

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: 1.1.1991 - 30.6.1991

Inhalt

I Zusammenfassung

- **Im Berichtszeitraum durchgeführte Arbeiten** S. 3
- **Weiteres konkretes Vorgehen** S. 3

II Einzeldarstellung

1. Theoretische Untersuchungen

- a) **Analytische Berechnungen** S. 4
- b) **Numerische Berechnungen** S. 4

2. Technologie

2.1 Siliziumtechnologie

- a) **Herstellung dünneätzter Dreifachbalkenstrukturen** S. 15
- b) **Abscheiden piezoelektrischer Zinkoxidschichten** S. 16
- c) **Neufestlegung eines Herstellungsprozesses** S. 23

2.2 Quarztechnologie

- a) **Entwicklung eines Belackungschucks für Quarzblanks** S. 24
- b) **Plasmatiefenätzen in Quarz** S. 25

3. Meßtechnik

- a) **Charakterisierung dünneätzter Dreifachbalkenstrukturen
mittels Michelson-Interferometer** S. 26
- b) **Vermessung der Dreifachbalken mit einem Laservibrometer** S. 27

I Zusammenfassung

• Im Berichtszeitraum durchgeführte Arbeiten

Die im letzten Statusbericht vorgestellten Silizium-Dreifachbalkenstrukturen wurden mit wesentlich verbesserter Vorder- zu Rückseitenjustierung nochmals hergestellt. Diese Resonatoren wurden mittels Michelson-Interferometer und Laservibrometer vermessen.

In Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner BOSCH wurden Membranstrukturen vermessen und numerische Berechnungen zur Ermittlung von Zug- und Druckspannungsbereichen in Siliziummembranen und -balken durchgeführt. Die Resonanzfrequenzänderung infolge von Druckbeaufschlagung bei Siliziummembranen wurde simuliert und mit den experimentellen Meßergebnissen korreliert.

Die Entwicklung eines ZnO-Sputterprozesses führte zu ersten piezoelektrisch anregbaren ZnO-Schichten.

In Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner MOTOMETER wurden Druckmembranstrukturen in Quarz im Stuttgarter Labor hergestellt. Für diesen Herstellungsprozeß wie auch für das Plasmatiefenätzen von Quarz im Erlanger Labor war die Herstellung von Spezialchucks aus anisotrop geätztem Silizium notwendig.

• Weiteres konkretes Vorgehen

a) Simulation

- Berechnung verschiedener Stegquerschnitt-Geometrien (3D-Modellierung) und deren Einfluß auf die Eigenschaften von Kraftsensoren.
- Piezoelektrische FE-Berechnungen (Optimierung der Elektrodenformen, Effektivität des Anregungsmechanismus, Optimierung des Dickenverhältnisses ZnO-Schicht/Si-Balken.
- Weitere Optimierung der passiven Resonatorstrukturen (Empfindlichkeit, Schwingungsgüte, Modenselektivität).

b) Technologie

- Ganzflächige Abscheidung von ZnO-Schichten mit nachfolgender photolithographischer Strukturierung
- Erarbeitung eines Prozeßablaufs zur Herstellung von Dreifachbalkenstrukturen. Vorversuche zur Prozeßintegration von ZnO. Evaluierung des Herstellungsprozesses anhand einer Musterstruktur. Optimierung der einzelnen Prozeßschritte.

c) Meßtechnik

- Korrelation der FE-Ergebnisse mit experimentellen Meßergebnissen (Impedance/Gain-Phase-Analyzer, Laservibrometer).

II Einzeldarstellung

1. Theoretische Untersuchungen

a) Analytische Berechnungen

Für die Berechnung der Eigenfrequenz f_0 eines doppelseitig eingespannten Balkens der Länge l , der Breite w und der Dicke t gilt folgender Zusammenhang [Til91]:

$$f_0 \approx 1,028 \frac{t}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho (1-\nu^2)}} \quad (1)$$

Hierbei ist E der E-Modul, ρ die Materialdichte und ν die Poissonsche Querkontraktionszahl. Da der Balken in unserem Fall in $\langle 110 \rangle$ -Richtung ausgerichtet ist, wurden die für diese Kristallrichtung gültigen Materialdaten $E = 1,689 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$ bzw. $\nu = 0,064$ verwendet. Die Dichte ρ beträgt $2,329 \text{ g/cm}^3$.

b) Numerische Berechnungen

Ermittlung von Zug- und Druckspannungsbereichen in Si-Membranen und Si-Balken

Die Anregung resonanter Siliziumstrukturen zu Transversalschwingungen erfolgt durch aufgesputterte ZnO-Schichten, die infolge des piezoelektrischen Effektes Dehnungen und Kontraktionen auf der Bauteiloberfläche erzeugen und somit zu einer Auslenkung der Membran- bzw. Balkenstrukturen führen. Um eine möglichst hohe Anregungseffizienz zu erreichen, ist es wichtig den genauen Spannungsverlauf auf der Bauteiloberfläche zu kennen und durch eine geeignete Elektrodenformgebung sicherzustellen, daß im Bereich von Zugspannungen nur Dehnung, im Bereich von Druckspannungen nur Kontraktion erzeugt wird. Ein wichtiger Designparameter für die Elektrodenauslegung ist der Nulldurchgang des Spannungsverlaufes (d.h. der Übergang von Zug- in Druckspannungsbereiche).

Membrangeometrie:

Ausgehend von einer Membrangeometrie mit halber Seitenlänge von $a = 4.6 \text{ mm}$ wurden verschiedene FE-Modellen berechnet, wobei der Einfluß verschiedener Membrandicken, variabler Druckbeaufschlagung, der Einspannung infolge der ätzbegrenzenden (111)-Ebenen und der Einfluß nichtlinearer Effekte (Spannungsversteifung der Membran) berücksichtigt wurden.

Die FE-Berechnungen ergeben für den Nulldurchgang:

- Membrandickenvariation (100 - 200 μm): (36.9 - 39.8 %) a
- Druckbeaufschlagung (0 - 1 bar): (37.4 - 39.0 %) a
- (111)-Einspannung: (34.6 %) a

In Abb. 1 ist der radiale Spannungsverlauf σ_x entlang der Membranseitenlänge für eine 200 μm dicke Siliziummembran bei einer Druckbeaufschlagung von 1 bar berechnet worden. Die gemessene Auslenkung in Membranmitte betrug 8.45 μm , die FE-Rechnung weicht um etwa 1.6 % von diesem Wert ab. In Abhängigkeit der Vernetzung (Quader- bzw. Tetraederelemente) ergibt sich eine Verschiebung des Spannungsmaximums von der Einspannung in den Membranbereich um 0.1 bis 0.3 mm. Das Spannungsmaximum baut sich nach außen hin zum Einspannungsbereich ab. Die leichten vernetzungsbedingten Unterschiede des Spannungsverlaufes sind durch das unterschiedliche Steifigkeitsverhalten und die Elementauflösung im Einspannungsbereich zu erklären.

Als Ergebnis läßt sich festhalten, daß in einem Bereich von etwa (35 - 40 %) · a keine Elektroden angeordnet werden sollten. Ausgehend von diesen Ergebnissen wurde die Maskenauslegung zur Strukturierung des Zinkoxids und der Aluminiumelektroden vorgenommen und technologisch umgesetzt (siehe Teil 2. Technologie und Bericht des Verbundpartners BOSCH).

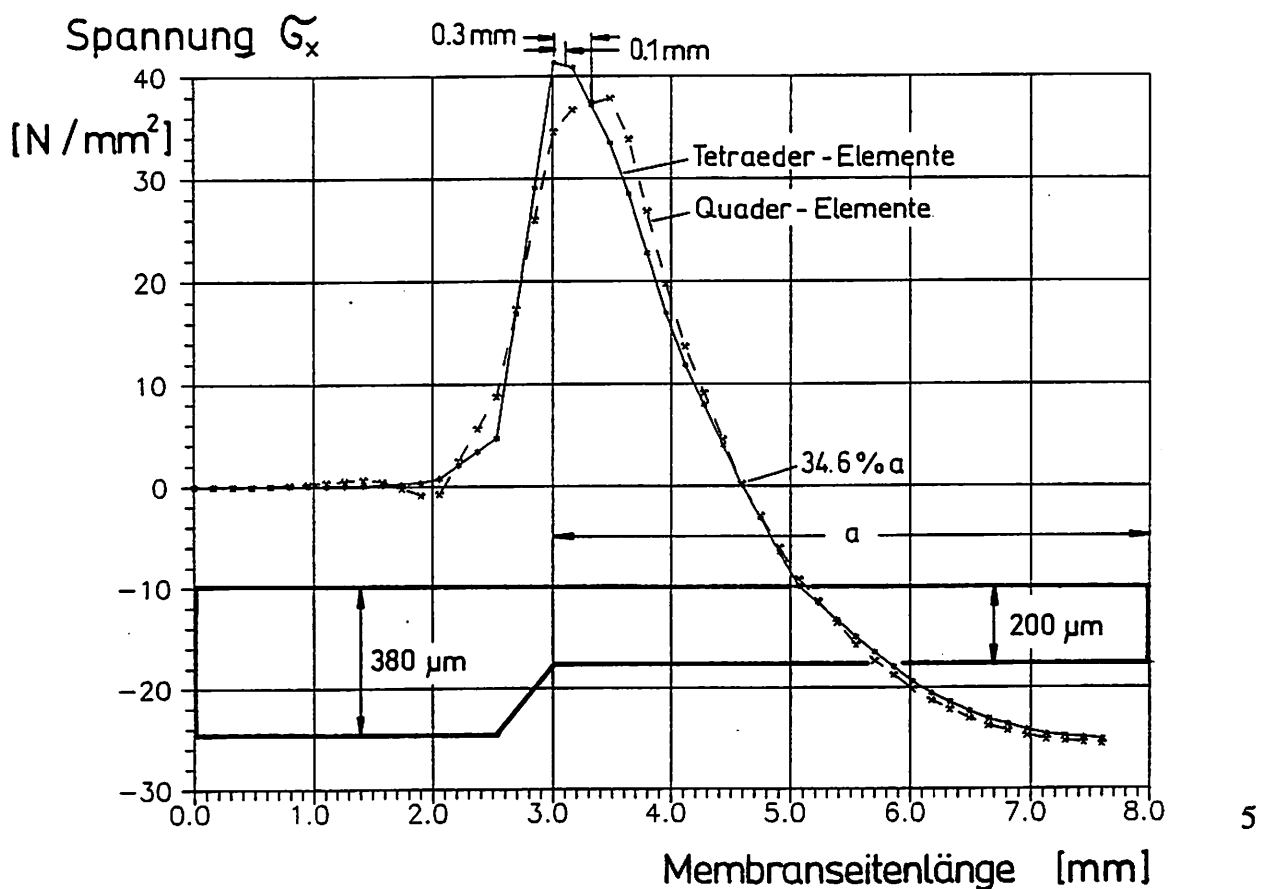


Abb. 1: Einspannungseffekte bei Silizium-Membranen

Balkengeometrie:

Wie im letzten Zwischenbericht angedeutet, eignet sich bei der Dreifachbalkenstruktur der antisymmetrische Schwingungsmodus für die Anwendung als Kraftsensor infolge der inhärenten Schwingungsentkopplung und der damit verbundenen hohen Güte und Meßgrößenauflösung. Um die Anregung der Dreifachbalkenstruktur in diesem Mode zu gewährleisten, müssen die beiden äußeren Balken ($w = 200 \mu\text{m}$) um 180° phasenversetzt zum mittleren ($w = 400 \mu\text{m}$) angesteuert werden. Zur Ermittlung der geeigneten Elektrodengeometrie genügt es einen einzelnen Balken zu betrachten. Die Abmessungen wurden wie folgt gewählt: Länge $l = 3 \text{ mm}$, Breite $w = 400 \mu\text{m}$ und Dicke $t = 25 \mu\text{m}$. Die FE-Berechnungen ergeben, daß sich infolge der Biegebeanspruchung der Nulldurchgang des Spannungsverlaufes σ_x in Balkenlängsrichtung bei etwa $(25 \%) \cdot l$ einstellt.

Eigenfrequenzen und Schwingungsformen

In den ersten beiden Zwischenberichten des Forschungsvorhabens hat bereits der Verbundpartner MotoMeter dynamische FE-Berechnungen an Quarzmembranen durchgeführt und die möglichen Schwingungsmoden ermittelt. Gegenüber Silizium weist einkristalliner Quarz aufgrund des komplexeren Kristallaufbaus ein komplizierteres Modenspektrum auf, so daß z.B. auch Dickenscherschwingungen bei Quarzmembranen auftreten können. Bei den hier betrachteten Silizium-Membranen interessieren jedoch lediglich die Biegeschwingungen (transversal aus der Membranebene heraus) und deren Oberschwingungen, da nur sie für die Drucksensorapplikation in Frage kommen.

