

## Kapitel 6

# FEM-unterstützte Sensorentwicklung

In diesem Kapitel wird die Entwicklung zweier alternativer Sensorgeometrien für die Kraft- und Druckmessung vorgestellt. Auf der Basis eines Dreifachbalkenschwingers wurde ein Kraftsensor realisiert, dessen grundlegendes dynamisches Verhalten mit Hilfe der FE-Methode simuliert werden konnte. Durch eine geeignete Strukturierung der Resonatorbefestigung wurde eine Modenentkopplung erreicht, die sich durch eine verbesserte Modenselektivität des passiven Resonators ausdrückt. Zusätzlich konnte bei technologisch realisierten Dreifachbalkenresonatoren eine dynamische Momentenkompensation experimentell nachgewiesen werden, die zu einer Erhöhung der Schwingungsgüte der antisymmetrischen Schwingungsmode führte.

Weiterhin wird der Entwurf und die Entwicklung eines neuartigen Drucksensorprinzips unter Verwendung einer „Balken-auf-Membran“-Struktur (engl.: *Beam-on-Diaphragm*<sup>1</sup> [Thornton 90]) vorgestellt, das die Vorteile von Balkenresonatoren als sensitives Element in *monolithischer* Kombination mit einer Siliziummembran als druckeinleitende Struktur ermöglicht. Da die komplizierte Strukturgeometrie der BOD-Sensoren eine analytische Behandlung nicht zulässt, wurde die FE-Methode eingesetzt, um die Auswirkungen von Dimensionsänderungen auf das dynamische Sensorverhalten und die Druckempfindlichkeit zu untersuchen.

### 6.1 Dreifachbalken-Kraftsensor

Im Rahmen des BMFT-Verbundprojektes wurde am Institut für Mikro- und Informationstechnik ein resonanter Kraftsensor realisiert, der als Resonator eine Dreifachbalkenstruktur aus Silizium einsetzt und mit Hilfe von piezoelektrischen *ZnO*-Dünnschichten angetrieben

---

<sup>1</sup>Im weiteren wird daher die Kurzbezeichnung *BOD-Struktur* verwendet.

wird [ABV 93]. Um den Einfluß der Einspanngeometrie auf das Modenverhalten des Resonators zu untersuchen, wurde die FE-Methode eingesetzt.

In **Abbildung 6.1** ist die Geometrie des Dreifachbalken-Kraftsensors schematisch dargestellt. Parallel zum Resonator, der aus drei Balken besteht, weist der Sensor zusätzlich zwei Verstärkungsstege in Waferdicke (etwa  $525\ \mu\text{m}$ ) auf, die als Überlastschutz dienen. Durch die Dimensionierung der Verstärkungsstegbreiten läßt sich der Kraftmeßbereich der Sensoren einstellen.

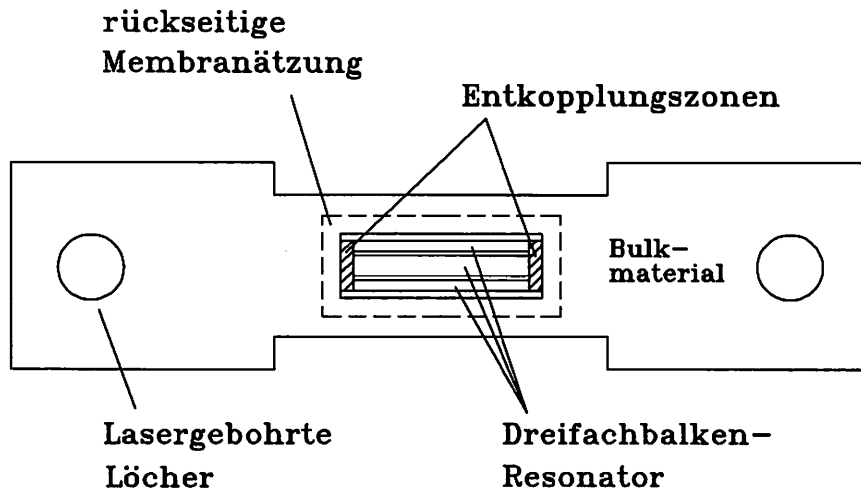


Abbildung 6.1: Geometrie des Dreifachbalken-Kraftsensors

Das erarbeitete Sensordesign ist für einen Kraftmeßbereich bis 50 N ausgelegt und weist Verstärkungsstege mit Breiten von jeweils 1 mm auf. Die Gesamtabmessungen des Kraftsensors betragen 15 mm x 3,75 mm, die Länge der Balken 3 mm und die Dicke etwa 20–25  $\mu\text{m}$ . Die Breite der beiden äußeren Balken beträgt 200  $\mu\text{m}$ , die des mittleren Balkens 400  $\mu\text{m}$ , wobei die Abstände zwischen den Balken 50  $\mu\text{m}$  betragen. Mit Hilfe eines Nd:YAG-Lasers wurden beidseitig kreisrunde Löcher in das Siliziumbulkmaterial geschnitten, die über Stahlstifte eine uniaxiale Krafteinleitung in den Kraftsensor ermöglichen und dadurch das Auftreten von Scherkräften stark reduzieren. Die mit dem Laser geschnittenen Löcher besitzen einen Durchmesser von 1 mm und gehen durch den Gesamtsiliziumwafer hindurch. Durch ihre ideal kreisrunde Berandung verhindern sie Kerbwirkungen [Schumacher].

### 6.1.1 Dynamische Momentenkompensation

Bei resonanten Sensoren ist die erzielbare Meßgrößenauflösung nach Gleichung (4.10) einerseits durch die minimale Auflösung des Detektionsmechanismus, andererseits durch die mechanische Schwingungsgüte des verwendeten Resonators begrenzt. Um eine möglichst hohe Schwingungsgüte zu erreichen, kann zum einen die Resonatorgehäusung evakuiert

werden, um die äußere Dämpfung durch Luft zu eliminieren, zum anderen ein spezielles Resonatordesign eingesetzt werden [Stemme 91b]. Einige in der Literatur vorgestellte Sensorkonzepte (z.B. [Ikeda 90b]) machen von beiden Maßnahmen Gebrauch. Um die Energieverluste im Einspannbereich der Resonatoren zu minimieren, werden bei resonanten Quarz-Kraftsensoren sogenannte Doppelstimmgabel-Resonatoren verwendet, die in einer antisymmetrischen Schwingungsmoden betrieben werden. Dieses wird erreicht, indem die beiden Stimmgabelstege gegenphasig zueinander in der Balkenebene schwingen [Eer Nisse 88]. Hierdurch stellt sich eine dynamische Momentenkompensation der beiden Stimmgabelstege ein und Schwingungsgüten von einigen Tausend werden so in Luftatmosphäre erzielt. Beim Einsatz von Einfachbalkenschwingern als Kraftsensoren müssen zusätzliche mechanische Konstruktionen vorgesehen werden, die geeignet zu strukturieren sind, um eine dynamische Momentenkompensation zu gewährleisten [Albert 88].

Im Gegensatz zu Quarz ist Silizium nicht piezoelektrisch, so daß bei der Realisierung von resonanten, piezoelektrisch betriebenen Siliziumsensoren piezoelektrische Dünnschichten vorgesehen werden müssen. Diese können aufgrund des Bimorphaufbaus nur Biegeschwingungen aus der Balkenebene heraus anregen. Aus diesem Grund ist eine Momentenkompensation in der Schwingungsebene wie bei Quarz-Doppelstimmgabeln nicht möglich. Diese kann beispielsweise erreicht werden, wenn der verwendete Resonator drei [Kirman 83, Satchell 89] oder mehrere Balken [Tilmans 93] besitzt, die gegenphasig aus der Balkenebene herausschwingen. Bei der Dreifachbalkenstruktur kann eine Momentenkompensation an den Einspannstellen des Resonators erfolgen, falls der Resonator in einer antisymmetrischen Schwingungsmoden betrieben wird und der mittlere Balken bei gleicher Dicke doppelt so breit wie die beiden äußeren ist. Diese Schwingungsmoden wird gezielt piezoelektrisch angeregt und infolge der Momentenkompensation vermindern sich die Schwingungsamplituden in den Einspannbereichen, so daß die Energieauskopplung minimiert wird und eine Güteerhöhung gegenüber den symmetrischen Biegeschwingungsmoden auftritt. Einerseits wird dadurch eine *mechanische* Entkopplung von der Bulkeinspannung ermöglicht, andererseits wird durch die flexiblen Entkopplungsbereiche eine Verbindung der drei Balken untereinander realisiert, so daß die Schwingungsenergie im Resonator verbleibt und nur ein minimaler Bruchteil in der Einspannung verloren geht. Um dieses zu gewährleisten, muß die beidseitige starre Resonatorhalterung, die durch das Bulkmaterial gebildet wird, mittels flexibler Entkopplungsbereiche<sup>2</sup> ersetzt werden. Die beidseitigen Entkopplungsbereiche entstehen bei der rückseitigen Membranätzung und weisen die gleiche Dicke wie die drei Resonatorbalken auf.

### 6.1.2 Herstellungsverfahren

Der Herstellungsprozeß des Dreifachbalken-Kraftsensors orientiert sich an einem beidseitigen Prozeß, der in [Mullem 91] beschrieben ist. Ausgehend von einem doppelseitig polierten {100}-Siliziumwafer wurden die substratseitigen Elektroden  $p^+$ -dotiert und strukturiert.

<sup>2</sup>In Abbildung 6.1 gestrichelt dargestellte Flächen.

Anschließend erfolgte die Abscheidung einer etwa  $2,5\ \mu\text{m}$  dicken  $\text{ZnO}$ -Schicht mit Hilfe eines RF-Magnetron-Sputterprozesses. Die obere Elektrode wurde durch eine Aluminiumschicht realisiert und anschließend mit Hilfe eines  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ -Schichtsystems passiviert. Um die erwünschten Balkendicken zu realisieren wurden sie von der Rückseite in einem  $\text{KOH}$ -Naßätzprozeß ohne Verwendung einer Ätzstoppschicht abgedünnt. Die Separation der drei Balken erfolgte in einem Plasma-Trockenätzschritt von der Wafervorderseite, so daß die drei Balken im Gegensatz zu dem in Abbildung 1.4 gezeigten Kraftsensor rechteckige Querschnitte aufweisen. Die technologische Charakterisierung der gesputterten  $\text{ZnO}$ -Schichten und eine eingehende Beschreibung der Prozeßtechnologien ist in [Wagner] zu finden.

### 6.1.3 Schwingungsverhalten und Kraftempfindlichkeit

Das Biegeschwingungsverhalten des Dreifachbalkenresonators wurde mit einem FE-Schalenmodell und isotropen Materialdaten (Gleichung 2.27) modelliert. Der Einfluß des zusätzlichen  $\text{ZnO}/\text{Al}$ -Schichtsystems wurde vernachlässigt, da in erster Linie nur das Modenverhalten des passiven Siliziumresonators bei Änderung des Einspannbereiches von Interesse war. Die Elementabmessungen betrugen  $50\ \mu\text{m}$ , um die Biegeschwingungen mit einer ausreichenden Genauigkeit abbilden zu können. In **Abbildung 6.2** sind das FE-Schalenmodell des Dreifachbalkenresonators und die ersten drei Biegeschwingungsmoden M1–M3 dargestellt. Im oberen linken Fenster (1) ist in einer Draufsicht auf den Resonator der Einspannbereich mit einer Länge der Entkopplungszone von  $200\ \mu\text{m}$  zu sehen. Die mechanische Einspannung des Resonators erfolgte an beiden Enden durch Sperrung der Verschiebungs- und Rotationsfreiheitsgrade der Schalenelemente (*SHELL43*). Bei der Grundbiegeschwingungsmode M1 (Fenster 2) schwingen alle drei Balken symmetrisch in Phase, während bei der Mode M2 (Fenster 3) der mittlere Balken ruht und die beiden äußeren gegenphasig zueinander schwingen. Die dritte Mode M3 (Fenster 4) stellt die gewünschte Sensormode dar, die aufgrund der antisymmetrischen Schwingung die dynamische Momentenkompensation auszunutzen erlaubt.

