

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: 1.1.1992 - 30.6.1992

Inhalt

I	Zusammenfassung der im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten	S. 2
	• Weiteres konkretes Vorgehen	
II	Einzeldarstellung	
	• Theoretische Untersuchungen	S. 3
	• Experimentelle Charakterisierung von resonanten Drucksensoren	S. 6
	• Experimentelle Charakterisierung von resonanten Kraftsensoren	S. 9
	• Technologie der Silizium-Dreifachbalkenstrukturen	S. 12
III	Literatur / Anhang Materialdaten	S. 16

I Zusammenfassung

Der Einfluß des Dickenverhältnisses von Silizium(struktur) zu piezoelektrischer Dünnsschicht bei verschiedenen Schwingungsmoden wurde über piezoelektrische FEM-Berechnungen untersucht. Ein wichtiges Ergebnis ist, daß bei Anregung höherer Schwingungsmoden (bei gleichem Dickenverhältnis) eine effektivere piezoelektrische Energieeinkopplung in die Biomorph-Resonatorstruktur erfolgen kann. Bei technologisch interessanten Schichtdicken (bis 5 µm) spielt somit eine Schichtdickenoptimierung eine unwesentliche Rolle. Bei abnehmender Dicke der Siliziumstruktur (⇒ Lambwellen-Devices) werden allerdings die Dickenoptimierung und die Elektrodenstrukturierung für die Resonatorstruktur-Optimierung wieder sehr interessant.

Mit der Herstellung von piezoelektrisch angeregten Silizium-Dreifachbalkenstrukturen wurde im Berichtszeitraum begonnen. Prozeßbegleitend wurden wichtige Voruntersuchungen zum naßchemischen Ätzverhalten von ZnO durchgeführt.

- Weiteres konkretes Vorgehen

Simulation: Berechnung verschiedener Stegquerschnitt-Geometrien (3D-Modellierung) und deren Einfluß auf die Eigenschaften von Kraftsensoren.
Piezoelektrische FE-Berechnungen (Strukturierung der Elektrodengeometrien, Optimierung der Dickenverhältnisse ZnO/Siliziumbalken).

Technologie: Durchlauf des Herstellungsprozesses, Redesign der Dreifachbalkenstrukturen für Optimierung der Resonatorstruktur (Modenselektivität).

Meßtechnik: Charakterisierung der piezoelektrisch angeregten Resonatorstrukturen und Vergleich mit theoretischen Berechnungen.

II Einzeldarstellung

• Theoretische Untersuchungen

Mit Hilfe piezoelektrischer FEM-Berechnungen wurde der Einfluß des Dickenverhältnisses von Siliziumstruktur zu ZnO-Dünnschicht untersucht. Berechnet wurde für resonante Drucksensormembranen der effektive elektromechanische Kopplungsfaktor k_{eff} , der sowohl von den Materialeigenschaften der piezoelektrischen Schicht, als auch von der speziellen Resonatorgeometrie abhängt. Ziel der Dickenoptimierung ist ein möglichst hoher elektromechanischer Kopplungsfaktor für minimalen Energieverbrauch und zur Vermeidung dynamischer Nichtlinearitäten, indem der Sensor nur bei kleinen Schwingungsamplituden betrieben wird.

Die Tabelle 1 zeigt einen Vergleich der Materialeigenschaften verschiedener Piezoelektrika und erlaubt eine Abschätzung der theoretisch zu erwartenden elektromechanischen Kopplungsfaktoren k_{mat} . Aufgeführt sind die beiden materialabhängigen Kopplungsfaktoren k_{31} bzw. k_p für einen reinen Transversal- bzw. Planarschwinger [VIB]. In Abhängigkeit der unterschiedlichen mechanischen Steifigkeiten, der dielektrischen und piezoelektrischen Eigenschaften ergeben sich für Aluminiumnitrid, Zinkoxid bzw. PZT-Keramik (VIBRIT420) unterschiedlich große Kopplungsfaktoren in der Größenordnung von etwa 10%, 20% und 30%. Ein Vergleich der beiden Kopplungsfaktoren k_{31} und k_p zeigt, daß der Unterschied lediglich etwa 20% beträgt. Da die Materialeigenschaften von Dünnschichten weitgehend unbekannt sind, beziehen sich die angegebenen Daten auf Bulkmaterial (siehe Anhang).

In Abb. 1 ist das dreidimensionale FE-Modell einer Viertelmembran dargestellt, welches die anisotropen Materialeigenschaften der ZnO-Dünnschicht (siehe letzten Zwischenbericht) und die Einspannung der Siliziummembran berücksichtigt, die durch das anisotrope Ätzen zu erhalten ist. Die Abmessungen der Membran betragen $9,2 \times 9,2 \text{ mm}^2$, die Membrandicke beträgt $20 \mu\text{m}$. Die Vernetzung des FE-Modells betrug bis zu drei Elementlagen sowohl bei der Si-Membran, als auch bei der ZnO-Schicht. In Abb. 2 ist der effektive elektromechanische Kopplungsfaktor k_{eff} für den Grundmode und zwei höher angeregte Schwingungsmoden (siehe Abbildung) in Abhängigkeit des Schichtdickenverhältnisses $t_{\text{Si}}/t_{\text{ZnO}}$ dargestellt. Für den Grundmode der Membrangeometrie beträgt der effektive Kopplungsfaktor etwa 9% bei einem Schichtdickenverhältnis von 0,95. In Tabelle 2 sind für die drei unterschiedlichen Schwingungsmoden M1 (= Grundmode), M2 und M3 die jeweils optimalen Zinkoxid-Schichtdicken t_{ZnO} , die berechneten Serien- und Parallelresonanzfrequenzen f_s und f_p , die maximalen effektiven Kopplungsfaktoren k_{eff}^{\max} und das Verhältnis der Kopplungsfaktoren $k_{\text{eff}}/k_{\text{M1}}$ aufgelistet.

Ein interessantes Ergebnis ist, daß höhere Schwingungsmoden sich durch einen größeren Kopplungsfaktor auszeichnen können.

