

**Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.**

**Thomas Fabula, Axel Schumacher, Hans-Joachim Wagner**

**Zwischenbericht  
über die Durchführung und den Stand des  
Verbundvorhabens**

**"Einsatz der Mikromechanik  
zur Herstellung frequenzanaloger Sensoren"**

**- Förderkennzeichen: 13 AS 0114 -**

**Projektleiter: Dipl.-Phys. H.-J. Wagner**

**Berichtszeitraum: 1.7.1990 - 31.12.1990**

# **Inhalt**

## **I Zusammenfassung**

- **Im Berichtszeitraum durchgeführte Arbeiten** S. 3
- **Stand der Arbeiten und weiteres konkretes Vorgehen** S. 3

## **II Einzeldarstellung**

### **1. Theoretische Untersuchungen**

- a) **Analytische Berechnungen** S. 6
- b) **Numerische Berechnungen** S. 7

### **2. Technologie**

- a) **Herstellung von schwingfähigen Balken aus einkristallinem Silizium und Vorstudien** S. 8
- b) **Entwurf eines Herstellungsprozesses von resonanten Si-Strukturen mit ZnO-Anregung** S. 15

# **I Zusammenfassung**

## **• Im Berichtszeitraum durchgeführte Arbeiten**

Der technologische Forschungsschwerpunkt wurde nach den Arbeiten für den Meilenstein M2: "Naßchemisch geätzte Quarzstrukturen" auf die Herstellung und Berechnung von Dreifachbalkenstrukturen aus Silizium verlagert. Hierzu wurden in einer Vorstudie schwingfähige Balken in Silizium geätzt. Diese wurden akustisch angeregt. Mit Hilfe eines Michelson-Interferometers wurden die Resonanzfrequenzen ermittelt und mit den analytisch und numerisch berechneten Werten verglichen. Die relativen Abweichungen von bis zu 12,7 % sind im wesentlichen auf die nicht berücksichtigte Dämpfung der Balken (in Luft), die nicht ideale Einspannung der Balkenenden und die Meßfehler bei Ermittlung der Balkendimensionen zurückzuführen. Vorarbeiten für einen neuartigen Prozeß zur Herstellung von resonanten Si-Strukturen mit ZnO-Anregung wurden durchgeführt. Arbeiten zum Meilenstein M4: "Piezoelektrische Schichten auf Silizium" konnten dabei wegen Verzögerungen im Umbau der Sputteranlage noch nicht begonnen werden.

## **• Stand der Arbeiten und weiteres konkretes Vorgehen**

Die Bestandsaufnahme nach "Halbzeit" des Vorhabens läßt sich im Vergleich mit dem im Vorhabensantrag, Anlage 1 festgelegten Balkenplan wie folgt darstellen:

(• Stand; + weiteres Vorgehen)

### **(a) Patent- und Literaturrecherche**

- Wurden mit verschiedenen Themenschwerpunkten durchgeführt.
- + Recherche weiterführen. Insbesondere die Patentlage für Quarzbalken, Siliziumbalken, "Beam-on-diaphragm"-Strukturen und Quarzmembranen mit den Verbundpartnern (VP) diskutieren und in aktuelles Sensordesign einfließen lassen.

### **(b) Festlegung der Entwicklungsziele**

- + Die Entwicklungsziele zu Beginn des Vorhabens müssen neu formuliert werden.

### **(c) Erarbeitung der Funktionsprinzipien**

- Funktionsprinzipien für Kraftsensoren, Modalanalyse, Einflüsse sind abgeschlossen.

- + Anregungs- und Detektionsprinzipien theoretisch ausarbeiten und evaluieren. Brauchbarkeit von Strukturen hinsichtlich verschiedener Meßgrößen (Kraft, Druck, Beschleunigung, Temperatur, Feuchte etc.) abschätzen und Machbarkeit theoretisch erarbeiten.

#### **(d) Experimentelle Vorarbeiten**

- Durchgeführt wurden die Vorarbeiten: Konstruktion einer Quarzätzapparatur, Belagungstechnologie und beidseitige Lithographie für Quarz- und Siliziumsubstrate, Silizium-Laserstrukturierung, Strukturieren der Metallisierungsschicht.

#### **(e) Theoretische Grundlagen**

- Berechnung von Resonatorgeometrien, dynamische FEM-Rechnungen wurden durchgeführt.
- + Einschluß der piezoelektrischen Finiten Elemente in die Berechnungen. Berechnung verschiedener Balkenquerschnittsformen (statisches und dynamisches Verhalten). Si-SiO<sub>2</sub>-ZnO-Al-Mehrschichtsysteme (dynamisches und thermisches Verhalten). Elektrodenstrukturierung für piezoelektrische Anregung/Abtastung. "Beam-on-diaphragm"-Strukturen (statisches und dynamisches Verhalten).

#### **(f) Erarbeitung von Technologien**

- Strukturierung der Quarzform durch naßchemische Ätzprozesse mit den gegebenen technologischen Möglichkeiten im Institut abgeschlossen. Erzeugung von mikro-mechanischen Grundstrukturen abgeschlossen.
- + Umrüstung der Sputteranlage für die Herstellung von ZnO vor dem Abschluß. Schichtabscheidung, -strukturierung und -charakterisierung (Charakterisierung evtl. mit Dienstleistung von Instituten, Verbundpartnern). Geeigneten Multilayer-Schichtaufbau zur Anregung und Detektion von resonanten Strukturen entwickeln. Dabei Elektrodenoptimierung (unterstützt durch FEM-Simulation). Anisotropes Ätzen (Elektrochemisches Ätzen, Ätzen auf Zeit) von Balkenstrukturen in Silizium. Dreidimensionale Mikrostrukturierung von Quarz mit Trockenätzverfahren (in Außenstelle Erlangen).

**(g) Aufbau- und Verbindungstechnik**

- Anodisches Bonden wurde durchgeführt.
- + "Silicon-direct-bonding" von Silizium.

**(h) Herstellung von diversen mikromechanischen Resonatoren**

- Fotolithographie und Naßätzen durchgeführt.
- + Optimierung der Technologieschritte notwendig. Herstellung von Resonatoren für VP geplant.