Zusätzlich zeichnen sich Dreifachbalkenresonatoren gegenüber Einfachbalkenresonatoren bei gleicher Gesamtbreite durch eine höhere Kraftempfindlichkeit aus, da eine Spannungskonzentration im Resonatorbereich auftritt. In **Tabelle 6.1** sind die Resultate der FE-Berechnungen für Einfach- und Dreifachbalkenresonatoren mit einer Entkopplungslänge von  $200\ \mu\text{m}$  zusammengestellt. Die Länge der betrachteten Resonatoren betrug  $3\ \text{mm}$  und die Dicke  $20\ \mu\text{m}$ . Die Breite der Balken betrug beim Dreifachbalken-Resonator  $200/400/200\ \mu\text{m}$  und die Balkenabstände  $50\ \mu\text{m}$ . Um die Ergebnisse mit einem Einfachbalkenresonator vergleichen zu können, wies dieser eine äquivalente Gesamtbalkenbreite von  $900\ \mu\text{m}$  auf. Die Kraftbeaufschlagung betrug bei der Berechnung der Kraftempfindlichkeiten jeweils  $1\ \text{N}$ . Aufgrund der um mehr als  $10\ \%$  verminderten Resonatorquerschnittsfläche erhöht sich beim Dreifachbalkenresonator die mechanische Längsspannung  $\sigma_x$  im Resonator um den gleichen Betrag. Die Kraftempfindlichkeit des Dreifachbalkenresonators nimmt

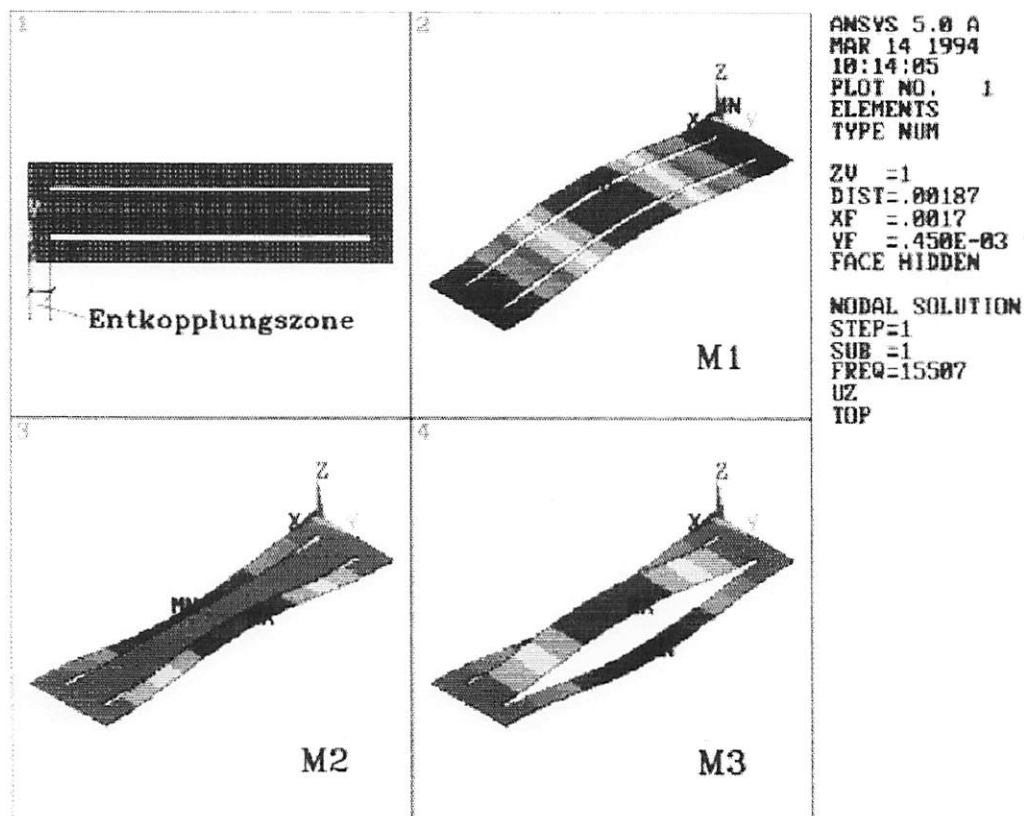


Abbildung 6.2: FE-Schalenmodell und Biegeschwingungsmoden M1, M2 und M3 des Dreifachbalkenresonators

entsprechend zu, so daß gegenüber dem Einfachbalkenresonator eine um bis zu 6 % erhöhte Kraftempfindlichkeit erzielt werden kann, wenn er in der antisymmetrischen Schwingungsmoden M3 betrieben wird. Bei den experimentell untersuchten Dreifachbalkenresonatoren konnte die höchste Kraftempfindlichkeit bei der Schwingungsmoden M3 nachgewiesen werden. Die maximale Kraftempfindlichkeit betrug in dem untersuchten Meßbereich (bis 5 N) etwa 8,6 kHz/N. Im Vergleich zu dem in Tabelle 6.1 angegebenen Wert fällt der gemessene aufgrund von Geometrietoleranzen und den getroffenen Idealisierungen durch die Vernachlässigung des  $ZnO/Al$ -Schichtsystems niedriger aus. Zusätzlich wirken sich die hohen inneren Spannungen in der  $ZnO$ -Dünnschicht einschränkend auf das Sensorverhalten aus. Sie führen dazu, daß bei einer Zugkraftbeaufschlagung die Resonanzfrequenz zunächst abnimmt, da die innere Druckspannung der  $ZnO$ -Schicht durch die am Sensor wirkende Zugkraft erst kompensiert werden muß. Bei zunehmender äußerer Kraft wird der Resonator spannungsfrei, ähnlich dem temperaturabhängigen Frequenzverhalten des Balkenresonators in Kapitel 4.4.2, so daß anschließend die Resonanzfrequenz wieder zunimmt [Fabula 93a]. Bei Meßanwendungen ist daher sicherzustellen, daß die inneren Spannungen der  $ZnO$ -Schichten erheblich reduziert oder zumindest kontrolliert werden [Sathe 93]. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den Sensor in einer entsprechenden Halterung mechanisch vorzuspannen.

Tabelle 6.1: Vergleich der berechneten statischen und dynamischen Eigenschaften von Einfachbalken- und Dreifachbalken-Kraftsensoren

Resonatortyp	Einfachbalken	Dreifachbalken		
Schwingungsmode	Grundmode	M1	M2	M3
Frequenz [kHz]	19,48	15,51	16,62	17,61
Empfindlichkeit [ $\frac{kHz}{N}$ ]	14,95	15,43	15,55	15,85
Verlängerung $u_x$ [ $\mu m$ ]	0,98	1,27		
Spannung $\sigma_x$ [MPa]	56	63		

#### 6.1.4 Verbesserung der Unimodalität

Um die Auswirkungen der Änderungen des membranartigen Entkopplungsbereiches auf das Sensorverhalten zu untersuchen, wurde der Entkopplungsbereich von 50–400  $\mu m$  variiert. In **Abbildung 6.3** ist die Abhängigkeit der Modenaufspaltung der drei Schwingungsmoden M1, M2 und M3 des Dreifachbalkenresonators von der Länge des Entkopplungsbereiches dargestellt. Bei verschwindender Entkopplungslänge sind die Dreifachbalken un-

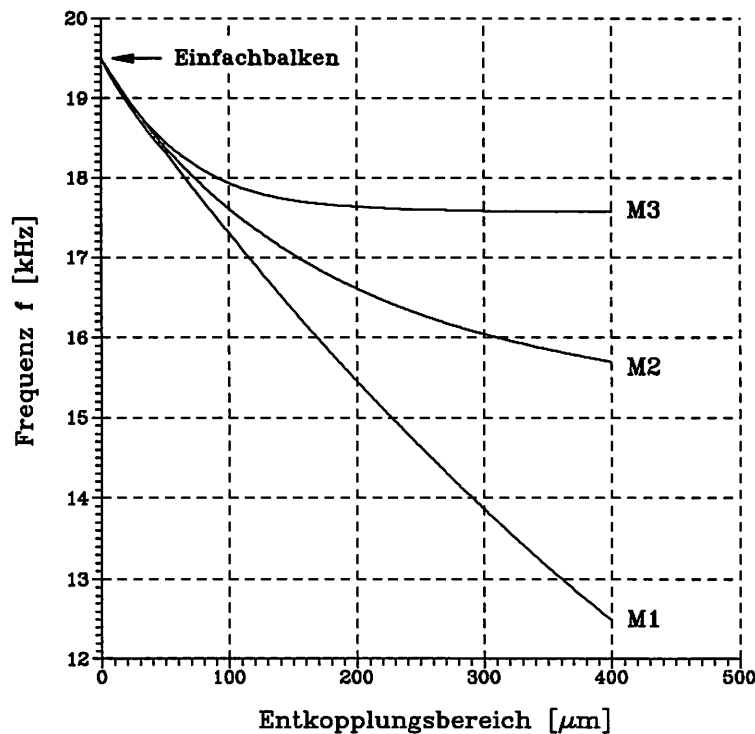


Abbildung 6.3: Abhängigkeit der Modenaufspaltung der Schwingungsmoden M1, M2 und M3 von der Länge des Entkopplungsbereiches

endlich starr eingespannt und somit voneinander mechanisch entkoppelt. Alle drei Balken schwingen dann mit der Frequenz des Einfachbalkens (19,48 kHz). Der flexible Membran-

bereich des Entkopplungsbereiches verbindet die drei Balkenschwinger miteinander und es können sich die verschiedenen Schwingungsmoden ausbilden. Mit zunehmender Entkopplungslänge spalten zusätzlich die Frequenzen weiter auf, was zu einer merklichen Erhöhung der Unimodalität des Resonators führt. Dieses ist dadurch zu erklären, daß durch die membranartige Balkenaufhängung die Einspannung weicher wird und folglich die Resonanzfrequenzen der verschiedenen Moden abnehmen. Dieses macht sich insbesondere für die beiden Moden M1 und M2 unterschiedlich bemerkbar. Die Frequenz der antisymmetrische Mode M3 stabilisiert sich ab einer Entkopplungslänge von etwa  $200\text{ }\mu\text{m}$  auf einen nahezu konstanten Wert, da die dynamische Momentenkompensation verhindert, daß der membranartige Einspannbereich zusätzlich mitschwingt und dadurch die *dynamische* Länge des Resonators effektiv vergrößert wird. Bei weiter zunehmender Entkopplungslänge besteht allerdings die Gefahr, daß die Anfälligkeit des Resonators für Torsionsschwingungen und überlagerte Biege-/Torsions-Schwingungsmoden zunimmt. Daher wurde eine Entkopplungslänge von  $200\text{ }\mu\text{m}$ , das sind etwa 6,7 % der Balkenlänge, ausgewählt, um sicherzustellen, daß an den Balkenenden die Schwingungsknoten der Mode M3 sitzen und eine optimale mechanische Entkopplung des Resonators von der Bulkeinspannung gegeben ist. In dem ursprünglichen Resonatorentwurf waren keine Entkopplungsbereiche vorgesehen, so daß in einem Redesign Entkopplungslängen von  $200\text{ }\mu\text{m}$  verwendet wurden, um verbesserte Dreifachbalkenresonatoren mit erhöhter Modenaufspaltung zu realisieren. Ein weiterer Effekt der erhöhten Unimodalität des Dreifachbalkenresonators ist es, daß ein besseres „Einlocken“ der elektrischen Oszillatorschaltung auf der gewünschten Sensormode M3 ermöglicht wird. Zusätzlich wirkt die vergrößerte Modenaufspaltung einer durch äußere Störeinflüsse (z.B. Temperatureinfluß) hervorgerufenen Modenkopplung entgegen. Durch Vermessung verschiedener Dreifachbalkenresonatoren konnte die erhöhte Moden-

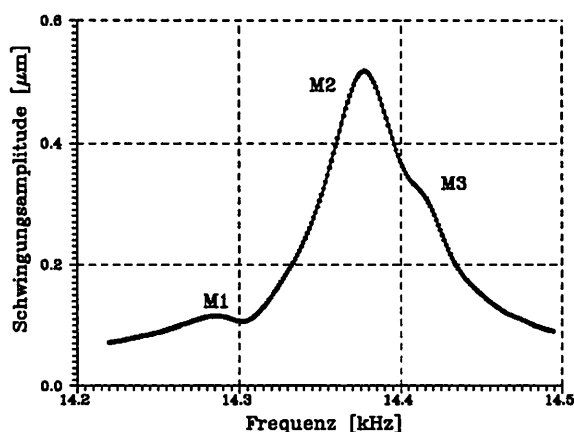


Abbildung 6.4: Amplitudenspektrum eines Dreifachbalkenresonators mit Bulkeinspannung

