

## Kapitel 5

# Piezoelektrische Dünnschichtstrukturen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Modellierung und experimentellen Charakterisierung von piezoelektrisch angetriebenen Mikrostrukturen. Mit Hilfe der im vorhergehenden Kapitel entwickelten FE-Modelle wird das dynamische Verhalten von mikromechanischen Resonatoren in Bimorphaufbau unter Berücksichtigung des elektromechanischen Wandlungsprinzips simuliert. Für die effiziente Anregung der Bimorphstrukturen war eine geeignete Auslegung der Elektrodengeometrie erforderlich und das Verhältnis der Schichtdicken zu optimieren. Weiterhin wird der Einfluß des piezoelektrischen Dünnschichtsystems untersucht und die erreichbaren elektromechanischen Kopplungsfaktoren verschiedener Wandlergeometrien berechnet. Bei der Ermittlung des effektiven elektromechanischen Kopplungsfaktors, der die Anregungseffizienz zu charakterisieren erlaubt, müssen neben den mechanischen auch die elektrischen Randbedingungen berücksichtigt werden. Mit Hilfe der piezoelektrischen Anregung können neben dem mechanischen Schwingungsverhalten der Sensoren auch verschiedene elektrische Kenngrößen, wie z.B. das frequenzabhängige Impedanz- und Phasenverhalten abgeleitet werden. Auf diese Weise konnte mit Hilfe der gekoppelten Feldberechnungen bei piezoelektrisch angetriebenen Membrandrucksensoren die Modenselektivität verbessert und ein unimodaler Betrieb meßtechnisch nachgewiesen werden. Weiterhin konnte rechnerisch gezeigt werden, daß die Temperaturquerempfindlichkeit von Membrandrucksensoren im Bimorphaufbau erheblich reduziert werden kann.

### 5.1 FE-Modell der Bimorphstruktur

Im vorangegangenen Kapitel wurden mit Hilfe der Modalanalyse die Eigenfrequenzen und -schwingungsformen von resonanten Druck- und Kraftsensoren rechnerisch und experimentell untersucht. Bei den piezoelektrisch betriebenen Membrandrucksensoren wurden

die mechanische Eigenschaften der  $ZnO$ -Dünnschichten berücksichtigt, aber der Einfluß der elektrischen Randbedingungen vernachlässigt. Bei piezoelektrischen Medien wird infolge der bidirektionalen elektromechanischen Wechselwirkung das mechanische Verhalten der Bimorphwandler durch die äußere elektrische Beschaltung beeinflusst. Daher werden im folgenden die elektrischen Randbedingungen mit berücksichtigt.

Hierfür wurde ein dreidimensionales FE-Modell entwickelt, das in **Abbildung 5.1** dargestellt ist. Aus Symmetriegründen handelt es sich um eine Viertelmembran, die ganzflächig

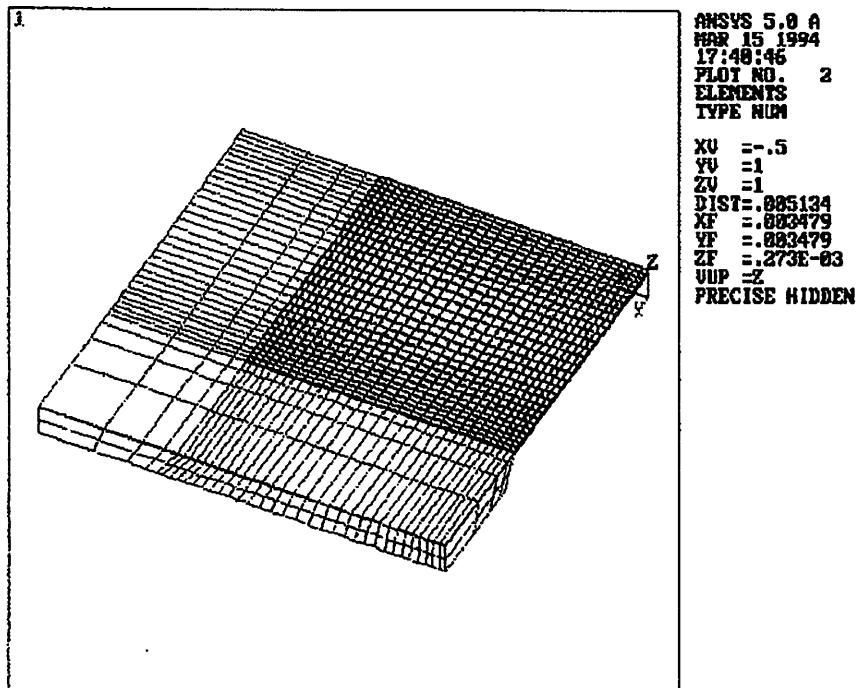


Abbildung 5.1: FE-Modell einer Silizium-Bimorphmembran

von einer piezoelektrischen Dünnschicht überdeckt ist. Die  $Al$ -Elektroden wurden im FE-Modell vernachlässigt, da sie im Vergleich zur piezoelektrischen Dünnschicht sehr dünn sind ( $h_{ZnO} \approx 10 - 100 h_{Al}$ ). Die schräge Einspannung entspricht den ätzbegrenzenden (111)-Siliziumebenen, die durch den anisotropen naßchemischen Herstellungsprozeß der Siliziummembran bedingt sind. Die Abmessungen der Sensormembran variieren je nach Anwendungsbereich. Die in dieser Arbeit betrachteten mikromechanisch gefertigten Membranen weisen eine Kantenlänge von 5 bzw. 9,2 mm und Membrandicken von 20–200  $\mu m$  auf. Der Membransockel hat eine untere Breite von 5 mm und eine Höhe von etwa 0,525 mm, die durch die Dicke des Siliziumwafers gegeben ist.

Zur Eingrenzung der Gültigkeit der analytischen Beschreibungsansätze für Bimorphstrukturen wurde die Resonanzfrequenz in Abhängigkeit der Gesamtmembrandicke betrachtet, um den Einfluß des zusätzlichen Dünnschichtsystems zu untersuchen. In **Abbildung 5.2** ist die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz einer Silizium-Bimorphmembran mit einer piezoelektrischen  $ZnO$ -Dünnschicht von der Gesamtmembrandicke dargestellt. Die Dicke der Siliziummembran betrug 20  $\mu m$  und die Dicke der  $ZnO$ -Schicht wurde von 1 bis 50  $\mu m$

variiert. Die analytische Näherungsformel nach Gleichung (2.23) geht von einer ideal homogenen, unendlich steif eingespannten Platte aus, wobei der Bimorphcharakter lediglich durch eine Gewichtung der Materialdaten ( $\hat{E}, \rho$ ) über die Schichtdicken berücksichtigt wird. Zur Vereinfachung wurde bei Silizium mit isotropen Materialeigenschaften gerechnet (Gleichung 2.27), so daß dreidimensionale, lineare Volumenelemente (*SOLID45*) verwendet werden konnten. Aufgrund der hexagonalen Kristallsymmetrie der piezoelektrischen Schicht (siehe Abbildung 2.4) muß die Anisotropie der Elastizitäts- und piezoelektrischen Eigenschaften berücksichtigt werden. Hierzu bietet ANSYS das dreidimensionale *Multi-Field-Element SOLID5* an, bei dem die Strukturfreiheitsgrade  $\vec{u}$  und der elektrische Potential-Freiheitsgrad  $\phi$  verwendet wurden. Bei der *ZnO*-Dünnschicht sind die anisotropen Materialkennwerte aus Tabelle 2.3 herangezogen worden.