**(i) Nachweis der Sensoreffekte + (m) Untersuchung der Sensorstrukturen**

- Elektrische Meßtechnik (Impedance/Gain Phase-Analyzer) im Labor/Stuttgart aufgebaut und Messungen durchgeführt. Charakterisierung von piezoelektrischen Materialien/Resonatoren. Messung des frequenzabhängigen Impedanz- und Phasenverhaltens, Bestimmung der Ersatzschaltbilddaten ( $R_1, C_1, L_1, C_0$ ) und der daraus abgeleiteten Größen Güte  $Q$  und elektromechanischer Kopplungsfaktor  $k_{\text{eff}}$  möglich.
- + Aufbau eines optischen Meßplatzes für dynamische Messungen zur Charakterisierung von Resonatorstrukturen geplant. Methode: akustische oder optische Anregung von resonanten Strukturen und optische Abtastung (Laserinterferometer, Laservibrometer). Aufbau eines temperaturregelbaren und evakuierbaren Meßrezipienten mit Meßdurchführungen und Resonatorhalterung zur Einleitung der Meßgrößen (Kraft, Druck). Messung der Größen: Resonanzfrequenzen, Empfindlichkeit, Amplitudengang, mechanische Schwingungsgüte, Nichtlinearität der Sensorkennlinie unter Beachtung von Störeinflüssen (Temperatur, Luftdruck).

**(k) Entwicklung der Sensorelektronik + (o) Busanschlußkonzepte**

- + Aufbau diskreter Oszillatoren, verschiedene Meßsignalauswertungsverfahren,  $\mu$ P-Anschluß und Verarbeitung).

## II Einzeldarstellung

### 1. Theoretische Untersuchungen

#### a) Analytische Berechnungen

Die für schwingende Balken gültigen Beziehungen für die Eigenfrequenzen und für die Kraftempfindlichkeiten wurden bereits im letzten Zwischenbericht eingehend abgehandelt, so daß an dieser Stelle nur die für die weiteren Untersuchungen wichtigsten Formeln angegeben werden. Die Beziehungen gelten für doppelseitig eingespannte Balken der Länge  $l$ , der Breite  $w$  und der Dicke  $t$  (Abb. 1).

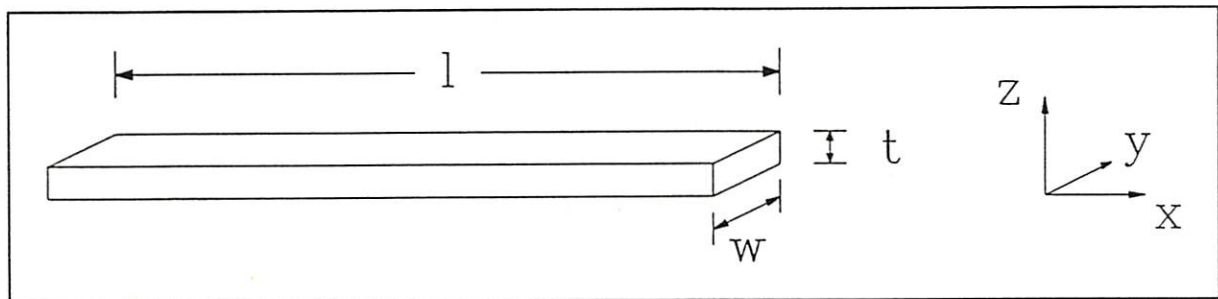


Abb. 1: Geometrie des doppelseitig eingespannten Biegebalkens

Für die **Eigenfrequenz**  $f_0$  für eine Schwingung in  $z$ -Richtung gilt:

$$f_0 \approx c_{f,0} \frac{t}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

Die Proportionalitätskonstante  $c_{f,0}$  beträgt ungefähr 1,026. <sup>1.028</sup> Ferner gelten für (100)-Silizium die Materialdaten  $E = 1,3 \cdot 10^{11}$  Pa und  $\rho = 2,329$  g/cm<sup>3</sup>.

$$E_{110} = 1,7 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$$

Für die **Kraftempfindlichkeit**  $\eta$  des Grundmodes bezogen auf die Eigenfrequenz  $f_0$  gilt in linearer Näherung:

$$\eta := \frac{1}{f_0} \frac{\partial f}{\partial F} \approx c_\eta \frac{1}{E} \left( \frac{l}{t} \right)^2 \frac{F}{w t} \quad (2)$$

Hierbei ist  $\partial f \approx \Delta f :=$  Frequenzänderung;  $\partial F \approx \Delta F :=$  Kraftänderung;

$c_\eta = 0,148$  N<sup>-1</sup> für Einfachbalkenstrukturen.

Für einen im Institut hergestellten Siliziumbalken mit den Dimensionen  $l = 3011 \mu\text{m}$ ,  $w = 880 \mu\text{m}$  und  $t = 28 \mu\text{m}$  ergibt sich die Eigenfrequenz  $f_{0,\text{theor}}$  zu