Tabelle 1: Vergleich der Materialeigenschaften verschiedener Piezoelektrika

	ρ [kg/m ³]	S_{11}^E/S_{12}^E [10 ⁻¹² Pa ⁻¹]	ν	d_{31} [10 ⁻¹² C/N]	d_{33} [10 ⁻¹² C/N]	$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	k_{31}^{mat}	k_p^{mat}
AlN	3260	3,53 -1,01	0,29	-2,0	5,53	9,04	11,4	0,11	0,18
ZnO	5470	7,91 -3,30	0,42	-5,12	12,0	9,26	8,2	0,21	0,40
PZT	7600	15,4 -5,70	0,37	-160	355	1600	1600	0,34	0,61

$$k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{S_{11}^E \cdot \epsilon_{33}^T} \quad k_p^2 = \frac{2 d_{31}^2}{(S_{11}^E + S_{12}^E) \cdot \epsilon_{33}^T}$$

$$k_p = \sqrt{\frac{2}{1-\nu}} \cdot k_{31} \approx 1,6 \dots 1,9 \cdot k_{31}$$

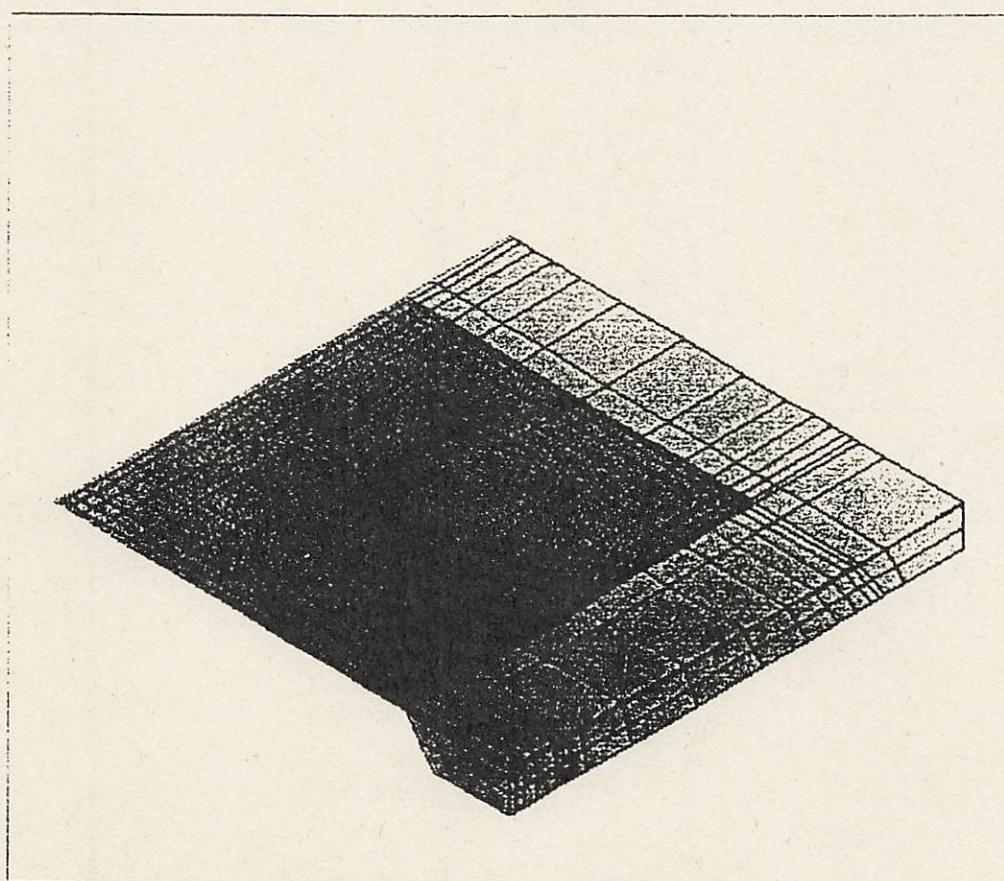


Abb. 1: Dreidimensionales FE-Modell einer Viertelmembran

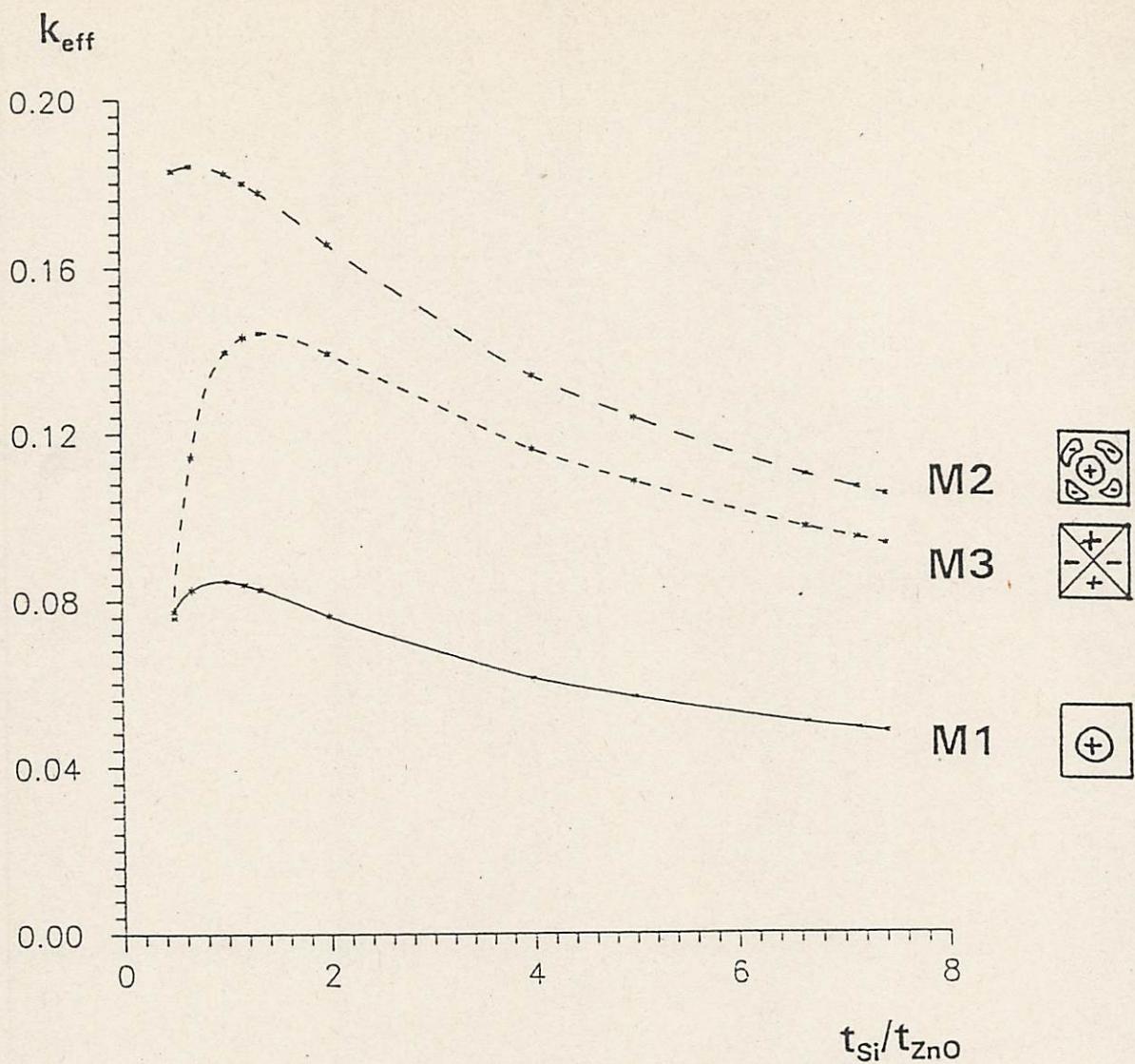


Abb 2: Effektive elektromechanische Kopplungsfaktoren k_{eff} in Abhängigkeit des Schichtdickenverhältnisses.