Entsprechend dem elektrischen Ersatzschaltbild für elektromechanisch gekoppelte Schwin-

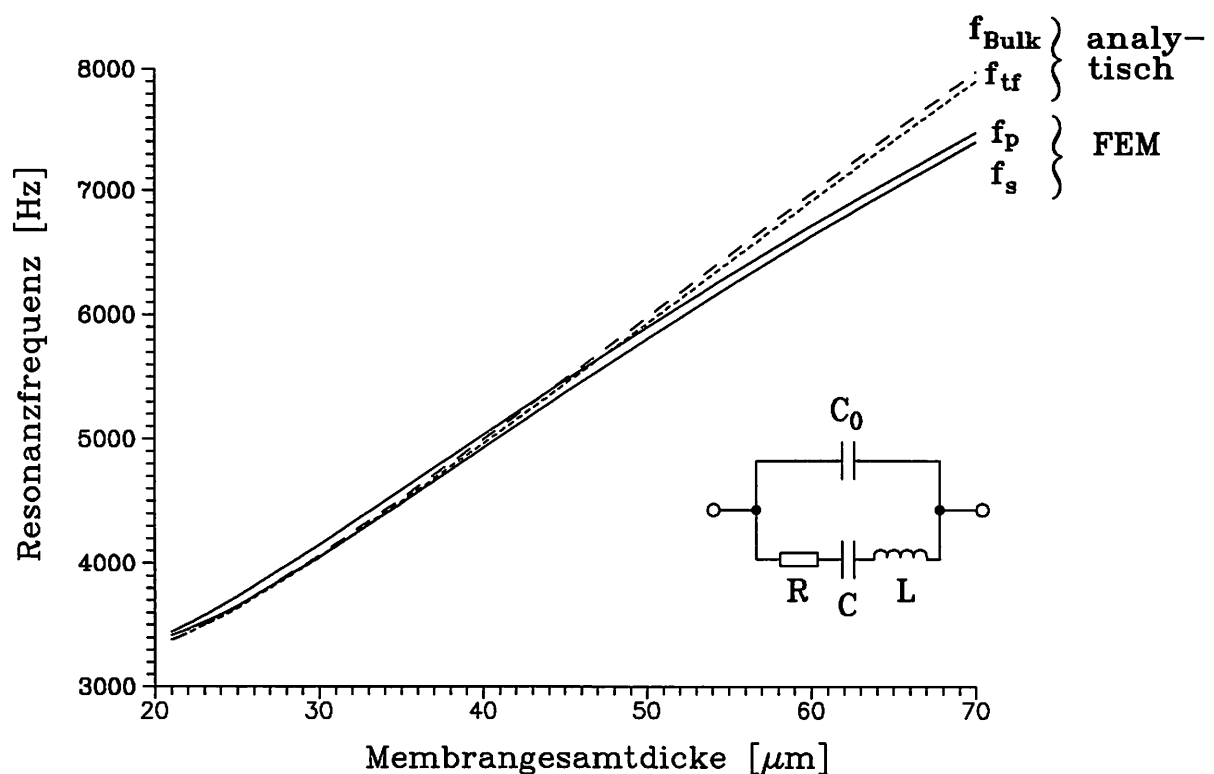


Abbildung 5.2: Resonanzfrequenzen einer Silizium-Bimorphmembran mit piezoelektrischer *ZnO*-Dünnschicht in Abhängigkeit der Membrangesamtdicke und elektrisches Ersatzschaltbild für piezoelektrische Resonatoren

ger [IEEE 78], das in Abbildung 5.2 skizziert ist, entspricht die numerisch berechnete Serienresonanzfrequenz  $f_s$  der Frequenz beim elektrischen Kurzschluß ( $\vec{E} = 0$ ), die Parallelresonanzfrequenz  $f_p$  dem elektrischen Leerlauf bei offenen Anschlußelektroden ( $\vec{D} = 0$ ) [Naillon 83]. Unter Zugrundelegung dieses einfachen Ersatzschaltbildes<sup>1</sup>, das nur im un-

<sup>1</sup>Das elektrische Ersatzschaltbild von piezoelektrischen Dünnschichtstrukturen ist stark vom Schichtaufbau des Wandlers abhängig. Zusätzlich ist zu unterscheiden, ob der Wandler bzw. Schwinger als elek-

mittelbaren Frequenzbereich der betrachteten Schwingungsmoden Gültigkeit besitzt, kann der piezoelektrisch angetriebene Resonator als ein elektrischer Zweipol aufgefaßt werden. Das Ersatzschaltbild geht von einem verlustbehafteten Resonanzschwingkreis aus. Der Serienschwingkreis setzt sich aus dem in Reihe geschalteten dynamischen Verlustwiderstand  $R$ , der dynamischen Induktivität  $L$  und der dynamischen Kapazität  $C$ , sowie einer dazu parallel geschalteten statischen Kapazität  $C_0$  zusammen. Der eigentliche Resonator wird durch die drei dynamischen Ersatzdaten beschrieben, während  $C_0$  durch die statische Kapazität der Anschlußelektroden der piezoelektrischen Schicht und die elektrischen Zuleitungen gebildet wird. Der komplexe Widerstand (Impedanz) des Resonators wird bei der Serien- und Parallelresonanzfrequenz reell. Unterhalb der Serienresonanzfrequenz und oberhalb der Parallelresonanzfrequenz ist das Wandlerverhalten rein kapazitiv, und durch den Wert der Kapazität  $C_0$  bestimmt. Bei der Serienresonanzfrequenz hat die Admittanz des Ersatzschaltkreises ein Maximum, bzw. die Impedanz ein lokales Minimum und der Wandler weist ein rein ohmsches Verhalten mit dem Verlustwiderstand  $R$  auf. Für Frequenzen  $f_s < f < f_p$  verhält sich der Schwinger induktiv. Mit Hilfe der elektrischen Ersatzdaten  $R, L, C$  und  $C_0$  lassen sich die beiden diskreten Resonanzfrequenzen ermitteln:

$$\begin{aligned}\omega_s &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \\ \omega_p &= \omega_s \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}}\end{aligned}\quad (5.1)$$