Bei den FE-Berechnungen wurden für die Materialdaten von Silizium folgende Werte verwendet: E-Modul $E_{110} = 1.689 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$, Poissonsche Querkontraktion $\nu = 0.064$, Dichte: $\rho = 2,329 \text{ g/cm}^3$, deren Gültigkeit durch Vergleich von berechneten Membranauslenkungen mit experimentellen Messungen verifiziert werden konnten. Mit verschiedenen FE-Modellansätzen (Schalen-, Volumenelemente, Berücksichtigung der (111)-Einspannung) wurden die Eigenfrequenzen und Oberwellen von quadratischen Membranen ($a = 4.6 \text{ mm}$) ermittelt.

Analytisch gilt für die Resonanzfrequenz der Grundbiegeschwingung einer quadratischen, voll eingespannten, homogenen Platte [You59], unter der Annahme, daß sie unverspannt und elastisch isotrop ist:

$$f = \frac{36}{8\pi\sqrt{12}} \frac{h}{a^2} \sqrt{\frac{E}{(1-\nu^2)\rho}} \quad (2)$$

wobei E = E-Modul, ν = Querkontraktion, ρ = Dichte, h = Membrandicke, a = halbe Seitenlänge ist.

Folgende Tabelle enthält die Gegenüberstellung zwischen analytisch berechneten Resonanzfrequenzen f_{theor} und den numerischen Werten f_{FEM} eines einfachen FE-Modells mit Schalenelementen. Die Differenz der Werte beträgt jeweils etwa 0.2 %.

Dicke h	25 μm	50 μm	100 μm	150 μm	200 μm
f_{theor} [kHz]	4.169	8.338	16.675	25.013	33.351
f_{FEM} [kHz]	4.161	8.321	16.642	24.963	33.284

Die höheren Biegeschwingungen lassen sich bereits mit diesem einfachen Schalenmodell berechnen. In Abb. 2 sind die möglichen Schwingungsformen schematisch dargestellt. Wie erwartet stellen sich bei höheren Schwingungsmoden zunehmend mehr Knotenlinien (mit entsprechenden Schwingungsminima und -maxima) ein, wobei einige Schwingungsmoden theoretisch entartet sein sollten. In der Realität treten diese Schwingungsmoden jedoch infolge der Kristallanisotropie, der Membranhomogenitäten und nicht idealen Einspannungsbedingungen getrennt auf. Die Eigenfrequenzen f_i der höheren Oberschwingungen (i = Mode) lassen sich als ein Vielfaches der Resonanzfrequenz f_1 der Grundschwingung beschreiben:

$f_i = c_i \cdot f_1$, wobei für die Frequenzvielfachen c_i gilt ($i = 1 - 10$):

$c_i \approx 1.00 / 2.04 / 2.04 / 3.00 / 3.65 / 3.67 / 4.57 / 4.57 / 5.84 / 5.85$

Deutlich sieht man, daß sich die Moden 2 und 3, 5 und 6, 7 und 8 sowie 9 und 10 in ihren Resonanzfrequenzen kaum unterscheiden und die theoretisch entarteten Schwingungsmoden darstellen. Der 6. Mode mit $c_6 = 3.67$ stellt die erste Oberschwingung (Amplitude in Membranmitte ungleich null) zur Grundschwingung dar. Weiterhin wurden Vergleichsrechnungen mit Volumenelementen bei Membrandicken von 100 μm und 200 μm durchgeführt.

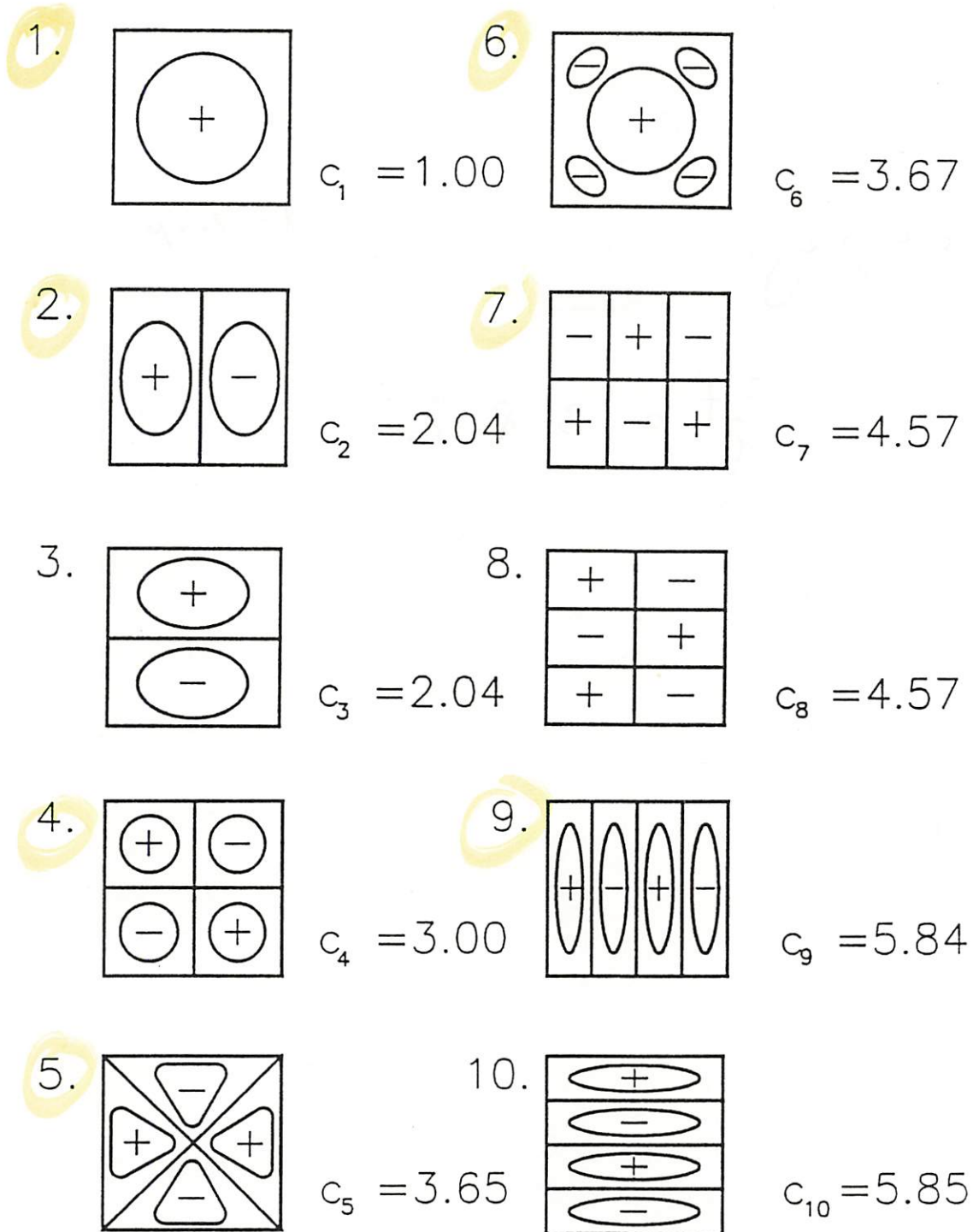
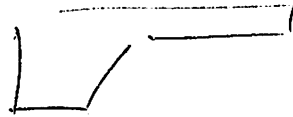


Abb. 2: Transversale Schwingungsmoden einer Silizium-Membran

Die Berechnungen ergaben als Mittelwerte für die Frequenz der Grundbiegeschwingung gute Übereinstimmung mit den analytischen Abschätzungen. Das Frequenzvielfache der ersten Oberschwingung c_6 stimmt gut mit dem des einfachen Schalenmodells überein.

Rand's space:



$$d = 200 \mu$$

$$\frac{\Delta f}{f} \approx 3.8 \%$$

Die zweite Oberschwingung stellt sich erst beim zwölften Schwingungsmode ein:

Dicke h	f_1 [kHz]	c_6	c_{12}
100 μm	16.688	3.71	6.12
200 μm	33.291	3.69	-

Um den Einspannungseffekt durch die Si(111)-Ebene zu ermitteln wurde ein rechenaufwendiges FE-Modell mit 2243 Volumenelementen (4594 Knoten, 500 Freiheitsgrade) erstellt und berechnet. Die Membrandicke h betrug 200 μm , die halbe Seitenlänge $a = 4.6$ mm, der Einspannungsbereich erstreckte sich über 3 mm. Für die Resonanzfrequenz ergab sich ein Wert von $f_1 = 32.062$ kHz. Dieser Frequenzwert fällt infolge der Verminderung der Einspannungssteifigkeit gegenüber dem Schalenmodell um etwa 4 % geringer aus. Die Frequenzvielfachen c_6 und c_{12} ergeben sich zu 3.67 und 6.09 für die beiden ersten Oberschwingungen. Ein Vergleich der FE-Berechnungen mit experimentellen Messungen an ZnO-beschichteten Silizium-Membranen ist im Bericht des Verbundpartners BOSCH zu finden. Als Ergebnis kann man festhalten, daß die Resonanzfrequenz der Grundschiwingung für idealisierte Membranen sich gemäß Gleichung (2) ermitteln läßt. Für die Abschätzung der beiden ersten Oberschwingungen gilt in erster Näherung $c_6 \approx 3.7$ und $c_{12} \approx 6.1$.

Resonanzfrequenzänderung infolge Druckbeaufschlagung bei Si-Membranen

Die Frequenzänderung bei resonanten Membranen und Balken läßt sich auf die Änderung der mechanischen Spannung im Resonator zurückführen, die zu einer Änderung der Resonatorsteifigkeit führt. In den vorangegangenen Zwischenberichten sind die Eigenschaften von schwingenden Balkenresonatoren und deren Einsatz als Kraftsensor eingehend untersucht worden. Aufgrund einer einwirkenden axialen Zug- bzw. Druckkraft erhöht bzw. erniedrigt sich die Resonanzfrequenz eines Biegebalkens entsprechend. Bei Membranen ist ein ähnlicher Effekt zu erwarten, sofern sich entsprechend große Membranspannungen im Innern aufbauen und zu einer Spannungsversteifung führen. Dieser Effekt ist allerdings stark von der Membranauslenkung abhängig, die bei geringer Druckbeaufschlagung in erster Näherung als proportional zum Druck angenommen werden kann. Im höheren Druckbereich ist das nichtlineare Verhalten abhängig von dem Verhältnis der Membranauslenkung zur Membrandicke, der Membraneinspannbedingungen und einer eventuellen Membranvaspannung.

Gemäß [Tim55] lässt sich die Resonanzfrequenzänderung einer Membran infolge Auslenkung bei Druckbeaufschlagung beschreiben durch:

$$f = f_0 \sqrt{1 + \text{const} \left(\frac{d}{h} \right)^2} \quad (3)$$

wobei f_0 = Resonanzfrequenz der unbelasteten Membran, d = Membranauslenkung, h = Membrandicke ist.

Der konstante Faktor unter dem Wurzelzeichen ist abhängig von der Membrangeometrie, den Randbedingungen und der Biegesteifigkeit der Membran. Für eine runde, voll eingespannte Membran gilt: $\text{const} = 1.464$. Für sehr dünne Membranen ist die Membranauslenkung allerdings extrem nichtlinear. Unter Zugrundelegung der vom Verbundpartner BOSCH hergestellten und vermessenen $25 \mu\text{m}$ dicken Siliziummembran ($a = 4.6 \text{ mm}$) wurde die druckabhängige Auslenkung berechnet. In Abb. 3 ist für einen Druckbereich bis 150 mbar die Auslenkung der Membran aufgetragen. Bei einem Druck von 100 mbar beträgt die Auslenkung in Membranmitte bereits ein dreifaches der Membrandicke ($\approx 74 \mu\text{m}$) und die maximale Biegespannung an der Oberfläche beträgt etwa 79 N/mm^2 , die maximale Zugspannung in der "neutralen Faser" etwa 30 N/mm^2 .

