

Dynamische Berechnungen in der Mikromechanik - Simulation / Messung

Thomas Fabula

Institut für Mikro- und Informationstechnik
der Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.
Wilhelm-Schickard-Straße 10, D-7730 Villingen-Schwenningen

10. ANSYS Users' Meeting 1992

28.-30. Oktober 1992
in Arolsen

Tagungsunterlagen erhältlich bei:

CADFEM GmbH
Anzinger Straße 11
8017 Ebersberg

Dynamische Berechnungen in der Mikromechanik - Simulation / Messung

Th.Fabula

Institut für Mikro- und Informationstechnik
der Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.
Wilhelm-Schickard-Straße 10, D-7730 Villingen-Schwenningen

Einleitung

Bei der Realisierung von mikromechanischen Systemen sind für die Bauelementfunktion die technologisch zu realisierenden Funktionsprinzipien und die prozeßtechnischen Randbedingungen bereits in der Entwurfsphase zu berücksichtigen. Reale mikromechanische Komponenten zeigen aufgrund der Miniaturisierung und des hohen Integrationsgrades eine starke Wechselwirkung verschiedener physikalischer Einflußgrößen, die zu einer Überlagerung von unerwünschten Störeinflüssen führen können. Mit Hilfe der Finite-Elemente Methode (FEM) kann der Einfluß verschiedener physikalischer Parameter auf das Systemverhalten und die Auswirkung prozeßabhängiger Materialeigenschaften mikrotechnisch hergestellter Dünnschichtsysteme modelliert werden. Die Ergebnisse gekoppelter Finite-Elemente Berechnungen unter Berücksichtigung der piezoelektrischen Anregung/Abtastung bei mikromechanischen Strukturen in Mehrlagenaufbau (sog. Multilayerstrukturen) ermöglichen eine gezielte Vorhersage des statischen und dynamischen Verhaltens von piezoelektrisch betriebenen Sensoren und Aktoren. Der Vortrag geht anhand des Beispiels eines resonanten mikromechanischen Drucksensors auf die Möglichkeiten der FEM als Entwurfswerkzeug in der Mikromechanik ein. Durch einen Vergleich mit experimentellen Daten optischer und elektrischer Meßmethoden werden die Ergebnisse der analytischen und numerischen FE-Berechnungen diskutiert, um die Grenzen und erreichbaren Modellierungsgenauigkeiten aufzuzeigen.

Resonante mikromechanische Sensoren

Das Prinzip eines resonanten Sensors beruht auf der Abhängigkeit der Resonanzfrequenz des

Resonators von einer äußeren physikalischen Größe (z.B. Druck, Kraft, Temperatur), indem der Spannungszustand beeinflusst oder die Trägheit des Resonators über eine Massenbelegung verändert wird. Als Ausgangssignal steht eine quasi-digitale Meßgröße zur Verfügung. Der Sensor wird einerseits durch seine passiven Resonatoreigenschaften charakterisiert, wie Eigenfrequenz, Schwingungsmoden und der Kopplung zur Meßgröße, andererseits durch die Schwingungsanregung und -detektion, d.h. der Effizienz der Energieeinkopplung und der Auflösung des Abfragesystems.

In Abb. 1 ist das Funktionsprinzip eines mikromechanischen resonanten Drucksensors schematisch dargestellt. Die Anregung wird durch eine Zinkoxid-Dünnschicht bewerkstelligt, die infolge des transversalen piezoelektrischen Effektes bei Anlegen einer Wechselspannung Dehnungen und Kontraktionen auf der Membranoberfläche erzeugt und somit zu einer Membranauslenkung führt. Infolge einer Druckdifferenz zwischen Unter- und Oberseite der Membran wird der Siliziumresonator deformiert und damit verspannt, sodaß sich seine Resonanzfrequenz analog zur Meßgröße ändert. Wird der umgekehrte piezoelektrische Effekt zur Detektion genutzt, so kann mit einer geeigneten Auswerteschaltung der Sensor resonant betrieben und die Frequenzänderung über einen Frequenzzähler ausgewertet werden.

Materialeigenschaften mikromechanischer Werkstoffe

In Tab. 1 sind die mechanischen, thermischen, piezo- und dielektrischen Materialdaten einiger wichtiger in der Mikromechanik verwendeter Werkstoffe zusammengestellt. Als Substratmaterial wird neben einkristallinem Silizium auch einkristalliner Quarz eingesetzt, während es sich bei Aluminiumnitrid (AlN) und Zinkoxid (ZnO) um piezoelektrisch aktive Wandlerschichten handelt. Im Vergleich zu den in Dünnschichttechnologie (Sputterprozeß) hergestellten polykristallinen Halbleitermaterialien AlN und ZnO zeichnen sich PZT-Piezokeramiken (Blei-Zirkon-Titanat) durch extrem hohe, einkristallines Quarz durch relativ niedrige piezoelektrische Kopplungsfaktoren (d_{ij}) aus. Ein Maß für die Effizienz der Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie stellt der elektromechanische Kopplungsfaktor dar. Der effektive Kopplungsfaktor k_{eff} setzt sich aus einem material- und einem geometrieabhängigen Anteil zusammen und kann nur mit Hilfe gekoppelter FE-Berechnungen für eine gegebene Struktur ermittelt werden. Die materialabhängigen transversalen und planaren Kopplungsfaktoren k_{31} bzw. k_p^{mat} für reine Transversal- bzw. Planarschwinger sind abhängig von der mechanischen Steifigkeit S_{11}^B und den piezo- und dielektrischen Eigenschaf-

ten d_{31} bzw. e_{33}^T der piezoelektrischen Dünnschicht (Zusammenhang siehe Tabelle 1). Da die Materialdaten mikrotechnisch hergestellter Schichtsysteme stark vom technologischen Herstellungsprozeß beeinflußt werden, unterscheiden sie sich u.U. erheblich von denen des Festkörpermateri als (Bulk). Lediglich die Materialdaten für Aluminiumnitrid in Tabelle 1 beziehen sich auf einige μm dünne Schichten [Fra88], die anderen Angaben beziehen sich auf Bulk-Material ([LB82], [Tic80]).