Die Differenz zwischen der Serienresonanzfrequenz und der Parallelresonanzfrequenz wird durch die unterschiedlichen Steifigkeiten der piezoelektrischen Schicht in Abhängigkeit der äußeren Beschaltung verursacht und ist ein direktes Maß für den effektiven elektromechanischen Kopplungsfaktor (siehe Gleichung 5.2). Beim elektrischen Kurzschluß können die durch die mechanische Verbiegung des Bimorphs induzierten elektrischen Ladungen abfließen, während sich bei offenen Elektroden ein zusätzliches elektrisches Feld in der piezoelektrischen Schicht aufbauen kann, das zu einer Versteifung des Wandlerelementes führt. Diese piezoelektrisch bedingte Versteifung erhöht den Wert der Parallelresonanzfrequenz beim elektrischen Leerlauf, so daß  $f_s < f_p$ . Die analytisch berechnete „rein mechanische“ Resonanzfrequenz  $f_{Bul}$  entspricht der Serienresonanzfrequenz  $f_s$  aufgrund der Verwendung der Steifigkeitskoeffizienten  $S_{11}^E$  ( $\vec{E} = \text{const}$ ) aus Tabelle 2.3 für Zinkoxid. Analog könnte die Parallelresonanzfrequenz  $f_p$  bei der Verwendung von  $S_{11}^D$  ( $\vec{D} = \text{const}$ ) berechnet werden, falls der Zusammenhang zwischen  $S^E$  und  $S^D$ , der durch die elektromechanische Kopplung beschrieben wird, vorab bekannt wäre.

---

trisches Zweipol- oder Vierpolnetzwerk betrieben wird. Resonante Silizium-Kraftsensoren sind von van Mullem *et al.* mit  $\text{Si}/\text{ZnO}/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ -Schichtaufbau im Vierpolbetrieb betrieben und ein elektrisches Ersatzschaltbild abgeleitet worden, das insbesondere das elektrische Übersprechverhalten zu beschreiben vermag [Mullem 92]. Ein Zweipolersatzschaltbild für elektromechanische Balkenresonatoren mit vereinfachtem  $\text{Si}/\text{ZnO}$ -Aufbau ist im Rahmen einer Diplomarbeit entwickelt worden [Quickert 93]. Es vermag die piezoelektrische Kopplung und den Einfluß einer konstanten axialen Zugbelastung prinzipiell zu beschreiben, berücksichtigt aber kein spezifisches Dünnschichtsystem (z.B. Schichtwiderstände und -kapazitäten), sowie elektrische Störpfade.

Während für dünne  $ZnO$ -Schichtdicken die analytische Lösung mit den FE-Ergebnissen gut übereinstimmt, wird die Abweichung ab einem Schichtdickenverhältnis von  $h_{ZnO}/h_{Si} \geq 1$  signifikant, da die Einspannbedingung auch für die  $ZnO$ -Schicht ungültigerweise angenommen wird. Beim FE-Modell wird der Einfluß der seitlich frei beweglichen  $ZnO$ -Schicht mit zunehmender Schichtdicke größer, so daß die Abweichung zwischen dem analytischen und dem numerisch Frequenzwert von etwa 1 % bis auf 7 % bei der maximalen Schichtdicke von 70  $\mu m$  zunimmt.

Der Einfluß der herstellungsprozeßabhängigen Dünnschichtdaten ist in Abbildung 5.2 ebenfalls dargestellt. Der an reaktiv gesputterten  $ZnO$ -Dünnschichten [Wagner] bestimmte reduzierte E-Modul  $\hat{E}_{tf}$  (siehe Kapitel 4.3.2) fällt gegenüber dem Bulkwert  $\hat{E}_{Bulk}$  um etwa 13 % niedriger aus, so daß die analytisch berechneten Resonanzfrequenzen  $f_{tf}$  unterhalb der Werte  $f_{Bulk}$  bleiben. Die Abweichung der Frequenzwerte infolge der Verwendung von Dünnschichtmaterialdaten bleibt im Mittel unterhalb von 1 % und ist damit für dieses spezielle Schichtsystem vernachlässigbar. Die Diskussion der Modelleinflüsse, die durch die Elementierung und die mechanischen Randbedingungen hervorgerufen werden, ist Gegenstand des folgenden Kapitels.

## 5.2 Einflüsse der Modellparameter

Verschiedene Plattenmodelle mit idealer, unendlich steifer Einspannung und dreidimensionale Membranmodelle mit realer Membraneinspannung wurden erstellt, um den Einfluß der FE-Modellparameter und der Randbedingungen separat untersuchen zu können. Bei den FE-Modellen wurde die Elementvernetzung, d.h. die äquidistante Seitenteilung entlang der Membran und damit die Aspektverhältnisse der Elemente variiert. Zusätzlich wurde der Einfluß der dynamischen Hauptfreiheitsgrade (MDOF) untersucht. Als mechanische Randbedingungen wurden die Knotenverschiebungen an den Membranseiten gesperrt. Damit ist die Membranen an ihrer Unterseite mechanisch fixiert. Die Modellierung der Elektroden erfolgte durch Definition von elektrischen Randbedingungen, indem konstante Potentiale ( $\phi = 0$ ) an die Knoten der Oberfläche der Siliziummembran und Piezoschicht gelegt wurden. Die Seitenlänge der untersuchten Silizium-Bimorphmembran betrug 9,2 mm. Die Schichtdicken der Siliziummembran  $h_{Si}$  und der  $ZnO$ -Schicht  $h_{ZnO}$  wurden zu 20  $\mu m$  gesetzt.

Bei den Plattenmodellen (P1–P4) handelt es sich um einfache FE-Modelle mit idealer Randeinspannung und jeweils einer Elementlage über die Dicke der Siliziummembran und der  $ZnO$ -Schicht. Um den Einfluß unterschiedlicher Randbedingungen zu analysieren, wurden verschiedene Knotenlagen des Plattenmodells eingespannt. Beim Modell P1 ist nur die untere äußere Knotenlage in den Verschiebungen ( $\vec{u} = 0$ ) gesperrt. Daher kann die Membran sich um diese Knotenlage verdrehen. Hierdurch wird die EinspannstEIFigkeit effektiv vermindert und die Resonanzfrequenzen fallen entsprechend niedriger aus. Beim Modell P2

wurde der gesamte Rand der Siliziummembran eingespannt und nur die  $ZnO$ -Schicht freigelassen, so daß sie seitlich frei beweglich war. Dieses entspricht einer mittleren Steifigkeit. Modell P3 wies eine volle Einspannung für alle Knotenlagen des gesamten Membranrandes auf. Entsprechend fallen die Frequenzen am höchsten aus. Infolge der unterschiedlichen Randeinspannungsbedingungen ändern sich bei den Plattenmodellen die Resonanzfrequenzen bis zu 30 %.