Membranauslenkung

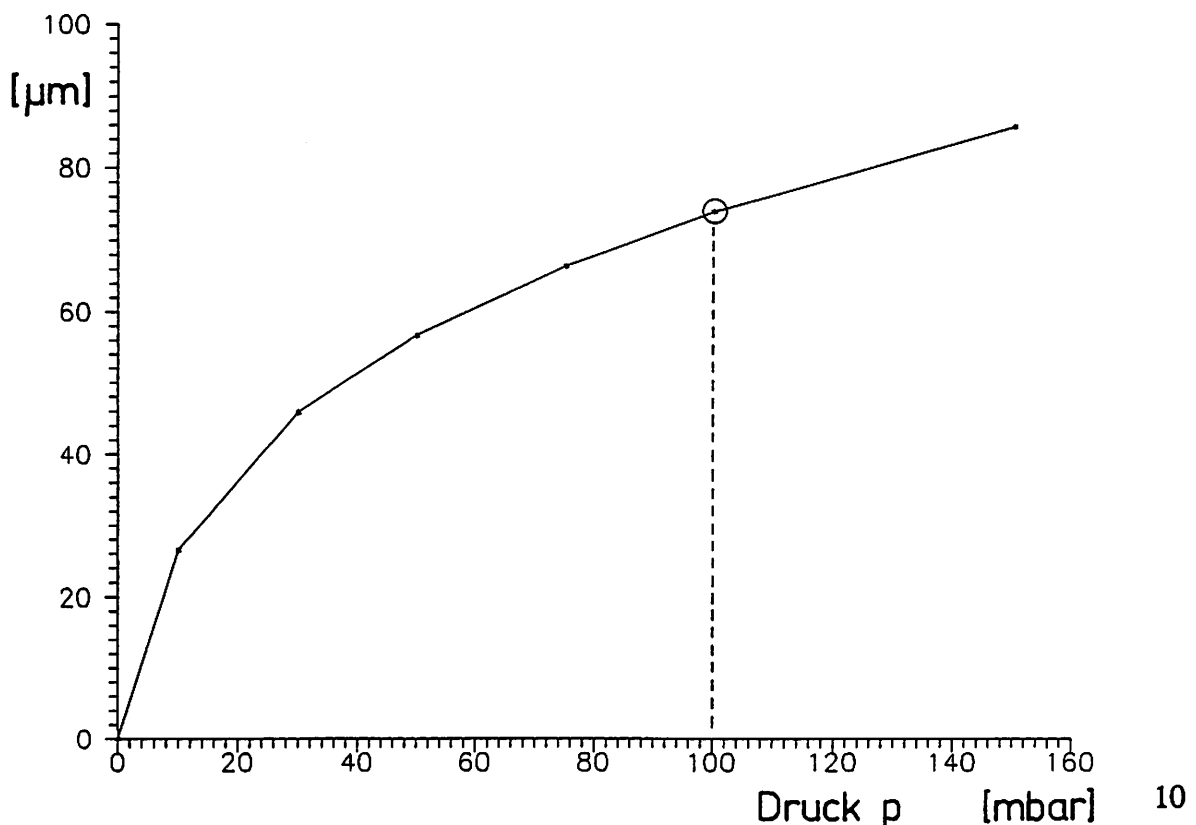


Abb. 3: Nichtlineare Membranauslenkung infolge Druckbeaufschlagung

Diese enormen Zugspannungen im Membraninnern bewirken nun eine hohe Spannungsversteifung der Membran infolge der großen Auslenkung und führen zu einer erheblichen Änderung der Resonanzfrequenzen. In Abb. 4 sind die Druck-Frequenz-Kennlinien für die Grundschiwingung und die ersten beiden Oberschwingungen graphisch aufgetragen. Die Frequenzverschiebung ist für den Grundmode maximal. Die Größenordnung liegt bei allen drei Schwingungsmoden etwa bei 10 kHz pro 100 mbar. Betrachtet man die Frequenzverschiebungen der beiden höheren Moden, so sieht man, daß die Frequenzvielfachen c_6 und c_{12} mit zunehmendem Druck kleiner werden, d.h. die Resonanzpeaks der Oberschwingungen werden im Amplitudenspektrum weniger verschoben als die Grundresonanz. Bei der Auswertung der experimentell gemessenen Amplitudenspektren von Silizium-Membranen unter Druckbeaufschlagung konnte dieser Effekt nachgewiesen werden. Zusätzlich änderten sich die Amplitudenverhältnisse der einzelnen Resonanzpeaks bei steigendem Druck, so daß eine eindeutige Zuordnung der Schwingungsmoden erschwert wurde. Ein Vergleich der FE-Berechnungen mit den durchgeführten Messungen zeigt eine gute Übereinstimmung. Der Berstdruck wurde experimentell zu etwa 150 mbar bestimmt.

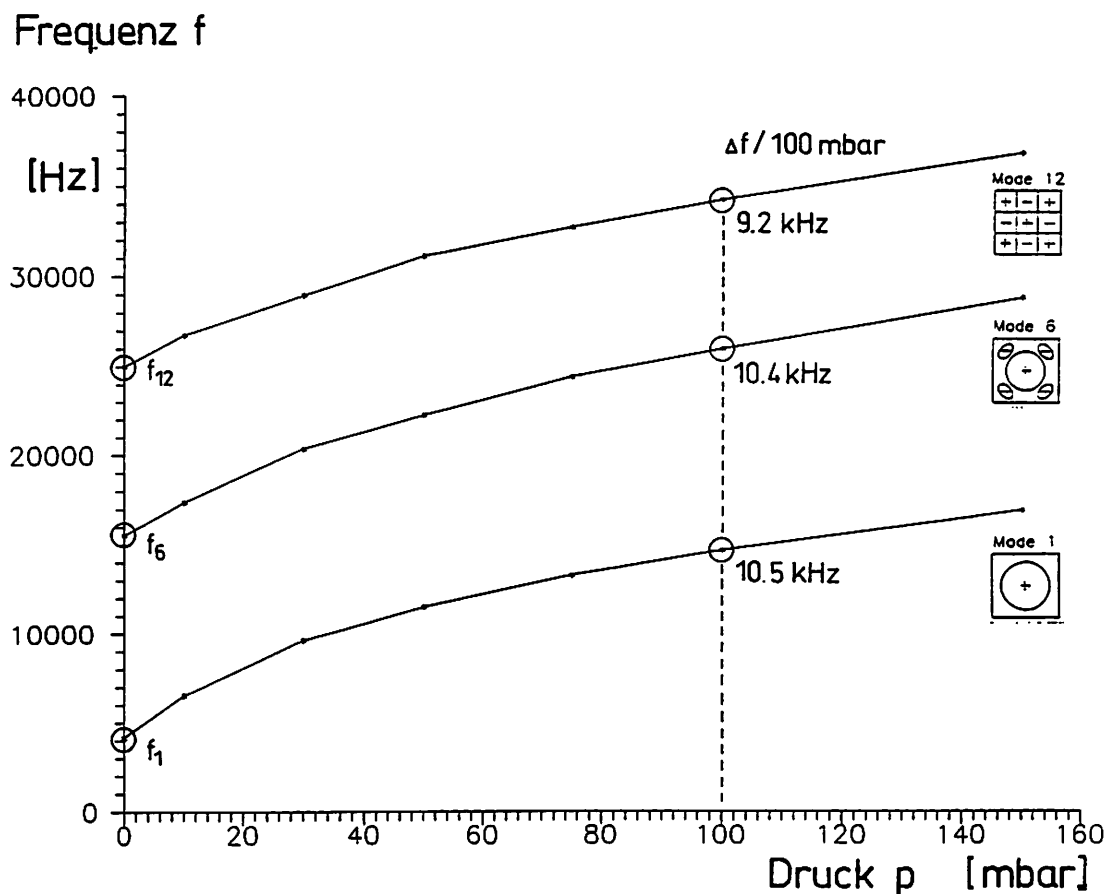


Abb. 4: Eigenfrequenzänderungen infolge Druckbeaufschlagung

Nachfolgende Tabelle faßt die Ergebnisse der FE-Berechnungen zusammen:

Druck p	0 bar	.01 bar	.03 bar	.05 bar	.075 bar	.1 bar	.15 bar
f_1 [kHz]	4.174	6.549	9.637	11.528	13.314	14.698	16.914
c_6	3.72	2.66	2.11	1.93	1.83	1.78	1.70
c_{12}	≈ 6.1	4.09	3.00	≈ 2.67	2.46	2.33	2.17

Angaben über das zugrundeliegende FE-Modell:

- Anzahl Elemente: 400 (Schalenelemente, 4-knotig)
- Anzahl Knoten: 441
- Anzahl Freiheitsgrade: 300 (MDOF)
- nichtlineare Option: Membranversteifung und große Auslenkung
- Anzahl Iterationen: ca. 6-7 pro Belastungsschritt.

Piezoelektrische Berechnungen

Für eine effiziente piezoelektrische Anregung von Siliziumbalken durch ZnO-Schichten ist außer der Kenntnis der geeigneten Elektrodenformen auch das optimale Verhältnis von ZnO-Schichtdicke zu Siliziumbalken-Dicke wichtig. Der elektromechanische Kopplungsfaktor k_{eff} ist ein Maß für die Güte der Energieeinkopplung von elektrischer Energie in mechanische Schwingungsenergie. Eine Möglichkeit der Bestimmung dieser Kopplungsfaktoren besteht in der Vermessung des frequenzabhängigen Impedanzverlaufes (siehe 2. Zwischenbericht: Quarzmeßtechnik). Der effektive Kopplungsfaktor k_{eff} eines piezoelektrischen Resonators ergibt sich näherungsweise zu [VIB81]:

$$k_{\text{eff}} = \sqrt{2 \frac{f_a - f_r}{f_a}} \quad (4)$$

wobei f_a = Antiresonanzfrequenz (Leerlaufbedingung), f_r = Resonanzfrequenz (Kurzschlußbedingung) ist.

Ziel der piezoelektrischen FE-Berechnung ist die Berechnung der Sensoreigenschaften und die Auslegung der Sensorstrukturen unter Einschluß der Kopplung der mechanischen Größen (Verschiebungen: UX, UY, UZ) und der elektrischen Größen (Potential, Ladungen).

Zur Entwicklung eines geeigneten FE-Modells und zur Verifikation der piezoelektrischen Berechnungsmöglichkeiten wurde eine Bimorph-Membran (Silizium-Membran mit aufgeklebter Piezokeramik) ausgewählt. Hierzu lagen experimentelle Messungen vor (siehe Bericht des Verbundpartners BOSCH). Genaue Angaben zu Materialdaten sind in [VIB81] zu finden. Gegenstand der piezoelektrischen FE-Berechnungen war eine Modalanalyse zur Ermittlung der Eigenfrequenzen und Schwingungsformen, die Frequenzverschiebung infolge einer Druckbeaufschlagung und die Berechnung des frequenzabhängigen Impedanzverlaufes zur Bestimmung der Frequenz f_r und f_a sowie der elektromechanischen Kopplungsfaktoren $k_{\text{eff},i}$ für die verschiedenen Schwingungsmoden.

Angaben zum piezoelektrischen FE-Modell der Bimorph-Membran:

- halbe Membranseitenlänge: $a = 4.6 \text{ mm}$
- Dicke der Silizium-Membran: $h_{\text{Si}} = 20 \text{ }\mu\text{m}$
- Dicke der Piezokeramik: $h_{\text{piezo}} = 200 \text{ }\mu\text{m}$
- Materialdaten: Silizium (isotrop),
Piezokeramik VIBRIT 420 (anisotrop)
- Anregungsspannung: $U = 1 \text{ V}$
- mechanische Schwingungsgüte: $Q \approx 1000$
- Dielektrische Dämpfung: vernachlässigt
- ganzflächige Elektrodenform: Unter- und Oberseite der Piezokeramik
- Anzahl Volumenelemente: 200 (Multi-Field-Elemente)
- Anzahl Knoten: 363
- Gesamtzahl Freiheitsgrade: 300 (MDOF)
- flache Membraneometrie (1/4 Modell) ohne (111)-Einspannung

In Abb. 5 ist der berechnete Impedanzverlauf der Bimorph-Membran von 0 bis 100 kHz dargestellt. Drei ausgeprägte Schwingungsmoden ($f_i \approx 11.5, 47.75, 83.25 \text{ kHz}$), deren elektromechanische Kopplungsfaktoren mit zunehmender Frequenz abnehmen ($k_i \approx 0.29, 0.22, 0.16$), sind in der Abb. zu erkennen. Die mechanischen Schwingungsamplituden betragen etwa 2.4, 2.5 und 0.5 μm . Ein Vergleich der FE-Berechnungen mit den experimentellen Messungen des Verbundpartners BOSCH liefert trotz des relativ einfachen Modellansatzes gute Übereinstimmung. Bei einer Druckbeaufschlagung von 400 mbar ergab sich eine Frequenzverschiebung des Grundschwingungsmodes von 426 Hz (gemessen: 595 Hz). Dies

entspricht einer Abweichung von etwa 28 %.

Ergebnis: Die piezoelektrischen Berechnungen erlauben die Modellierung der piezoelektrischen Anregung und die Evaluierung der Geometrieinflüsse, der Randbedingungen sowie der Materialdaten (mechanische und elektrische) bei Bimorph-Strukturen. Die dynamischen Eigenschaften (Resonanzfrequenzen) des Systems werden bereits mit einem einfachen FE-Modell sehr gut beschrieben. Die Abweichung von 28 % in der druckabhängigen Frequenzverschiebung ist auf das Fehlen der nichtlinearen Option LARGE DEFLECTION beim Multi-Field-Element STIF5 zurückzuführen.