Berechnung der Eigenfrequenzen

Mit Hilfe der Modalanalyse (ANSYS-Analyseoption: KAN,2) wurden die Eigenfrequenzen und -schwingungsformen der resonanten Drucksensormembran berechnet und verschiedene FE-Modelle erstellt, um den Einfluß der Modellparameter zu untersuchen. Abb. 2 zeigt das dreidimensionale FE-Modell einer Viertelmembran, ganzflächig überdeckt von einer piezoelektrischen Dünnschicht. Die schräge Einspannung entspricht den ätzbegrenzenden (111)-Ebenen, die durch den anisotropen naßchemischen Herstellungsprozeß der Druckmembran bedingt sind. Die Abmessungen der Druckmembran variieren je nach Anwendungsbereich (Membrankantenlänge: 9,2 mm, Membrandicken: 20 - 150 μm). Der Membransockel hat eine Breite von 5 mm und eine Höhe von etwa 0,5 mm.

In Tab. 2 sind die Ergebnisse der Parametereinflüsse auf die Resonanzfrequenzen und effektiven Kopplungsfaktoren des Grundmodes von Plattenmodellen (P1, P2, P3, P8), mit jeweils einer Elementlage pro Schicht, und von 3D-Membranmodellen mit (111)-Einspannung (M4 - M8) zusammengestellt. Zur Vereinfachung wurde bei Silizium mit isotropen Materialeigenschaften gerechnet ($E = 1,689 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$, $\nu = 0,0625$, STIF45), während für die piezoelektrischen Schichten aufgrund der Anisotropie der Elastizitäts- und piezoelektrischen Koeffizienten die vollen Materialmatrizen (NL-Table bei STIF5) berücksichtigt wurden. Die berechnete Serienresonanzfrequenz f_s entspricht der elektrischen Kurzschluß-Bedingung ($E=0$), die Parallelresonanzfrequenz f_p entspricht dem elektrischen Leerlauf bei offenen Elektroden ($D=0$) entsprechend dem Ersatzschaltbild für piezoelektrische Resonatoren [Tic80]. Für den effektiven elektromechanischen Kopplungsfaktor des Grundschwingungsmodes gilt näherungsweise $k_{\text{eff}}^2 \approx 2 \cdot (f_p - f_s) / f_p$.

In Tab. 3 ist der Einfluß des FE-Modells bei der Modalanalyse grafisch dargestellt. Infolge der unterschiedlichen Randeinspannungsbedingungen ändern sich bei den Plattenmodellen die Resonanzfrequenzen deutlich. Durch die Berücksichtigung der realen Membraneinspannung

(FE-Modelle: M5 - M8) erniedrigen sich die Frequenzwerte, jedoch steigt gleichzeitig der Modellieraufwand beträchtlich an. Der Wert für den effektiven Kopplungsfaktor stabilisiert sich weitgehend unabhängig von der Netzverfeinerung auf etwa 20%. Einen Vergleich der numerisch berechneten Resonanzfrequenzen mit analytisch ermittelten Werten zeigt Abb. 3 in Abhängigkeit der Gesamtmembrandicke ($t_{\text{Si}} = 20 \mu\text{m} = \text{const}$). Die analytische Näherungsformel geht von einer ideal homogenen, unendlich steif eingespannten Platte aus. Der Bimorph-Charakter des Drucksensors wird lediglich durch eine Gewichtung der Materialdaten über die Schichtdicken berücksichtigt. Während für dünne ZnO-Schichtdicken die analytische Lösung mit den FE-Ergebnissen gut übereinstimmt, wird die Abweichung ab einem Schichtdickenverhältnis von $t_{\text{ZnO}} / t_{\text{Si}} \geq 1$ signifikant, da die Einspannbedingung auch für die ZnO-Schicht gilt. Die analytisch berechnete Resonanzfrequenz entspricht der Serienresonanzfrequenz f_s aufgrund der Verwendung der Steifigkeitskoeffizienten S_{ij}^B . Die Verwendung eines an ZnO-Dünnschichten bestimmten, reduzierten E-Moduls von $E / (1-\nu^2) \approx 150 \text{ GPa}$ verursacht eine nur geringfügige Frequenzabweichung.

Ermittlung der Schwingungsmoden

In Tab. 4 werden die rechnerisch und experimentell ermittelten Resonanzfrequenzvielfachen c_i der Schwingungsmoden der Drucksensormembran miteinander verglichen. Die analytisch ermittelten Frequenzvielfachen für isotropes und anisotropes Materialverhalten sind der Literatur [Pon91] entnommen und gehen von Platten mit idealer Einspannung aus. Zum Vergleich wurden mit FEM sowohl 2D-Schalenmodelle (STIF 43, 93) mit isotropem Materialverhalten, als auch 3D-Volumenmodelle (STIF 45, 95, 64) mit anisotropem Materialverhalten und (111)-Einspannung berechnet [Sch92]. Die Frequenzvielfachen der niedrigen Schwingungsmoden korrelieren gut mit den analytischen Ergebnissen.

Um die piezoelektrisch angesteuerten Drucksensormembranen experimentell zu charakterisieren, wurden sie optisch und elektrisch vermessen. Mit Hilfe eines Laser-Doppler-Vibrometers (POLYTEC OFV1102) wurden die frequenzabhängigen Amplitudenspektren und die ortsabhängigen Modenverläufe erfaßt. Die Resonanzamplitude des Grundmodes M_{11} betrug etwa $1 \mu\text{m}$. Die Schwingungsgüte betrug bei Normalluftdruck beim Grundmode etwa 100, bei den Moden M_{13} und M_{33} etwa 310 bzw. 360. Im Vergleich zu den analytischen und numerischen Berechnungen fiel die gemessene Resonanzfrequenz des Grundmodes um etwa 2 kHz geringer aus. Hieraus konnte die technologisch bedingte innere Druckspannung in der

ZnO-Schicht ($\sigma \approx -15$ MPa) bestimmt werden. Bei den elektrischen Messungen wurde mit Hilfe eines Impedance/Gain-Phase Analyzers (HP4194A) das Übertragungs- (Gain) und Phasenverhalten der Drucksensormembranen vermessen und aus den Resonanzfrequenzen f_s und f_p der effektive Kopplungsfaktor k_{eff} bestimmt. Aufgrund schlecht ausgeprägten Resonanzverhaltens konnten einige Moden elektrisch nicht eindeutig nachgewiesen werden, doch stimmen die Frequenzvielfachen für M_{13} und M_{33} sehr gut mit den optisch gemessenen Werten überein. Die Abweichung zu den berechneten Werten nimmt auch hier zu höheren Schwingungsmoden hin zu.