Die Membranmodelle (M1–M4) berücksichtigen zusätzlich die reale Membraneinspannung durch die (111)-Siliziumebenen, so daß sich die Frequenzwerte infolge verminderter Einspannsteifigkeit erniedrigen. Gleichzeitig steigt jedoch der Modellieraufwand beträchtlich an, bei etwa drei- bis fünffach erhöhter Rechenzeit. Die Resonanzfrequenzen nehmen mit steigender Elementanzahl wie erwartet ab, wobei sich der Wert für den effektiven Kopplungsfaktor weitgehend unabhängig von der Netzverfeinerung auf etwa 20 % stabilisiert. Erst bei einer drastischen Erhöhung der Element- und Knotenanzahl beim Referenzmodell MR, sowie gleichzeitiger Berücksichtigung der Materialanisotropien von Silizium und Zinkoxid erniedrigen sich die Frequenzwerte auf  $f_s = 4677$  Hz und  $f_p = 4755$  Hz, aus denen sich ein Kopplungsfaktor von 18 % errechnet. Eine analytische Überschlagsrechnung nach Gleichung (2.23) liefert mit gewichteten Materialdaten für die Resonanzfrequenz einen Wert von etwa 4,91 kHz. Dieses entspricht einer Abweichung von 5 % im Vergleich zum numerisch ermittelten Wert der Serienresonanzfrequenz.

In **Tabelle 5.1** sind die Ergebnisse der Parametereinflüsse auf die Resonanzfrequenzen

Tabelle 5.1: Einfluß der Modellparameter bei der Berechnung der Resonanzfrequenzen  $f_s$ ,  $f_p$  und des effektiven elektromechanischen Kopplungsfaktors  $k_{eff}$

FE-Modell	P1	P2	P3	P4	M1	M2	M3	M4	MR
Elemente	200	200	200	3200	450	450	578	1058	2714
Knoten	363	363	363	5043	795	795	999	1767	4286
MDOF	300	300	300	300	100	100	100	300	300
Seitenteil.:	10	10	10	40	13	13	13	19	31
Aspektver.:	23	23	23	6	18	18	18	12	7
$f_s$ [Hz]	4016	5196	5281	4907	5015	4836	4871	4745	4677
$f_p$ [Hz]	4143	5298	5378	5012	5117	4931	4967	4842	4755
$k_{eff}^{lin}$ [%]	24,8	19,6	19,0	20,5	20,0	19,6	19,7	20,0	18,1

und den effektiven elektromechanischen Kopplungsfaktor  $k_{eff}$  der Grundswingungsmoden, der nach Gleichung (2.14) ermittelt wurde, zusammengestellt. Für kleine Kopplungsfaktoren ( $k_{eff}^2 \ll 1$ ) gilt näherungsweise [VIBRIT-Datenblatt 81]:

$$k_{eff} = \sqrt{\frac{f_p^2 - f_s^2}{f_p^2}} \approx \sqrt{2 \frac{f_p - f_s}{f_p}} \quad (5.2)$$

Da die Differenz zwischen beiden Werten für die hier betrachteten Kopplungsfaktoren in der Regel kleiner als 0,1 % ist, wird im weiteren die *lineare* Näherung  $k_{eff}^{lin}$  verwendet<sup>2</sup>. Um bei den folgenden FE-Berechnungen den Modellieraufwand in vertretbaren Grenzen bei gleichzeitig ausreichender numerischer Genauigkeit zu halten, wird das FE-Modell M1 eingesetzt. Damit läßt sich das tendenzielle Verhalten der piezoelektrisch angetriebenen Membranstrukturen bei moderaten Rechenzeiten systematisch untersuchen. Auf der anderen Seite stellen vielmehr die nur ungenau bekannten Eingangsdaten der Berechnung – hier sind insbesondere die Materialeigenschaften und die Vorspannung der *ZnO*-Dünnschicht zu nennen – erhebliche Einflußfaktoren dar, die im nachfolgenden näher untersucht werden.

## 5.3 Elektromechanischer Kopplungsfaktor

Zur Verifikation der Bimorphmodelle und Überprüfung der Modellierungsgenauigkeit der piezoelektrischen FE-Berechnungen wurden Siliziummembranen vermessen, auf die eine Piezokeramik<sup>3</sup> hybrid aufgebracht war. Da die Materialeigenschaften von PZT-Piezokeramiken (hier: *VIBRIT*) sehr genau bekannt sind und im Gegensatz zu piezoelektrischen Dünnschichten kaum Prozeßschwankungen unterliegen, konnten die Fehler der Eingangsdaten auf ein Minimum reduziert werden. Insbesondere weisen die Hybride keine inneren mechanischen Spannungen auf. Mit Hilfe dieser hybriden Bimorphwandler konnten in der Entwicklungsphase der Dünnschichtsensoren die piezoelektrischen Modellrechnungen überprüft und das frequenzanaloge Sensorprinzip an Drucksensorprototypen meßtechnisch nachgewiesen werden. Ein zusätzlicher Vorteil der Piezokeramiken ist ihr gut meßbares elektrisches Impedanzverhalten und die Kenntnis des exakten elektrischen Ersatzschaltbildes.

### 5.3.1 Piezokeramik-Hybride

Das dynamische Verhalten der Bimorphwandler wurde mit optischen und elektrischen Meßmethoden vermessen. Die Abmessungen der untersuchten Siliziummembranen betrugen  $9,2 \times 9,2 \text{ mm}^2$  und die Dicke der *VIBRIT*-Piezokeramiken jeweils  $200 \text{ }\mu\text{m}$ . Mit dem Laservibrometer wurde das Amplitudenspektrum optisch aufgenommen und die mechanische Resonanzfrequenz  $f_{res}$ , die dynamische Resonanzamplitude und die mechani-

---

<sup>2</sup>Bei der Untersuchung von *PZT*-Keramiken, deren Kopplungsfaktor erheblich höher als der von piezoelektrischen *AlN*- und *ZnO*-Dünnschichten ist, wird die exakte Definition nach Gleichung (2.14) verwendet.