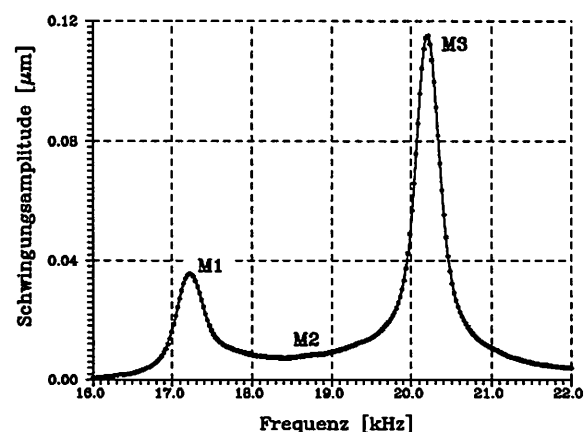


Abbildung 6.5: Amplitudenspektrum eines Dreifachbalkenresonators mit einer Entkopplungslänge von  $200\text{ }\mu\text{m}$

aufspaltung verifiziert und eine Güteerhöhung der antisymmetrischen Schwingungsmoden M3 gegenüber der Grundmode M1 experimentell nachgewiesen werden. Die Güteerhöhung

betrug bei den untersuchten Dreifachbalkenresonatoren etwa das Doppelte. Als maximale Schwingungsgüte der Mode M3 wurde in Luftatmosphäre ein Wert von etwa 400 gemessen. In **Abbildung 6.4** und **Abbildung 6.5** sind die optisch vermessenen Amplitudenspektren zweier Dreifachbalkenresonatoren mit unterschiedlichen Entkopplungslängen dargestellt. Während beim ersten Resonator die Balkeneinspannung direkt durch das Bulkmaterial gebildet wird, so daß die *geometrische* Entkopplungslänge gleich Null ist, weist der zweite Resonator einen Entkopplungsbereich der Länge  $200\text{ }\mu\text{m}$  auf. Da sich eine Superposition der Schwingungsmoden beim Resonator mit der Bulkeinspannung einstellt, ist ein Einsatz als Kraftsensor aufgrund der stark ausgeprägten Modenkopplung nicht möglich. Bei einer Entkopplungslänge von  $200\text{ }\mu\text{m}$  erhöht sich hingegen die Modenaufspaltung um etwa das 30-fache (3 kHz). Zusätzlich tritt die oben erwähnte Güteerhöhung der Mode M3 gegenüber der Grundmode M1 auf. Die Schwingungsmoden M2 kann optisch auf dem Mittelbalken nicht detektiert werden, da bei dieser Mode der Mittelbalken in Ruhe bleibt, so daß diese Mode nur auf den beiden äußeren Balken interferometrisch nachgewiesen werden konnte. Die stark unterschiedlichen Resonanzfrequenzen der Biegeschwingungsmoden bei den beiden untersuchten Resonatoren lassen sich durch die hohen Schwankungen der inneren Spannung der *ZnO*-Schichten erklären.

In **Tabelle 6.2** sind die Ergebnisse der FE-Berechnungen und der Messungen für Resonatoren mit unterschiedlicher Entkopplungslänge zusammengefaßt. Um die Resonanzfre-

Tabelle 6.2: Relative Modenaufspaltung von Dreifachbalkenresonatoren in Abhängigkeit der Entkopplungslänge (Vergleich: FE-Berechnungen – Messungen)

Entkopplungslänge	FE-Berechnung		Messung	
	$50\text{ }\mu\text{m}$	$200\text{ }\mu\text{m}$	Bulkeinsp.	$200\text{ }\mu\text{m}$
$c_2 - 1$	0,3 %	7,2 %	0,5 %	7,0 %
$c_3 - 1$	0,6 %	13,5 %	0,7 %	13,0 %

quenzen vergleichen zu können, wurden die Frequenzwerte  $f_i$  auf die jeweilige Frequenz der Grundmode  $f_{M1}$  normiert, da die hohe Verspannung der *ZnO*-Dünnschichten zu großen Frequenzenverschiebungen führte. In der Tabelle sind daher die relativen Frequenzaufspaltungen  $c_i = f_i/f_{M1}$  gegenübergestellt. Beim Vergleich der FE-Resultate mit den Messungen korrespondiert die Bulkeinspannung, bei der die *geometrische* Entkopplungslänge Null beträgt, einer *dynamischen* Entkopplungslänge von etwa  $50\text{ }\mu\text{m}$ . Die Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Werten betragen bei einer Entkopplungslänge von  $200\text{ }\mu\text{m}$  jeweils nur 2,9 % (Mode M2) und 3,8 % (Mode M3), so daß eine sehr gute Korrelation vorhanden ist.



## 6.2 BOD-Drucksensor

Mit Hilfe des am Institut für Mikro- und Informationstechnik entwickelten Verfahrens des laserunterstützten anisotropen Ätzens [Alavi 91] konnten Balkenstrukturen in  $\langle 110 \rangle$ -Siliziumwafern mit dreieckigem Balkenquerschnitt hergestellt werden, die monolithisch auf Trägerstegen sitzend auf einer Membran angeordnet sind [Schumacher 93]. Diese sogenannten BOD-Strukturen eignen sich insbesondere für die Realisierung von mechanischen Sensoren, beispielsweise zur Messung von Drücken und Kräften. Die BOD-Struktur zeichnet sich durch eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Verformungen der Membran aus. Bei der Anwendung als Drucksensor hängt die Druckempfindlichkeit der BOD-Struktur von den Abmessungen der Membran, der Höhe der Trägerstege und dem Längen-/Dickenverhältnis des Balkens ab. Weiterhin kommt der Dimensionierung der Trägerstegstruktur eine besondere Bedeutung zu, da sie die Membranverformung über eine Art Hebelwirkung in eine mechanische Axialspannung im Balken transformiert, der als sensitives Element dient. Zum Betrieb können sowohl das frequenzanaloge Sensorprinzip unter Verwendung des piezoelektrischen oder elektrothermischen Antriebs, als auch analoge Nachweisverfahren, wie die resistive oder piezoresistive Abtastung durch DMS- oder diffundierte Widerstände, eingesetzt werden [Alavi 93].

### 6.2.1 Herstellungsverfahren und Funktionsprinzip

Das Verfahrensprinzip des laserunterstützten anisotropen Ätzens beruht auf der lokalen Zerstörung der Kristallordnung in langsamätzenden  $\{111\}$ -Ebenen durch den fokussierten Strahl eines Nd:YAG-Lasers und nachfolgendes naßchemisches anisotropes Ätzen. Die so durch das Laserlicht zerstörten  $\{111\}$ -Ebenen bilden keinen Ätzstopp mehr, so daß im Gegensatz zum herkömmlichen anisotropen Naßätzen neuartige Strukturgeometrien realisierbar sind [Alavi 92a]. Ausgangsmaterial sind beidseitig polierte  $\langle 110 \rangle$ -Siliziumwafer mit einer Dicke<sup>3</sup> von etwa 380  $\mu\text{m}$ . Durch thermische Oxidation wird eine etwa 1  $\mu\text{m}$  dicke Maskierschicht (hier:  $\text{SiO}_2$ ) wie in **Abbildung 6.6** dargestellt beidseitig aufgebracht, die an den Stellen der späteren Laserbearbeitung geöffnet wird. Falls der Abstand der beiden rautenförmigen Mikrokanäle bei gegebener Ätztiefe, hier etwa  $(230 \pm 10)$   $\mu\text{m}$ , einen bestimmten Wert unterschreitet, bilden sich Balkenresonatoren mit dreieckigem Querschnitt aus. Durch die Maskenöffnungen wird der Balken lithographisch definiert und mit Hilfe einer nachfolgenden flächenhaften Laserbearbeitung die Kristallordnung thermisch zerstört. Anschließend wird der Siliziumwafer in einem Standardnaßätzprozeß in einer KOH-Lösung geätzt und der Balken freigelegt. Die Balkenseiten werden durch die ätzbegrenzenden  $\{111\}$ -Siliziumebenen gebildet. In Abhängigkeit der Orientierung der Balkenlängsachse zum Waferflat können verschiedene Balkenquerschnittsformen realisiert werden. Falls die Balken parallel zur  $[110]$ -Kristallrichtung (senkrecht zum Waferflat) ori-

<sup>3</sup>Die Realisation und die ersten experimentellen Voruntersuchungen an BOD-Drucksensoren erfolgte unter Verwendung von 3"-Siliziumwafern.

entiert sind, weisen ihre Seitenflächen einen Winkel von  $35,26^\circ$  zur Oberfläche auf, bei einer senkrechten Orientierung zum Waferflat einen Winkel von etwa  $50^\circ$  [Alavi 92b]. Durch die flächige Bestrahlung mit Laserlicht können die seitlichen Abmessungen der Membran bei der Herstellung der BOD-Sensorstruktur eingestellt werden. In einer vereinfachten Prozeßabfolge kann der Lithographieschritt entfallen und der Siliziumwafer direkt mit dem Laser bearbeitet werden. Eine detaillierte Beschreibung des experimentellen Aufbaus und der automatisierten Ansteuerung des Laserschreibprozesses ist in [Schumacher] zu finden. In einer Vorstufe zur eigentlichen BOD-Sensorstruktur wurden *monolithisch integrierte*

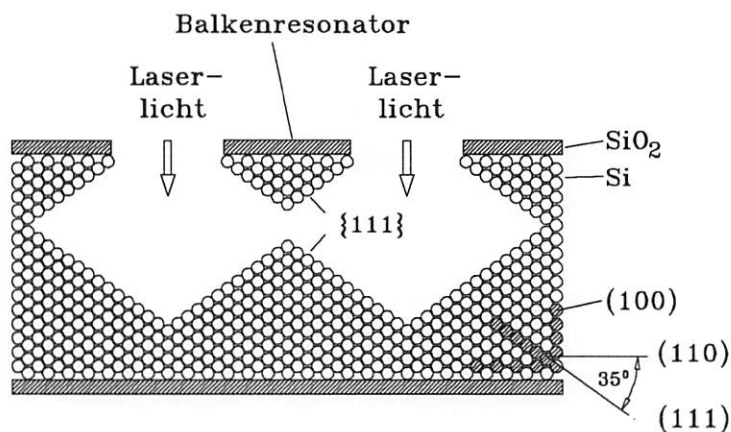


Abbildung 6.6: Herstellungsprinzip der Siliziumbalken mit dreieckigem Querschnitt

Siliziumbalken mit dreieckigem Querschnitt, wie in Abbildung 6.6 schematisch skizziert, hergestellt und das dynamische Verhalten experimentell untersucht, wobei die Balkendimensionen variiert wurden.

### 6.2.2 Einfluß des Balkenquerschnitts auf das Schwingungsverhalten

Die Frequenzverschiebung resonanter Sensoren ist abhängig von der durch die Meßgröße induzierten mechanischen Spannung im Resonator, so daß durch eine Verkleinerung des Resonatorquerschnitts die Kraftempfindlichkeit erhöht werden kann. Während naßchemisch in  $\langle 100 \rangle$ -Silizium geätzte Balkenresonatoren einen trapezförmigen Querschnitt aufweisen (siehe Abbildung 1.4), können durch Laserstrukturierung von Silizium in Kombination mit anisotroper Naßätztechnik dreieckförmige Balkenquerschnitte in  $\langle 110 \rangle$ -Silizium hergestellt werden, die bei gleicher Balkenbreite eine kleinere Querschnittsfläche als trapezförmige Balken aufweisen [Alavi 92b]. Somit wird bei einer gleichen Kraftbeaufschlagung eine höhere Resonatorverspannung in dem dreieckförmigen Balken hervorgerufen. Im nachfolgenden wird der Einfluß des Balkenquerschnitts auf das Schwingungsverhalten und die Eignung solcher Balkenelemente als resonante Sensoren untersucht.