Tabelle 2: Elektromechanische Kopplungsfaktoren verschiedener Schwingungsmoden für eine Silizium-Membran mit ZnO-Dünnenschicht.

Mode	$t_{\text{Si}}/t_{\text{ZnO}}$	f_s [kHz]	f_p [kHz]	t_{ZnO} [μm]	k_{eff}^{\max}	$k_{\text{eff}}/k_{\text{M1}}$
M1	0,95	5,101	5,119	21 ± 2	0,09	1,0
M2	0,75	23,417	23,820	27 ± 2	0,18	2,0
M3	1,33	20,005	20,215	15 ± 2	0,14	1,6

Im Gegensatz zu den rein materialabhängigen Kopplungsfaktoren k_{mat} der Tabelle 1 enthalten die effektiven Kopplungsfaktoren k_{eff} zusätzlich den Geometrieanteil.

Drückt man die planaren Kopplungsfaktoren k_p durch die beiden Resonanzfrequenzen f_p und f_s nach untenstehenden Gleichungen [VIB] aus, so ergeben sich die Werte 0,09, 0,21 und 0,16 in guter Übereinstimmung mit den effektiven Kopplungsfaktoren k_{eff}^{max} aus Tabelle 2:

Effektiver elektromechanischer Kopplungsfaktor:

$$k_{eff}^2 = \frac{f_p^2 - f_s^2}{f_p^2} \approx 2 \left(\frac{f_p - f_s}{f_p} \right)$$

Planarer elektromechanischer Kopplungsfaktor:

$$k_p^2 \approx 2,5 \left(\frac{f_p - f_s}{f_p} \right) - \left(\frac{f_p - f_s}{f_p} \right)^2$$

- Experimentelle Charakterisierung von resonanten Drucksensoren

Die resonanten Drucksensoren des Verbundpartners BOSCH wurden optisch (Laservibrometer) und piezoelektrisch (Gain-Phase-Analyzer) charakterisiert. Die Resonatoreigenschaften (Resonanzfrequenzen, Schwingungsamplituden, -güten) und Druckempfindlichkeiten wurden optisch vermessen und mit FEM-Berechnungen verglichen. Eine detaillierte Beschreibung enthält die im Hahn-Schickard-Institut durchgeführte Diplomarbeit von A.Schroth [Sch92], die den Verbundpartnern zur Verfügung gestellt wurde.

Modenselektion:

Die Abb. 3 zeigt den Einfluß der Elektrodengeometrie bei der Schwingungsanregung. Vermessen wurde die Membran M6 - 2/2 mit einer Siliziummembrdicke von $t_{Si} = 50 \pm 2 \mu\text{m}$ und einer strukturierten ZnO-Schicht (Dicke: $t_{ZnO} = 14,4 \mu\text{m}$). Bei einer Anregung an den vier Randeletroden sieht man zwei ausgeprägte Resonanzen im Amplitudenspektrum, den Grundmode bei etwa 9,31 kHz mit einer Schwingungsamplitude von 0,20 μm und die erste Oberwelle bei etwa 33,5 kHz. Bei der Anregung über die Zentralelektrode bleibt das Modenspektrum gleich, die Amplitude des Grundmodes nimmt aber auf 0,27 μm zu. Bei der gegenphasigen Anregung von Rand- und Zentralelektrode wird die Oberwelle stark unterdrückt und die Schwingungsamplitude des Grundmodes steigt auf 0,50 μm . Dies entspricht einer Amplitudenerhöhung um den Faktor 2,5. Durch eine geeignete Strukturierung der Elektroden (hier für den Grundmode) und gegenphasiger Anregung kann ein Schwingungsmodus gut selektiert werden.

Frequenzzentrum : 50500 Hz
 Frequenzspanne : 99000 Hz
 Startfrequenz : 1000 Hz
 Stopfrequenz : 100000 Hz
 Sweepzeit : 62.2592 s
 Sample-Time : 0.000004 s
 Res.-Bandbreite : 9.1 Hz
 Quellen-Amplitude : 10.0 dBm
 Quellen-Ausg.Widerstand : 50 Ohm
 Eingangs-Widerstand : 1000000 Ohm