<sup>3</sup>Die Siliziummembranen mit hybrid aufgeklebter bzw. aufgelöteter (Goldschicht) Piezokeramik und *ZnO*-Beschichtung wurden bereits in einer sehr frühen Phase des BMFT-Verbundprojektes freundlicherweise von Herrn Dr. G. Flik, *Robert Bosch GmbH*, Gerlingen, für Meßzwecke zum Abgleich der FE-Modelle zur Verfügung gestellt.

sche Schwingungsgüte<sup>4</sup>  $Q_{mech}$  der Grundbiegeschwingung  $M_{11}$  bestimmt. Mit Hilfe eines Impedance/Gain-Phase-Analyzers (HP4194A) wurde das frequenzabhängige Impedanz- und Phasenverhalten vermessen. Durch Anpassung einer Impedanzcharakteristik an die gemessenen Kurvenverläufe gemäß dem elektrischen Ersatzschaltbild in Abbildung 5.2 wurden die elektrischen Ersatzdaten  $R, L, C$  und  $C_0$  ermittelt. Mit Hilfe der Ersatzdaten lassen sich die elektrische Schwingungsgüte und der effektive elektromechanische Kopplungsfaktor bestimmen [Tilmans 93]:

$$Q_{elek} = \frac{\omega_s L}{R} = \frac{1}{\omega_s RC} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5.3)$$

$$k_{eff}^{RLC} = \sqrt{\frac{C}{C_0 + C}} \approx \sqrt{\frac{C}{C_0}} \quad (5.4)$$

Während die Schwingungsgüte  $Q_{elek}$  durch den ohmschen Widerstand  $R$ , der der Dämpfung entspricht, begrenzt ist, hängt der Kopplungsfaktor im wesentlichen vom Kapazitätsverhältnis  $C/C_0$  ab, da in der Regel  $C_0 \gg C$  aufgrund der Größe der Anschlußelektroden erfüllt ist. Zur Charakterisierung der Wandlergüte wird in der Literatur auch als „*Figure of Merit*“ die Größe  $M$  angegeben, die das Produkt aus der Schwingungsgüte und dem Quadrat des Kopplungsfaktors darstellt, falls  $k_{eff} \ll 1$  [IEEE 78]:

$$M = \frac{1}{\omega_s RC_0} = Q \frac{k_{eff}^2}{1 - k_{eff}^2} \approx Q k_{eff}^2 \quad (5.5)$$

Bei der Optimierung der Wandlereigenschaften spielen beide Größen eine wichtige Rolle und sollten *gleichzeitig* maximiert werden. Der Kopplungsfaktor läßt sich nach Gleichung (5.4) erhöhen, wenn die Elektrodenfläche und damit die statische Kapazität  $C_0$  verringert wird. Jedoch entspricht dieses in der Regel nicht einer modenselektiven Anregungsgeometrie (siehe hierzu Kapitel 5.5.1), auf die es bei resonanten Sensoren im Gegensatz zu piezoelektrisch betriebenen Aktoren ankommt.

In **Tabelle 5.2** sind die experimentellen Ergebnisse verschiedener hybrider Piezokeramik-Siliziummembranen zusammengefaßt. Die Anregungsspannung betrug bei den optischen Messungen etwa  $4 V_{SS}$ , bei den elektrischen Messungen maximal 1 V. Die optisch vermessenen Resonanzfrequenzen  $f_{res}$  entsprechen in etwa den Serienresonanzfrequenzen  $f_s$ , so daß auf niederohmige elektrische Abschlußbedingungen bei den Messungen geschlossen werden kann. Die erreichbaren Schwingungsamplituden  $A_{SS}$  variieren bei der anliegenden Anregungsspannung von  $4 V_{SS}$  zwischen  $1,4$ – $4,4 \mu\text{m}$ . Aufgrund des linearen Zusammenhangs zwischen der Anregungsspannung und den Schwingungsamplituden befindet man sich im Kleinsignalbereich. Die an der Piezokeramik anliegende elektrische Feldstärke beläuft sich auf etwa  $E = 0,1 \text{ V}/\mu\text{m}$ .

Die kleinen Piezokeramiken ( $6 \times 6 \text{ mm}^2$ ) zeichnen sich gegenüber den großen ( $12 \times 12 \text{ mm}^2$ ) durch einen erheblich höheren effektiven elektromechanischen Kopplungsfaktor  $k_{eff}$  aus. So erhöht sich der  $k_{eff}$ -Wert vom Wandler PB zum Wandler PA um das Doppelte. Den ent-

<sup>4</sup>Die mechanische Schwingungsgüte wurde durch die Bestimmung der Halbwertsbreite  $\Delta\omega$  (3dB-Abfall der Maximalamplitude  $A_{res}$ ) der frequenzabhängigen Amplitudenkurve nach Gleichung (4.8) ermittelt.



Tabelle 5.2: Experimentelle Charakterisierung von Silizium-Bimorphmembranen mit hybrider Piezokeramik

Wandler	PA	PB	PC	PD
$h_{Si}/h_{PZT}$	$\sim 0,5$	$\sim 0,75$	$\sim 0,5$	$\sim 0,75$
Abm. [ $mm^2$ ]:	6x6	12x12	6x6	12x12
Optische Messungen				
$f_{res}$ [Hz]	15430	24428	16849	25153
$A_{SS}$ [ $\mu m$ ]	2,3	2,1	4,4	1,4
$Q_{mech}$	42	65	62	84
Elektrische Messungen				
$f_s$ [Hz]	15162	24388	16854	25113
$f_p$ [Hz]	15888	24669	17437	25328
$k_{eff}$ [%]	29,9	15,1	25,6	13,0
Elektrische Ersatzdaten				
$R$ [ $k\Omega$ ]	2,22	1,65	1,24	3,46
$L$ [H]	1,25	0,28	1,10	1,12
$C$ [pF]	86,8	149,7	80,6	36,0
$C_0$ [nF]	1,83	8,14	1,35	7,34
$Q_{elek}$	54	26	94	51
$k_{eff}^{RLC}$ [%]	21,3	13,4	23,7	7,0

scheidenden Einfluß auf die Größe des Kopplungsfaktors besitzt das Schichtdickenverhältnis  $h_{Si}/h_{PZT}$ , wie in Kapitel 5.3.3 gezeigt wird. Zum anderen spielt die Membranüberdeckung durch die Piezokeramik eine gewisse Rolle, wodurch das Kapazitätsverhältnis  $C/C_0$  beeinflusst wird. In Kapitel 5.5 wird auf den Einfluß der lateralen Schichtstrukturierung auf das Verhalten von piezoelektrischen Dünschichtstrukturen eingegangen.