Um die Balkenresonatoren mit trapezförmigem und dreieckigem Balkenquerschnitt vergleichen zu können, wurde von gleichen Balkendicken ausgegangen, die sich bei einer Bal-

kenbreite von  $200\ \mu\text{m}$  ergeben. Durch die vorgegebene Balkenbreite stellen sich bei den Siliziumbalken, die einen Resonatorquerschnitt mit einem Winkel von  $35^\circ$  bzw.  $50^\circ$  aufweisen, Balkendicken von etwa  $71\ \mu\text{m}$  bzw.  $120\ \mu\text{m}$  ein. Die Balkenlängen wurden in den FE-Berechnungen zu  $3\ \text{mm}$  gewählt. Bei der Berechnung der Eigenfrequenzen und auftretenden Schwingungsmoden, wurde in erster Näherung von isotropem Materialverhalten (Gleichung 2.27) und einer ideal starren Balkeneinspannung ausgegangen. Die FE-Modelle besaßen etwa 720 bis 1400 Volumenelemente (*SOLID45*) und 300 MDOFs. In **Tabelle 6.3** sind die numerisch berechneten Resonanzfrequenzvielfachen  $c_i = f_i/f_1$  für Balkenstrukturen mit den zwei verschiedenen Balkenquerschnitten aufgelistet. Die Frequenzen sind auf die jeweilige Grundmode Z1 normiert und die verschiedenen Oberschwingungen aus der Balkenebene heraus mit Z2 bis Z5, die erste Biegeschwingungsmoden in der Balkenebene mit Y1, sowie die erste Torsionsmoden mit T1 bezeichnet. Die Resonanzfrequenzen

Tabelle 6.3: Einfluß des Resonatorquerschnitts auf die Resonanzfrequenzen

Resonanzfrequenzen [kHz]				
Dicke	$71\ \mu\text{m}\ (35^\circ)$		$120\ \mu\text{m}\ (50^\circ)$	
Mode	dreieck	trapez	dreieck	trapez
Z1	56,6 (1,00)	68,5 (1,00)	94,3 (1,00)	114,1 (1,00)
Z2	155,5 (2,75)	188,3 (2,75)	258,1 (2,74)	311,5 (2,73)
Z3	303,9 (5,38)	368,0 (5,37)	501,3 (5,32)	603,9 (5,29)
Z4	500,6 (8,85)	606,2 (8,85)	819,8 (8,69)	986,9 (8,65)
Z5	744,8 (13,2)	901,9 (13,2)	1209 (12,8)	1460 (12,8)
Y1	136,2 (2,41)	238,8 (3,49)	136,1 (1,44)	274,8 (2,41)
T1	595,6 (10,5)	491,0 (7,17)	749,7 (7,95)	634,5 (5,56)

der Grundschiwingung von trapezförmigen Balkenresonatoren fallen gegenüber Resonatoren mit dreieckigen Querschnittsflächen aufgrund der größeren Querschnittsflächen, die ihrerseits zu einer Erhöhung der axialen Flächenträgheitsmomente<sup>4</sup> führen, höher aus. Die Frequenzvielfachen  $c_i$  der Biegeschwingungsmoden in  $z$ -Richtung differieren kaum, da die konstant gehaltene Balkendicke in erster Näherung der ausschlaggebende Parameter ist.

<sup>4</sup>Das äquatoriale Flächenträgheitsmoment von Balken mit dreieckiger Querschnittsfläche der Höhe  $h$  und Breite  $b$  beträgt  $I = b \cdot h^3/36$  (vergleiche hierzu Gleichung (2.18)).

Eine analytische Vergleichsrechnung nach Gleichung (2.22) liefert für rechteckige Siliziumbalken Grundfrequenzen von 69,1 und 116,7 kHz bei Resonatordicken von 71 und 120  $\mu\text{m}$ . Diese Werte zeigen eine hinreichend gute Übereinstimmung (Abweichung: 1–2 %) mit den Frequenzwerten der trapezförmigen Balkenschwinger.

An verschiedenen Siliziumbalken mit dreieckigem Resonatorquerschnitt (Winkel: 35°)

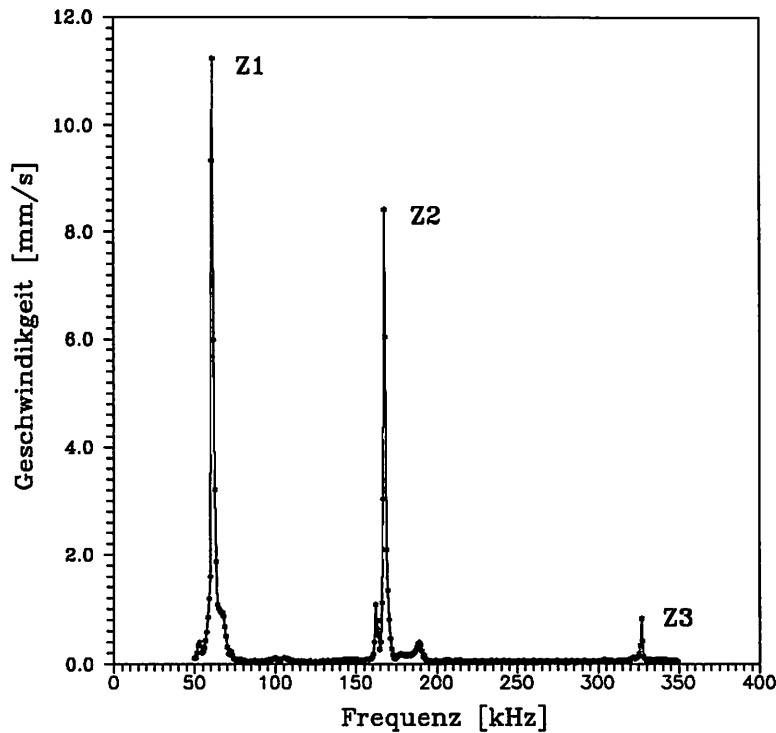


Abbildung 6.7: Optisch vermessenes Geschwindigkeitsspektrum eines doppelseitig eingespannten Siliziumbalkens mit dreieckigem Querschnitt

wurden Messungen durchgeführt und die experimentellen Ergebnisse mit den FE-Berechnungen verglichen. In **Abbildung 6.7** ist ein optisch vermessenes Modenspektrum eines 2800  $\mu\text{m}$  langen, doppelseitig eingespannten Siliziumbalkens dargestellt. Die Balkenbreite betrug etwa 180  $\mu\text{m}$  und die Balkendicke etwa  $(64 \pm 2)$   $\mu\text{m}$ . Um eine genügend hohe Nachweisempfindlichkeit auch für die hochfrequenten Schwingungsmoden zu erreichen, wurde die Geschwindigkeitsschnelle  $v(f)$  in Balkenmitte aufgezeichnet. Der Nachweis der Z2-Schwingungsmode erfolgte auf der Balkenviertellänge. Die Anregung erfolgte über Körperschall mit Hilfe eines extern angebrachten Piezokeramikschwingers. Im Signaluntergrund sind einzelne Resonanzüberhöhungen der Piezokeramik zu sehen, die auch bei günstigster Justage der Piezokeramik und zusätzlicher Dämpfung des Siliziumwafers mit dünnen Softgummischeiben nicht vollständig eliminiert werden konnten. Im Spektrum ist die Grundbiegeschwingung Z1 bei einer Frequenz von etwa 60,9 kHz deutlich zu erkennen. Die Resonanzfrequenzen der Oberschwingungen Z2 und Z3 liegen bei etwa 168,2 kHz und 327,8 kHz. Durch Ausdehnung des Meßbereiches bis 1 MHz konnten auch die Schwingungsmoden Z4 und Z5 nachgewiesen werden. Die Resonanzfrequenzen betrugen 536,0 kHz und

749,0 kHz, bei einem erhöhten Meßfehler von etwa  $\pm 5$  kHz. Die Frequenzvielfachen  $c_i$  der gemessenen Frequenzwerte (2,76/5,38/8,80/12,3) korrelieren gut mit den berechneten Werten<sup>5</sup>. Die Bestimmung der Schwingungsgüte der Grundbiegeschwingung, die etwa 420 in Luft betrug, konnte durch die schmalbandige Vermessung des Amplitudenspektrums  $A(f)$  erfolgen. Die Absolutwerte der Schwingungsamplituden, die typischerweise im Nanometerbereich liegen, sind hierbei von der akustischen Leistung abhängig, die von der Piezokeramik übertragen wird, und damit proportional zur Anregungsspannung.

In **Tabelle 6.4** ist ein Vergleich zwischen einer Messung und einer FE-Rechnung, die unter

Tabelle 6.4: Resonanzfrequenzen von Siliziumbalken mit dreieckigem Resonatorquerschnitt (Vergleich: FE-Berechnung – Messung)

Mode	FEM	Exp.	Abw.
Z1	58,0 kHz (1,000)	60,9 kHz (1,000)	4,8 %
Z2	159,4 kHz (2,748)	168,2 kHz (2,762)	5,2 %
Z3	311,4 kHz (5,369)	327,8 kHz (5,383)	5,0 %

vereinfachenden Annahmen die komplexe Einspanngeometrie vernachlässigt, zusammengefaßt. Das FE-Modell wies 2256 Elemente mit 3325 Knoten auf, wobei die Elementabmessungen  $30\ \mu\text{m}$  betrugen. Die Frequenzabweichungen liegen um 5 % und sind einerseits durch die Vernachlässigung der exakten Einspanngeometrie und andererseits durch die Dickenschwankungen des Balkens zu erklären. In Kapitel 6.2.3 wird auf die meßtechnische Charakterisierung eines BOD-Drucksensors eingegangen, der einen monolithisch integrierten Balken auf einer Siliziummembran aufweist. In Kapitel 6.2.4 wird bei der Modellierung des Sensorverhaltens und der Optimierung der Druckempfindlichkeit die exakte BOD-Sensorgeometrie, insbesondere die realen Einspannverhältnisse des Siliziumbalkens, berücksichtigt.

Um die maximal möglichen Frequenzverschiebungen der Siliziumbalken in Abhängigkeit der mechanischen Spannung im Resonator zu untersuchen, genügt es bei der Modellierung, lediglich eine ideal starre Balkeneinspannung zu betrachten. Hierzu wurden die Balken mit einer axialen Zugspannung  $\sigma_x$  beaufschlagt und als maximal auftretende Spannung die Bruchspannung von Silizium, etwa 200 MPa, festgelegt. In **Abbildung 6.8** sind die auf die unbelastete Grundfrequenz  $f_{Z1}(\sigma = 0)$  normierten Resonanzfrequenzen von Balkenschwingern mit dreieckigen und trapezförmigen Balkenquerschnitten in Abhängigkeit der mechanischen Zugspannung dargestellt. Hervorzuheben sind die großen Frequenzänderungen von bis zu 40 % der Siliziumbalken mit dreieckigen Balkenquerschnitten bei maximaler Zugbelastung. Sie zeichnen sich um eine etwa 30 % höhere Empfindlichkeit als Balken mit

<sup>5</sup> Vergleiche hierzu jeweils die ersten Spalten der Tabellen 6.3 und 6.4.

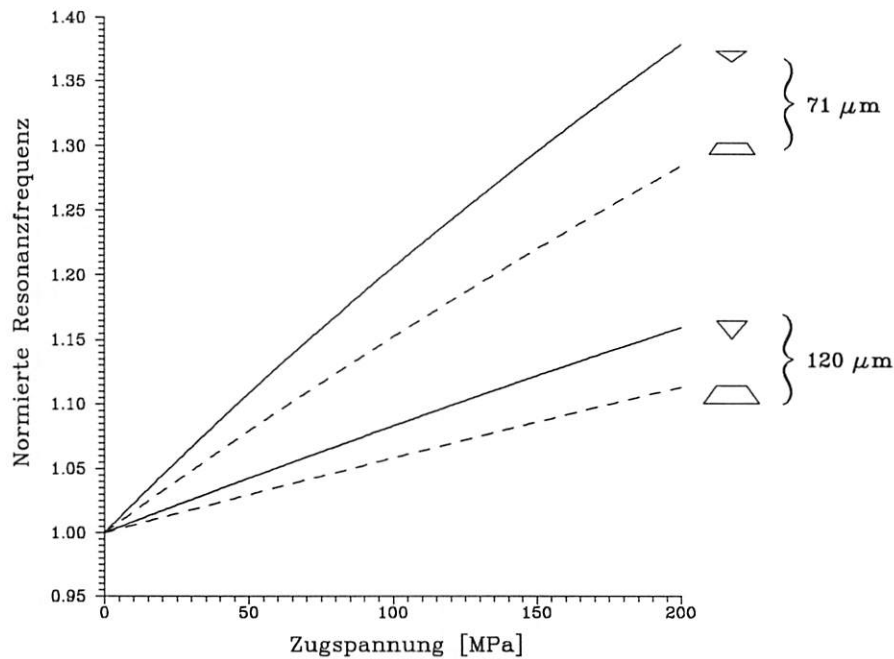


Abbildung 6.8: Vergleich der numerisch berechneten Frequenzänderungen von Balkenresonatoren mit dreieckigem und trapezförmigem Balkenquerschnitt

trapezförmigen Querschnitten aus und sind damit besonders für den Einsatz in BOD-Drucksensoren geeignet.