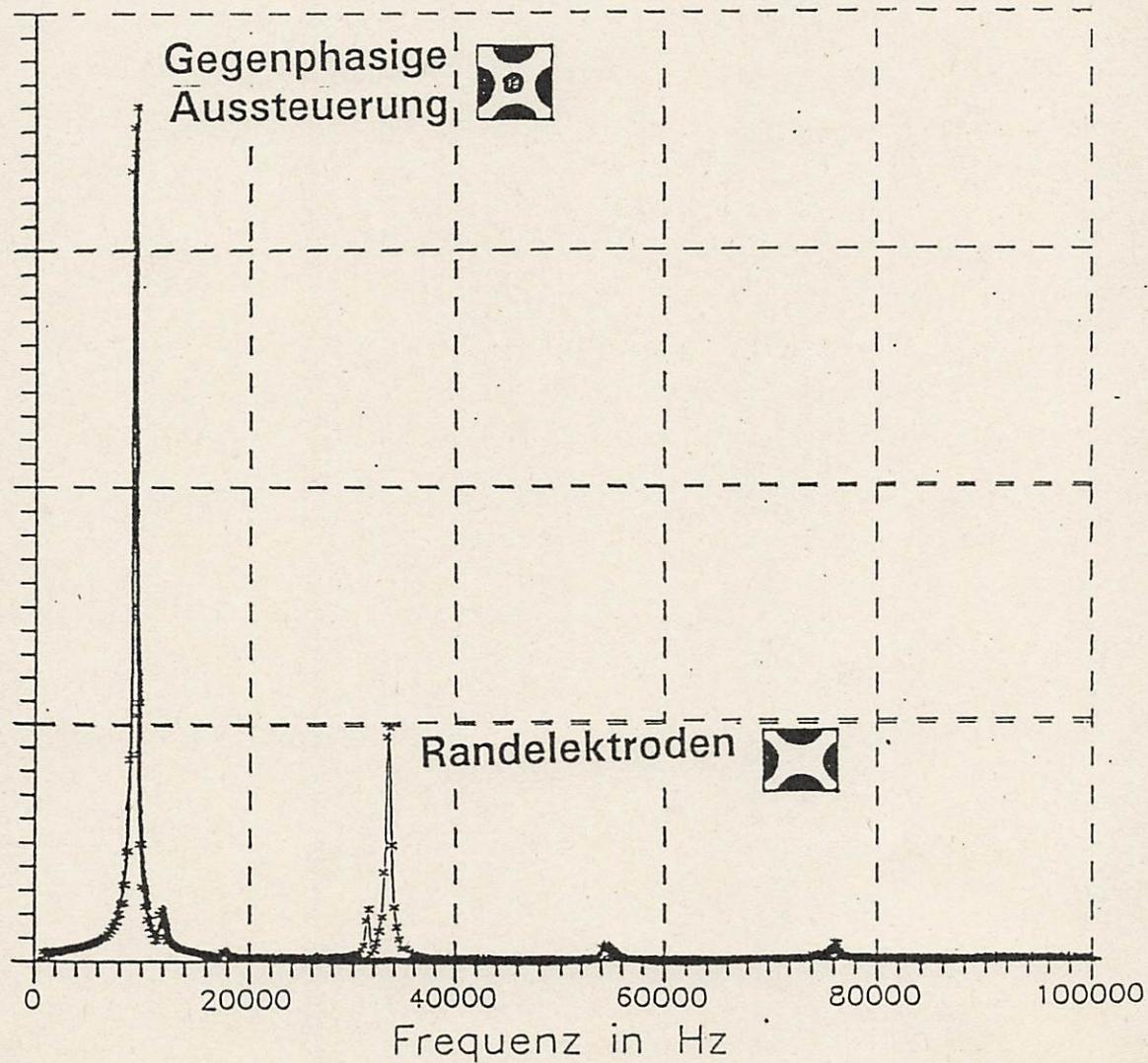


Abb. 3: Einfluß der Elektrodengeometrie bei der Schwingungsanregung

Piezoelektrische Messungen:

Die Tabelle 3 enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse der piezoelektrischen Messungen an ZnO-beschichteten Silizium-Membranen und Piezokeramik-Bimorphstrukturen (PZT-20, PZT-200). Mit Hilfe des Gain-Phase-Analyzers wurden Impedanz- bzw. Übertragungsverhalten (Gain-Phase) der piezoelektrisch angeregten Membranen gemessen und aus Serien- und Parallelresonanzfrequenzen der effektive elektromechanische Kopplungsfaktor k_{eff} bestimmt. Bei den Gain-Phase-Messungen erfolgte die Anregung an der Zentralelektrode, der Abgriff an den vier Randeletroden. Die Membran M7 - 2/3 mit einer Grundresonanzfrequenz von etwa 7,25 kHz und einer Schwingungsgüte von $Q = 100$ wurde unter Druckbeaufschlagung und nach mehrmaligen Drucklastwechseln und Temperaturschocks vermessen (siehe Bericht des Verbundpartners BOSCH). Der Wert für k_{eff} verringerte sich dabei von 20% (Reihe 1) auf etwa 10% (Reihe 2). Vergleicht man die gemessenen Kopplungsfaktoren mit denen der FEM-Berechnungen, so fallen die experimentell bestimmten Werte höher aus. Zum einen liegt dies an dem FE-Modell, das eine durchgehende ZnO-Beschichtung aufweist, die Materialeigenschaften von Bulkmaterial verwendet und eine Verspannung der Zinkoxidsschicht nicht berücksichtigt. Andererseits gehen in die experimentelle Bestimmung der Kopplungsfaktoren die prozeßabhängigen Dünnschichteigenschaften, die elektrischen Randbedingungen (äußere Beschaltung) und sonstige Störeffekte (z.B. Temperaturerhöhung, Lichtaktivität des ZnO) stark ein.

Tabelle 3: Piezoelektrische Vermessung von Membranstrukturen.

Meßobjekt	$t [\mu\text{m}]$	$t_{\text{Si}}/t_{\text{piezo}}$	k_{eff}
M7 - 2/3	50, 14.4	3,5	0,20
		0,1 bar \Rightarrow	0,11
M7 - 2/3	50, 14.4	3,5	0,10
M5 - 2/3	?	?	0,31
M7 - 2/4	50, 14.4	3,5	0,12
M 4/2	50, 10	5,0	0,13
PZT-20	20, 200	0,1	0,19
		0,4 bar \Rightarrow	0,21
PZT-200	200, 200	1,0	0,31
		2,0 bar \Rightarrow	0,34

- Experimentelle Charakterisierung von resonanten Kraftsensoren

Die resonanten Kraftsensoren des Verbundpartners GMS wurden optisch charakterisiert, indem das Amplitudenspektrum der Silizium-Balkenschwinger vermessen wurde. Abb. 4 zeigt das Amplitudenspektrum eines Kraftsensors mit einer Balkenlänge von $l = 8 \text{ mm}$, bei einer gemessenen Balkendicke von $t_{\text{Si}} = 34 \pm 3 \mu\text{m}$. Die Anregung erfolgte elektrothermisch über die Ni/Cr-Heizwiderstände an den Balkenenden mit Hilfe eines verstärkten Frequenzgeneratorsignals. Tabelle 4 enthält die Ergebnisse der Vermessung der thermisch angeregten Silizium-Kraftsensoren verschiedener Länge. Die Abtastung der Schwingung erfolgte jeweils optisch m. H. des Laservibrometers in der Balkenmitte, so daß der Wärmeeinfluß der DMS-Struktur nicht enthalten ist. Die nachfolgende Tabelle enthält die theoretischen Grundresonanzfrequenzen eines reinen Silizium-Balkens f_{Si} und zum Vergleich die Resonanzfrequenzen $f_{\text{Si-Al}}$ eines Silizium-Balkens mit einer homogenen Aluminiumschicht (Dicke: 700 nm) bei einer durchschnittlichen Temperaturerhöhung von $\Delta T = 100 \text{ K}$ und einer angenommenen relativen Frequenzverschiebung von -1200 ppm/K [Wal91]. Ebenfalls sind die durch passive Anregung mit Hilfe einer Piezokeramik ermittelten Resonanzfrequenzen f_{passiv} und die Resonanzfrequenzen bei elektrothermischer Anregung f_{therm} aufgeführt. Ferner wurden die Schwingungsgüten Q_{therm} aus den Halbwertsbreiten der Resonanzkurven bestimmt.

Tabelle 4: Charakterisierung der elektrothermisch angeregten Kraftsensoren.