Die statische Kapazität  $C_0$  kann durch die Permittivität  $\epsilon_{33}$  und die geometrischen Abmessungen des Kondensators, der durch die Anschlußelektroden der Piezokeramik gebildet wird, abgeschätzt werden. Es gilt  $C_0 = \epsilon_0 \epsilon_{33} A / h_{PZT}$ , wobei  $A$  die effektive Elektrodenfläche (6 x 6 bzw. 12 x 12  $mm^2$ ) ist. Unter der Annahme von  $\epsilon_{33}/\epsilon_0 = 1600 \pm 300$  und  $h_{PZT} = 200 \mu m$  ( $\pm 10 \%$ ) folgt für die beiden Keramikabmessungen  $C_0 = 2,6$  bzw. 10,2 nF. Diese Werte stimmen größenordnungsmäßig gut mit den gemessenen Werten überein.

Zum Vergleich von piezoelektrischen FE-Berechnungen an Bimorphmembranen mit den experimentellen Daten, wurde der Wandler mit den Abmessungen 6 x 6  $mm^2$  und der Piezokeramikdicke von 200  $\mu m$  herangezogen. Hierfür wurde eine Membraneometrie mit strukturierten ZnO-Schichten herangezogen. Aufgrund der Dickenschwankungen der Siliziummembranen, die eine nominelle Dicke von etwa 100  $\mu m$  aufwiesen, wurden die Serien- und Parallelresonanzfrequenzen, sowie die  $k_{eff}$ -Werte in Abhängigkeit der Siliziummembrandicke  $h_{Si}$  berechnet. Die Materialeigenschaften wurden anisotrop angenommen. Die

Tabelle 5.3: FE-Modellierung von Silizium-Bimorphmembranen mit hybrider Piezokeramik

$h_{Si}$ [ $\mu\text{m}$ ]	90	95	100
$h_{Si}/h_{PZT}$	0,45	0,475	0,5
$f_s$ [Hz]	15683	16388	17074
$f_p$ [Hz]	16276	17041	17785
$k_{eff}$ [%]	26,7	27,4	28,0

Anzahl der Elemente betrug 1970, die der Knoten 2828. Es wurde mit der *Householder*-Methode gerechnet (300 MDOF). In **Tabelle 5.3** sind die numerischen Ergebnisse zusammengefaßt. Die gemessenen Resonanzfrequenzen  $f_s$  und  $f_p$  liegen für die beiden Wandler PA und PC im Bereich 15–17 kHz, so daß ausgehend von den FE-Resultaten auf eine effektive Siliziummembrandicke von etwa 90–100  $\mu\text{m}$  geschlossen werden kann. Die berechneten Kopplungsfaktoren 27–28 % liegen zwischen den beiden gemessenen. Die Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Werten lassen sich durch die Toleranz der Siliziummembrandicke und die Vernachlässigung der dielektrischen Dämpfung der Piezokeramik erklären.

Gegenstand der weiteren Untersuchungen von Bimorphwandlern mit piezoelektrischen Dünnschichten sind die Einflüsse:

- des Schichtdickenverhältnisses ( $h_{Si}/h_{Piezo}$ )
- des Dünnschichtsystems ( $AlN$ ,  $PZT$ ,  $ZnO$ )
- der lateralen Schichtstrukturierung.

### 5.3.2 Zinkoxid-Dünnschichten

Neben Membranstrukturen eignen sich einseitig eingespannte Siliziumzungen als technologische Teststrukturen zur Entwicklung der Dünnschichtprozesse. Die Güte der piezoelektrischen Dünnschichten ist aus der Sicht der meisten Anwendungen durch den elektromechanischen Kopplungsfaktor bestimmt. Da der materialabhängige Anteil  $k_{mat}$  den Messungen nicht direkt zugänglich ist, muß an mikromechanischen Strukturen der effektive Wert  $k_{eff}$  ermittelt und ausgewertet werden. Im Gegensatz zu Membranen können bei den einseitig eingespannten Zungenstrukturen zusätzlich die statischen Auslenkungen<sup>5</sup>

<sup>5</sup>Die Bestimmung der  $k_{eff}$ -Werte durch statische Messung der Zungenauslenkungen wurde vom BMFT-Verbundpartner *Robert Bosch GmbH* durchgeführt. Gegenüber der Resonanzmethode weist diese Methode den Nachteil auf, daß die zugrundeliegende analytische Näherungsformel, die für die Berechnung von  $k_{eff}$  herangezogen wird, die mechanischen und elektrischen Randbedingungen, sowie den Bimorphcharakter nicht exakt berücksichtigt. Weiterhin kommt hinzu, daß durch die relativ hohen Anregungsspannungen nichtlineare Effekte auftreten können (Großsignalverhalten). Die auf diese Weise ermittelten  $k_{eff}$ -Werte fallen daher im Vergleich zu dynamisch vermessenen Werten systematisch zu niedrig aus [ABV 93].

infolge elektrischer Ansteuerung gut vermessen werden, da sie im Vergleich zu Membranstrukturen einen größeren Hub (einige Mikrometer) aufweisen. Im folgenden werden die experimentellen Daten mit den Resultaten piezoelektrischer FE-Berechnungen verglichen und die Modellierungsgenauigkeit der numerischen Methoden, sowie die piezoelektrischen Bimorphmodelle überprüft.

Die Herstellung und Vermessung der ganzflächig von einer piezoelektrischen *ZnO*-Dünnschicht überdeckten Zungenstrukturen erfolgte vom BMFT-Verbundpartner *Robert Bosch GmbH*. Die Meßergebnisse wurden für die Entwicklung der piezoelektrischen FE-Modelle im Rahmen dieser Arbeit freundlicherweise zur Verfügung gestellt [Flik].

In **Tabelle 5.4** sind die optisch vermessenen Resonanzfrequenzen  $f_{res}$ , die durch Impedanzmessungen bestimmten Serien- und Parallelresonanzfrequenzen  $f_s$  und  $f_p$ , sowie die daraus abgeleiteten effektiven Kopplungsfaktoren  $k_{eff}$  zusammengestellt. Bei den FE-Berechnungen wurde von einem homogenen Siliziumbalken, der ganzflächig von einer *ZnO*-Schicht bedeckt ist, ausgegangen. Die einseitige Einspannung der Zungenstruktur wird durch eine schräge (111)-Siliziumebene gebildet. Die Länge der Siliziumzungen betrug 7 mm, die Breite 5 mm. Es wurden sowohl bei Silizium, als auch bei *ZnO* anisotrope Materialdaten [Landolt-Börnstein 82] berücksichtigt. Um die numerischen Fehlereinflüsse möglichst niedrig zu halten, wurden die Zungen lateral sehr fein unterteilt. Das gröbere FE-Modell weist 30 Elemente in Längsrichtung und 8 Elemente in der Breite auf, während das feinere Modell entsprechend 70 bzw. 15 Elemente aufweist. Die Elementunterteilung in Dickenrichtung war weniger kritisch, wie in Kapitel 4 bereits für die Membranstrukturen gezeigt wurde, so daß für die Siliziumzunge zwei Elementlagen und für die *ZnO*-Schicht eine Elementlage genügten. Zur Berechnung der Eigenfrequenzen wurde das *Householder*-Verfahren mit 300 MDOFs eingesetzt. Die Angaben für die Frequenzwerte sind aufgerundet, während die  $k_{eff}$ -Werte exakt angegeben sind.