In Abb. 4 sind die radialen Modenverläufe entlang der Membranmitte für die Moden M_{31} und M_{13} aufgetragen. Gestrichelt sind die optisch gemessenen Amplitudenwerte, im Vergleich dazu die FE-berechneten Daten aufgetragen, die qualitativ übereinstimmen. Bei genügend großen Schwingungsamplituden (einige hundert nm) konnten alle experimentell ermittelten Moden mit Hilfe der FEM-Ergebnisse charakterisiert und zugeordnet werden.

Frequenzverschiebung infolge Druckbeaufschlagung

Das Resonanzverhalten von Membranen unter Druckbeaufschlagung ist abhängig von den in der Membran induzierten Membranspannungen, die bei "großen" Auslenkungen auftreten. Die nichtlinearen Effekten sind abhängig vom Verhältnis der Membrandicke zur Kantenlänge, des einwirkenden Druckes und der Einspannungsart [Fab92]. Die Druckempfindlichkeit von Membranen wurde berechnet, indem durch eine nichtlineare, statische FE-Berechnung (large deflection, stress stiffening) die durch die Druckdifferenz hervorgerufene Steifigkeitsänderung der Sensormembran ermittelt wurde. Diese wird zur Berechnung der Frequenzverschiebung der vorgespannten Druckmembran (/FREQ-Kommando) herangezogen und so die Sensor-Kennlinie ermittelt. In Abb. 5 sind FE-Berechnungen und optischen Messungen einer 148 μm dicken Silizium-Membran mit einer etwa 15 μm ZnO-Schicht dargestellt. Aufgrund der Resonanzfrequenzabweichung von etwa 4 kHz kann auf eine innere Druckspannung der ZnO-Schicht von etwa $\sigma \approx -100$ MPa geschlossen werden. Die gemessene Druckempfindlichkeit des Sensors beträgt etwa 1 Hz/mbar [Sch92]. Bei Erniedrigung der Membrandicke auf 125 μm konnte zwar der richtige Frequenzwert reproduziert werden, jedoch ist dies mit einer erhöhten Druckempfindlichkeit verbunden.

Schichtdickenabhängigkeit des Kopplungsfaktors

Bei Sensor- und Aktoranwendungen mit piezoelektrischer Anregung sind für die Funktionsoptimierung z.B. Aussagen über die Formgebung der Elektroden zwecks Modenselektivität und des günstigsten Schichtdickenverhältnisses zwecks maximaler elektromechanischer Kopplung von besonderem Interesse. Daher wurde mit einem einfachen aber genügend genauen Bimorph-Plattenmodell der Einfluß des Schichtdickenverhältnisses der Piezoschicht und Siliziummembran und der Auswirkung verschiedener piezoelektrischer Materialien untersucht. In Abb. 6 ist der effektive elektromechanische Kopplungsfaktor für AlN, ZnO und PZT-Keramik in Abhängigkeit der Piezoschichtdicke aufgetragen. Deutlich ist zu erkennen, daß die verschiedenen Materialien unterschiedliche optimale Schichtdicken aufweisen. Für AlN, ZnO und PZT werden die maximalen Kopplungsfaktoren von 10%, 25% und 39% bei Schichtdicken von etwa 5 - 6 μm , $9 \pm 1 \mu\text{m}$ und $15 \pm 2 \mu\text{m}$ erreicht und liegen damit im realisierbaren Bereich der Dünnschichttechnik. Die gemessenen Werte streuen allerdings stark, sodaß noch keine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den Simulationsdaten erreicht werden konnte.

Zusammenfassung

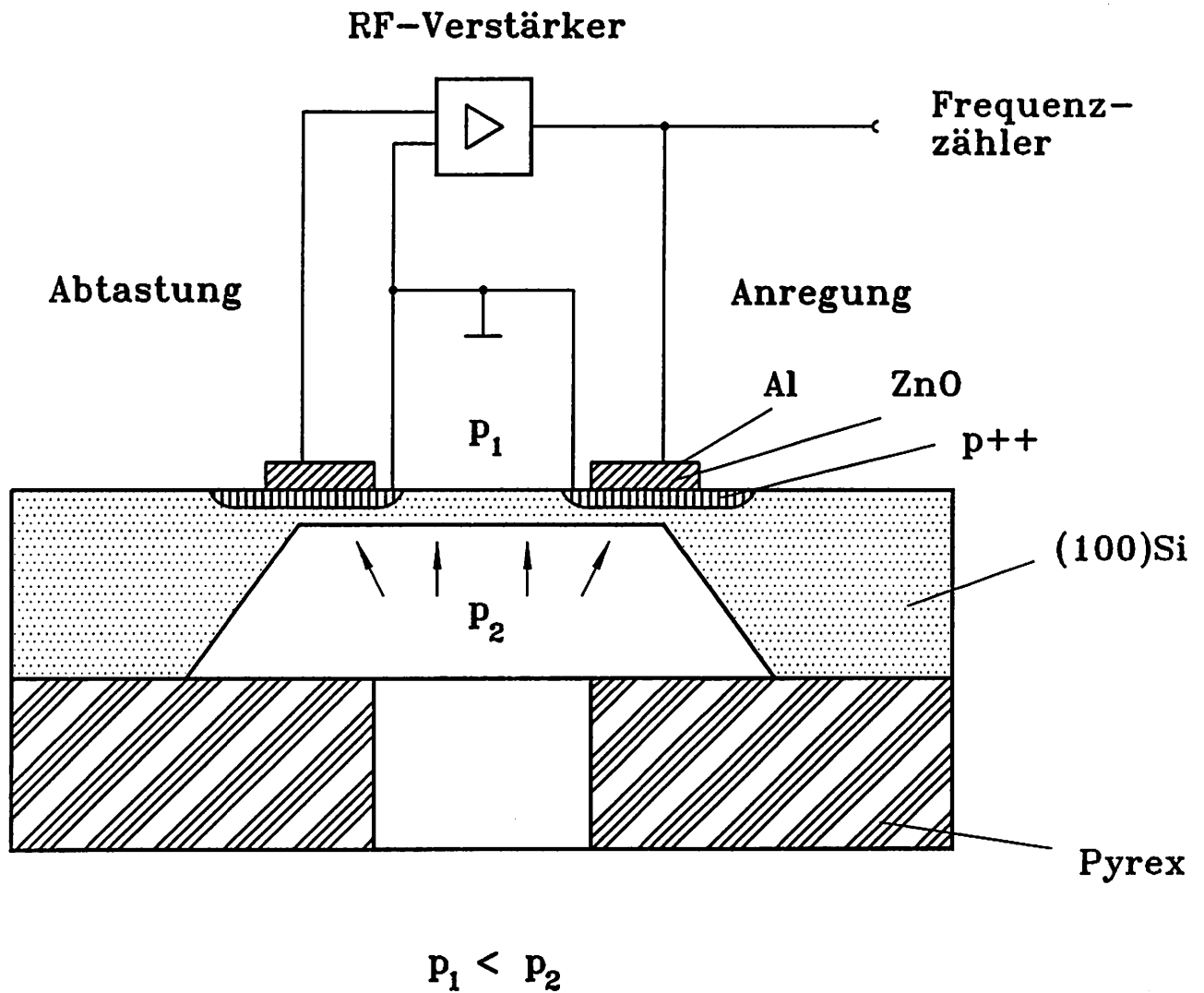
Die vorgestellten Untersuchungen haben gezeigt, daß die Methode der Finiten Elemente, prinzipiell geeignet ist, das statische und dynamische Verhalten mikromechanischer Sensoren zu beschreiben. Bei der Berechnung der Resonanzfrequenzen und Schwingungsmoden, sowie der Druckempfindlichkeit von resonanten Siliziummembranen konnte eine gute Übereinstimmung sowohl mit der analytischen Beschreibungsweise, als auch mit den Meßergebnissen erzielt werden. Insbesondere die Möglichkeiten des Programmpakets ANSYS, gekoppelte Feldberechnungen durchzuführen, erlauben eine Modellierung des Verhaltens piezoelektrisch angeregter Sensoren und Aktoren. Damit lassen sich bereits in der Entwurfsphase wichtige Vorgaben, z.B. das optimale Schichtdickenverhältnis, für die nachfolgenden technologischen Prozeßschritte ableiten. Einschränkend ist jedoch zu erwähnen, daß neben den unbekannten Materialeigenschaften mikrotechnisch hergestellter Dünnschichtsysteme vor allem die inneren Schichtspannungen in Multilayersystemen nicht direkt modellierbar sind.