### 6.2.3 Meßtechnische Charakterisierung

Mit dem in Kapitel 6.2.1 beschriebenen laserunterstützten Herstellungsverfahren wurden BOD-Drucksensoren in  $\langle 110 \rangle$ -Silizium realisiert. In **Abbildung 6.9** ist ein Schnitt durch die Geometrie eines solchen BOD-Drucksensors schematisch dargestellt. Die eigentliche

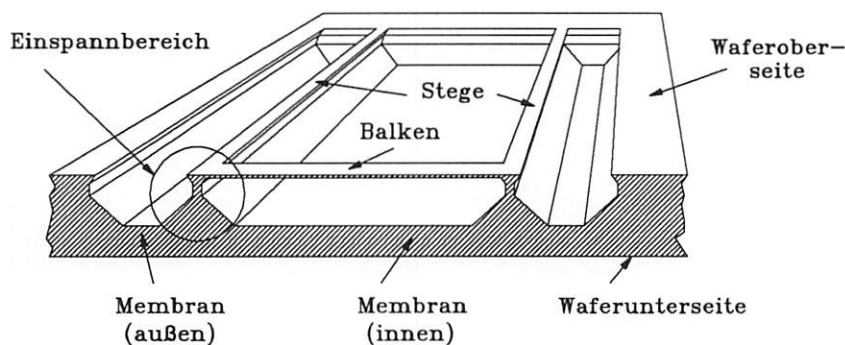


Abbildung 6.9: Geometrie des BOD-Drucksensors

Membran, die zur Druckeinleitung dient, ist durch zwei senkrecht zum schwingenden Siliziumbalken laufende Stege in einen äußeren und inneren Bereich unterteilt. Die parallelen

Stege, die mit dem Balken eine H-förmige Trägerstruktur bilden, sind für eine spätere elektrische Kontaktierung des Balkens durch Elektroden vorgesehen. Die Waferunterseite bildet den Membranboden und die Balkenoberseite liegt auf der Höhe der Waferoberseite, so daß die beidseitigen Einspannbereiche des Balkens (in der Abbildung eingekreist) die Hebelwirkung der BOD-Struktur festlegen. Diese bewirken, daß bei einer Druckdifferenz zwischen der Membranunterseite und -oberseite eine Verwölbung auftritt und der Balken in seiner Längsrichtung gedehnt wird. Die durch die Dehnung im Siliziumbalken hervorgerufene homogene Zugspannung erhöht die Resonanzfrequenz, die beim frequenzanalogen Sensorprinzip direkt als Sensorsignal genutzt werden kann.

**Abbildung 6.10** zeigt in einer REM-Aufnahme die Gesamtansicht eines in  $\langle 110 \rangle$ -Silizium realisierten BOD-Drucksensors [Schumacher 93]. Die Membranseitenlänge beträgt 5 mm. Bei einer Ätztiefe von  $230\ \mu\text{m}$  resultiert beim verwendeten 3"-Siliziumwafer mit einer Waferdicke von  $380\ \mu\text{m}$  eine Membrandicke von etwa  $150\ \mu\text{m}$ . In **Abbildung 6.11** ist die Balkeneinspannung in einer Nahaufnahme deutlich zu erkennen. Bei einer lithographisch festgelegten Balkenbreite von  $120\ \mu\text{m}$  stellt sich bei einem Winkel von  $35^\circ$  eine theoretische Balkendicke von  $42,42\ \mu\text{m}$  ein. Infolge von Überätzung vermindert sich jedoch die Balkendicke und zusätzlich treten Dickenschwankungen bis zu  $\pm 5\ \mu\text{m}$  über die Balkenlänge auf, so daß real von einer Balkendicke von etwa  $37\ \mu\text{m}$  auszugehen ist [Schumacher 94]. Die freie Länge des Balkens, gemessen zwischen den beiden dreiecksförmigen Einspannungen, die einen Begrenzungswinkel von  $2 \cdot 54,74^\circ = 109,48^\circ$  aufweisen, beträgt etwa  $(1,99 \pm 0,04)\ \text{mm}$  und wurde mit Hilfe eines IR-Durchlichtmikroskopes bestimmt. Die Breite der beiden querlaufenden Stege beträgt auf der Oberseite etwa  $74\ \mu\text{m}$  und auf dem Membrangrund verbreitern sich die Stege beidseitig unter einem Winkel von  $45^\circ$  auf etwa  $400\ \mu\text{m}$ .

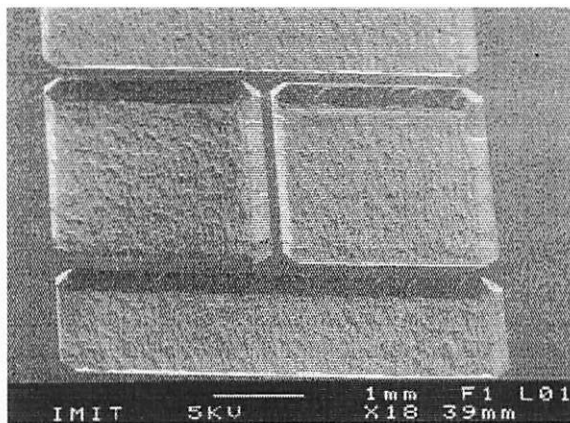


Abbildung 6.10: REM-Aufnahme des BOD-Drucksensors (Gesamtansicht)

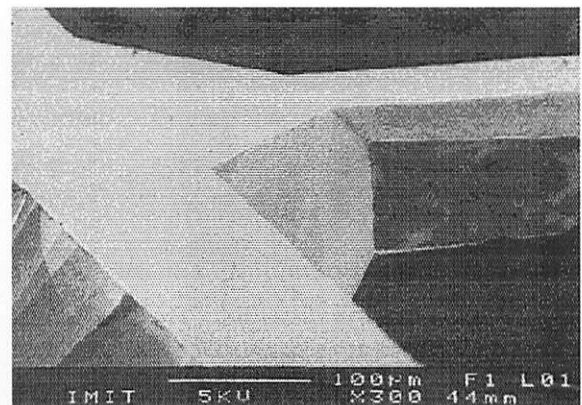


Abbildung 6.11: REM-Aufnahme des BOD-Drucksensors (Balkeneinspannung)

Die meßtechnische Charakterisierung der BOD-Strukturen erfolgte optisch mit dem Laservibrometer bei passiver Anregung der Gesamtstruktur mittels Piezokeramikschwinger.

Hierzu wurden einzelne BOD-Strukturen mit dem Nd:YAG-Laser aus dem Waferverbund geschnitten und auf Aluminiumhalter geklebt, um möglichst definierte Einspannbedingungen zu gewährleisten und eine Druckeinleitung zu ermöglichen. Aufgrund der durch den Herstellungsprozeß hervorgerufenen Geometrietoleranzen schwanken die gemessenen Resonanzfrequenzen und Schwingungsgüten zum Teil erheblich. Die Abtastung der Grundbiegeschwingungsmoden Z1 erfolgte in der Balkenmitte. Die an verschiedenen Strukturen gemessenen Frequenzen lagen aufgrund der Geometrietoleranzen im Bereich von 77–82 kHz, die der beiden Obermoden Z2 und Z3 bei etwa 217,3 und 426,7 kHz (Meßfehler: etwa  $\pm 5,0$  kHz). Die an der BOD-Struktur bestimmten Schwingungsgüten variierten bei Normalluftdruck für die Grundmode im Bereich 370–530 und für die Z2-Mode wurde ein Wert von etwa 1240 gemessen. Bei hohen Frequenzen zeichnet sich der Amplitudendemulator der Laservibrometer-Steuerung durch eine geringe Nachweisempfindlichkeit aus, so daß bei der Z3-Mode die Geschwindigkeitsschnelle aufgezeichnet wurde und somit eine Gütebestimmung nicht durchgeführt werden konnte. Der eindeutige Nachweis der Schwingungsmoden erfolgte durch eine laterale Messung entlang des Balkens. Auf der Viertelbalkenlänge wurde die Z2-Mode nachgewiesen und auf der Balkeneinspannung (siehe Abbildung 6.11) der Signaluntergrund untersucht, der einzelne Resonanzen des anregenden Piezokeramikschringers enthielt. Unglücklicherweise lagen im Frequenzbereich (78–80 kHz) der Biegeschwingungsmoden des Siliziumbalkens auch Schwingungsmoden der Piezokeramik, die jedoch im Amplitudenspektrum aufgrund ihrer geringen Güten ( $Q \leq 100$ ) eindeutig identifiziert und herausgerechnet werden konnten.

Zur Vermessung der Druckempfindlichkeit wurde die BOD-Struktur mit dem Aluminiumhalter auf einen Druckmeßtisch<sup>6</sup> geschraubt und sowohl mit Unterdruck (bis – 0,8 bar), als auch mit Überdruck (bis 1,0 bar) kontinuierlich beaufschlagt. Die gemessene Frequenz-Druck-Kennlinie der Grundbiegeschwingungsmoden Z1 des Balkens ist in **Abbildung 6.12** zu sehen. An den gemessenen Kurvenverlauf wurde ein Polynom zweiten Grades  $f(p) = f_0 + a_1 \cdot p + a_2 \cdot p^2$  angepaßt. Für die Grundresonanzfrequenz  $f_0(p = 0)$  ergibt die Regression einen Wert von 82,079 kHz und einen *linearen* Polynomkoeffizienten von  $a_1 = 4,47$  kHz/bar, sowie einen *quadratischen* Polynomkoeffizienten von  $a_2 = -7,28 \cdot 10^{-4}$  kHz/bar<sup>2</sup>. Daraus folgt für die relative Druckempfindlichkeit  $\eta = \frac{1}{f_0} \frac{\Delta f}{\Delta p}$  in dem untersuchten Druckbereich ein Wert von etwa 5,45 %/bar. Anhand des Kurvenverlaufes ist zu sehen, daß im Unterdruckbereich ( $p < 0$ ) die Druckempfindlichkeit anwächst. Die unterschiedlichen Druckempfindlichkeiten lassen sich durch die unsymmetrische Hebelwirkung der BOD-Struktur erklären, falls sich die BOD-Membran nach unten bzw. oben durchbiegt.

Um eventuell auftretende Hystereseeffekte nachzuweisen, wurde die BOD-Struktur Druckwechsellasten ausgesetzt und der maximale Unter- und Überdruck alternierend angelegt, um jeweils die Grundresonanzfrequenz  $f_0$  zu messen. Im Rahmen der Meßgenauigkeit<sup>7</sup> konnten geringe Hystereseeffekte festgestellt werden. Die Streubreite der Frequenzwerte, die etwa  $\pm 200$  Hz beträgt, läßt sich aufgrund des ideal elastischen Materialverhaltens

<sup>6</sup>Im Anhang ist der gesamte experimentelle Meßaufbau beschrieben.

<sup>7</sup>Die Genauigkeit der Frequenzmessung betrug etwa  $\pm 100$  Hz, die der Druckmessung etwa  $\pm (1-3)$  mbar.