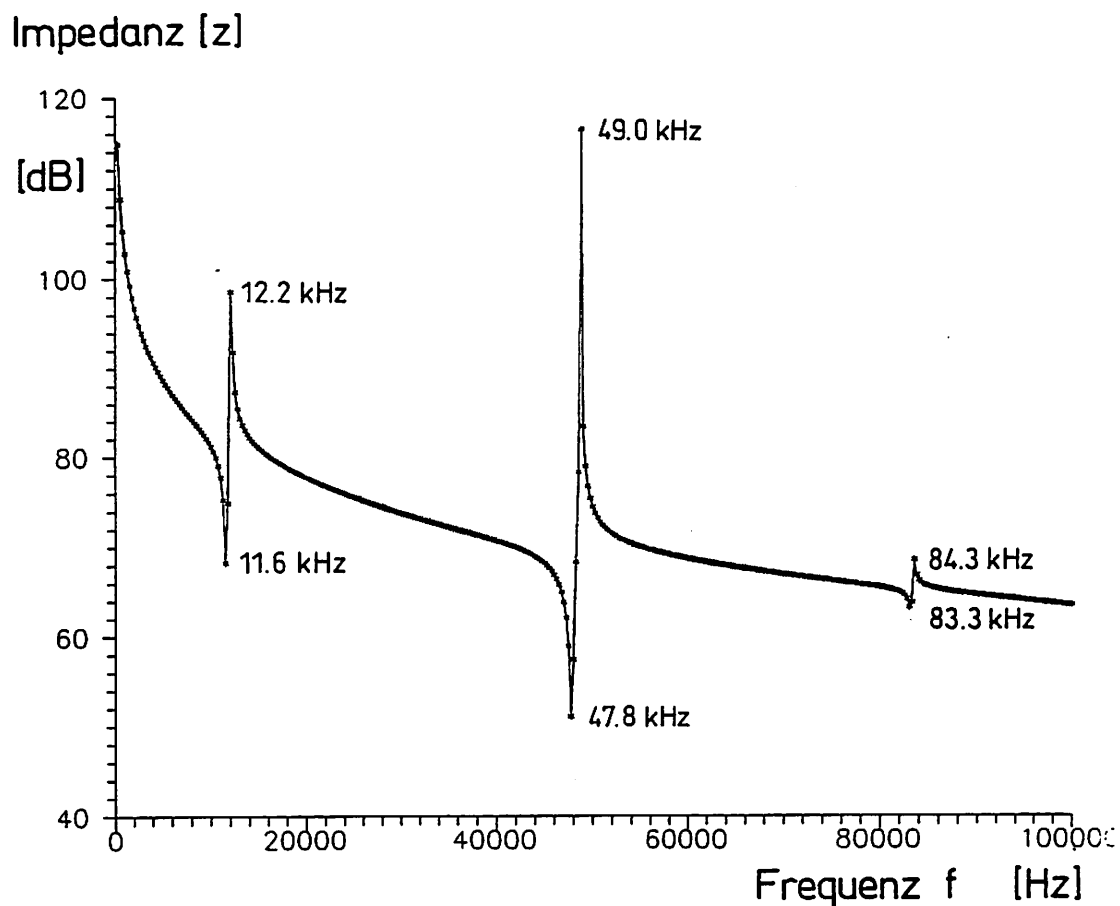


Abb. 5: Impedanzverlauf einer piezoelektrisch angeregten Bimorph-Membran

2. Technologie

2.1 Siliziumtechnologie

a) Herstellung und Charakterisierung dünngeätzter Dreifachbalkenstrukturen

Mit Hilfe des im letzten Zwischenbericht eingehend beschriebenen Verfahrens wurden weitere schwingfähige Balken aus Silizium hergestellt. Im Gegensatz zu den letzten Versuchen wurde die Belichtung der Waferrückseite mit speziellen Belichtungsgeräten (Süss MA 6 mit Infrarotbeobachtungseinrichtung und ET-AL6-2) durchgeführt, die auf optischem Weg eine genaue Vorder- zu Rückseitenbelichtung ermöglichen. Somit konnte die bei den ersten Versuchen aufgetretene Fehljustierung vermieden werden, d. h. es konnten sich Dreifachbalkenstrukturen ausbilden. Abb. 6 zeigt in einer REM-Aufnahme eine Dreifachbalkenstruktur von der Rückseite. Die geometrischen Strukturdaten der Balken stimmen in ihrer Breite w und in ihrer Länge l mit denen der ersten Versuche überein:

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

Für die Balkendicke t wurden die Werte $31 \mu\text{m}$ und $12,5 \mu\text{m}$ gewählt.

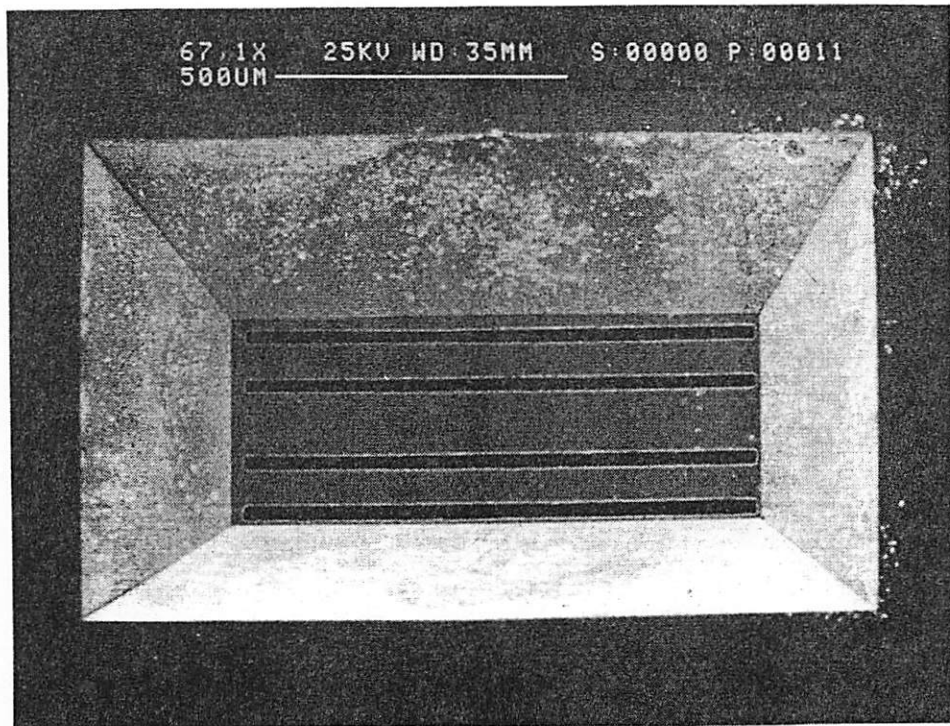


Abb. 6: Silizium-Dreifachbalkenstruktur, von der Rückseite gesehen (REM-Aufnahme). Balkendimensionen: $l = 1 \text{ mm}$, $t = 31 \mu\text{m}$, $b = 50/100/50 \mu\text{m}$.

b) Abscheiden piezoelektrischer Zinkoxidschichten

Eine starke Anisotropie der Wachstumsraten kann bei ZnO während der Abscheidung zu stark orientierten polykristallinen Schichten führen. Obwohl diese Schichten nicht einkristallin sind, führt die Gleichmäßigkeit der Orientierung bei optimierten Abscheidungsbedingungen zu piezoelektrischen Kenngrößen, die 85 % der Werte einkristalliner Elemente erreichen können [Heu89]. Die hexagonale Kristallstruktur von ZnO ist vom Wurtzit-Typ (Abb. 7). Die Kristallklasse ist 6mm.

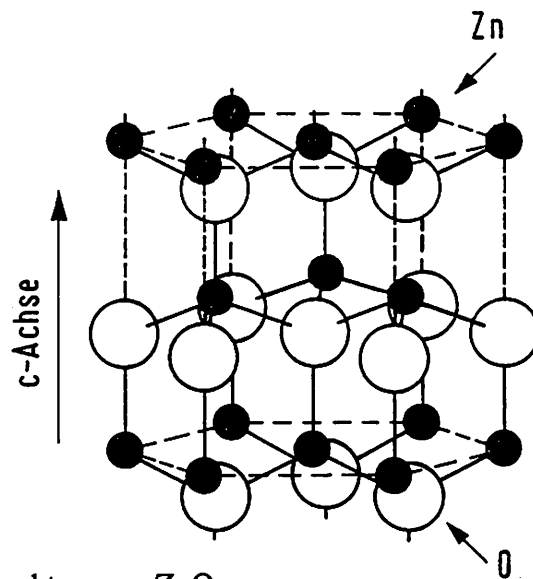


Abb. 7: Wurtzitstruktur von ZnO

Die piezoelektrischen Koeffizienten von ZnO sind:

$$d_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -8,3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -8,3 & 0 & 0 \\ -5 & -5 & 12,4 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \times 10^{-12} [\text{C/N}] \equiv [\text{m/V}].$$

Eine quantitative Aussage über die Effektivität eines piezoelektrischen Elements ist durch die Angabe des piezoelektrischen Kopplungsfaktors, der die elektrische und die mechanische Energiedichte W_{el} bzw. W_{mech} miteinander verknüpft, möglich. Der longitudinale Kopplungsfaktor K_L (elektrisches HF-Feld \parallel zur c-Achse des Kristallits angelegt) beträgt beim ZnO $\approx 0,45$ [Heu89] - $0,48$ [Ike90]. Der transversale Kopplungsfaktor K_Q (elektrisches HF-Feld senkrecht zur c-Achse) beträgt $0,34$. Verglichen mit dem klassischen Material Quarz ist der piezoelektrische Effekt für ZnO-Schichten stark ausgeprägt. Zur Anregung/Detektion

von dünnen Siliziumbalken wird der piezoelektrische Transversaleffekt ausgenutzt.

Dies zeigt Abb. 8 in einer Plausibilitätsbetrachtung: werden die ZnO-Kristallite in einer Vorzugsrichtung senkrecht zur Substratebene aufgewachsen, so wird z.B. bei einem angelegten E-Feld von $1 \text{ V}/\mu\text{m}$ in x_3 -Richtung (\parallel c-Achse) eine Verlängerung (bzw. Kontraktion) $\epsilon_3 (= \Delta l/l) = d_{33} E_3 = 12,4 \times 10^{-6}$ und eine Kontraktion (bzw. Verlängerung) $\epsilon_1 = \epsilon_2 = d_{31} E_3 = -5 \times 10^{-6}$ in x_1 - bzw. x_2 -Richtung bewirkt. Legt man in x_3 -Richtung eine Dimension von $3 \mu\text{m}$ ZnO-Schichtdicke in Relation zur Balkenlänge von ca. $3000 \mu\text{m}$ in x_1 -Richtung zugrunde, so ergibt sich für eine Bimorph-Struktur (ZnO-Si) ein transversaler Dehnungseffekt der Schicht in der Größenordnung eines Faktors > 500 .

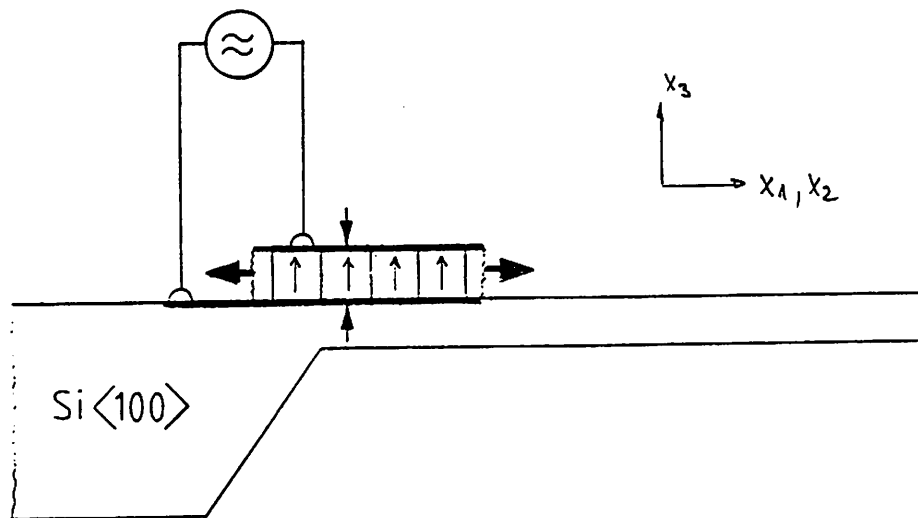


Abb. 8: Piezoelektrischer Transversaleffekt zur Anregung/Detektion von dünnen Siliziumbalken (schematisch).