Balkenlänge	f_{Si} [kHz]	$f_{\text{Si-Al}}$ [kHz]	f_{passiv} [kHz]	f_{therm} [kHz]	Q_{therm}	Anzahl Heizwid.
3 mm	33,14	29,16	-	19,10	560	2
				18,42	575	2
6 mm	8,28	7,29	5,6 6,8	6,36	160	2
				6,13	200	2
8 mm	4,66	4,10	3,9 3,1 4,8	5,04	240	2
				5,27	250	2
				6,80	180	1
10 mm	2,98	2,62	4,1 4,1 4,5	6,58	190	2
				6,95	210	1
				6,00	120	1

Balkenlänge: $l = 8 \text{ mm}$

Balkendicke: $t_{\text{Si}} = 34 \pm 3 \mu\text{m}$

Anregung: thermisch über Heizwiderstände

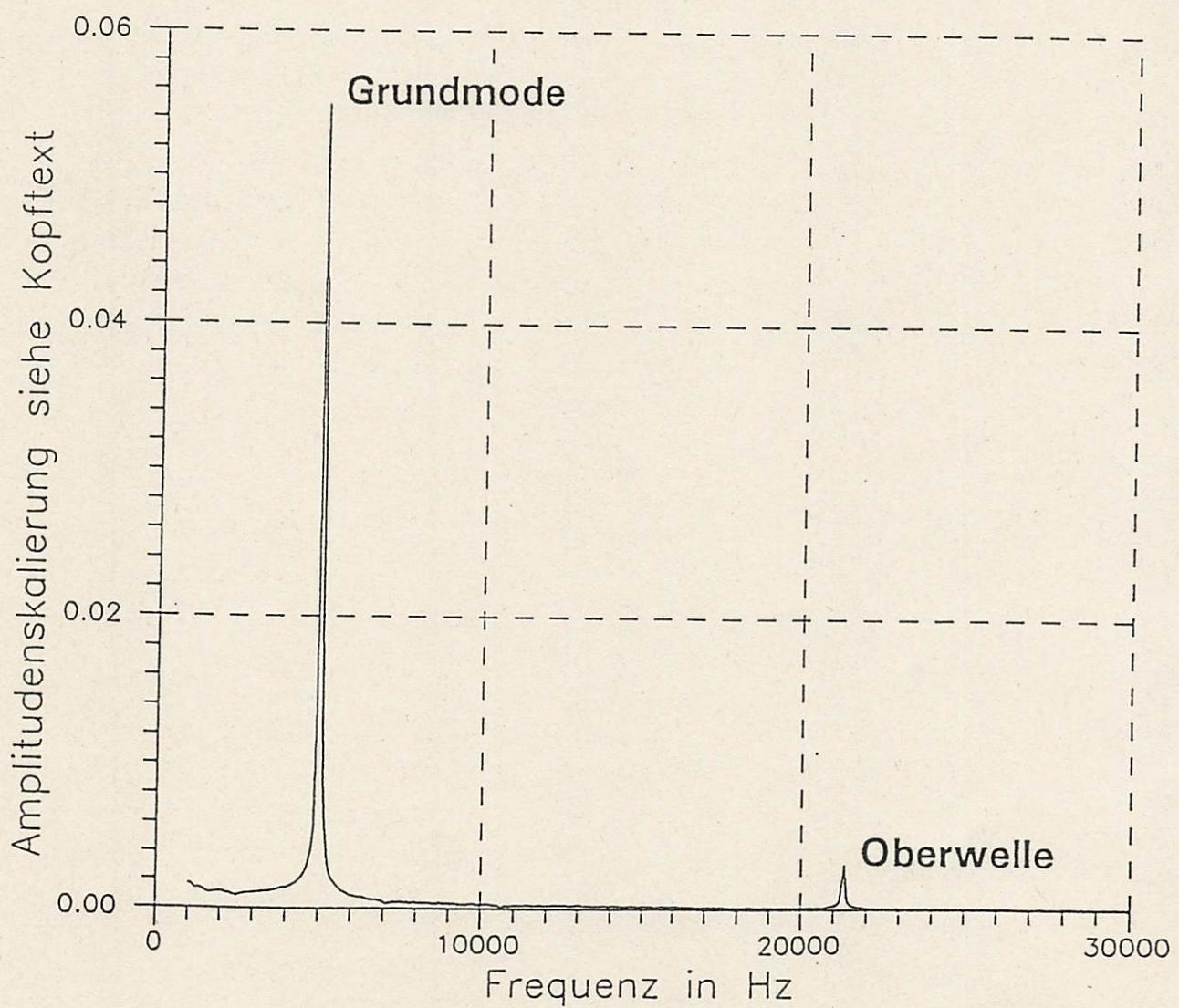


Abb. 4: Amplitudenspektrum eines Kraftsensors.

In Abb. 5 ist die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Heizleistung für den Grundmode und die erste angeregte Oberwelle aufgetragen. Deutlich ist zu erkennen, daß infolge erhöhter Heizleistung die Resonanzfrequenzen sich stark verändern. Infolge der Beschichtung des Siliziumbalkens kommt es bei unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Ni/Cr- und Ti/Pd/Au-Schichten zu Verspannungen. Diese sind sowohl von der Betriebstemperatur, als auch von der Strukturierung des Resonators abhängig.

Eine abschließende Diskussion der Meßergebnisse kann an dieser Stelle daher noch nicht erfolgen, da noch weitergehende detaillierte Untersuchungen des thermischen Verhaltens der Resonatoren notwendig sind.