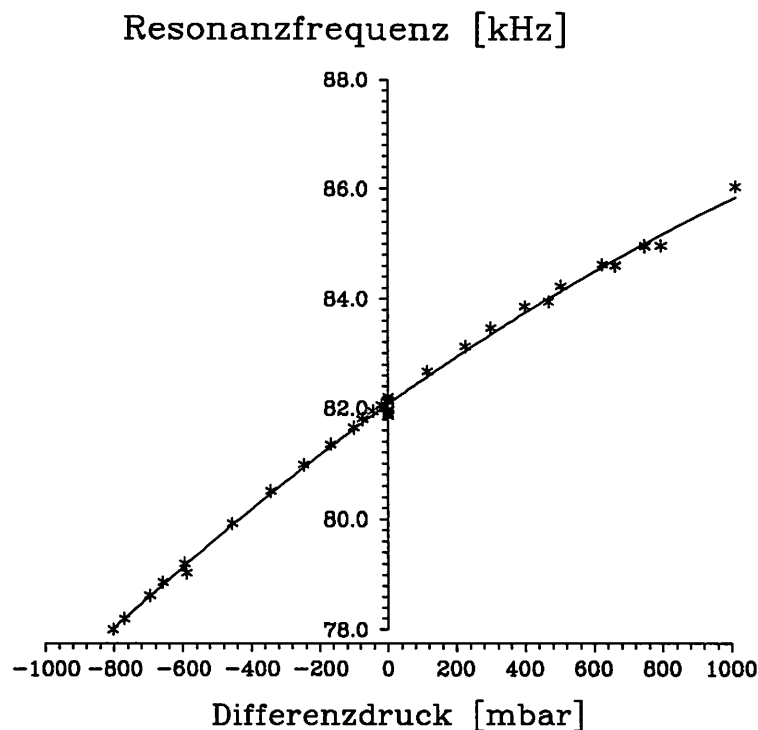


Abbildung 6.12: Gemessene Frequenz-Druck-Kennlinie eines BOD-Drucksensors

von Silizium [Over 77] nur durch den Einfluß der Klebschicht zwischen der BOD-Struktur und dem Aluminiumträger erklären. Im Vergleich zu dem in Kapitel 4.3.2 vermessenen Membrandrucksensor zeichnet sich die vermessene BOD-Kennlinie durch eine bessere Linearität<sup>8</sup>, bei gleichzeitig wesentlich erhöhter Druckempfindlichkeit aus.

#### 6.2.4 Optimierung der Druckempfindlichkeit

Bei der Optimierung der Druckempfindlichkeit von BOD-Sensoren ist darauf zu achten, daß die BOD-Membran über die Trägerstegstruktur bei gegebener Druckdifferenz eine möglichst hohe Verspannung im Balken hervorruft. Diese ist abhängig von den Abmessungen der Membran ( $a$  : Seitenlänge,  $h_m$  : Dicke) und des Balkens ( $l$  : Länge,  $h_b$  : Dicke), sowie der Steghöhe  $h_s$ . Eine analytische Näherungsbeschreibung der druckabhängigen Frequenzänderung von BOD-Strukturen ist unter der Annahme möglich, daß das Biegeverhalten der als ideal starr eingespannt angenommenen Membran durch den Balken und die Trägerstegstruktur nicht behindert wird. Diese Voraussetzung ist im wesentlichen nur für dicke Membranen erfüllt, bei denen die Membransteifigkeit im Verhältnis zur Steifigkeit, die durch die Trägerstege-Konstruktion gebildet wird, sehr groß ist. Die druckabhängige

<sup>8</sup> Die Nichtlinearität der Kennlinie beträgt im vermessenen Druckbereich (-0,8 bis 1,0 bar) etwa  $\pm 3,8$  %.

Frequenzänderung läßt sich dann näherungsweise durch:

$$f(p) = f_0 \sqrt{1 + \text{const} \left( \frac{l}{h_b} \right)^2 \left( \frac{h_s}{h_m^3} \right) \left( a^2 - \frac{l^2}{4} \right) \frac{p}{E}} \quad (6.1)$$

beschreiben [Thornton 90]. Die Konstante ist abhängig von der Membrangeometrie und beträgt für runde Membranen etwa 0,225. Größenordnungsmäßig sollte dieses auch für quadratische Membranen erfüllt sein, so daß es mit diesem Ausdruck möglich ist, das Skalierungsverhalten der Druckempfindlichkeit abzuschätzen und die wesentlichen Geometrieparameter im Entwurfsprozeß festzulegen. Bei gegebener Balkenlänge  $l$  ist zum einen die Schlankheit des Balkens ( $l/h_b$ -Verhältnis), zum anderen die Membrandicke  $h_m$  von entscheidender Bedeutung. Außerdem ist eine Erhöhung der Membranseitenlänge  $a$  im anwendungsspezifischen Rahmen möglichst anzustreben. Der Einfluß der Steghöhe  $h_s$  ist aufgrund des linearen Einflusses nahezu vernachlässigbar.

Bei der realisierten BOD-Struktur sind die der Gleichung (6.1) zugrundeliegenden Annahmen *nicht* erfüllt, da die über die Gesamtlänge der Membran verlaufenden Stege, die zur Balkenbefestigung dienen, das Biegeverhalten der Membran wesentlich verändern. Zusätzlich beeinflusst die Steifigkeit der Trägerkonstruktion (H-Struktur) die Hebelwirkung auf den Balken. Um die Hebelwirkung bei der vorliegenden BOD-Struktur genauer zu untersuchen, wurde daher ein dreidimensionales FE-Modell mit dem Volumenmodellierer I-DEAS [SDRC] erstellt. Aus Symmetriegründen wurde nur ein Viertel der Gesamtgeometrie betrachtet, da nur das Verhalten der Grundbiegeschwingungsmoden bei der Drucksensoranwendung von Interesse ist. Die Materialanisotropie und die  $\langle 110 \rangle$ -Orientierung des Siliziumwafers wurden durch eine  $45^\circ$ -Drehung des Elementkoordinatensystems berücksichtigt.

In **Abbildung 6.13** sind die Geometrie des Viertelmodells und die Ergebnisse der FE-Berechnungen abgebildet. Im oberen linken Fenster (1) sind die berechneten Auslenkungen  $u_z$  bei homogener Druckbeaufschlagung der BOD-Struktur zu sehen. Bei einer Druckbeaufschlagung von 1 bar beträgt die maximale Membranauslenkung etwa  $1 \mu\text{m}$ . Im oberen rechten Fenster (2) ist die gemittelte Spannungsverteilung  $\sigma_y$  entlang des Balkens abgebildet. Die maximale Zugspannung konzentriert sich aufgrund der Hebelwirkung im Resonatorbalken und beträgt etwa 24,7 MPa. Dieses entspricht etwa dem Doppelten der Spannung auf der Membranoberfläche. Im Fenster (3) ist die Elementierung im Bereich des Balkens und der Einspannung zu sehen, die sehr fein gewählt wurde, um die Hebelwirkung und die daraus resultierende Spannungskonzentration im Balken möglichst genau berechnen zu können. Aufgrund der nicht mit Regelflächen begrenzten Einspanngeometrie mußte dieser Bereich des FE-Modells mit Tetraederelementen<sup>9</sup> vernetzt werden. Bei der Berechnung der Schwingungsmoden<sup>10</sup> der BOD-Struktur wurden nur die Biegeschwingungsmoden Z1 des Balkens und die erste gekoppelte Schwingungsmoden, bei der der Balken und die Membran gegenphasig zueinander schwingen, berücksichtigt. Im Fenster (4) ist

<sup>9</sup>Das Gesamtmodell umfaßt 1748 Volumenelemente mit 2248 Knoten.

<sup>10</sup>Um die numerischen Fehler möglichst niedrig zu halten, wurde bei der Modalanalyse das *Subspace-Iterationsverfahren* verwendet.

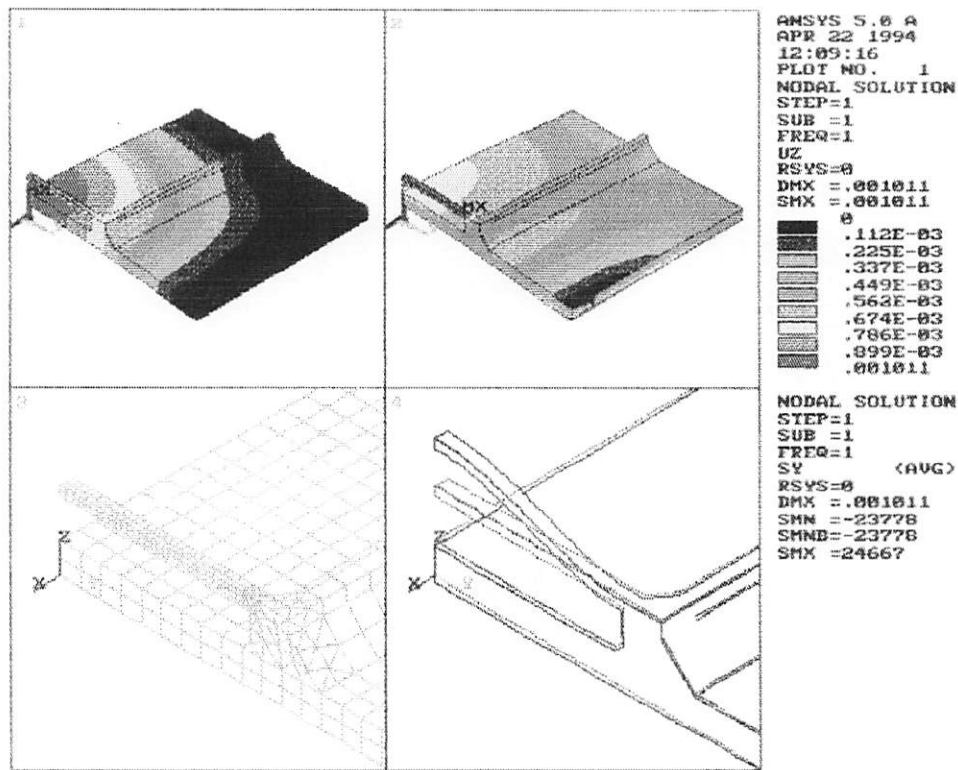


Abbildung 6.13: Berechnete Auslenkungen  $u_z$  (1), Spannungsverteilung  $\sigma_y$  (2), Elementierung (3) und Membranschwingungsmode (4) des BOD-Drucksensors

diese antisymmetrische Membranschwingungsmode des BOD-Drucksensors dargestellt. Gemäß Gleichung (6.1) ist die Membrandicke der BOD-Struktur aufgrund des kubischen Einflusses der ausschlaggebende Parameter, so daß ausgehend von der untersuchten Referenzgeometrie des BOD-Drucksensors die Membrandicke im Bereich 50–300  $\mu\text{m}$  variiert wurde. Die übrigen Geometrieparameter wurden unverändert beibehalten. Die Resonanzfrequenz der Biegeschwingungsmode Z1 des Balkens sollte unabhängig von der Membrandicke sein, während die Frequenz der Membranschwingungsmode proportional zur Membrandicke nach Gleichung (2.23) anwachsen sollte. Dieses Verhalten konnte zumindest für dicke Membranen (150–300  $\mu\text{m}$ ) rechnerisch verifiziert werden und ist in **Abbildung 6.14** graphisch dargestellt. Bei der Variation der BOD-Membrandicken von 50 auf 300  $\mu\text{m}$  wächst die Frequenz der Membranschwingungsmode  $f_{\text{Membran}}$  von 65,6 auf 174,9 kHz an. Die Balkenresonanzfrequenz  $f_{\text{Balken}}$  bewegt sich im Bereich 90,5–95,4 kHz. Die Abweichungen von 16 % zu dem gemessenen Frequenzwert (82 kHz) lassen sich einerseits durch die großen Dickenschwankungen des Balkens ( $\pm 5 \mu\text{m}$ ), andererseits durch die ungenaue Balkenlänge ( $1,99 \pm 0,04$  mm) erklären. Insbesondere gibt es eine Membrandicke, bei der die Steifigkeit der Membran und der Trägerstege-Konstruktion von gleicher Größenordnung sind, so daß beide Resonanzfrequenzen dicht nebeneinander zu liegen kommen. Diese Konfiguration wird bei einer Membrandicke von etwas weniger als 130  $\mu\text{m}$  erreicht.