Herstellung von ZnO-Schichten

Die ZnO-Schichten werden mittels HF-Magnetron-Sputtern in einer Sputteranlage Alcatel SCM 600 erzeugt. Die Anlage mußte für diesen Zweck mit einer Substratheizung ausgerüstet werden, da für gut orientierte Schichten eine Substrattemperatur von 350°C bis 500°C notwendig ist (Abb. 9). Die ersten Schichten wurden mit einer Substrattemperatur von 300°C bis 350°C hergestellt. Einige wichtige Sputterprozeßparameter sind nachfolgend aufgeführt:

HF-Frequenz: 13,56 MHz
 Restgasdruck: 7×10^{-6} hPa
 Prozeßgas: Ar 40 %, O₂ 60 %
 Sputterdruck: $4 - 5 \times 10^{-3}$ hPa
 Sputterleistungsdichte: bis 2,8 W/cm²
 Target/Substratabstand: 45 bzw. 50 mm

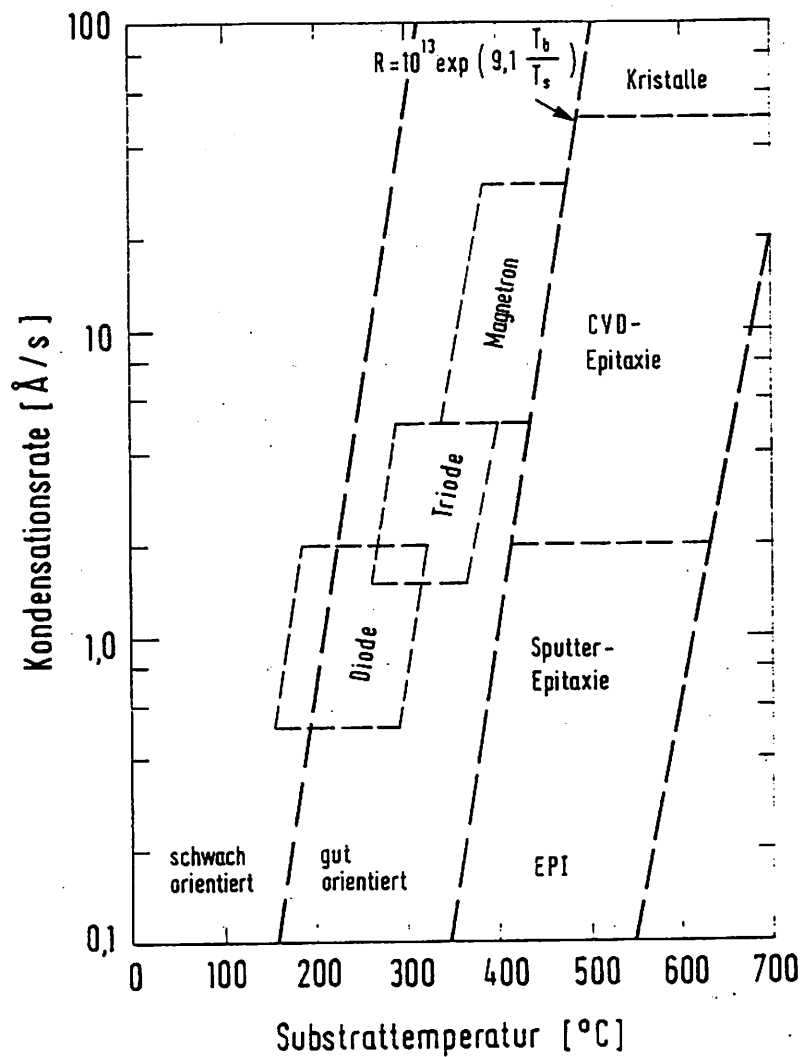


Abb. 9: Kondensationsrate und Aufwuchsgüte von ZnO in Abhängigkeit von Verfahren und Substrattemperatur. [Hic85]

Das Target besteht aus gesintertem ZnO (99,999 %) und hat einen Durchmesser von 150 mm. Die Möglichkeit zum Biassputtern ist gegeben. Mit der o.g. Leistungsdichte wurden Sputterraten bis zu 80 nm/min und Schichtdicken bis 6,8 μm erzeugt. Als Substrate wurden zunächst 3" <100> Si-Wafer mit polierter Oberfläche ganzflächig beschichtet. An diesen Proben wurden vergleichende Schichtdickenmessungen (Talystep Stylusgerät, optisches UBM-Profilometer) durchgeführt. Abb. 10 zeigt die Schichtdickenverteilung über den Durchmesser eines Wafers. Eine Optimierung dieser Schichthomogenität soll in weiteren Untersuchungen über eine Variation des Target/Substratabstands und des Sputterdrucks erfolgen. Das Ergebnis einer Schichtrauhigkeitsmessung in Wafermitte ist in Abb. 11 dargestellt. Ein Vergleich mit Literaturangaben zeigt, daß mit dem Anlegen einer Biasspannung die Schichtrauhigkeit noch verbessert werden kann.

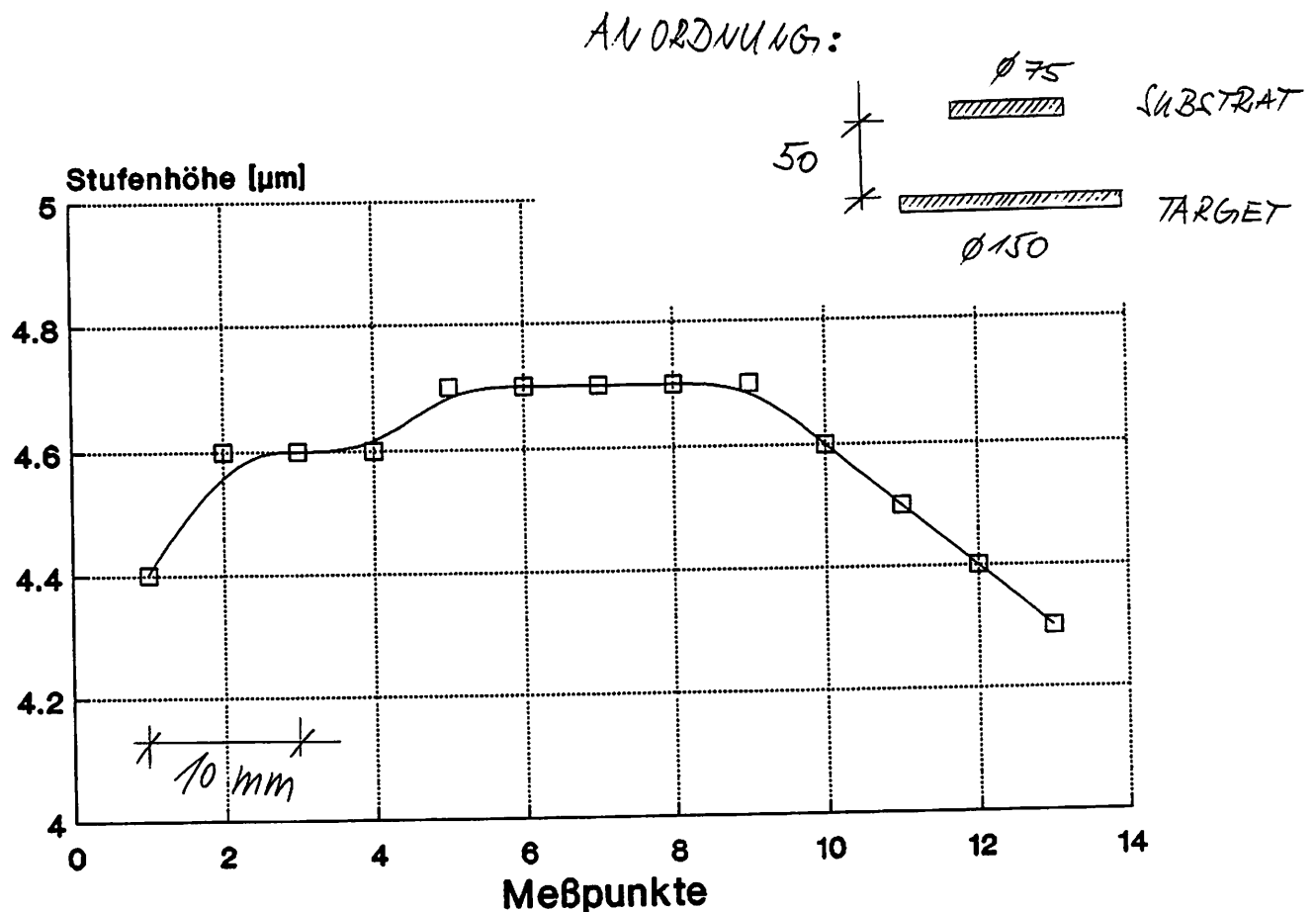


Abb. 10: Verteilung der Stufenhöhe über den Durchmesser bei ZnO #4.
Die Schichthomogenität beträgt $4,6 \mu\text{m} \pm 6 \%$.

Meßpunkt 7

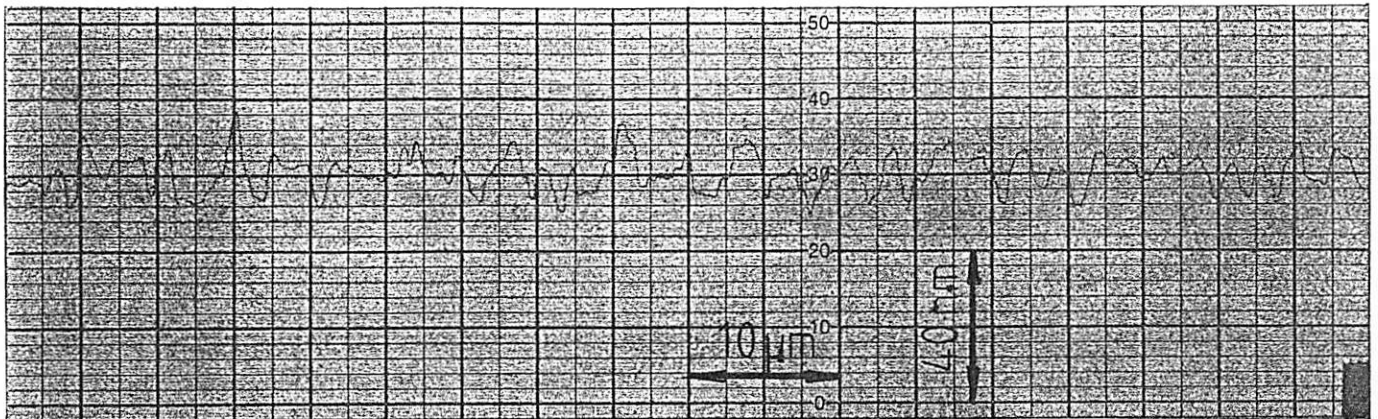


Abb. 11: Schichttrauhigkeit in Wafermitte (Meßpunkt 7) bei ZnO #4.

Eine REM-Aufnahme von einer Bruchkante einer ZnO-Schicht (ZnO #2) zeigt Abb. 12. Es ist deutlich die Vorzugsorientierung der Kristallite zu sehen.

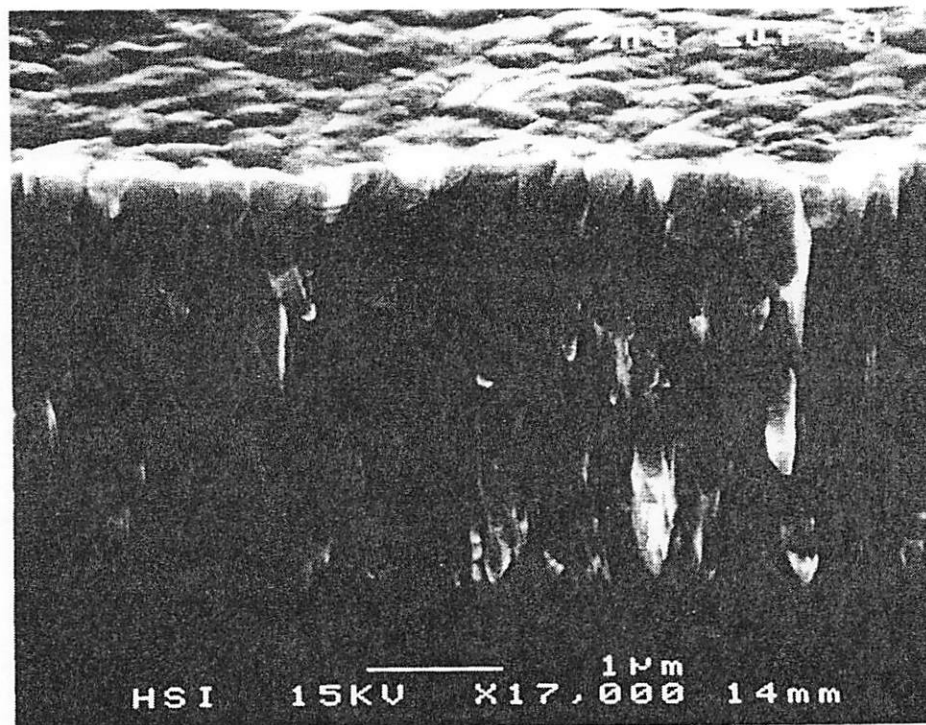


Abb. 12: REM-Aufnahme einer Bruchkante einer ZnO-Schicht (ZnO #2). Die Schicht ist auf $\langle 100 \rangle$ Si aufgewachsen. Die Vorzugsorientierung der Kristallite (c-Achsen-Orientierung) senkrecht zur Waferoberfläche (im Bild unten) ist deutlich zu sehen.