Die Zungen SZ1 und SZ2 weisen ein *Si/ZnO/SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>*-Schichtsystem auf und die Zungen SZ3 und SZ4 bestehen aus einem vereinfachten *Si/ZnO/Al*-Schichtsystem. Die Zunge SZ5 wurde aus hochdotiertem  $p^{++}$ -Silizium hergestellt und zeichnet sich bei gleichem Schichtsystem wie Zunge SZ4 durch den höchsten Kopplungsfaktor von etwa 12 % aus. Die Dicken der *SiO<sub>2</sub>*- und *Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>*-Schicht betrugen 150 und 300 nm und wurden aufgrund ihrer im Vergleich zum *ZnO* geringen Schichtdicke bei den FE-Berechnungen nicht berücksichtigt.

Das Schichtdickenverhältnis  $h_{Si}/h_{ZnO}$  ändert sich bei den Zungenstrukturen nur unwesentlich von 12–16, so daß die effektiven Kopplungsfaktoren davon kaum betroffen werden. Dieses belegen auch die FE-Berechnungen, die unter der Annahme ideal homogener Schichteigenschaften unter Verwendung der Literaturmaterialdaten (siehe Tabelle 2.3) durchgeführt wurden. Die Frequenzabweichungen betragen bei den Zungen SZ4 und SZ5 etwa 1,5 % und nehmen bis auf 4–6 % bei den ersten drei Zungen zu. Die rechnerisch ermittelten Resonanzfrequenzen fallen gegenüber den gemessenen Werte alle systematisch höher aus, was durch die Druckspannungen (bis zu -500 MPa) in den *ZnO*-Schichten erklärt werden kann. Experimentell wurde die innere Spannung der Zungen durch optische Vermessung der Zungenauslenkung bestimmt [Flik]. Insbesondere zeichnen sich die

Tabelle 5.4: Charakteristische Kenndaten  $ZnO$ -beschichteter Siliziumzungenstrukturen (Vergleich: FE-Berechnung – Messung)

Zunge:	SZ1	SZ2	SZ3	SZ4	SZ5
$h_{Si}$ [ $\mu\text{m}$ ]	123,7	124,5	137,2	124,5	
$h_{ZnO}$ [ $\mu\text{m}$ ]	10,4	10,1	10,7	7,75	
Messungen					
$f_{res}$ [Hz]	3330	3410	3680	3455	
$f_s$ [Hz]	3358	3416	3642	3418	3420
$f_p$ [Hz]	3376	3430	3654	3439	3445
$k_{eff}$ [%]	10,3	9,0	8,1	11,0	12,0
FE-Modellierung					
Elemente	2080		4410		
Knoten	2781		6144		
$f_s$ [Hz]	3474	3495	3832	3474	
$f_p$ [Hz]	3502	3523	3861	3497	
$k_{eff}$ [%]	12,6	12,5	12,3	11,3	
$\frac{\Delta k}{k}$ [%]	-22	-39	-52	-3	+6

beiden Zungen SZ4 und SZ5 durch spannungsarme  $ZnO$ -Schichten aus. Nur bei diesen beiden Strukturen stimmen die Werte der effektiven elektromechanischen Kopplungsfaktoren hinreichend gut mit den FE-Resultaten überein. Die Abweichungen betragen nur 3 bzw. 6 %, im Gegensatz zu den anderen drei Zungen, bei denen die Abweichungen bis zu 52 % betragen. Ein Grund für diese teilweise hohen Abweichungen ist der Einfluß der mechanischen Verspannung der  $ZnO$ -Schichten. Dieses belegen auch die Messungen an  $ZnO$ -beschichteten Membranstrukturen, die in Abhängigkeit der inneren Spannung bis zu  $\pm 100$  % vom numerisch ermittelten  $k_{eff}$ -Wert abweichen [ABV 93]. Die gemessenen maximalen Feldstärken lagen zwischen  $4\text{--}12\text{ V}/\mu\text{m}$  und decken sich mit den in der Literatur angegebenen Wert von etwa  $10\text{ V}/\mu\text{m}$  [Smits 92b].

Unter der Voraussetzung, daß bei den hier betrachteten Biegewandlern im wesentlichen der transversale bzw. planare elektromechanische Kopplungsfaktor  $k_{31}$  bzw.  $k_p$  ausschlaggebend ist, kann mit Hilfe von Gleichung (2.15) auf einen *effektiven, prozeßabhängigen* elektromechanischen Kopplungsfaktor  $k_{31}^{eff}$  bzw.  $k_p^{eff}$  geschlossen werden. Aufgrund der Proportionalität zwischen  $k_{31}$  und  $d_{31}$  ist es möglich durch einen Vergleich des experimentellen  $k_{31}^{eff}$ -Wertes mit den FE-Resultaten einen schichtspezifischen  $d_{31}^{eff}$ -Wert<sup>6</sup> bei

<sup>6</sup>Wird bei den Zungenstrukturen SZ1–SZ3 eine Abweichung von 22–52 % zwischen Messung und FEM zugrundegelegt, so kann mit dem in der FE-Rechnung verwendeten Literaturwert von  $d_{31} = 5,12\text{ pC/N}$  auf einen effektiven piezoelektrischen Kopplungskoeffizienten von lediglich  $d_{31}^{eff} = 2,5\text{--}4,0\text{ pC/N}$  geschlossen werden. Dieser Wertebereich liegt in der Größenordnung von Dünnschichtprozessen und wird auch von anderen Forschungsgruppen angegeben [Prak 93]. Für den spannungsarmen Beschichtungsprozeß, mit dem die Zungen SZ4 und SZ5 hergestellt wurden, errechnet sich ein gegenüber dem Literaturwert leicht erhöhter

fester Geometrie abzuleiten. Dieser Wert ist geeignet, um die Beschichtungsprozesse zu optimieren, erlaubt aber keinen direkten Rückschluß auf die absolute Größe des rein materialabhängigen  $d_{31}^{mat}$ -Wertes. Zur eindeutigen Bestimmung dieses Wertes ist es zusätzlich erforderlich, den mechanischen Steifigkeitskoeffizienten  $S_{11}^E$  und die Permittivität  $\epsilon_{33}^e$  an der betrachteten Dünnschichtstruktur zu bestimmen.