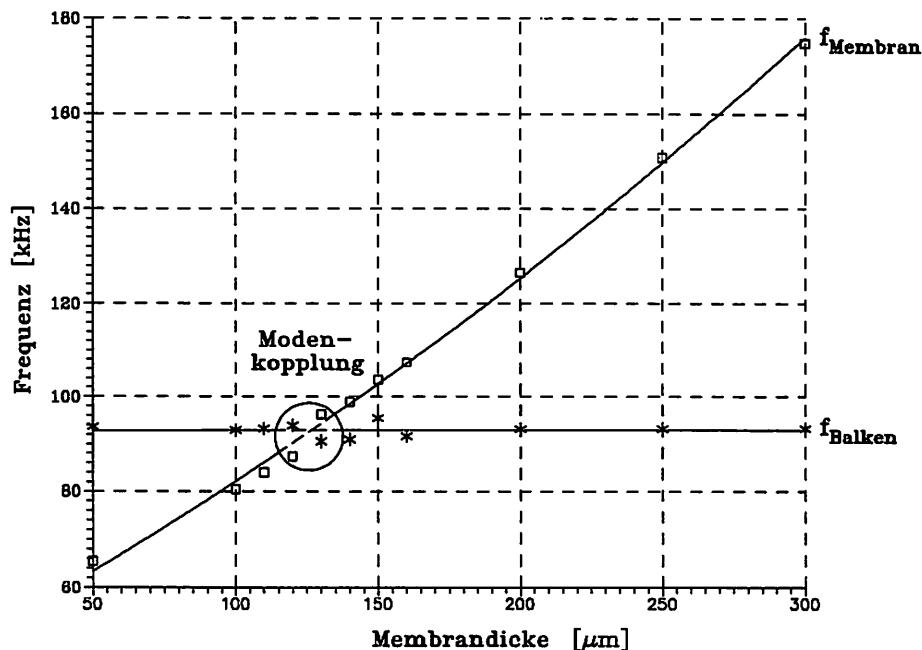


Abbildung 6.14: Berechnete Modenaufspaltung beim BOD-Drucksensor in Abhängigkeit der Membrandicke

Beide Frequenzen unterscheiden sich dann nur noch geringfügig<sup>11</sup>, so daß die Energie der Balkenschwingungsmode in die Membranschwingungsmode dissipieren und eine Modenkopplung, ähnlich wie beim Dreifachbalkenresonator in Abbildung 6.4, auftreten kann. Bei realen Sensoranwendungen sollte solch eine ungünstige Konfiguration daher vermieden und beim Entwurf darauf geachtet werden, daß die Membranfrequenz möglichst weit außerhalb des druckabhängig überstrichenen Frequenzbereiches des Balkenresonators bleibt. Im Vergleich zu den in der Literatur vorgestellten BOD-Drucksensoren (z.B. [Andres 88]), zeichnet sich die hier beschriebene Sensorstruktur durch ein einfacheres Modenspektrum aus, was sich in der späteren Anwendung als frequenzanaloger Drucksensor durch eine erhöhte Unimodalität des Gesamtsystems bemerkbar macht.

Analog zu den rechnerischen Untersuchungen in Kapitel 4.3.2 wurden die BOD-Drucksensoren von der Membranunterseite schrittweise mit Überdruck bis 1 bar belastet und anschließend die Resonanzfrequenzänderungen infolge der spannungsversteifenden Wirkung ermittelt. Die Frequenz-Druck-Kennlinien der Balkenschwingungsmoden Z1 sind in **Abbildung 6.15** für BOD-Drucksensoren mit einer Membranseitenlänge von 5 mm für unterschiedliche Membrandicken zusammengefaßt. Die unbelasteten Resonanzfrequenzen  $f_0$  liegen um 93 kHz, sofern die Membrandicke  $h_m$  außerhalb des kritischen Bereichs von etwa  $130 \mu\text{m} \leq h_m \leq 150 \mu\text{m}$  bleibt. Dieses ist in guter Näherung für relativ dicke (200, 250, 300  $\mu\text{m}$ ) und für dünne Membranen (100, 110  $\mu\text{m}$ ) erfüllt. Infolge des ungünstigen Steifig-

<sup>11</sup>Bei einer Membrandicke von 130  $\mu\text{m}$  beträgt die Differenz der beiden Frequenzen 5773 Hz (siehe Tabelle 6.5).

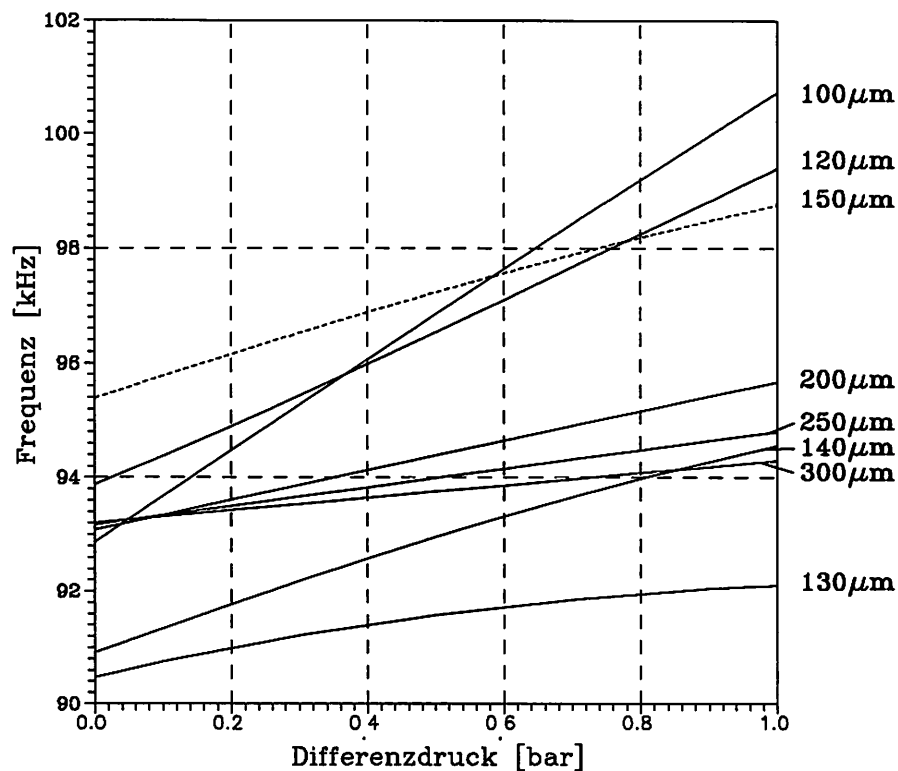


Abbildung 6.15: Einfluß der Membrandicke auf die Druckempfindlichkeit von BOD-Drucksensoren

keitsverhältnisses<sup>12</sup> von BOD-Membran zur Balken-Stege-Konstruktion beeinflussen sich die beiden Schwingungsmoden der BOD-Struktur und es kommt zu einer Verschiebung der Balkenresonanzfrequenz  $f_{Balken}$  (vgl. hierzu Abbildung 6.14). Während die Resonanzfrequenz bei einer Membrandicke von 130  $\mu\text{m}$  auf den niedrigsten Wert (90,5 kHz) fällt, stellt sich bei einer Membrandicke von 150  $\mu\text{m}$  der maximale Wert (95,4 kHz) ein. Membrandicken von 120 und 140  $\mu\text{m}$  stellen ebenfalls Geometrieconfigurationen aus dem kritischen Übergangsbereich dar. Die Druckempfindlichkeit der BOD-Sensorstruktur ist umso größer, je dünner die Membran ist. Die höchste Druckempfindlichkeit von etwa 12,5 kHz/bar weist die BOD-Struktur mit einer Membrandicke von 50  $\mu\text{m}$  auf. Allerdings ist der Druckeinsatzbereich auf einige Hundert mbar beschränkt. Bei Erhöhung der Membrandicke auf 300  $\mu\text{m}$  erweitert sich der Druckbereich bis etwa 12 bar. In **Tabelle 6.5** sind die Ergebnisse der FE-Berechnungen für die Variation der Membrandicke zusammengefaßt. In Erweiterung zu der Abbildung 6.15 sind die BOD-Strukturen bis zu ihrem jeweiligen Maximaldruck  $p_{max}$  belastet worden, bei dem die mechanischen Maximalspannungen  $\sigma_{max}$  im Balken etwa ein Viertel der Bruchspannung von Silizium nicht übersteigen durften. Die maximalen Membranauslenkungen  $u_z$  betragen bei den angegebenen Maximaldrücken etwa 2  $\mu\text{m}$ , während die maximalen Spannungen  $\sigma_{max}$  im Bereich um 50–60 MPa liegen.

<sup>12</sup> Eine Abnahme der Membrandicke bewirkt eine Abnahme der Biegesteifigkeit der Membran im Verhältnis zur Steifigkeit der H-Trägerstruktur.

Tabelle 6.5: Charakteristische Kenngrößen verschiedener BOD-Drucksensoren in Abhängigkeit der Membrandicke

$h_m$	$f_{Balken}$	$f_{Membran}$	$\frac{\Delta f}{\Delta p}$	$p_{max}$
[ $\mu\text{m}$ ]	[kHz]	[kHz]	[ $\frac{\text{kHz}}{\text{bar}}$ ]	[bar]
50	93,668	65,556	12,48	0,5
100	92,870	80,386	7,955	1,0
130	90,467	96,240	1,314	1,5
150	95,387	103,611	2,615	2,0
200	93,085	126,503	2,446	5,0
250	93,174	150,731	1,547	7,0
300	93,207	174,869	1,026	12,0

Bei dieser zugrundegelegten vierfachen Überlastsicherheit können Drucksensoren für einen Druckbereich von 0,5–12 bar bei *gleichem Layout* lediglich durch Änderung der Membrandicke realisiert werden. Der Einsatzbereich der Sensoren läßt sich erweitern, falls von der zugrundegelegten Überlastsicherheit abgewichen wird.

Bei konstant gehaltenen Balkendimensionen und unveränderter Steghöhe (d.h. Ätztiefe) ist das laterale Sensorlayout mit der Membranseitenlänge  $a$  der bestimmende Parameter für die Druckempfindlichkeit. Eine Verkleinerung dieses Parameters ist im Rahmen der prozeßspezifischen Forderungen bezüglich der Verringerung der Prozeßzeit anzustreben, da einerseits bei kleinerer Membranfläche die Schreibzeiten mit dem Laser verringert und andererseits der Einsatz eines Excimer-Lasers möglich wird. Im Gegensatz zum Nd:YAG-Laser, der eine fokussierte Strahlquelle (Strahldurchmesser: 5–10  $\mu\text{m}$ ) besitzt und ein sequentielles Schreibverfahren bedingt, erlaubt der Excimer-Laser eine großflächige Bearbeitung (Schreibfläche: ca. 10 mm x 20 mm) des Siliziumwafers [Schumacher]. Durch die weitere Miniaturisierung der BOD-Drucksensoren ist es außerdem möglich, auf einem Siliziumwafer viele Sensorelemente herzustellen und damit bei großer Anzahl und guter Ausbeute reduzierte Herstellungskosten zu erreichen. Im weiteren wurde daher die Membranseitenlänge bei gleichen Balkendimensionen (Länge: 1,95 mm, Breite: 120  $\mu\text{m}$ , Dicke: etwa 42,4  $\mu\text{m}$ ) von 5 auf 2,5 mm verringert und gleichzeitig verschiedene Membrandicken untersucht. Zusätzlich wurde ein Sensorlayout mit minimalen Abmessungen von 2 x 2 mm<sup>2</sup> modelliert. Aufgrund der vorgegebenen Breite der Trägersteg-Konstruktion wurde die Balkenlänge auf 1 mm verkürzt. Im Vergleich mit dem realisierten Referenzdrucksensor (Membranabmessungen: 5 x 5 mm<sup>2</sup>, Membrandicke: 150  $\mu\text{m}$ ) zeichnet sich diese miniaturisierte Drucksensorkonfiguration durch hohe Resonanzfrequenzen der Balkenschwingungsmoden (385,3 kHz) und der Membranmoden (627,3 kHz) aus und weist eine Druckempfindlichkeit von 0,539 kHz/bar im Bereich bis etwa 20 bar auf.