Eine Schichtanalyse der Schicht ZnO #3 wurde mit einem Röntgendiffraktometer der Fa. Siemens beim Verbundpartner BOSCH durchgeführt. Abb. 13 zeigt die Rocking-Kurve eines Θ -2 Θ Scans. Im Scanbereich von $2\Theta = 15^\circ - 40^\circ$ sind für eine polykristalline ZnO-Probe drei Peaks zu erwarten: $(10\bar{1}0)$ bei $2\Theta = 31,76^\circ$, (0002) bei $2\Theta = 34,42^\circ$ und $(10\bar{1}1)$ bei $2\Theta = 36,24^\circ$. Die gemessenen Reflektionen können diesen theoretischen Werten auch eindeutig zugeordnet werden, wobei allerdings der hauptsächlich interessierende (0002) -Peak vom theoretischen Wert um ca. $2,5^\circ$ abweicht. Der ausgeprägt auftretende (0002) -Peak zeigt, daß die gemessene Schicht hochgradig mit der c-Achse senkrecht zum Substrat texturiert ist (vgl. auch Abb. 12). Die gemessene Halbwertsbreite (FWHM) des (0002) -Peaks beträgt ca. $0,37^\circ$. Dieser Wert ist um einen Faktor zwei größer als derjenige von ZnO-Einkristallen (Bulkmaterial: $\Delta\Theta = 0,19^\circ$).

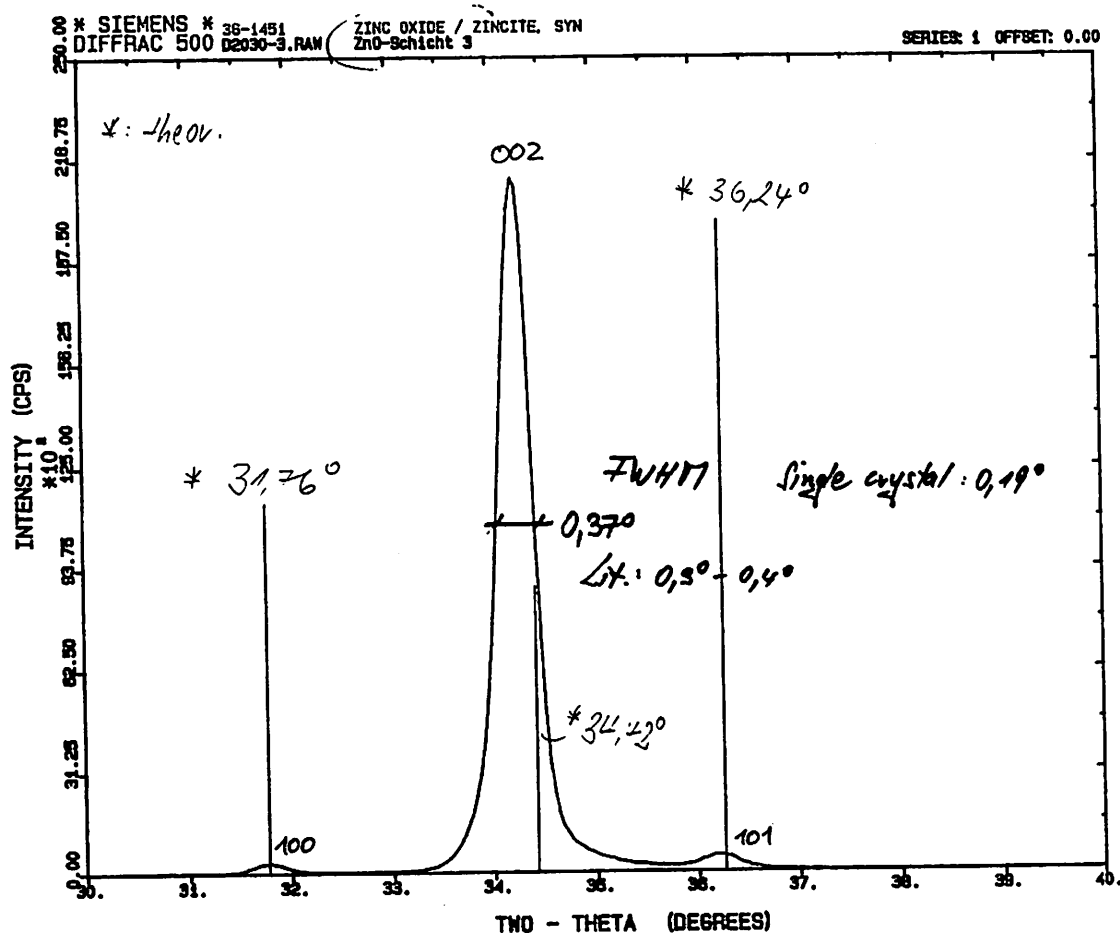


Abb. 13: Rocking-Kurve einer ZnO-Schicht (ZnO #3); Beschreibung im Text.

Strukturierte Abscheidung durch eine Schattenblende hindurch

Um die piezoelektrische Effektivität von ZnO-Schichten beurteilen zu können, wurden Vorversuche mit verschiedenen strukturierten ZnO-Schichten durchgeführt. Mit Hilfe von Schattenblenden wurden zuerst Siliziumscheiben großflächig mit ZnO beschichtet und anschließend ebenfalls durch Schattenblenden mit Aluminium (als oberer Elektrode) besputtert. Die untere Elektrode bildete dabei auf Si aufgesputtertes Aluminium. Diese Schichten konnten mit einem Wavetek-Frequenzgenerator ($U = 10 \text{ V}_{pp}$) im kHz-Frequenzbereich zum Schwingen angeregt werden. Weitergehende Versuche wurden unternommen, um Balkenstrukturen (in Bulkdicke) zum Schwingen anzuregen. Mittels Ätzmaske (Abb. 14) wurden in einem $\langle 100 \rangle$ Siliziumwafer freistehende Balken strukturiert. Die breitere Seite der im Querschnitt trapezförmigen freigeätzten Balken wurden mit einer angepaßten Schattenmaske (Abb. 15), die aus einem 3" Si $\langle 100 \rangle$ Wafer bestand, abgedeckt, und ebenfalls mit ZnO und anschließend mit Al beschichtet. Der Vorteil von Schattenmasken aus anisotrop geätztem Silizium gegenüber gestanzten Metallmasken liegt in der höheren Maßgenauigkeit.

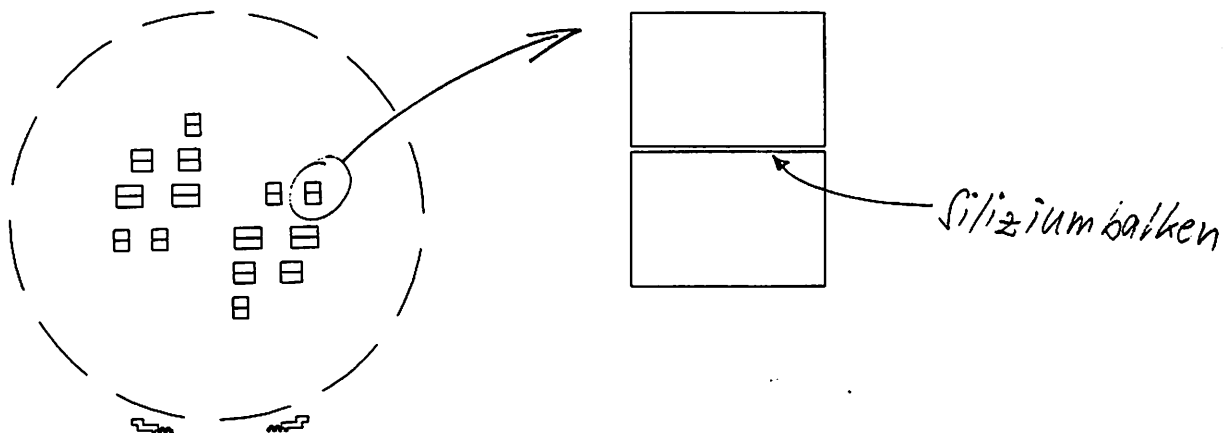


Abb. 14: Ätzmaske für Balkenstrukturen in $\langle 100 \rangle$ Si (Ansicht von der unteren, nicht beschichteten Seite).

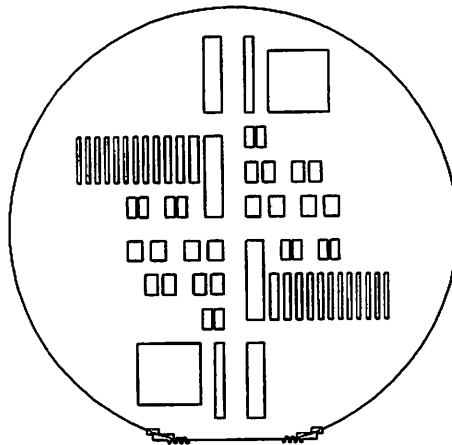


Abb. 15: Anisotrop geätzte Schattenmaske in $\langle 100 \rangle$ Si (Ansicht von oben).

c) Neufestlegung eines Herstellungsprozesses anhand einer Musterstruktur

Da die Technologielinie des HSI in Erlangen inbetriebgenommen und eingefahren ist, soll der Herstellungsprozeß von Si-Dreifachbalkenstrukturen überwiegend in dieser Fertigungsline auf Substraten mit \varnothing 100 mm durchgeführt werden. Anhand einer Musterstruktur ("Drosophila", Abb. 16) sollen die einzelnen Prozeßschritte, die Prozeßabfolge und die Prozeßkompatibilitäten untersucht und optimiert werden. Durch die weitgehende Verlagerung des Herstellungsprozesses nach Erlangen ergibt sich folgender möglicher Prozeßablauf zur Herstellung von resonanten Si-Strukturen mit ZnO-Anregung:

Ausgangsmaterial: (100)-Siliziumwafer, \varnothing 100 mm, niedrig n-dotiert (2-5 Ω cm), beidseitig poliert

Prozeßabfolge:

- 1.) P-Diffusion auf Vorderseite, strukturiert.
- 2.) Drive-in.
- 3.) Abscheiden und Strukturieren von ZnO auf Vorderseite.
- 4.) Aufputtern und Strukturieren von Aluminium auf Vorderseite.
- 5.) Passivieren mit LTO und PECVD-Nitrid auf Vorderseite.
- 6.) Naßchemisches Tiefenätzen auf der Rückseite in KOH bei geschützter Vorderseite.
- 7.) Durchätzen der Membran von der Vorderseite (Plasmaätzen).

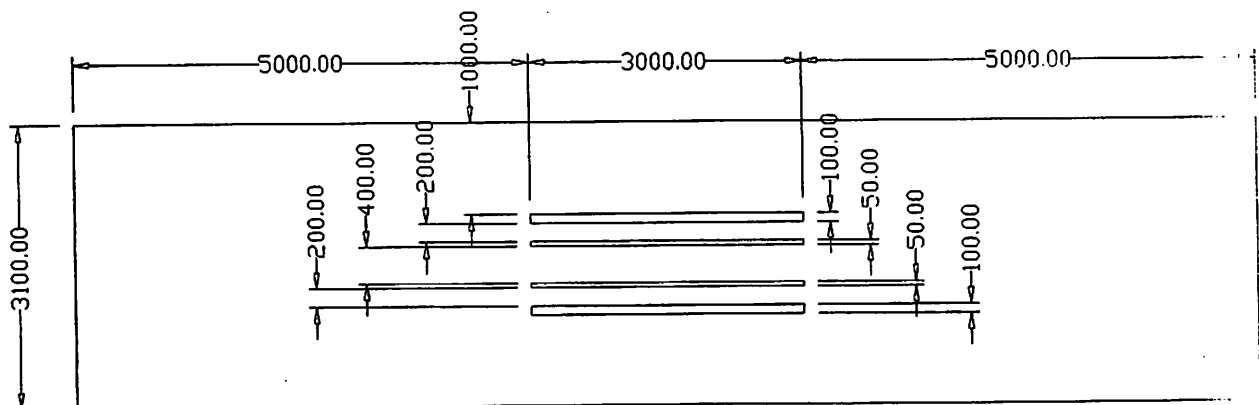


Abb. 16: Dimensionen der Dreifachbalken-Musterstruktur zur Erarbeitung des Herstellungsprozesses

2.2 Quarztechnologie

a) Entwicklung eines Belackungschucks für Quarzblanks

Wie bereits im zweiten Zwischenbericht zum Verbundvorhaben erwähnt, ergeben sich durch die quadratische Form der Blanks bei der Spin-on-Belackung im Eckbereich der Blanks ungleichmäßige Schichtdicken, die beim rückseitigen Belacken und beim späteren Belichten im Maskaligner zu Problemen führen können. Die Ursache sind Photolackteilchen, die sich während der Spin-on-Belackung von der Seitenmitte des Blanks ablösen und bei hoher Schleuderdrehzahl von den Eckbereichen eingefangen werden, was zu Photolackaufwerfungen führt.