$$f_{0,\text{theor}} \approx 23,67 \text{ kHz} \quad (3)$$

und die Kraftempfindlichkeit  $\eta_{\text{theor}}$  zu

$$\eta_{\text{theor}} \approx 53,4 \text{ \%}/\text{N} \quad (4)$$

$$\rightarrow f_{110} = 27.07 \text{ kHz}$$

$$\rightarrow \eta \approx 40.5 \text{ \%}/\text{N}$$

## b) Numerische Berechnungen

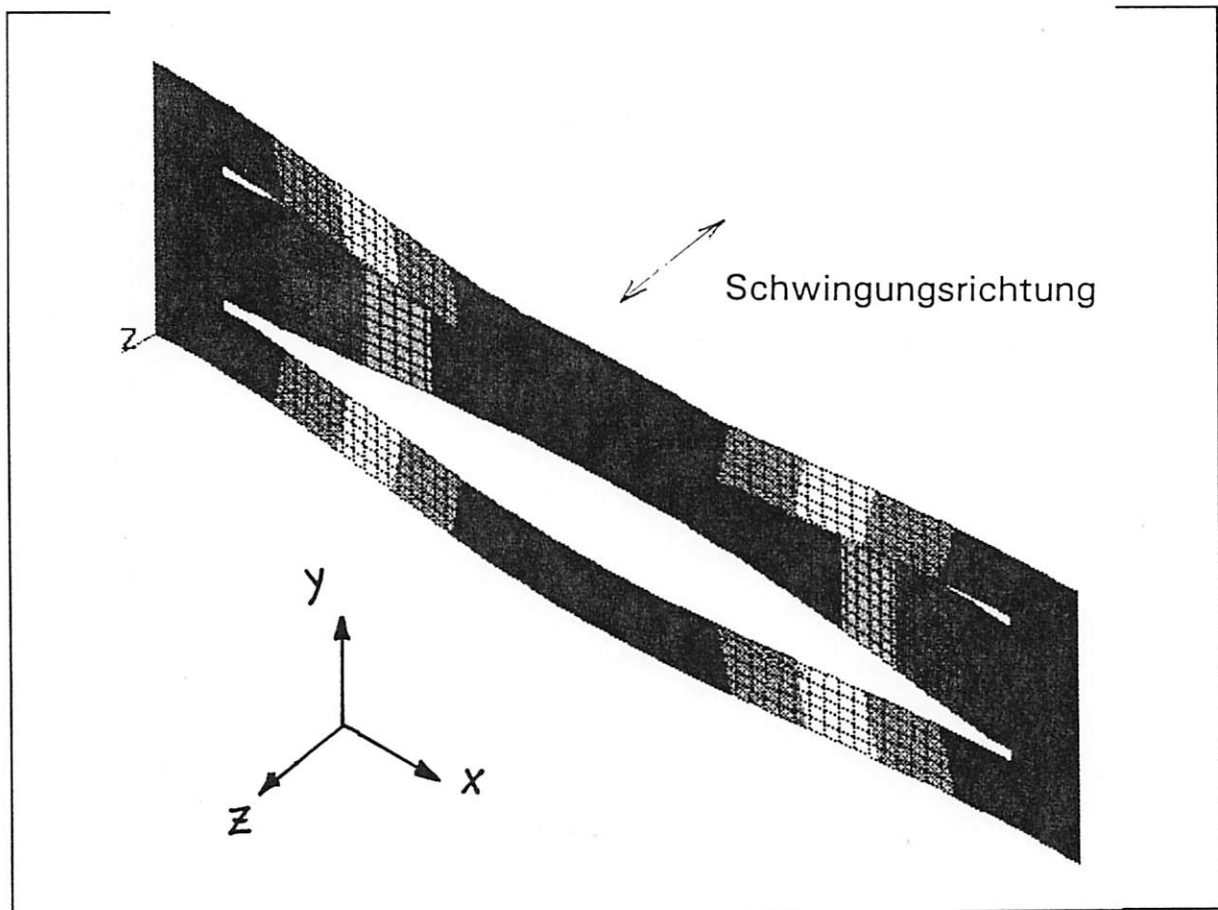
Mittels zweidimensionalen Finite-Elemente-Berechnungen wurden für Dreifachbalkenstrukturen aus Silizium die Eigenfrequenzen und Kraftempfindlichkeiten für verschiedene Schwingungsmoden bestimmt. Für die Berechnungen wurden die geometrischen Daten eines geätzten Si-Balkens verwendet:

|                                   |                        |
|-----------------------------------|------------------------|
| Länge der Balken:                 | 3011 $\mu\text{m}$     |
| Breite des mittleren Balkens:     | 400 $\mu\text{m}$ ;    |
| Breite der beiden äußeren Balken: | je 200 $\mu\text{m}$ ; |
| Spaltbreite zwischen den Balken:  | je 40 $\mu\text{m}$ ;  |
| Balkendicke:                      | 28 $\mu\text{m}$ .     |

Um die kinematische Kopplung der drei Balken zu berücksichtigen, wurde an beiden Enden jeweils eine gemeinsame Aufhängung angenommen. Abb. 2 zeigt diejenige Eigenschwingungsform, bei der der mittlere Balken in Gegenphase zu den beiden äußeren schwingt. Wie bereits im letzten Zwischenbericht erwähnt wurde, ist diese Resonatorform im antisymmetrischen Schwingungsmodus aufgrund der inhärenten Schwingungsentkopplung und der damit verbundenen hohen Schwingungsgüte und Kraftempfindlichkeit für Sensoranwendungen besonders interessant.

Die numerischen Berechnungen liefern folgende Ergebnisse für den antisymmetrischen Schwingungsmodus:  $(F = 1.3 \text{ e} \pi P_0) \quad v = 0.17$

|  |  |
|--|--|
| Resonanzfrequenz:                        | $f \approx 21,4 \text{ kHz}$   |
| Kraftempfindlichkeit:                    | $\eta_{\text{FEM}} \approx 43,8 \text{ \%}/\text{N}$ (bei $\Delta F = 2 \text{ N}$ ) |
| Nichtlinearität:                         | $NL \approx \pm 5,4 \text{ \%}$ (bei $\Delta F = 2 \text{ N}$ )                      |
| Max. Zugspannung bei $F = 2 \text{ N}$ : | $\sigma_x \approx 111 \text{ N/mm}^2$ .  |



**Abb. 2:** Antisymmetrische Eigenschwingungsform der Si-Dreifachbalkenstruktur (nicht maßstabsgetreu)

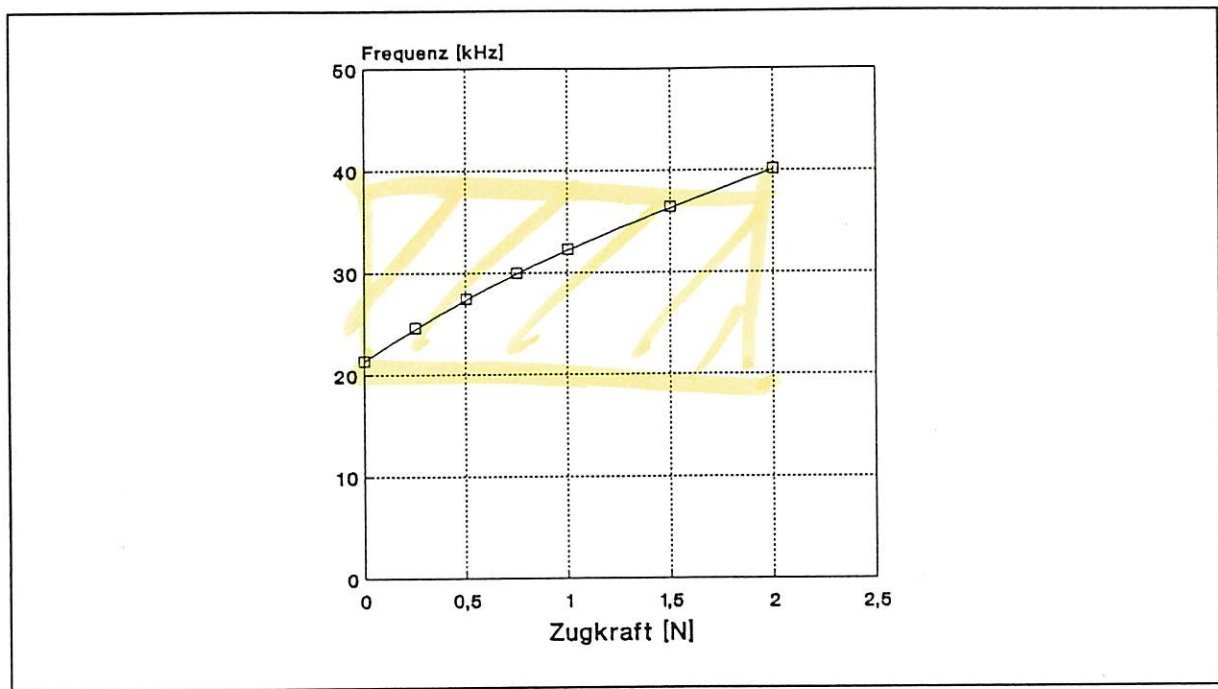
Die angegebene Zugspannung liegt deutlich unter der Bruchgrenze von etwa 200 - 300 N/mm<sup>2</sup>. Die numerisch berechnete Kraft-Frequenz-Kennlinie ist in Abb. 3 dargestellt.