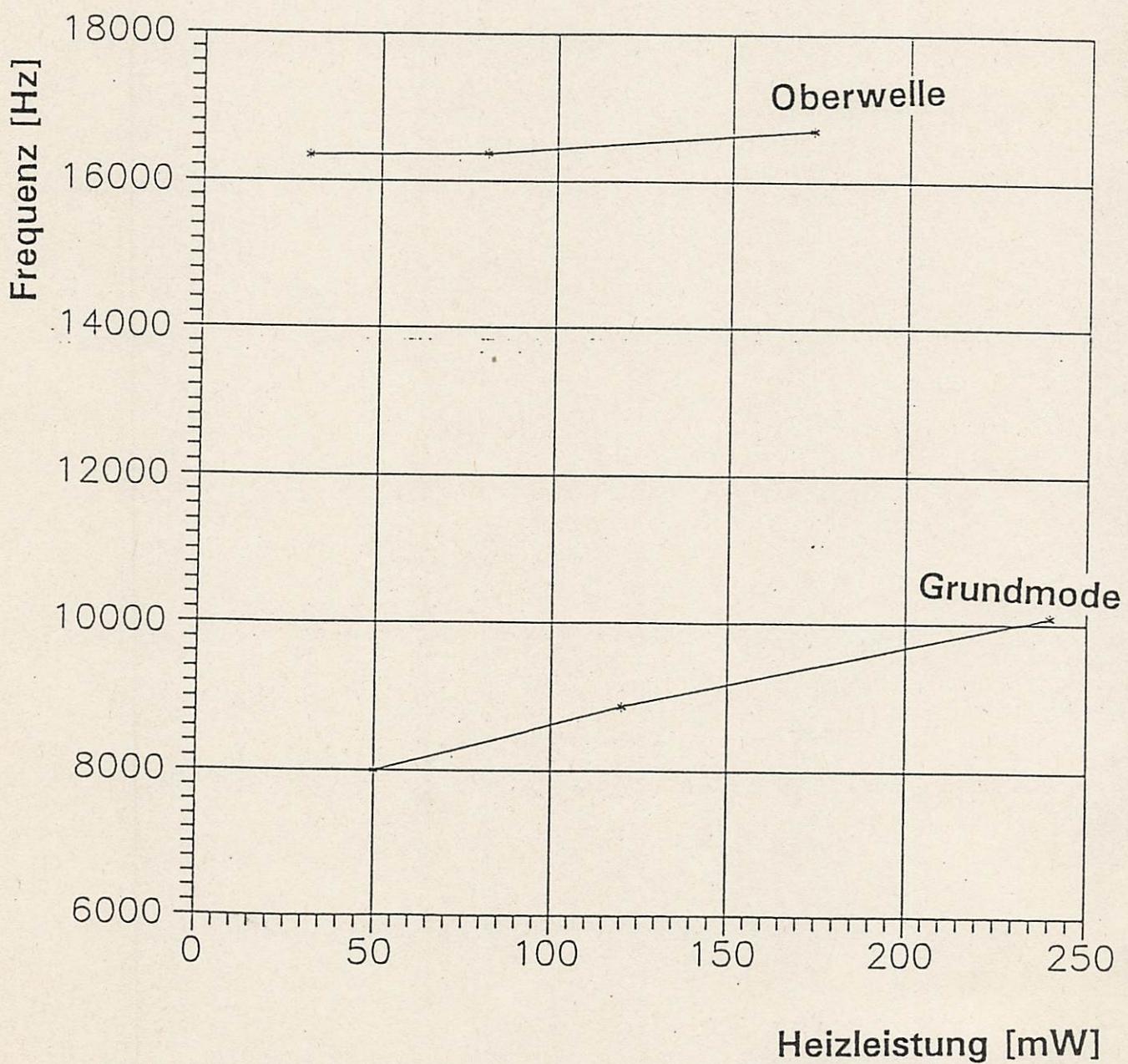


Abb. 5 Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Heizleistung.

- Technologie der Silizium-Dreifachbalkenstrukturen

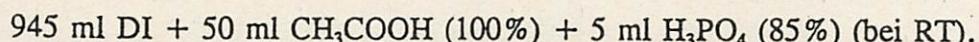
Photolithographische Strukturierung und naßchemisches Ätzen dünner Zinkoxid-Schichten:

Die Untersuchungen dienten zur Bestimmung der Ätzeigenschaften an dünnen Zinkoxid-Schichten (Ätzraten, Ätzprofile, Rauhigkeiten der Ätzfronten) in Abhängigkeit der Ätzparameter (Zusammensetzung, Temperatur und Bewegung der Ätzlösung, sowie der Ätzdauer). Die Versuche wurden an dünnen ZnO-Schichten (Dicken ca. 3 - 5 µm) durchgeführt, die mittels RF-Sputtern auf <100>-Siliziumproben (3", Dicke 380 µm, p-dotiert, einseitig poliert) erzeugt wurden. Anschließend wurde die Vorderseite der Substrate belackt und die Lackschicht photolithographisch strukturiert. Als Ätzlösungen dienten Mischungen aus Essigsäure (CH_3COOH , 100%), Ortho-Phosphorsäure (H_3PO_4 , 85%) und Wasser bei Raumtemperatur. Der Ätzprozeß wurde jeweils abgebrochen, sobald die (polierte) Siliziumoberfläche sichtbar wurde.

Die Charakterisierung der Ätzergebnisse geschah mittels Lichtmikroskopie in Auflicht und rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen an nach dem Ätzprozeß erzeugten Bruchkanten. Die Schichtdicken wurden mit Hilfe der REM-Aufnahmen nachgemessen. Für jede Testätzung wurde die jeweilige Zusammensetzung der Ätzlösung in ein Diagramm übertragen (Abb. 6).

Wie bereits im letzten Zwischenbericht erwähnt, nimmt die Ätzrate mit steigendem Phosphorsäuregehalt zu und mit steigendem Essigsäuregehalt ab. Bei hohem Essigsäuregehalt (50%) findet eine große Unterätzung der Fotolackschicht statt, und es ist ein Eindringen der Ätzlösung zwischen ZnO-Schicht und Substrat zu beobachten. Der Neigungswinkel der Ätzfront beträgt ca. 30°. Bei mittlerem Essigsäuregehalt (5%) ist die Fotolackunterätzung geringer, der Neigungswinkel beträgt hier bis zu 50°. Das beste Ergebnis wird mit 0,5% Phosphorsäuregehalt erzielt. Mit abnehmendem Phosphorsäuregehalt werden die Ätzfronten allgemein rauer.

In weiteren Vorversuchen wurde der zeitliche Verlauf des Ätzvorgangs unter gleichen Versuchsbedingungen zur Ermittlung der optimalen Ätzdauer und zur Untersuchung des Ätzverhaltens der ZnO-Kristallite untersucht. Als Ätzlösung wurde hier die folgende Mischung verwendet:



Zu Beginn des Ätzvorgangs werden die Kristallite von oben angegriffen und gleichmäßig verkürzt (Abb. 7). Nachdem die Kristallite an den nicht maskierten Stellen entfernt sind, bildet sich eine Ätzfront mit zunächst flacher Neigung aus (ca. 30°). Dies ist der optimale Zeitpunkt zum Abbruch des Ätzvorgangs im Hinblick auf weitere darauffolgende Beschich-

tungen (Abb. 8). Im weiteren Ätzverlauf nimmt der Neigungswinkel der Ätzfront zu (Abb. 9) und erreicht nach 100% Überätzung ca. 90° , d. h. die Kristallite werden seitlich abgetragen (Abb. 10).

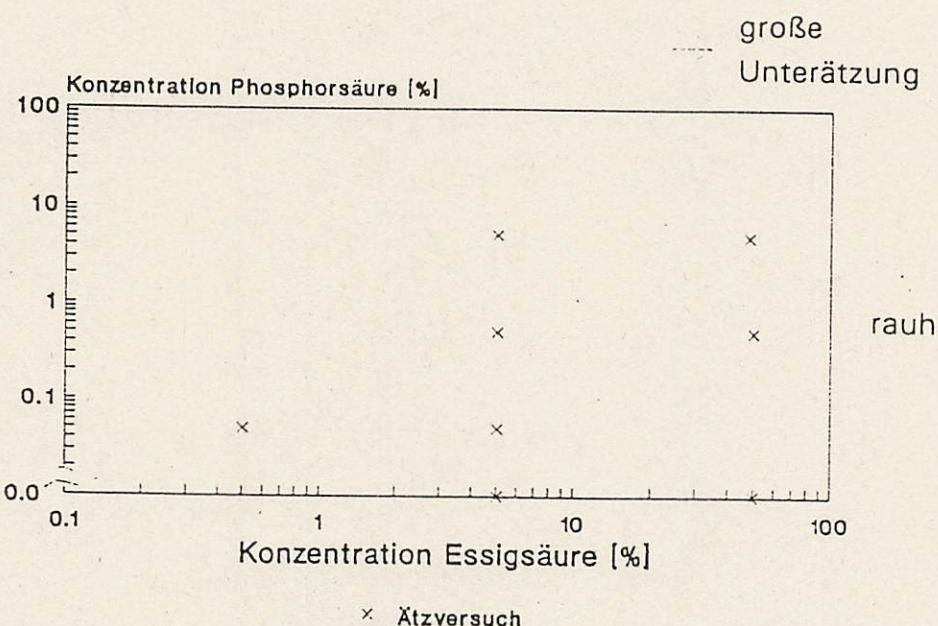


Abb. 6: Ätzergebnis in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Ätzlösung.