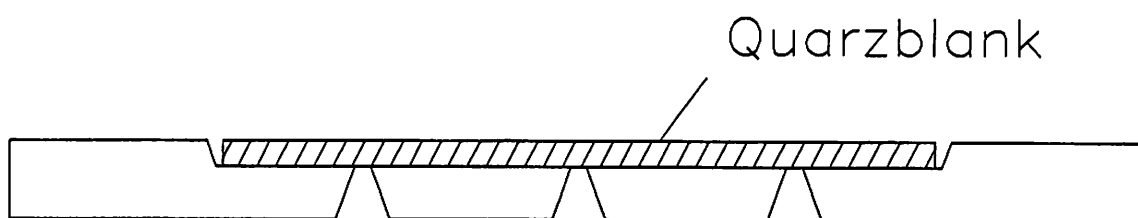


Abb. 17: Querschnitt des anisotrop geätzten $\langle 100 \rangle$ -Siliziumwafers als Belackungschuck für Quarzblanks (schematisch).

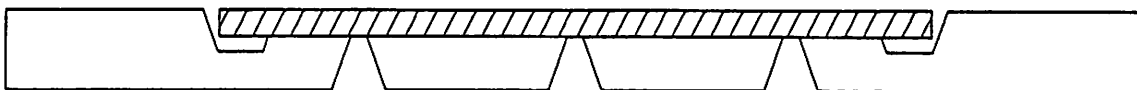


Abb. 18: Weiterentwicklung des Quarzchucks aus Abb. 17 mit zusätzlich eingebrachten Vertiefungen (Auffangrillen) am Randbereich des Quarzblanks (schematisch)

Zur Vermeidung der Photolackaufwerfungen wurde ein Belackungschuck entwickelt, der die von der Seitenmitte des Blanks abgelösten Photolackteilchen aufnimmt, bevor diese am Eckbereich des Blanks aufgeschleudert werden. Der Chuck besteht aus einem beidseitig polierten $\langle 100 \rangle$ -Siliziumwafer, in dessen Vorderseite eine quadratische Vertiefung mit den Abmessungen des Quarzblanks geätzt wurde. Von der Waferrückseite her geätzte durchgehende Löcher dienen zur Ankopplung des Quarzblanks an die Vakuumsaugung des Spin-on-Belackungsgeräts. Der Siliziumwafer wird zur Belackung zusammen mit dem Quarzblank

auf einen 3"-Standardvakuumchuck (für Siliziumwafer) aufgesetzt (Abb. 17). Bei ersten Belackungsversuchen stellte sich heraus, daß die Aufwerfungen verhindert werden, daß jedoch durch die Vakuumsaugung Photolack zwischen Blank und Siliziumwafer eingepreßt wird. Daher wurde in einer Weiterentwicklung ein zusätzlicher Graben (Auffangrille) am Randbereich des Quarzblanks in den Siliziumwafer eingeätzt (Abb. 18).

b) Plasmatiefenätzen in Quarz

Zur Einbringung der quadratischen Quarzblanks (1,5") in die Plasmaätzanlage Leybold LE 301 (Aufnahme für \varnothing 100 mm-Substrate) wurde ein Spezialchuck aus Silizium hergestellt (siehe auch Teil a)). Damit konnten auch erste Belackungsversuche für Quarzwafer durchgeführt werden. In einem Photolithographieprozeß wurden Quarzblanks einseitig mit einer Aluminiummaske versehen. Mit dieser Maske wurden im Plasmareaktor mit einem CHF_3/CF_4 -Prozeß Plasmaätzversuche durchgeführt. Eine Ätzrate von 49 nm/min konnte erreicht werden. Allerdings kann nach diesen Versuchen festgestellt werden, daß Al-Masken für Plasmatiefenätzversuche in Quarz nicht geeignet sind, da Al abgesputtert wird (Auswertung von REM-Bildern) und die Ätzung undefiniert gestoppt wird.

Weitergehende Versuche mit Chrom- und Titanätzmasken (gesputtert) wurden durchgeführt. Versuche zum naßchemischen Strukturieren waren bei Cr erfolgversprechend, bei Ti problematisch, da der Fotolack nicht gut haftet.

3. Meßtechnik

Charakterisierung dünngeätzter Dreifachbalkenstrukturen mittels Michelson-Interferometer

Die Eigenfrequenzen der Dreifachbalkenstruktur wurden mit dem im letzten Zwischenbericht beschriebenen Laboraufbau bestimmt. Tab. 4 zeigt die experimentell ermittelten Eigenfrequenzen in Abhängigkeit von der Balkenlänge l bzw. -breite w im Vergleich zu den analytisch berechneten Werten (siehe S.4)

Tab. 4: Experimentell ermittelte Eigenfrequenzen in Abhängigkeit von der Balkenlänge l bzw. -breite w im Vergleich mit den analytisch berechneten Werten $f_{0,theor}$ (Angaben in kHz).

$t = 31 \mu\text{m}$:

l/w	$50 \mu\text{m}$	$100 \mu\text{m}$	$200 \mu\text{m}$	$400 \mu\text{m}$	$f_{0,theor}$
1 mm	227	231			271
2 mm		61,6	62,2	62,7	67,8
3 mm			28,7	29,1	30,1
4 mm			16,4	16,5	16,9

$t = 12,5 \mu\text{m}$:

l/w	$50 \mu\text{m}$	$100 \mu\text{m}$	$200 \mu\text{m}$	$400 \mu\text{m}$	$f_{0,theor}$
1 mm	92,4	92,5	92,0		109
2 mm		23,7	23,6	23,6	27,3
3 mm			10,6	10,5	12,1
4 mm			6,76	6,76	6,83

Membrandicke 31 μm

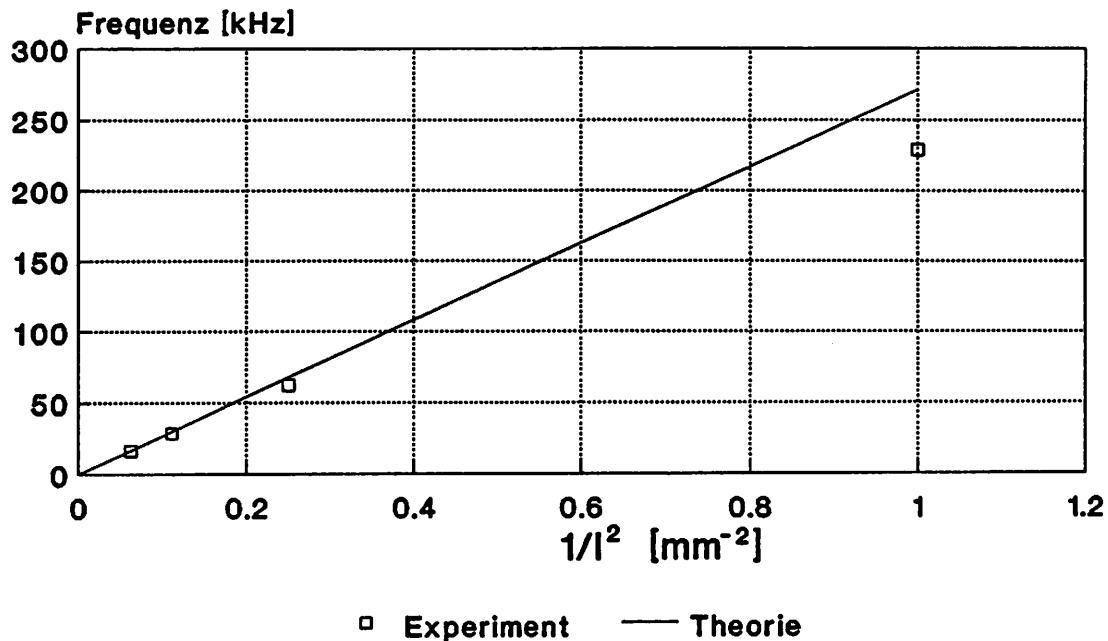


Abb. 19: Abhängigkeit der Schwingungsfrequenz vom Kehrwert des Quadrats der Balkenlänge im Vergleich mit den analytischen Werten (Gl. 1), für 31 μm dicke Balken

Vermessung der Dreifachbalken mit einem Laservibrometer

Um eine quantitative Charakterisierung der hergestellten Silizium-Dreifachbalken vornehmen zu können, wurden sie mit einem Laservibrometer der Fa. POLYTEC (Typ: OFV 1100) vermessen. Hierbei handelt es sich um ein interferometrisches Nachweisverfahren, bei dem die durch die Bewegung der Silizium-Balken hervorgerufene Dopplerverschiebung des rückreflektierten Laserlichtes detektiert wird [POLY]. Die Dopplerverschiebung ist proportional zur Schwingungsschnelle (Geschwindigkeit) der reflektierenden Oberfläche. Das Laservibrometer bietet zusätzlich zur Messung der Schwingungsschnelle die Möglichkeit der absoluten Amplitudenbestimmung (Auflösung: 316 nm). Die Anregung der Dreifachbalken erfolgte wieder akustisch mit Hilfe einer Piezokeramik, die jedoch von der hochgenauen Signalquelle eines Spektrumanalysators (HP3588A) über den zu messenden Frequenzbereich

(10 Hz - 1 MHz) linear angesteuert wurde (Amplitude: 10 dBm = 4.2 V).

Um den Einfluß der Piezokeramik auf das Schwingungsverhalten der Dreifachstimmgabeln festzustellen, wurden verschiedene Geschwindigkeits- und Amplitudenspektren im interessierenden Frequenzbereich aufgenommen. Im unteren Frequenzbereich traten die stärksten Resonanzpeaks (2.89, 6.68, 8.56, 13.86 kHz) auf. Die mechanische Güte dieser niederfrequenten Schwingungsmoden wurde über die Vermessung der Halbwertsbreite der Amplitudenspektren bestimmt. Für die Resonanz bei 6.7 kHz ergab sich eine mittlere Güte von etwa 30. Dieser Wert deckt sich mit den Angaben für VIBRIT-Piezokeramiken [VIB81]. Die Messungen ergaben, daß eine breitbandige, akustische Anregung der Silizium-Balkenstrukturen mit Piezokeramiken bis etwa 100 kHz gewährleistet ist.

Kontrollmessungen auf dem Bulkmaterial des Wafers ergaben eine starke Beeinflussung der Messung durch Schwingungsanteile benachbarter Resonatoren, die ebenfalls von der Piezokeramik angeregt wurden. Um diese Anteile weitgehend zu eliminieren, wurde der Gesamtwafers gedämpft gelagert (Softgummischeiben unter- und oberhalb des Silizium-Wafers) und die zu untersuchenden Dreifachbalken direkt über der Piezokeramik justiert.

Membrandicke 12,5 μm

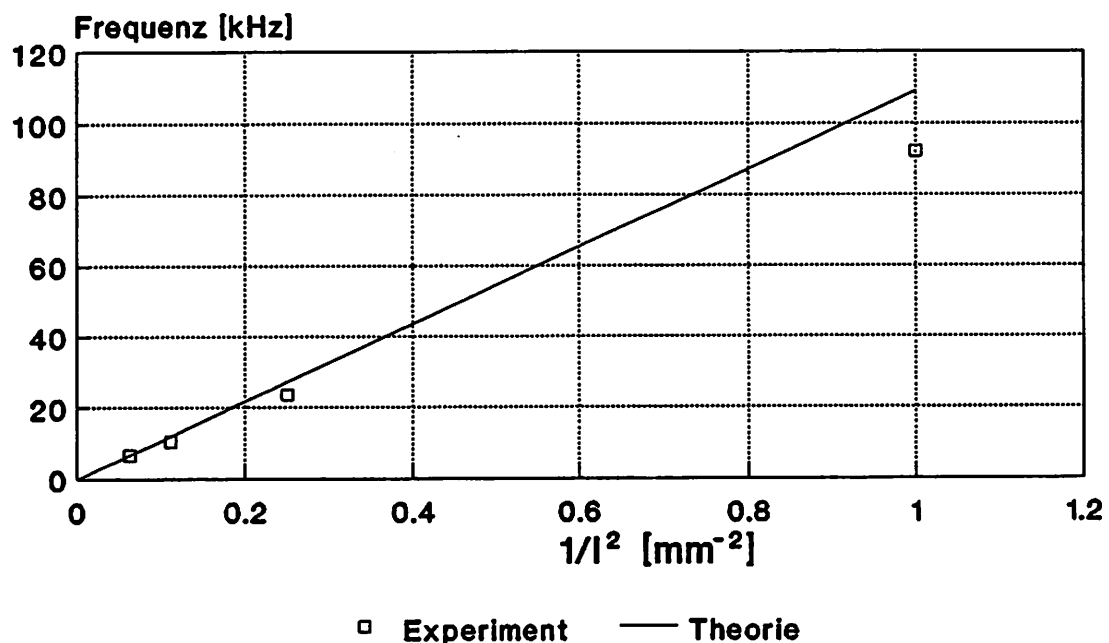


Abb. 20: Wie Abb. 19, jedoch für 12,5 μm dicke Balken

Auf diese Weise war es möglich die Dreifachbalken der verschiedenen Wafer zu vermessen und eine eindeutige Zuordnung der Grundschiwingung vorzunehmen.