Danksagung: Für die freundliche Bereitstellung von Drucksensoren für Meßzwecke möchte ich Herrn Dr. G. Flik, Robert BOSCH GmbH, meinen Dank aussprechen.

Literaturverzeichnis

- [Fab92] : Th. Fabula, A. Schroth:
"Simulation des dynamischen Verhaltens mikromechanischer Membranen",
VDI-Fachtagung für Geräte- und Mikrosystemtechnik, TU Chemnitz (1992)
- [Fra88] : J. Franz:
"Piezoelektrische Sensoren auf Siliziumbasis für akustische Anwendungen",
VDI-Berichte, Reihe 10: Informatik/Kommunikationstechnik, Nr. 87, VDI-
Verlag Düsseldorf (1988)
- [LB82] : Landolt-Börnstein:
"Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaft und Technik",
Gruppe III, Band 17a, Berlin, Springer Verlag (1982)
- [Pon91] : P. Pons, G. Blasquez:
"Natural vibration frequencies of silicon diaphragms",
Proceedings: Transducers of the IEEE, San Francisco (1991)
- [Sch92] : A. Schroth:
"Modellierung mikromechanischer Membranen", Diplomarbeit (veröffent-
licht), TU Chemnitz (1992)
- [Tic80] : J. Tichy, G. Gautschi:
"Piezoelektrische Meßtechnik", Springer-Verlag, Berlin (1980)

Resonanter Drucksensor



Hahn-Schickard-Institut für Mikro- und Informationstechnik

Tab.1: Materialeigenschaften mikromechanischer Werkstoffe

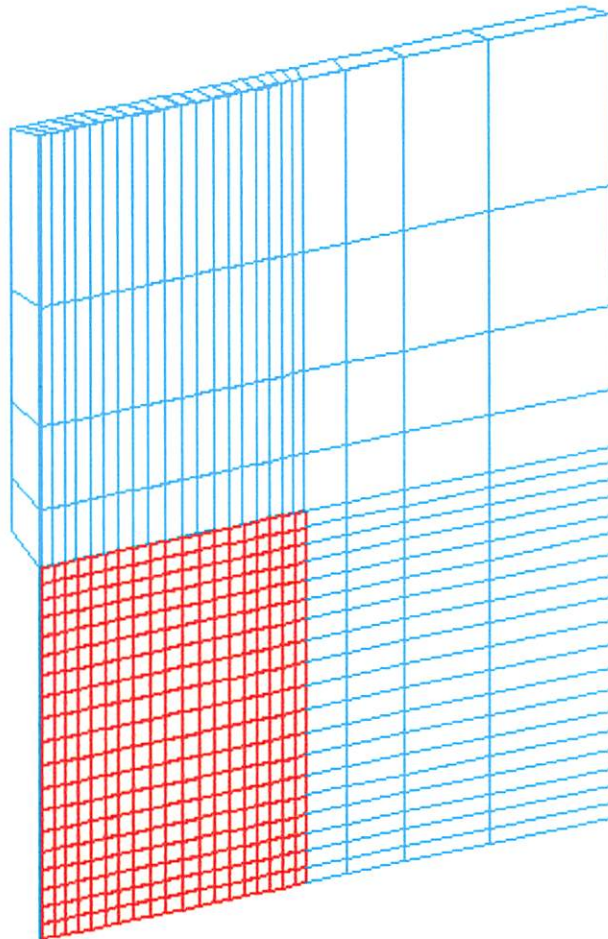
Bezugstemperatur: T = 300 K

	ρ [kg/m³]	S_{11}^E/S_{12}^E [10 ⁻¹² Pa ⁻¹]	ν	d_{31} [10 ⁻¹² C/N]	d_{33} [10 ⁻¹² C/N]	$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	α_{th} [10 ⁻⁶ K ⁻¹]	λ [W/ mK]	k_p^{mat}
Si	2329	7,68 -2,14	0,28	---	---	?	?	2,3 - 2,6	156	---
Quarz	2650	12,78 -1,81	0,14	$d_{11} = 2,30$	$d_{14} = -0,67$	4,51	4,63	$7,48 \parallel z$ $13,7 \perp z$	12	(0,1)
AlN	3260	3,53 -1,01	0,29	-2,00	5,53	9,04	11,4	$4,15 \parallel z$ $5,27 \perp z$?	0,18
ZnO	5470	7,91 -3,30	0,42	-5,12	12,0	9,26	8,2	$2,92 \parallel z$ $4,75 \perp z$	54	0,40
PZT	7600	15,4 -5,70	0,37	-160	355	1600	1600	$\approx 7,0$	1,2	0,61