## 2. Technologie

**a) Herstellung von schwingfähigen Balken aus einkristallinem Silizium und Vorstudien**  
Mit Hilfe des in Abb. 4 skizzierten Prozesses wurden schwingfähige Balken aus Silizium hergestellt.

Als Ausgangssubstrat dienen (100)-Si-Wafer ( $\phi$  3", Dicke 380  $\mu$ m, beidseitig poliert, p-dotiert (Bor), 1-10  $\Omega$ cm). Diese werden in einem feuchten Oxidationsprozeß von beiden Seiten mit einer 1,5  $\mu$ m dicken SiO<sub>2</sub>-Schicht versehen. Anschließend wird diese mittels Fotolithographie von beiden Seiten strukturiert. Beim darauffolgenden anisotropen Tiefenät-

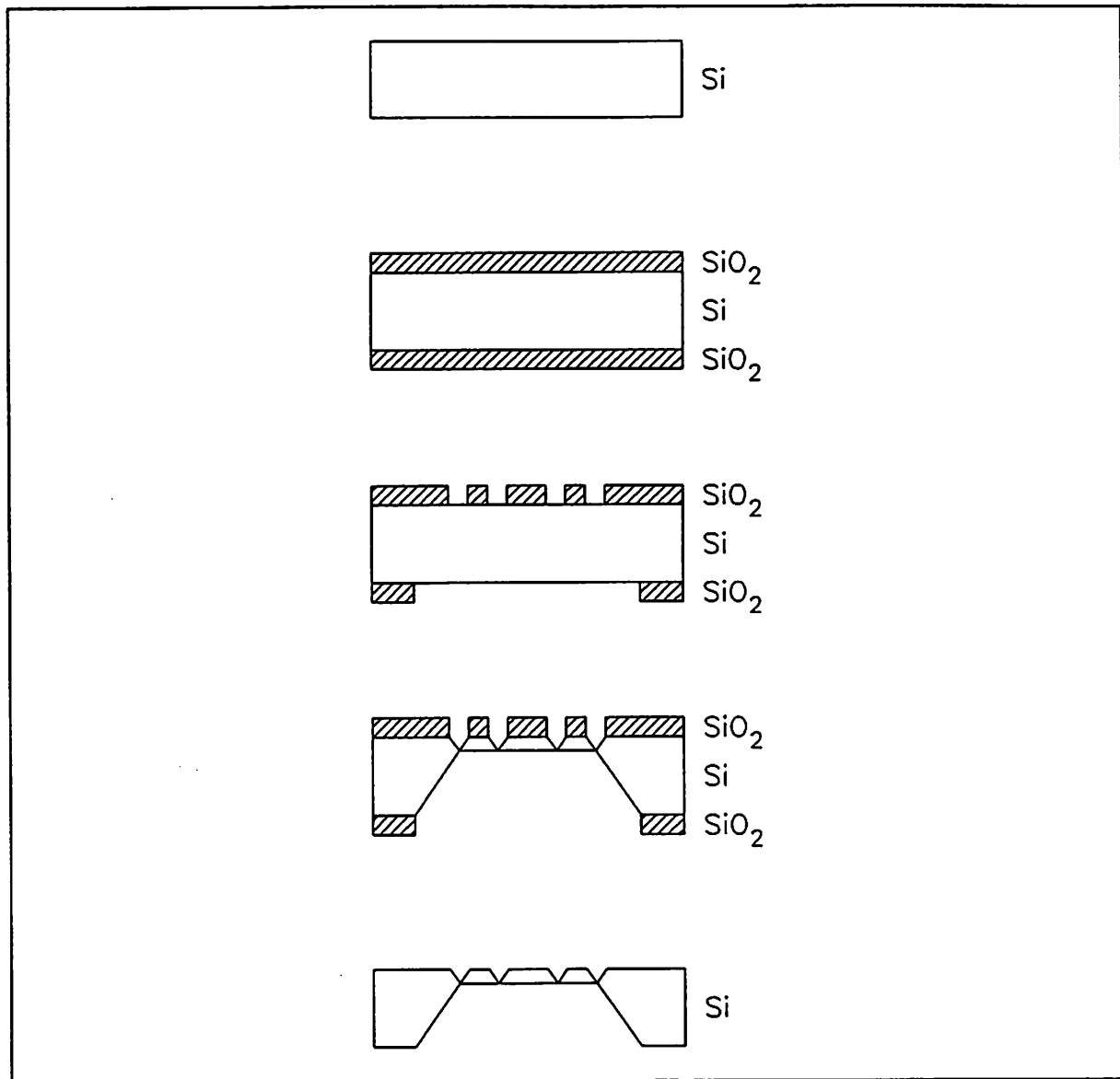




**Abb. 3:** Numerisch berechnete Kraft-Frequenz-Kennlinie der hergestellten Si-Dreifachbalkenstruktur

zen mit KOH-Lösung bilden sich an der Wafervorderseite (in Abb. 4 oben liegend) V-Gräben aus, deren Seitenwände aus sehr langsam ätzenden  $\{111\}$ -Ebenen bestehen, und deren Tiefe durch eine entsprechende Wahl der Grubenbreite an der Waferoberfläche sehr genau bestimmt werden kann. An der Waferrückseite bildet sich eine größere Grube aus, deren Seitenwände ebenfalls aus  $\{111\}$ -Ebenen bestehen, während dessen Boden eine ebene  $\langle 100 \rangle$ -Ätzfront darstellt. Sobald diese Ätzfront die V-Gräben an der Vorderseite erreicht, bilden sich spaltförmige Öffnungen aus, die für eine Separierung der Balken sorgen. Durch optische Kontrolle kann dieser Zeitpunkt sehr genau bestimmt werden, und der Ätzprozeß wird an dieser Stelle abgebrochen. Im letzten Prozeßschritt wird mit gepufferter Flußsäure die Oxidschicht entfernt.