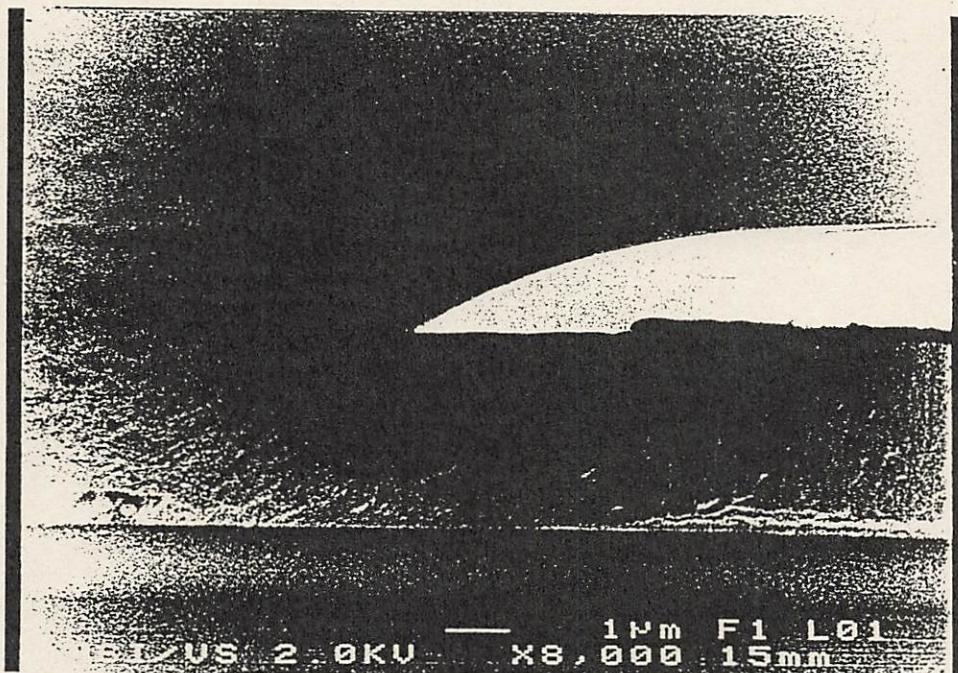


Abb. 7: ZnO-Ätzprofil nach der halben zum Durchätzen der ZnO-Schicht erforderlichen Ätzdauer.

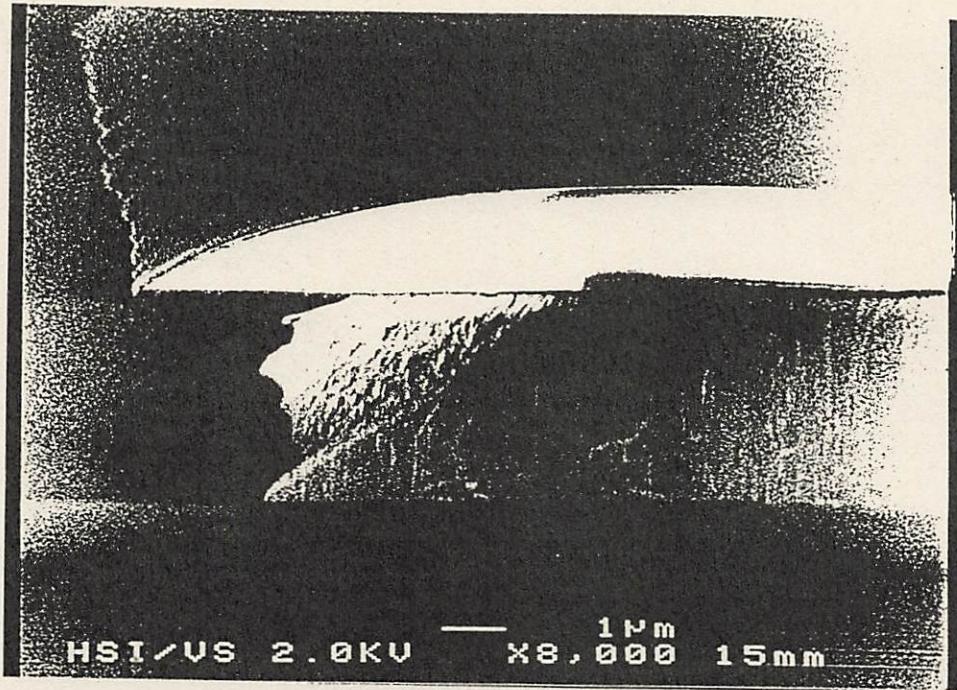


Abb. 8: ZnO-Ätzprofil nach der zum Durchätzen der ZnO-Schicht erforderlichen Ätzdauer.

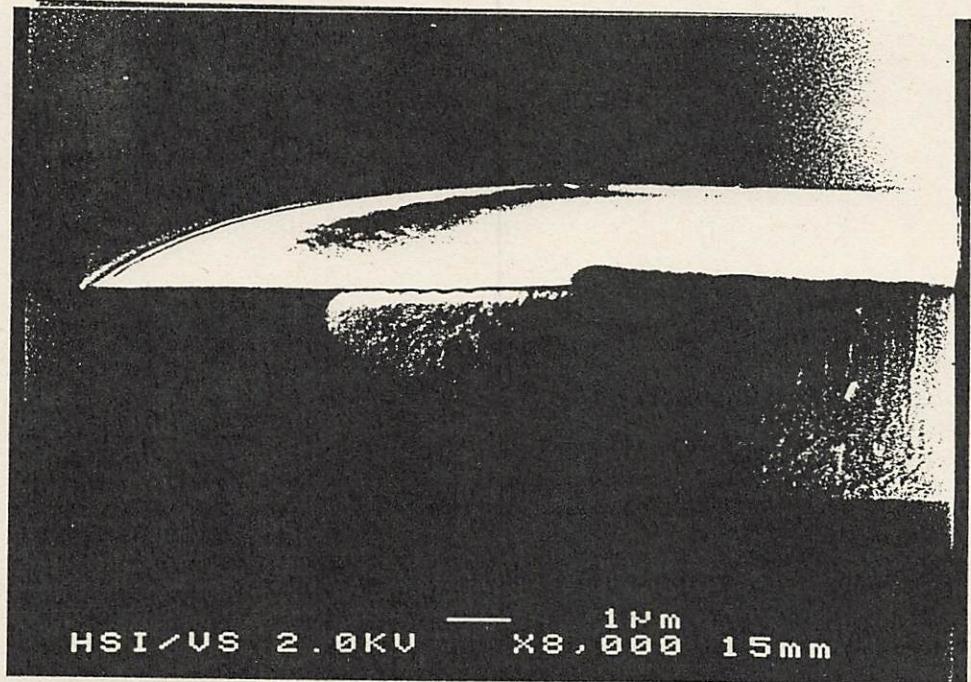


Abb. 9: ZnO-Ätzprofil nach 50% Überätzung.