Die berechneten Druckempfindlichkeiten der BOD-Drucksensoren mit verschiedenen Membranabmessungen sind in **Abbildung 6.16** graphisch dargestellt und die charakte-

Tabelle 6.6: Charakteristische Kenngrößen verschiedener BOD-Drucksensoren bei Variation von Membranseitenabmessungen und -dicke

Membranabm.		$f_{Balken}$	$f_{Membran}$	$\frac{\Delta f}{\Delta p}$	$p_{max}$
$a[mm]$	$h_m[\mu m]$	[kHz]	[kHz]	$[\frac{kHz}{bar}]$	[bar]
3,0	150	93,198	266,913	11,43	1,5
3,5	100	96,327	156,130	3,70	7,5
5,0	150	95,387	103,611	2,62	4,0
4,5	250	96,510	184,730	1,21	24,0
3,5	250	96,538	297,220	0,65	38,0
2,5	250	96,542	377,380	0,02	76,0

ristischen Kenngrößen in **Tabelle 6.6** zusammengefaßt. Als maximale Belastung sind die Drücke  $p_{max}$  zugelassen worden, bei denen die mechanischen Maximalspannungen  $\sigma_{max}$  im Balken etwa die Hälfte der Bruchspannung von Silizium (etwa 100 MPa) betrug. Aufgrund der unveränderten Trägerstege-Konstruktion unterscheiden sich die Hebelwirkungen der einzelnen BOD-Sensoren erheblich, da die geometrische Anordnung der Balken auf der Membran verändert wird und sich zusätzlich die Verringerung der Membranseitenlänge bemerkbar macht. Durch Ausnutzung dieser beiden Effekte entsteht ein weiterer Spielraum für die Parameterwahl bei der Dimensionierung von BOD-Drucksensoren. Wie in Abbildung 6.16 dargestellt, läßt sich durch eine geeignete Wahl der Membranseitenlänge (Angaben in: mm) und der Membrandicke (Angaben in:  $\mu m$ ) die Druckempfindlichkeit der BOD-Drucksensoren in einem weiten Bereich einstellen. FEM-Berechnungen bei zusätzlicher Variation der Membrandicke haben allerdings gezeigt, daß es aus Sicht der Beeinflussung von Balken- und Membranmode günstiger ist, Membrandicken von 150  $\mu m$  zu vermeiden [Messner]. Der Druckeinsatzbereich läßt sich weiter steigern, indem die Membrandicke erhöht und die Membranseitenabmessungen gleichzeitig verringert werden. So zeichnet sich ein BOD-Drucksensor mit einer Seitenlänge von 2 mm und einer Dicke von 300  $\mu m$  durch eine Druckempfindlichkeit von etwa 141 Hz/bar in einem Maximaldruckbereich bis 100 bar aus. Die maximal auftretenden Spannungen betragen hierbei etwa die Hälfte der Bruchspannung von Silizium.

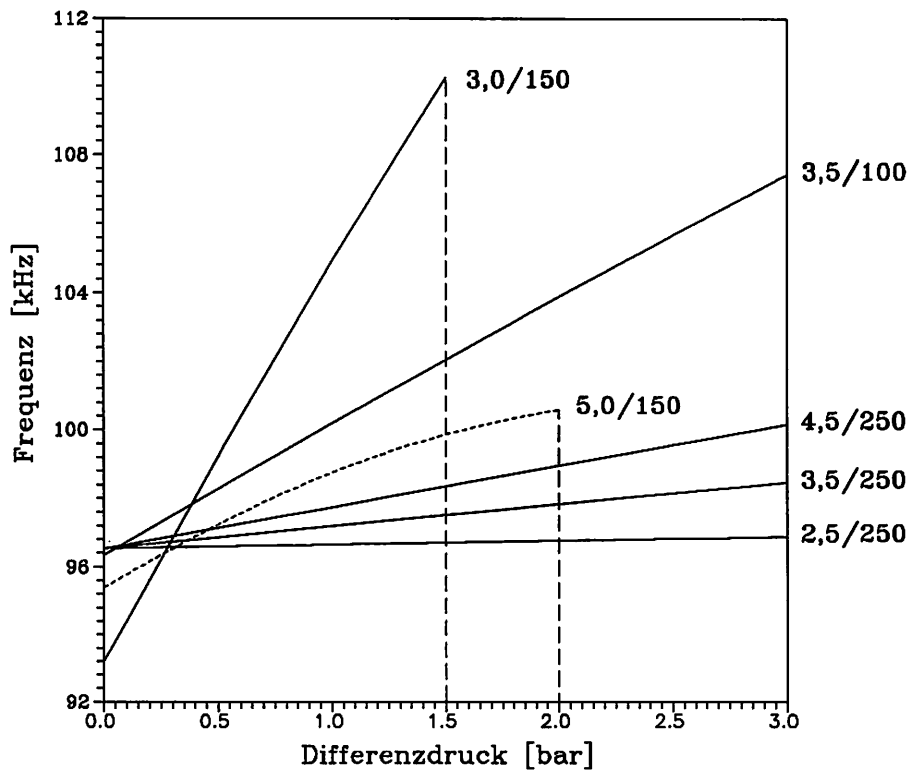


Abbildung 6.16: Geometrieinfluß (Membranseitenlänge [mm]/ -dicke [ $\mu\text{m}$ ]) auf die Druckempfindlichkeit von BOD-Drucksensoren

### 6.3 Zusammenstellung der Resultate

In diesem Abschnitt wurden zwei alternative Sensorstrukturen für die Kraft- und Druckmessung theoretisch und experimentell untersucht. Insbesondere konnte das dynamische Verhalten unter Einwirkung von äußeren Belastungen charakterisiert werden. Mit Hilfe der numerischen FE-Berechnungen wurden Entwurfsvorgaben für die Optimierung der Sensoreigenschaften abgeleitet. Gegenüber anderen Sensorkonzepten konnten verschiedene Vorteile nachgewiesen werden. Im folgenden sind die Ergebnisse der Untersuchungen zusammengefaßt:

#### 6.3.1 Dreifachbalken-Kraftsensor

- Durch Einführung einer beidseitigen mechanischen Entkopplung in Form eines membranartigen Entkopplungsbereiches der Länge  $200\ \mu\text{m}$ , das sind etwa 6,7 % der Balkenlänge, wird die Unimodalität des Dreifachbalkenresonators wesentlich erhöht. Die Modenaufspaltung zwischen der Grundmode M1 und der gewünschten Schwingungs-mode M3, bei dem der Sensor betrieben wird, nimmt hierdurch um den Faktor 30 zu und beträgt absolut etwa 3 kHz.



- Weiterhin wird durch eine geeignete Dimensionierung dieses Entkopplungsbereiches eine dynamische Momentenkompensation bei der antisymmetrischen Schwingungs-mode M3 erreicht und es stellt sich eine etwa doppelt so hohe Schwingungsgüte wie bei der Grundmode M1 ein. Die maximal erzielten Güten betragen für die vermessenen Schwinger  $Q_{M3} \approx 2 \cdot Q_{M1} \approx 400$  in Luftatmosphäre.
- Die gemessene Kraftempfindlichkeit betrug 8,6 kHz/N im Kraftmeßbereich bis 5 N. Dieses entspricht einer relativen Kraftempfindlichkeit von etwa  $\eta = \frac{1}{f_0} \frac{\Delta f}{\Delta F} = 0,39 \text{ N}^{-1}$  bei einer Resonanzfrequenz von  $f_{M3} = 22,0 \text{ kHz}$ .
- Durch den Einsatz von lasergebohrten Löchern konnte eine uniaxiale Krafteinleitung in den Kraftsensor ermöglicht und Scherkräfte unterdrückt werden.

Bei der Realisierung von Kraftsensoren für Präzisionsmeßanwendungen sind allerdings noch erheblich höhere Schwingungsgüten notwendig, um eine entsprechende Meßgrößenauflösung (siehe Gleichung 4.10) zu erreichen. Dieses könnte beispielsweise durch die Herstellung von Balken mit einem größeren Längen-/Breiten-Verhältnis erzielt werden [Kirman 83], da eine Evakuierung des Resonatorgehäuses bei Kraftsensoren aufgrund der erforderlichen Krafteinleitung problematischer als bei Drucksensoren ist. Außerdem ist eine technologische Optimierung der ZnO-Schichten im Hinblick auf die inneren Spannungen erforderlich. Alternativ bietet sich die elektrothermische Anregung mit Hilfe eindiffundierter Widerstände in Verbindung mit piezoresistiver Abtastung der Dreifachbalkenresonatoren an. Bei Resonatorlängen von 500–700  $\mu\text{m}$  und Balkendicken von etwa 6  $\mu\text{m}$  lassen sich Schwingungsmoden bis etwa 1 MHz elektrothermisch anregen [Burrer 93].

### 6.3.2 BOD-Drucksensor

Die vorgestellte BOD-Sensorstruktur wurde mit Hilfe des laserunterstützten anisotropen Ätzens vollständig in Silizium *monolithisch integriert* hergestellt. Dadurch können Ätzstopp- [Greenwood 88] oder sonstige Verbindungstechniken [Parsons 92] entfallen. Es sind auch keine zusätzlichen manuellen Eingriffe [Buser 91a] erforderlich, so daß es sich hier um einen einfachen, aber *reproduzierbaren* und vor allem *batchfähigen* Herstellungsprozeß handelt. Es konnte gezeigt werden, daß aufgrund der Vielzahl von variablen Geometrieparametern sich die BOD-Struktur für die Realisierung von Drucksensoren mit unterschiedlichen Sensorspezifikationen in verschiedenen Druckmeßbereichen sehr gut eignet.

- Konventionelle Herstellungsprozesse, wie elektrochemischer Ätzstopp, und die hierfür erforderlichen Implantierungs- und Diffusionsprozesse bieten aufgrund der geringen Diffusionslängen nur die Möglichkeit der Herstellung von relativ dünnen Schwin-gerstrukturen, typischerweise unter einem Mikrometer. Diese weisen zwar eine hohe Empfindlichkeit auf, besitzen aber schlechte Überlasteigenschaften, insbesondere gegenüber dynamischen Druckstößen. Der Nachteil bei *zeitlich* geätzten Siliziumbalken

sind die Inhomogenitäten und Schwankungen, so daß starke Bauelementestreungen auftreten.

- BOD-Drucksensoren zeichnen sich gegenüber anderen Drucksensorkonzepten insbesondere durch die funktionelle Trennung von sensitivem Element (Resonatorbalken) und druckeinleitendem Medium (Druckmembran) aus. Der hier vorgestellte BOD-Drucksensor bietet mehrere Entwurfsparameter (Membran- und Balkenabmessungen, Steghöhe und -breite) zur Auslegung der Druckempfindlichkeit, des Druckbereiches und des Überlastverhaltens.
- Ein Vorteil der mit laserunterstütztem anisotropen Ätzen hergestellten BOD-Drucksensoren sind die erzielbaren großen Balkendicken, die bis zu 200  $\mu\text{m}$  betragen können. Experimentell wurden Balkendicken im Bereich 40–120  $\mu\text{m}$  realisiert und vermessen. Die Dickenschwankungen betragen etwa  $\pm(3-5)$   $\mu\text{m}$ , was bei zunehmenden Balkendicken vernachlässigbar wird. Durch Einsatz dicker Balken und Membranen ist die Realisierung von Hochdrucksensoren bis in einem Bereich von über 100 bar möglich.
- Gegenüber resonanten Membrandrucksensoren zeichnen sich resonante BOD-Drucksensoren weiterhin durch hohe Druckempfindlichkeiten bei gleichzeitig niedrigen Kennliniennichtlinearitäten aus. Der experimentell realisierte BOD-Drucksensor besitzt eine Druckempfindlichkeit von 4,47 kHz/bar im Druckbereich von -0,8 bis 1,0 bar, was einer relativen Druckempfindlichkeit von etwa 5,45 %/bar entspricht. Die Kennliniennichtlinearität beträgt im betrachteten Meßbereich etwa  $\pm 3,8$  %.
- Mit Hilfe der FE-Berechnungen konnten Entwurfsvorgaben abgeleitet und durch geeignete Dimensionierung der Membran- und Balkenabmessungen die Druckempfindlichkeit wesentlich erhöht werden. Theoretisch wurde gezeigt, daß durch Änderung der Membrandicke Sensoren für einen Druckbereich von 0,5–12 bar mit *gleichem Layout* bei einer etwa vierfachen Überlastsicherheit herzustellen sind. FE-Berechnungen an einem BOD-Sensor mit der Membranseitenlänge von 2 mm und einer Dicke von 300  $\mu\text{m}$  ergaben eine Druckempfindlichkeit von etwa 141 Hz/bar in einem Maximaldruckbereich bis 100 bar. Die maximal auftretende Spannung betrug etwa die Hälfte der Bruchspannung von Silizium.
- Infolge der Spannungskonzentration im Balken eignet sich die BOD-Sensorstruktur ebenfalls sehr gut für die *analoge* Signalauswertung, beispielsweise mit Hilfe auf der Balkenoberfläche diffundierter piezoresistiver oder gesputterter Metall-DMS-Widerstände.