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

$$k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{S_{11}^E \cdot \epsilon_{33}^T}$$

1



Bimorph-Membran mit Piezoschicht

```

ANSYS  4.4A1
SEP 29 1992
12:03:02
PLOT NO.    6
POST1 ELEMENTS
TYPE NUM

XU  =-1
YU  =0.3
ZU  =1
DIST=0.006205
XF  =0.004979
YF  =0.004979
ZF  =0.273E-03
PRECISE HIDDEN
  
```

Abb. 2: FE-Modell einer Bimorph-Membran

Tab. 2: Parametereinflüsse beim Membran-Modell

Variation: Elementvernetzung, Anzahl der dynamischen Hauptfreiheitsgrade (MDOF)

FE-Modelle: Plattenmodell mit unendlich steifer Einspannung (P1 - P8),

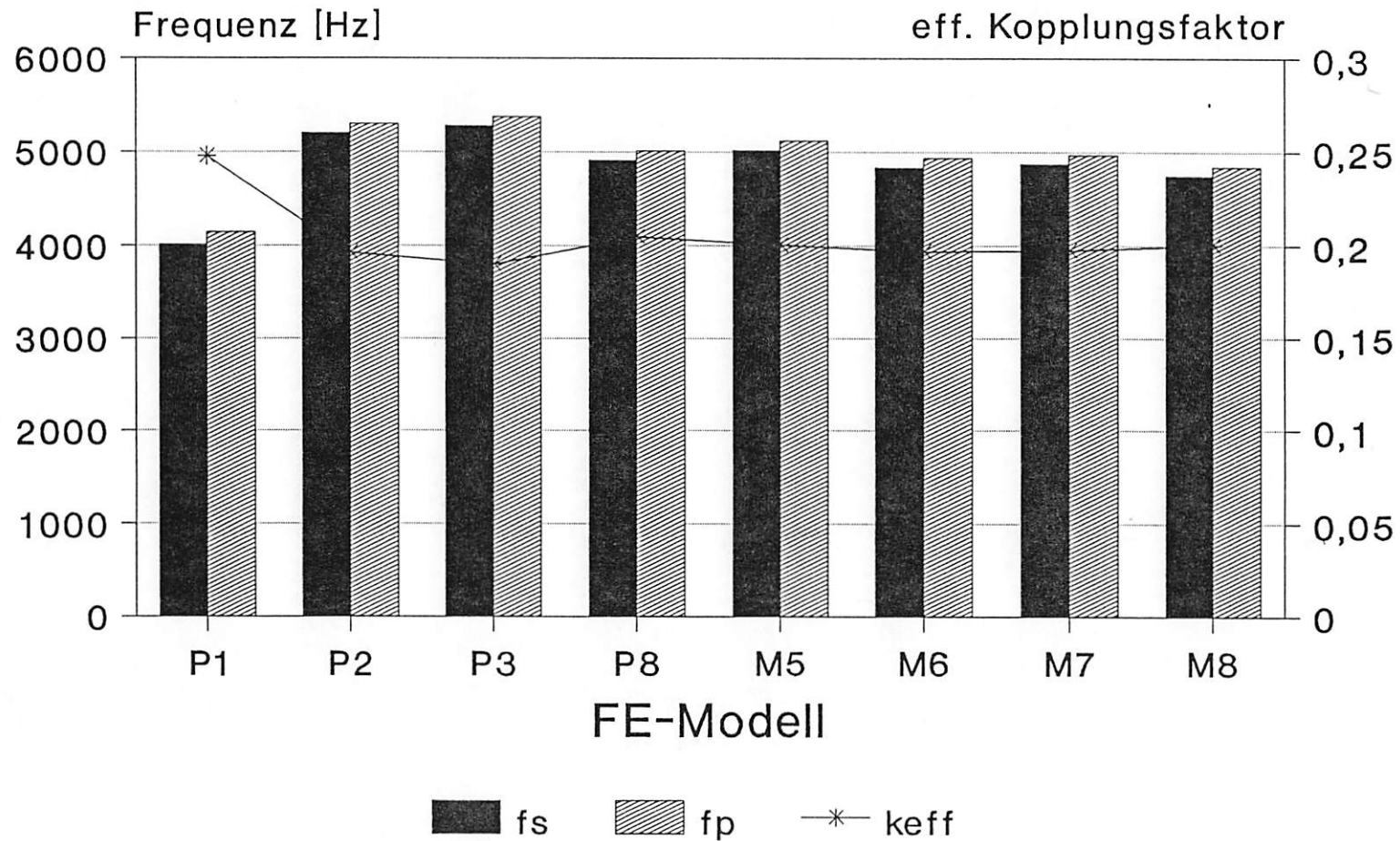
3D-Membran mit (111)-Einspannung, variable Elementunterteilung (M5 - M8)

Si/ZnO-Bimorphmembran: Abm.: $9,2 \times 9,2 \text{ mm}^2$, $t_{\text{Si}} = t_{\text{ZnO}} = 20 \text{ }\mu\text{m}$

f_s : Serienresonanzfrequenz, f_p : Parallelresonanzfrequenz, k_{eff} : effektiver Kopplungsfaktor (Grundswingungsmode)