Abb. 5 zeigt in einem Querschliff eine mit dem oben beschriebenen Verfahren hergestellte Struktur. Durch eine Fehljustierung der beiden Masken um etwa  $120\ \mu\text{m}$  sind nur zwei der ursprünglich drei vorgesehenen Balken separiert worden. In Zukunft wird uns ein speziell dafür eingerichtetes Belichtungsgerät zur Verfügung stehen, um diese Fehljustierung bei der beidseitigen Fotolithographie zu vermeiden. In einer Detailaufnahme (Abb. 6) ist einer der Balken vergrößert dargestellt. Durch Anätzen der konvexen Ecken an der Balkenunterseite

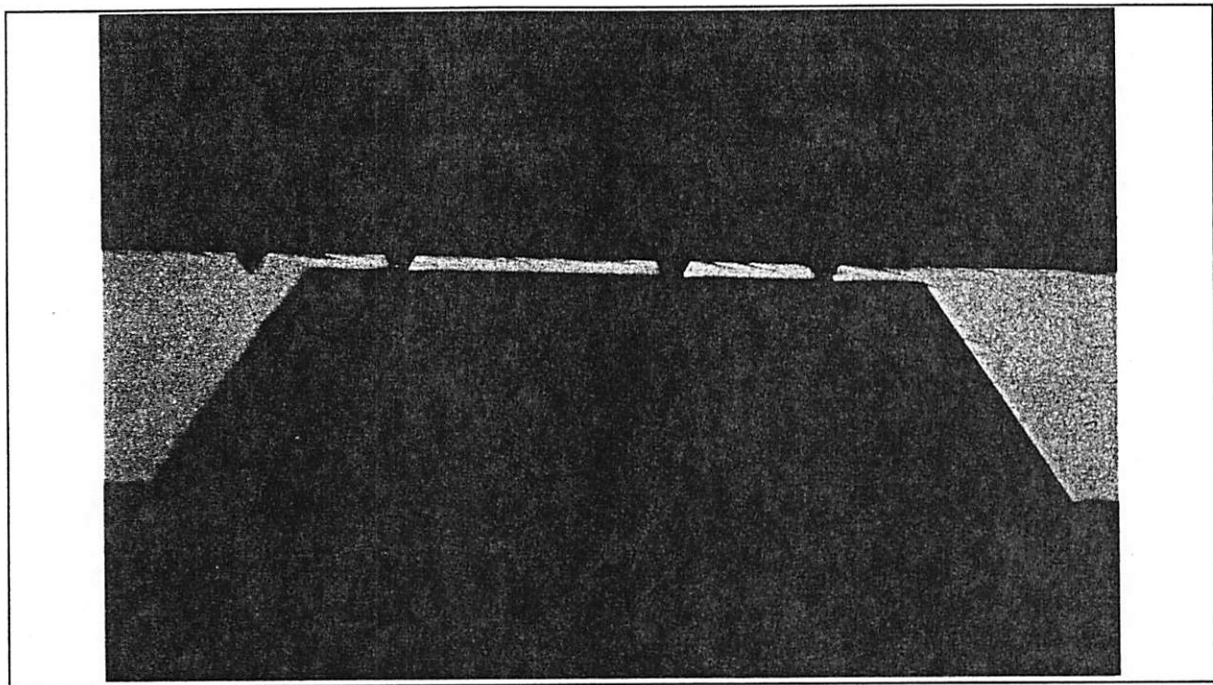


**Abb. 4:** Prozeßabfolge zur Herstellung schwingfähiger Si-Balken

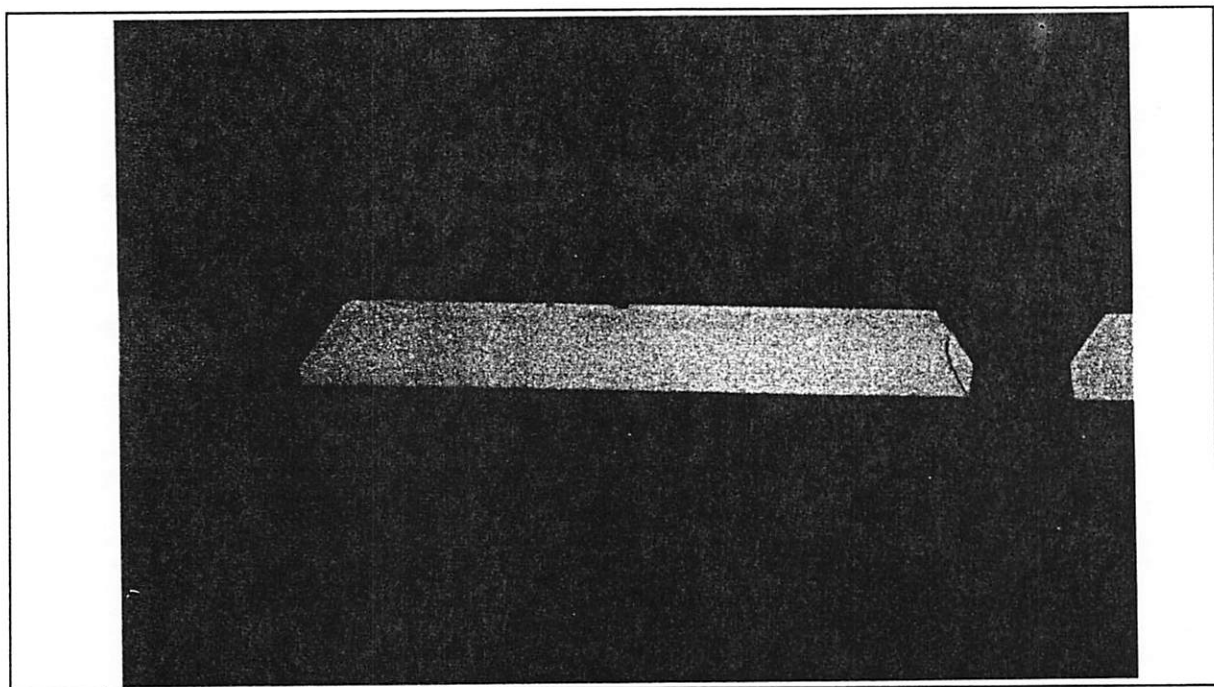
bildet sich eine von der Trapezform abweichenden Form des Balkenprofils aus. In Abb. 7 ist ein einzelner Balken mit den dazugehörigen Dimensionsbezeichnungen in Aufsicht und Querschnitt schematisch dargestellt. Folgende geometrischen Strukturdaten wurden im Experiment verwendet:

$t = 28 \mu\text{m}$ ;  $w = 50 \mu\text{m}, 100 \mu\text{m}, 200 \mu\text{m}, 400 \mu\text{m}$ ;  $l = 1 \text{ mm}, 2 \text{ mm}, 3 \text{ mm}, 4 \text{ mm}$ .

Zur experimentellen Bestimmung der Eigenfrequenzen wurde ein Laboraufbau nach Abb. 8 verwendet. Mit Hilfe einer Piezokeramik, die von einem Funktionsgenerator versorgt wird, werden die Siliziumbalken von unten akustisch zum Schwingen angeregt. Die Detektion der

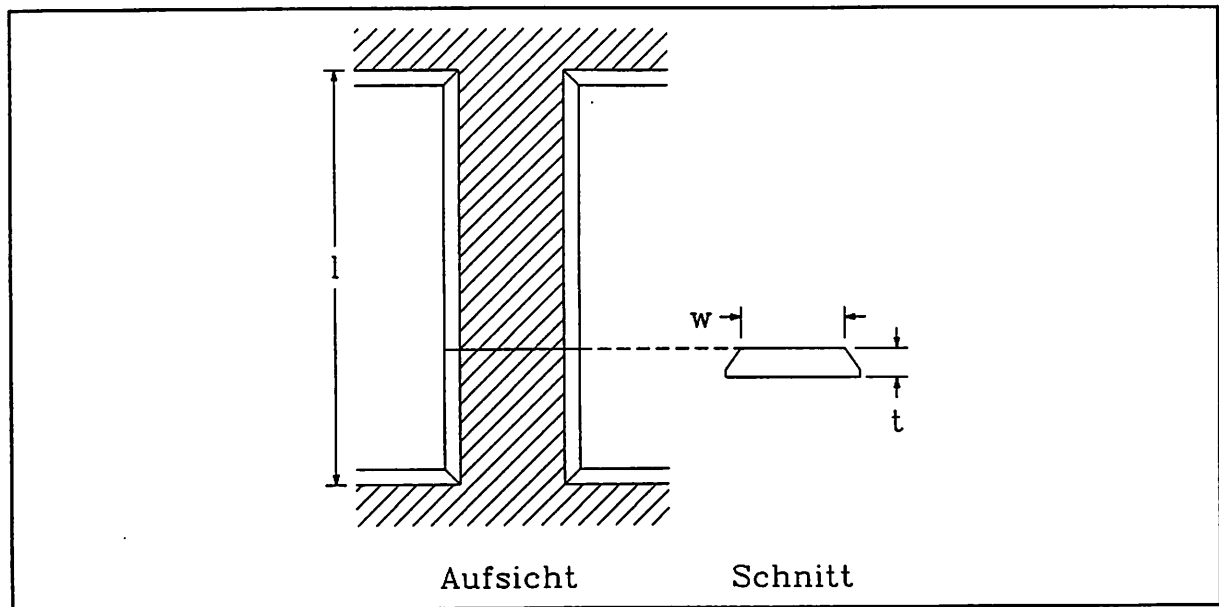


**Abb. 5:** Querschliff der Balkenstruktur aus Silizium



**Abb. 6:** Detailaufnahme eines Balkens im Querschnitt

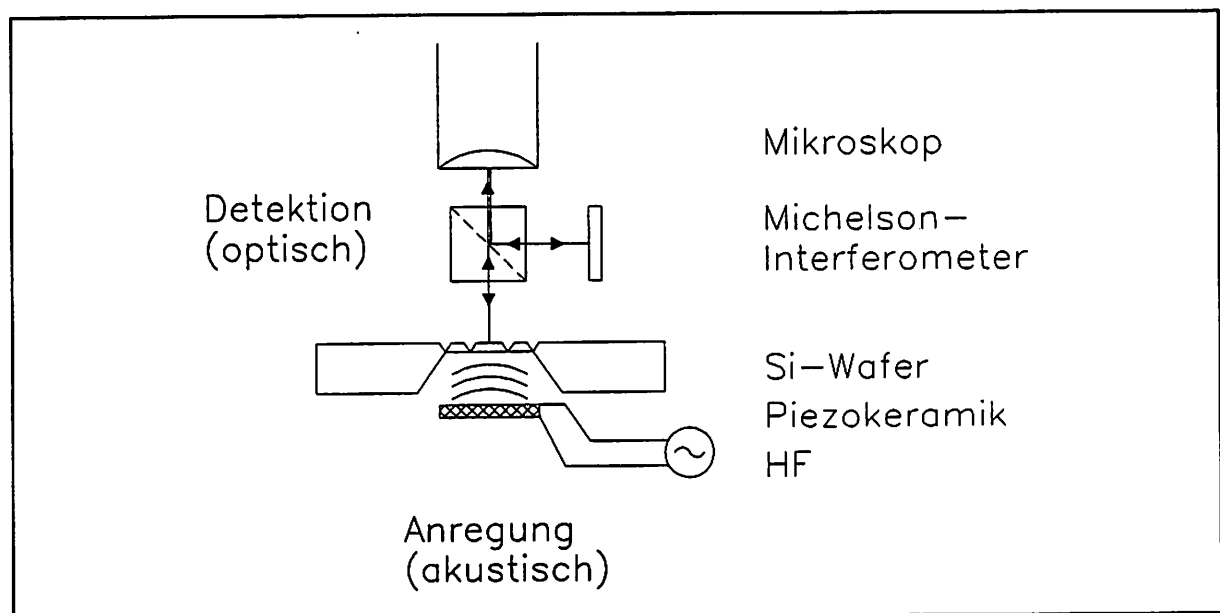
Balkenbewegungen erfolgt mit einer Michelson-Interferometer-Meßeinheit am Inspektionsmikroskop. Bei entsprechender Justierung des Referenzspiegels des Interferometers bezüglich der Waferoberfläche entsteht bei Verwendung von Glühlampenlicht ein farbiges Interferenz-