In Abb. 21 ist ein typisches Geschwindigkeitsspektrum eines Dreifachbalkens ($t = 31 \mu\text{m}$) aufgenommen. Die optische Abtastung erfolgte auf dem mittleren Balken (Breite: $400 \mu\text{m}$) in Balkenmitte. Der Laserspot-Durchmesser betrug abhängig von der Justierung etwa $100 - 200 \mu\text{m}$ (Rückreflektionen). Die Messung in Abb. 21 wurde an einem Resonator mit 4 mm Balkenlänge ausgeführt, die Resonanzfrequenz wurde zu 16.58 kHz bestimmt. Eine Vermessung des Amplitudenverlaufes ergab eine Schwingungsgüte von 450 . Im unteren Frequenzbereich sind einige Schwingungsanteile der Piezokeramik noch vorhanden, die jedoch aufgrund der Dämpfungsmaßnahmen stark unterdrückt werden konnten.

Die Vermessung eines 3 mm Dreifachbalkens am gleichen Wafer ergab für die Grundschiwingung 27.79 kHz bei einer Güte von etwa 150 , für die erste Oberschiwingung wurde 118 kHz bei einer Güte von etwa 1100 gemessen. Die Differenz zwischen Grundschiwingung und erster Oberschiwingung betrug etwa 90 kHz (FE-Berechnung: 98 kHz).

In Abb. 22 ist das gemessene Oberwellenspektrum eines Dreifachbalkens ($l = 4 \text{ mm}$, $t = 31 \mu\text{m}$) dargestellt. Die Grundfrequenz f_1 liegt bei etwa 16.4 kHz , die höheren Schwingungsmoden liegen bei 45.1 , 89.3 , 147.8 , 221 und 284 kHz . Die Frequenzvielfachen c_i dieser Schwingungen betragen 2.72 , 5.38 , 8.91 , 13.32 und 17.12 gemäß $f_i = c_i \cdot f_1$. Ein Vergleich mit FE-Berechnungen ermöglicht eine Zuordnung der ersten Oberschiwingung zum Schwingungsmoden bei 89.3 kHz .

Ergebnis: Die optischen Messungen mit dem Laservibrometer ermöglichen die Bestimmung der Eigenfrequenzen mit Hilfe der Geschwindigkeits- und Amplitudenspektren bis 1 MHz . Eine quantitative Charakterisierung der Resonatoren (Bestimmung der absoluten Schwingungsamplituden und mechanischen Güten) ist bei geeigneter Fixierung der Dreifachbalken (Vereinzelung und Bonden/Kleben der Chips) möglich. Allgemein konnte bei der Bestimmung der Schwingungsgüten festgestellt werden, daß diese bei höheren Schwingungsmoden ($Q \sim f$) zunehmen. Eine Auswertung der Messungen ergab, daß bereits kleine Toleranzen in der Balkendicke t zu erheblichen Resonanzfrequenzvariationen führen ($\Delta t = \pm 2 \mu\text{m} \Rightarrow \Delta f \approx \pm 1 \text{ kHz}$, bei $l = 4 \text{ mm}$).

Die nachfolgende Tabelle enthält eine Übersicht über die Bestimmung der Resonanzfrequenzen und Schwingungsgüten der vermessenen Dreifachbalken. Die Breite der Balken betrug,

falls nicht anders angegeben, $w = 400 \mu\text{m}$:

Abmessungen	Frequenz f_1	Güte Q
$l = 4 \text{ mm}$ $t = 31 \mu\text{m}$	16.58 kHz	450
$l = 3 \text{ mm}$ $t = 31 \mu\text{m}$	27.79 kHz	150
$l = 1 \text{ mm}$ ($w = 200 \mu\text{m}$) $t = 12.5 \mu\text{m}$	91.5 kHz	760
$l = 1 \text{ mm}$ $t = 12.5 \mu\text{m}$	90.7 kHz	650
$l = 4 \text{ mm}$ $t = 28 \mu\text{m}$	15.1 kHz	120

Geschwindigkeit $V(f)$

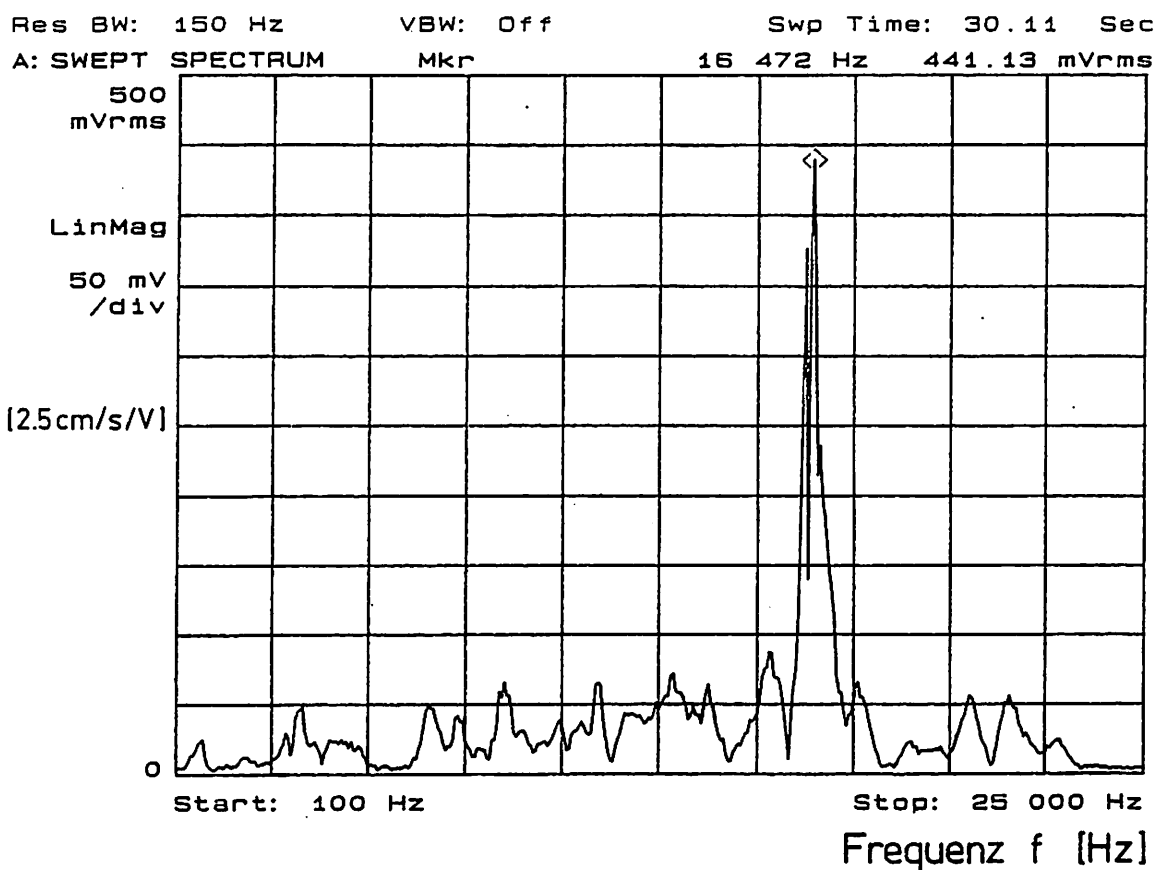


Abb. 21: Geschwindigkeitsspektrum eines Silizium-Dreifachbalkens

Geschwindigkeit $v(t)$

Res BW: 2 300 Hz VBW: Off

Swp Time: 30 Sec

A: SWEPT SPECTRUM

Mkr

89 320 Hz

427.96 mVrms

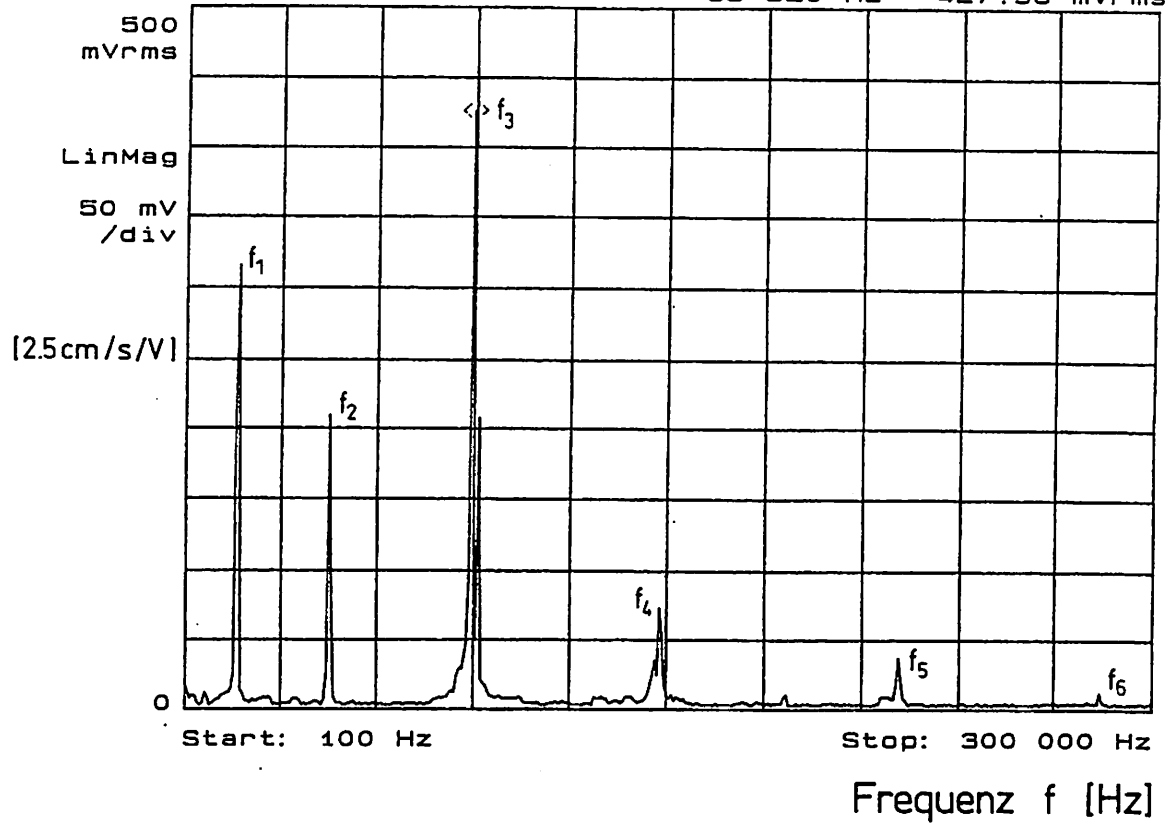


Abb. 22: Oberwellenspektrum eines Silizium-Dreifachbalkens

Literaturverzeichnis:

- [Heu89] : Heuberger (Hrsg.)
Mikromechanik
Springer-Verlag, 1989
- [Hic85] : Hickernell, F.S.
Zinc Oxide Films for Acoustoelectric Device Applications
IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. SU-32, No.5 (1985) 621
- [Ike90] : Ikeda, T.
Fundamentals of Piezoelectricity
Oxford Science Publications, 1990
- [POLY] : POLYTEC - Benutzeranleitung,
Laservibrometer OFV 1100
POLYTEC GmbH, Waldbronn
- [Til91] : Tilmans, H.A.C.; Bouwstra, S.; Fluitman, J.H.J
"Design Considerations for Micromechanical Sensors using Encapsulated
Built-in Resonant Strain Gauges"
Sensors and Actuators A, 25-27 (1991) 79
- [Tim55] : Timoshenko, S.:
"Vibration problems in engineering"
Van Nostrand, Princeton NJ (1955), 3rd edn.
- [VIB81] : VIBRIT - Piezokeramik von Siemens,
Datenblatt, Stand Januar 1981, Siemens AG, Redwitz
- [You59] : Young, D.:
"Vibration of rectangular plates by the Ritz method",
Appl. Mech., 176 (1959) 448