FEM-Modell:	Elemente / Knoten	MDOFs	Seiten- teilung	Aspekt- verhält.	f_s [kHz]	f_p [kHz]	k_{eff}	Bemerkungen:
Nr. P1	200/363	300	10	23	4,016	4,143	0,2476	nur <u>untere</u> Knoten- lage eingespannt
Nr. P2	200/363	300	10	23	5,196	5,298	0,1962	Si: eingespannt ZnO-Schicht frei
Nr. P3	200/363	300	10	23	5,281	5,378	0,1899	Si-Membran <u>und</u> ZnO eingespannt
Nr. P8	3200/5043	300	40	ca. 6	4,907	5,012	0,2047	Si: eingespannt ZnO-Schicht frei
Nr. M5	450/795	100	13	ca. 18	5,015	5,117	0,2005	Sockel <u>und</u> Seiten- teile fixiert
Nr. M6	450/795	100	13	ca. 18	4,836	4,931	0,1970	<u>nur</u> Sockel fixiert Breite: 1 mm
Nr. M7	578/999	100	13	ca. 18	4,871	4,967	0,1974	<u>nur</u> Sockel fixiert Breite: 5 mm
Nr. M8	1058/1767	300	19	ca. 12	4,745	4,842	0,2004	- " -

Tab. 3: FE-Modelleinfluß (Modalanalyse)



Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der Membrandicke

Vergleich: analytische Rechnung \longleftrightarrow FEM

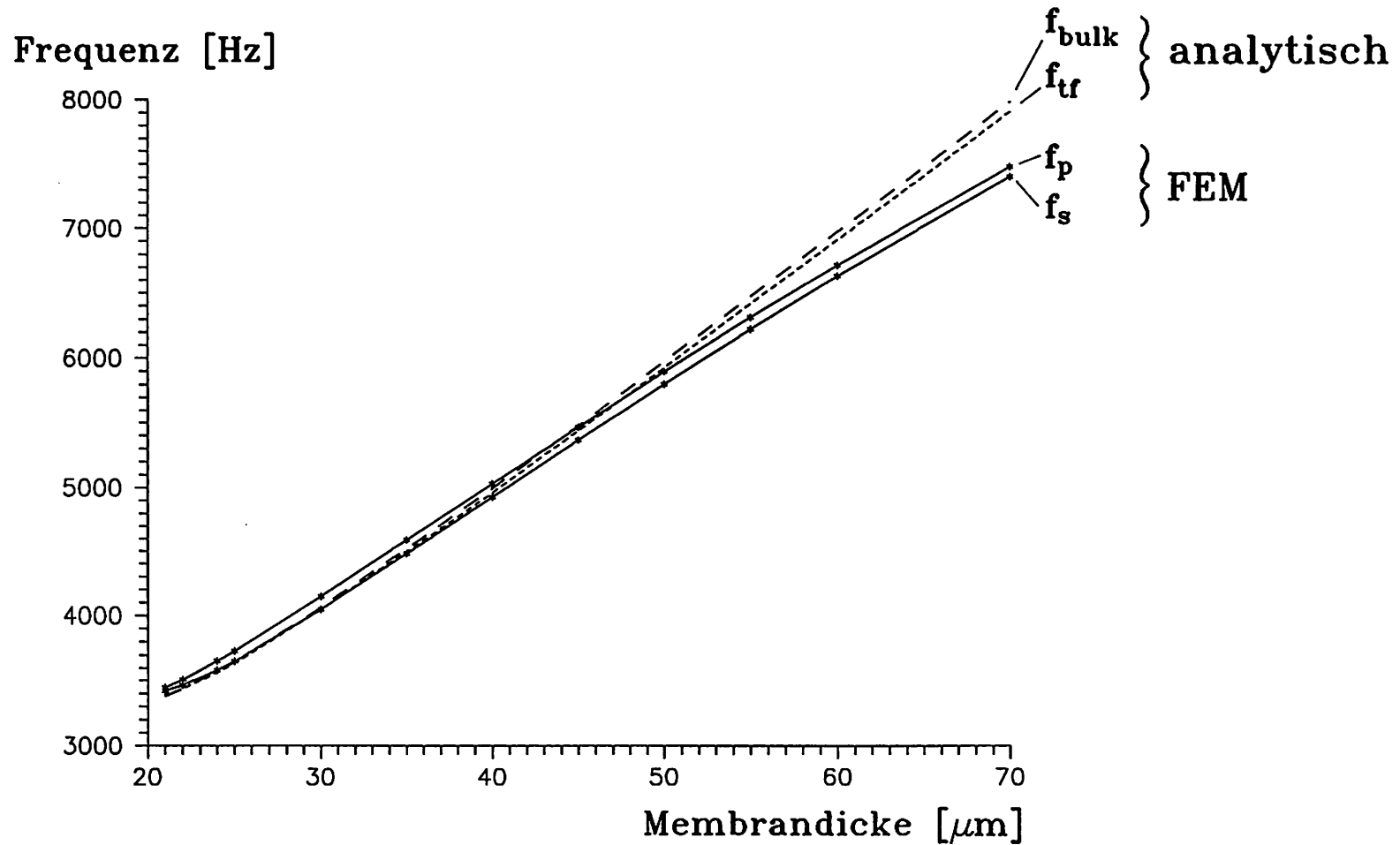








Abb. 3:

Resonanzfrequenzen in Abhängigkeit der Membrandicke

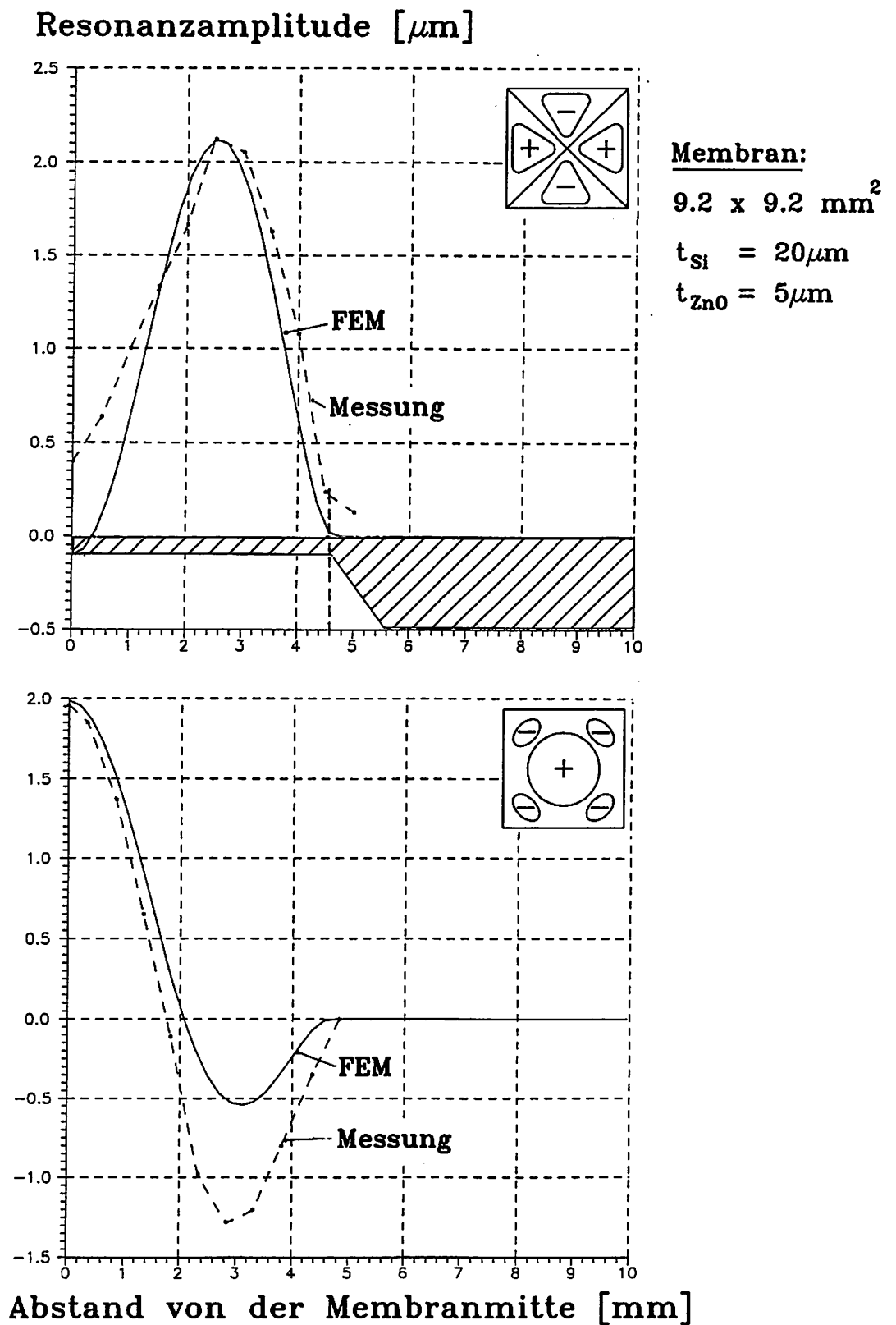
Tab. 4: Resonanzfrequenzen-Vergleich: Analytische Rechnung \Leftrightarrow FEM \Leftrightarrow Messung

Resonanzfrequenzvielfaches c_i : $f_i = c_i \cdot f_0$

- analytisch: ideal homogene, quadratische Silizium-Platte (steife Einspannung)
- FE-Modelle: Si-Membran, Abm.: $9,2 \times 9,2 \text{ mm}^2$, $t_{\text{Si}} = 100 \text{ }\mu\text{m}$
- Messungen: Si/ZnO-Bimorphmembran, Abm.: $9,2 \times 9,2 \text{ mm}^2$, $t_{\text{Si}} = 50 \text{ }\mu\text{m}$, $t_{\text{ZnO}} = 15 \text{ }\mu\text{m}$
(k_{eff} : effektiver elektromechanischer Kopplungsfaktor)

Schwingungs- mode		analytisch		FEM		opt. Messung		elektr. Messung	
		isotrop [Pon91]	aniso. [Pon91]	2D isotrop	3D an- isotrop	c_i	f_i [kHz]	c_i	k_{eff}
	M_{11}	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	7,24	1,00	0,10
	M_{12}	2,04	2,00	2,04	2,11	2,10	15,22	---	---
	M_{22}	3,01	2,90	3,00	3,03	2,86	20,71	---	---
	M_{31}	3,66	3,62	3,65	3,75	---	---	---	---
	M_{13}	3,68	3,63	3,67	3,77	3,94	28,57	3,92	0,08
	M_{33}	6,12	5,87	6,11	6,02	6,35	46,0	6,34	0,07

Radiale Modenverläufe einer Si-Membran



Hahn-Schickard-Institut für Mikro- und Informationstechnik

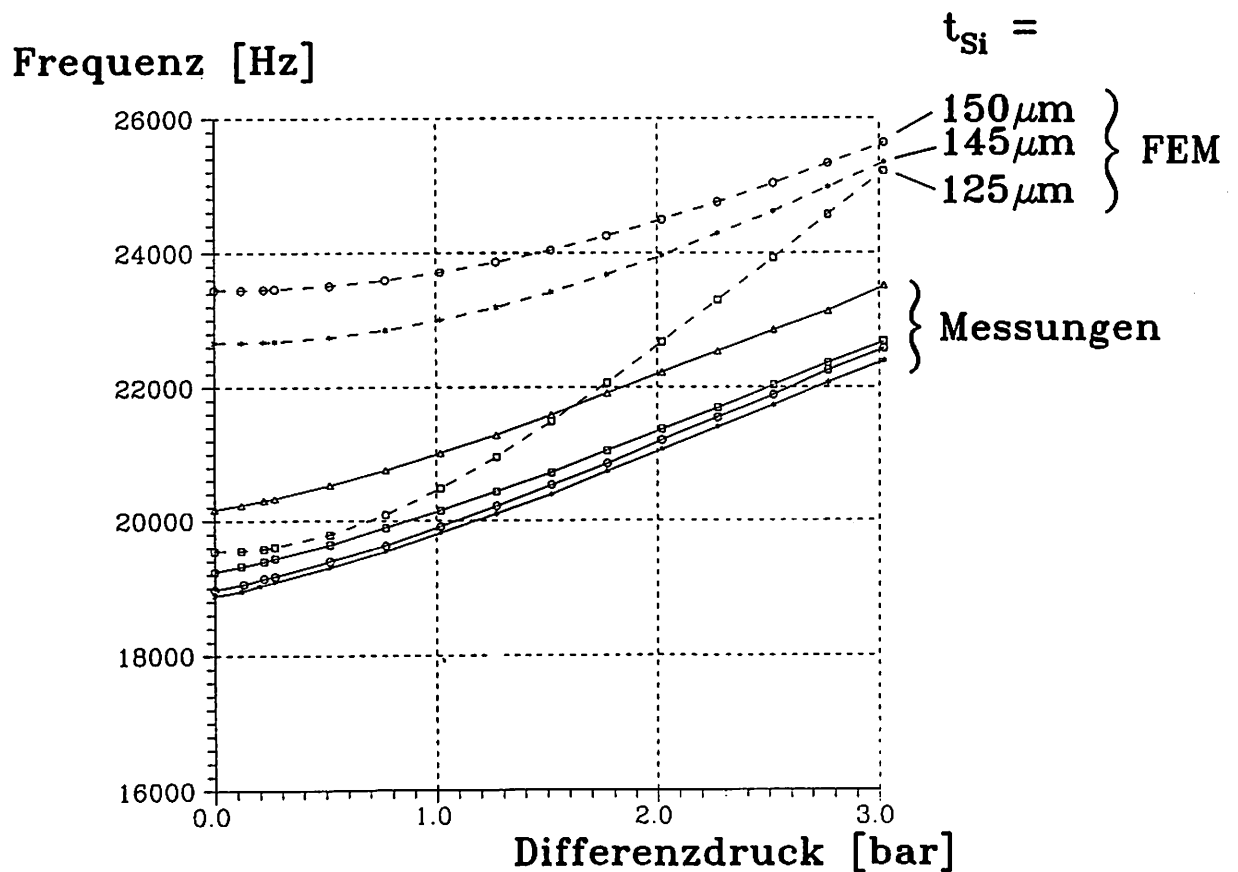
Abb. 4: Radiale Modenverläufe einer Si-Membran