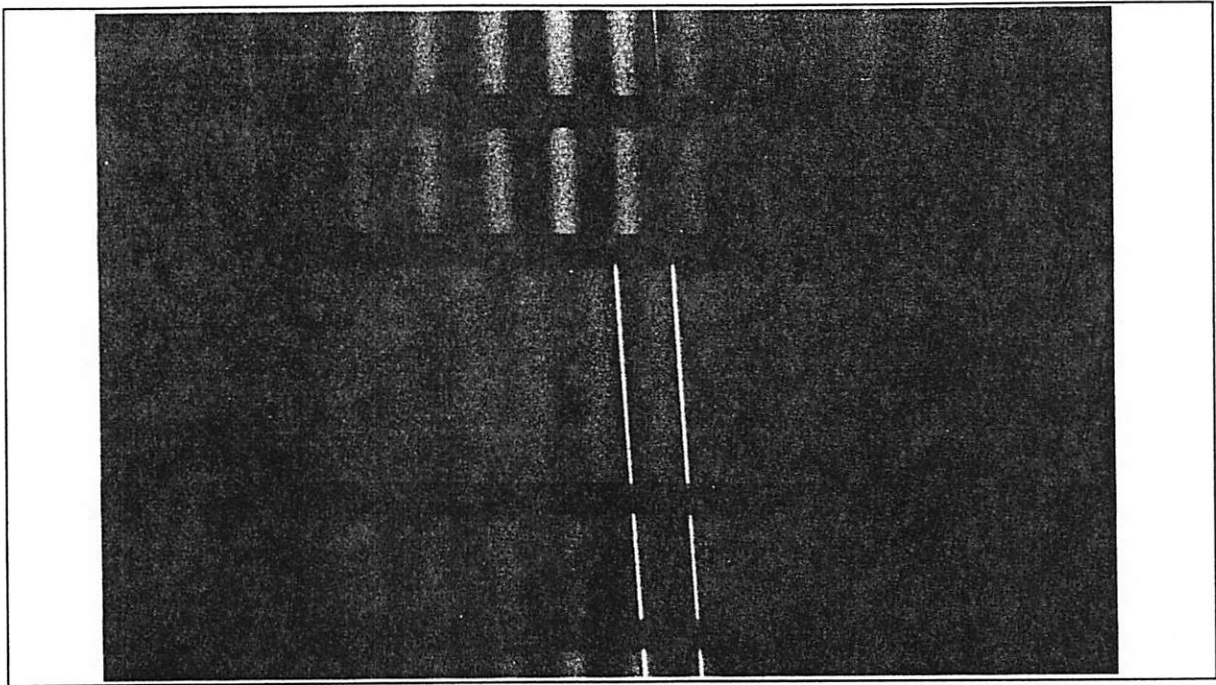
**Abb. 7:** Einzelner Si-Balken in Aufsicht und Querschnitt mit dazugehörigen Dimensionsbezeichnungen

streifenmuster. Im Falle einer Schwingungsresonanz mit Amplituden im Bereich der halben Lichtwellenlänge nimmt der Kontrast der Interferenzstreifen deutlich ab (Abb. 9).

Tab. 2 zeigt die experimentell ermittelten Eigenfrequenzen in Abhängigkeit von der Balken-



**Abb. 8:** Laboraufbau zur experimentellen Ermittlung der Eigenfrequenzen



**Abb. 9:** Aufnahme eines Interferenzmusters einer Dreifachbalkenstruktur in Aufsicht. Der Balken in der Bildmitte und der Balken im Bild unten sind in Resonanz.

länge  $l$  bzw. -breite  $w$  im Vergleich mit den analytisch berechneten Werten. Es ist keine signifikante Abhängigkeit der Eigenfrequenz von der Balkenbreite zu erkennen, so daß der Einfluß des Balkenquerschnitts auf die Eigenfrequenz von untergeordneter Bedeutung ist. In Abb. 10 sind die experimentell bestimmten Frequenzen über dem Kehrwert des Quadrats der Balkenlänge aufgetragen. Die relativen Abweichungen der experimentell bestimmten Frequenzen von den analytisch (s. Gl. 1) bzw. numerisch berechneten Werten betragen zwischen 6,5 % ( $l = 1$  mm) und etwa 12,7 % ( $l = 4$  mm). Diese Abweichungen besitzen folgende mögliche Ursachen:

- 1.) Die Dämpfung der Balken (in Luft) wurde nicht berücksichtigt.
- 2.) Die Einspannung der Balkenenden ist nicht ideal.
- 3.) Die eingesetzten Werte für die Balkendimensionen sind mit Toleranzen behaftet.
- 4.) Das Querschnittsprofil der Balken war nicht ideal rechteckförmig.



| $l \setminus w$ | 50 $\mu\text{m}$ | 100 $\mu\text{m}$ | 200 $\mu\text{m}$ | 400 $\mu\text{m}$ | $f_{0,\text{theor}}^{(100)}$ |
|-----------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|
| 1 mm            | 229              | 230               | —                 | —                 | 214,63                       |
| 2 mm            | —                | 59,7              | 59,8              | 59,5              | 53,66                        |
| 3 mm            | —                | —                 | 27,13             | 27,15             | 23,85                        |
| 4 mm            | —                | —                 | 15,36             | 15,37             | 13,41                        |