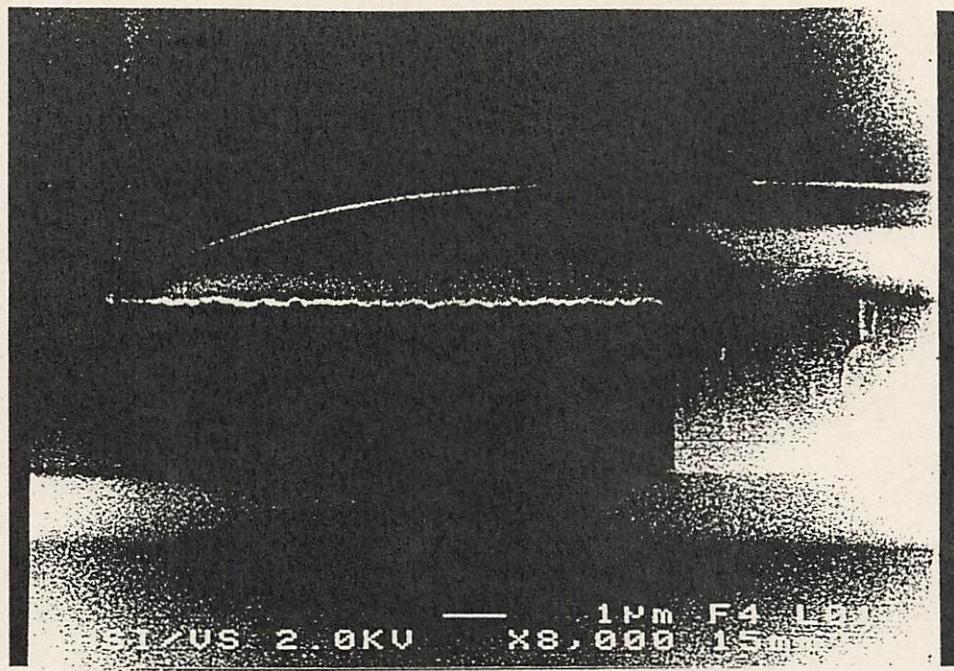


Abb. 10: ZnO-Ätzprofil nach 100% Überätzung.

Ergebnisse der Vorversuche:

- 1) Die besten Ätzergebnisse wurden mit 0,5% Essigsäure (100%) und 0,5 - 5% Phosphorsäure (85%) erzielt.
- 2) Die Ätzlösung und/oder die Probe müssen während des Ätzvorgangs bewegt werden.
- 3) Bei größeren Substraten (100 mm Durchmesser) treten hervorgerufen durch lokal unterschiedliche Strömungsverhältnisse während des Ätzvorgangs verschiedene Ätzraten auf. Dadurch kann ein Überätzen der Probe an manchen Stellen nicht vermieden werden. Die dadurch bewirkte Unterätzung der Resistenschicht muß durch ein entsprechendes Maskenlayout berücksichtigt werden.

Herstellung von Silizium-Dreifachbalkenstrukturen

Mit der Herstellung von piezoelektrisch angeregten Silizium-Dreifachbalkenstrukturen wurde im Berichtszeitraum begonnen. Folgende Prozeßschritte wurden im Berichtszeitraum durchgeführt:

Die Ausgangssubstrate (<100> n-Silizium, 2-5 Ωcm, Ø 100 mm, d = 520 -530 μm, einseitig poliert) wurden thermisch oxidiert. Das anschließend strukturierte Oxid diente als Diffusionsmaske für die darauffolgende p⁺-Dotierung zur Herstellung der Grundelektrode auf der Wafervorderseite. Darauf wurde Siliziumnitrid abgeschieden, das als Ätzmase für die Waferrückseite und als Isolationsschicht für die Vorderseite dient. Im Nitrid wurden die Kontaktpads und die Fenster für die ZnO-Beschichtung auf der p⁺-Wanne geöffnet. Anschließend wurde auf der Vorderseite ganzflächig Zinkoxid abgeschieden und photolithographisch strukturiert.

Literaturverzeichnis:

- [Fra88] : Franz, J.:
Piezoelektrische Sensoren auf Siliziumbasis für akustische Anwendungen,
Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 10, Nr.: 87, VDI Verlag - Düsseldorf (1988)
- [Sch92] : Schroth, A.:
"Modellierung mikromechanischer Membranen",
Diplomarbeit TU Chemnitz, 1992
- [VIB] : VIBRIT - Piezoceramics from Siemens, Ord.-No.: N-281/5035-101
- [Wal91] : Walsh, D., Culshaw, B.:
"Optically Activated Silicon Microresonator Transducers: An Assessment of
Material Properties", Sensors & Actuators A, 25-27 (1991) 711-716

ANHANG: Materialdaten

Bei den analytischen und numerischen Berechnungen wurden folgende Materialdaten verwendet.

Aluminiumnitrid: (aus: [Fra88])

Dichte: 3260 kg/m³

Elastizitätskoeffizienten S^E_{ij} [Pa⁻¹]:

3.53e-12	-1.01e-12	-0.76e-12	0	0	0
-1.01e-12	3.53e-12	-0.76e-12	0	0	0
-0.76e-12	-0.76e-12	3.00e-12	0	0	0
0	0	0	8.50e-12	0	0
0	0	0	0	8.50e-12	0
0	0	0	0	0	9.00e-12

Piezoelektrische Konstanten d_{ij} [C/N]:

0	0	0	0	-4.08e-12	0
0	0	0	-4.08e-12	0	0
-2.0e-12	-2.0e-12	5.53e-12	0	0	0

Dielektrizitätskonstanten ε_{ij} [As/Vm]:

8.0e-11	0	0
0	8.0e-11	0
0	0	9.5e-11

PZT-Keramik (VIBRIT420, Siemens):

Dichte: 7600 kg/m³

Elastizitätskoeffizienten S_{ij}^E [Pa⁻¹]:

15.4e-12	-5.7e-12	-6.0e-12	0	0	0
-5.7e-12	15.4e-12	-6.0e-12	0	0	0
-6.0e-12	-6.0e-12	18.7e-12	0	0	0
0	0	0	42.2e-12	0	0
0	0	0	0	45e-12	0
0	0	0	0	0	45e-12

Piezoelektrische Konstanten d_{ij} [C/N]:

0	0	0	0	0	525e-12
0	0	0	0	525e-12	0
-160e-12	-160e-12	355e-12	0	0	0

Dielektrizitätskonstanten ϵ_{ij} [As/Vm]:

14.16e-9	0	0
0	14.16e-9	0
0	0	14.16e-9