Frequenzverschiebung bei Druckbeaufschlagung

Membran: $9.5 \times 9.5 \text{ mm}^2$

$t_{\text{Si}} = 148 \mu\text{m}$

$t_{\text{ZnO}} = 15 \mu\text{m}$

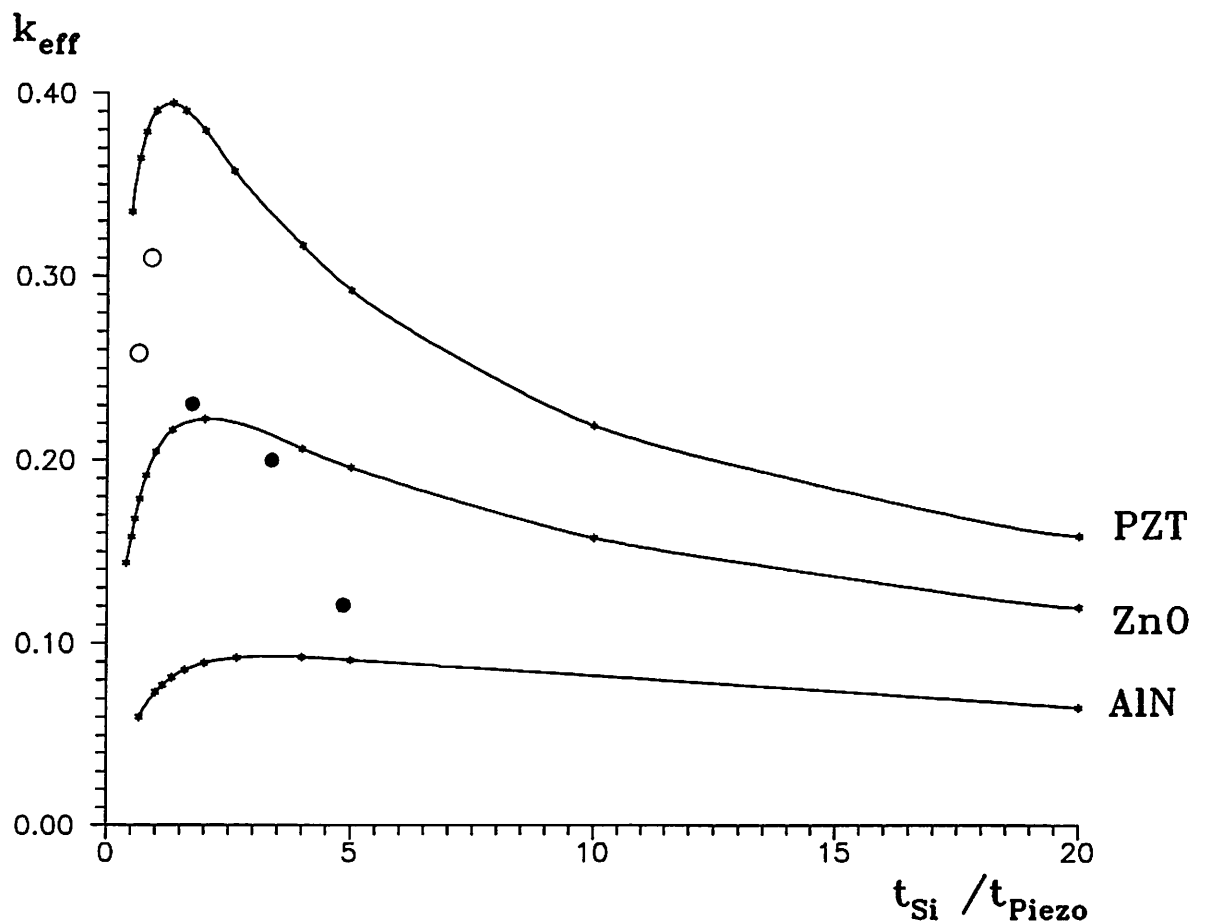
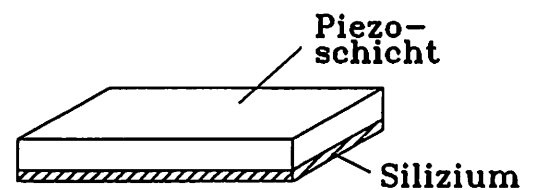


Hahn-Schickard-Institut für Mikro- und Informationstechnik

Abb. 5: Frequenzverschiebung bei Druckbeaufschlagung

Kopplungsfaktor in Abhängigkeit des Schichtdickenverhältnisses

Membran: $9.2 \times 9.2 \text{ mm}^2$
 $t_{\text{Si}} = 20 \mu\text{m}$



Hahn-Schickard-Institut für Mikro- und Informationstechnik

Abb. 6: Elektromechanischer Kopplungsfaktor in Abhängigkeit
des Schichtdickenverhältnisses