$f_{(100)}$   $f_{(100)}$   $f_{(100)}$

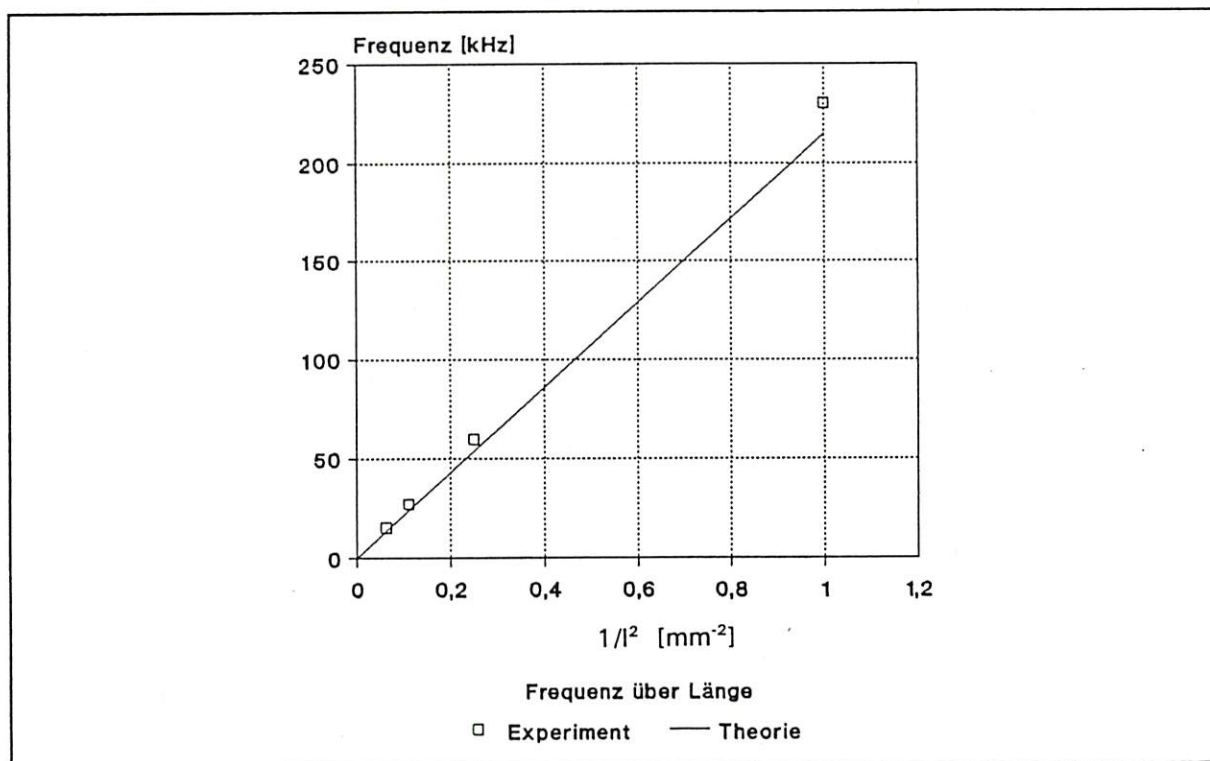
245,4 7%

61,36 3%

27,27 0,5%

15,34 0,2%

**Tab. 2:** Experimentell ermittelte Eigenfrequenzen in Abhängigkeit von der Balkenlänge  $l$  bzw. -breite  $w$  im Vergleich mit den analytisch berechneten Werten  $f_{0,\text{theor}}$  (Angaben in kHz)

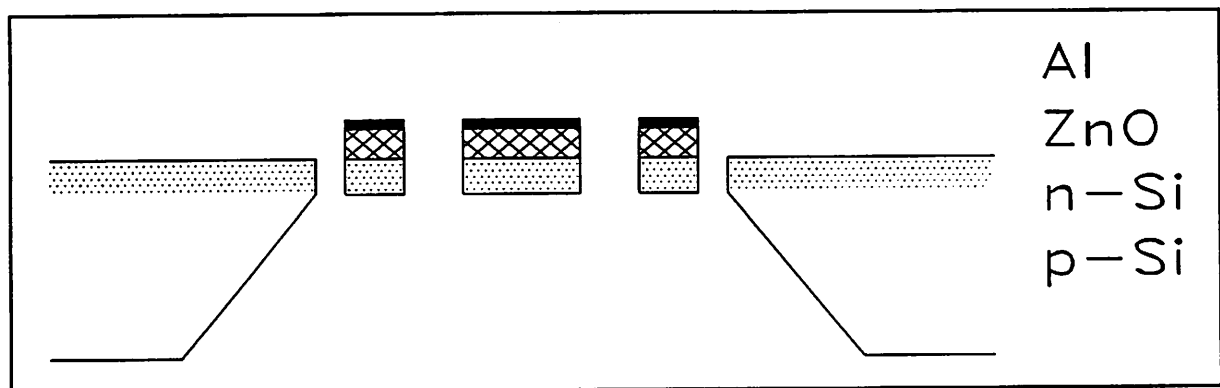


**Abb. 10:** Abhängigkeit der Schwingungsfrequenz vom Kehrwert des Quadrats der Balkenlänge im Vergleich mit den analytischen Werten (Gl. 1)

## b) Entwurf eines Herstellungsprozesses von resonanten Si-Strukturen mit ZnO-Anregung

Im folgenden wird der Entwurf eines Herstellungsprozesses von resonanten Si-Strukturen vorgestellt. Schwingungsanregung und -detektion der Strukturen soll über aufgebraute ZnO-Schichten erfolgen.

Als Ausgangsmaterial dienen (100)-Si-Wafer ( $\phi$  3", niedrig p(Bor)-dotiert ( $10 \Omega\text{cm}$ ), beidseitig poliert). Auf deren Vorderseite wird mittels Phosphordiffusion und anschließend Eintreiben ein ganzflächiger pn-Übergang erzeugt. Dieser dient beim späteren elektrochemischen Tiefenätzen als Ätzstopp, so daß mit der Tiefe der dotierten Schicht die Balkendicke eingestellt wird. Die n-dotierte Si-Schicht bildet zudem die untere Elektrode für die piezoelektrische Schicht. Darauf folgt die Erzeugung von thermischem  $\text{SiO}_2$  auf beiden Seiten des Wafers. An den Bereichen, die später mit ZnO beschichtet werden sollen, wird das Oxid geöffnet. Anschließend erfolgt die Abscheidung von Zinkoxid sowie dessen Strukturierung. Die Vorderseite wird mit Aluminium bedampft, welches ebenfalls strukturiert wird und später als obere Elektrode dient. Der elektrochemische Tiefenätzprozeß findet bei geschützter Vorderseite statt. Im letzten Prozeßschritt erfolgt die Separierung der Balken. Abb. 11 zeigt schematisch einen Querschnitt der Si-Balkenstruktur mit dem Mehrschichten-Aufbau.



**Abb. 11:** Schematische Darstellung einer Si-Dreifachbalkenstruktur mit Schichtaufbau (nicht maßstabsgetreu)