Die FE-Berechnungen an piezoelektrischen Bimorphstrukturen berücksichtigen nicht die Schichtmorphologie und die innere Schichtspannungen im Zinkoxid oder sonstige prozeßbedingte Auswirkungen, so daß diese Rechnungen nur qualitative Aussagen ermöglichen. Im weiteren wird daher von idealisierten Schichtsystemen ausgegangen, die durch die Materialdaten der Literatur beschrieben werden, und die Einflüsse der Wandler- und Elektrodengeometrien auf das statische und dynamische Verhalten prinzipiell untersucht.

### 5.3.3 Schichtdickenabhängigkeit

Um eine möglichst hohe elektromechanische Kopplung bei der piezoelektrischen Anregung von Bimorphwandlern zu erreichen, ist unter anderem die Kenntnis des günstigsten Schichtdickenverhältnisses von Bedeutung. Einerseits ist die Dicke des passiven Wandlersubstrates ein ausschlaggebender Parameter, beispielsweise für die Sensorempfindlichkeit, andererseits unterliegen die anvisierten Schichtdicken der aktiven piezoelektrischen Dünnschicht starken technologischen Einschränkungen (z.B. Sputterraten, Schichthomogenität). Mit verschiedenen Bimorphmodellen wurde daher der Einfluß des Schichtdickenverhältnisses der Siliziummembran  $h_{Si}$  zur Piezoschicht  $h_{Piezo}$  und die Auswirkung verschiedener piezoelektrischer Materialien untersucht. Die Dicke der Siliziummembran betrug bei allen Variationen  $20\text{ }\mu\text{m}$ , die Seitenlänge  $9,2\text{ mm}$ . Für die Berechnungen wurde das FE-Modell M4 mit ganzflächiger Piezoschicht, das in Kapitel 5.1 beschrieben ist, herangezogen.

In **Abbildung 5.3** ist der effektive elektromechanische Kopplungsfaktor in Abhängigkeit des Schichtdickenverhältnisses für piezoelektrische *AlN*- und *ZnO*-Schichten, sowie *PZT*-Keramik abgebildet. Die Kurvenverläufe weisen ein jeweils deutlich ausgeprägtes Maxi-

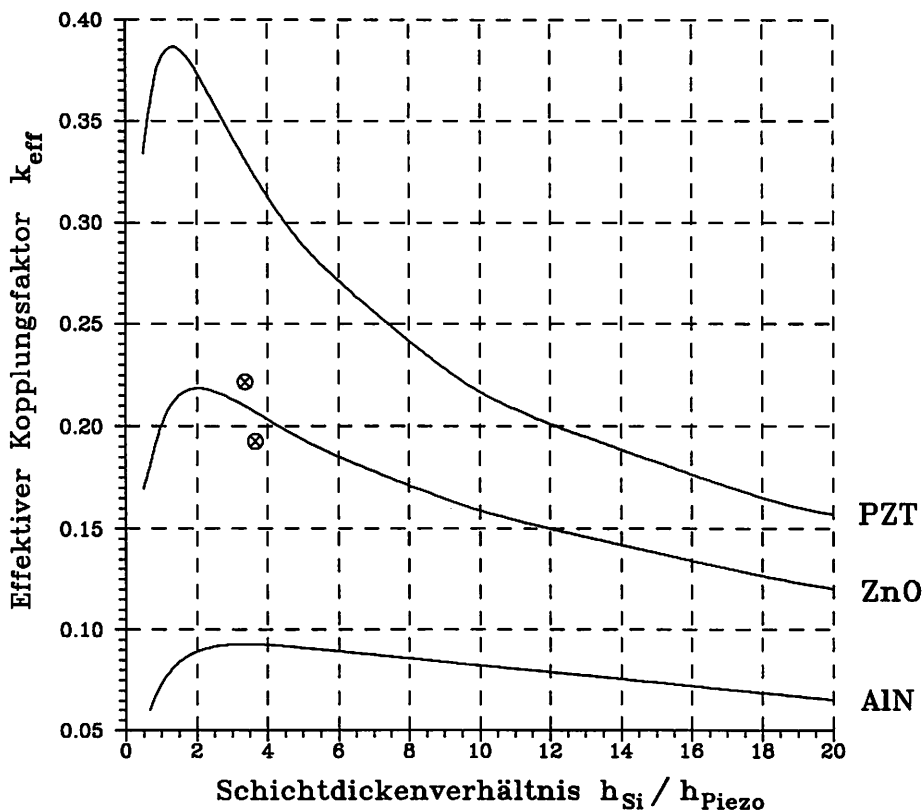


Abbildung 5.3: Effektiver elektromechanischer Kopplungsfaktor  $k_{eff}$  einer Silizium-Bimorphmembran in Abhängigkeit des Schichtdickenverhältnisses für verschiedene Piezoelektrika (Meßwerte für *ZnO*-Dünnschichten)

mum auf, das bei den verschiedenen piezoelektrischen Materialien auf unterschiedliche

optimale Schichtdicken führt. Das Anwachsen des elektromechanischen Kopplungsfaktors bei zunehmender Schichtdicke ist auf eine effizientere Energieumwandlung zurückzuführen. Ab einer bestimmten Piezoschichtdicke nimmt die Energiekonversion allerdings nicht mehr weiter zu, da nur die oberflächennahen Piezoschichtbereiche zur elektromechanischen Anregung beitragen, so daß bei weiter zunehmender Schichtdicke  $k_{eff}$  wieder abnimmt. Für  $AlN$ ,  $ZnO$  und  $PZT$  werden maximalen Kopplungsfaktoren von etwa 9 %, 22 % und 38 % bei Schichtdicken von etwa 5–15  $\mu m$  erreicht und liegen damit noch im realisierbaren Bereich der Dünnschichttechnik. Bei der Oberflächenmikromechanik, bei der typische Substratdicken im Bereich von 0,5–2  $\mu m$  liegen, verbessert sich das Schichtdickenverhältnis entscheidend zu gunsten der Dünnschichttechnik. Zum Vergleich sind experimentell bestimmte  $k_{eff}$ -Werte von  $ZnO$ -beschichteten Silizium-Membrandrucksensoren in Abbildung 5.3 mit eingezeichnet. Die vermessenen  $Si/ZnO$ -Membranen besaßen Schichtdickenverhältnisse von etwa 3,4–4,5 und wiesen in Abhängigkeit der Prozeßparameter verschiedene  $k_{eff}$ -Werte auf. Wie bei den Zungenstrukturen konnte ein erheblicher Einfluß der inneren Schichtspannung festgestellt werden, die ihrerseits von der Sputterrate, der Targettemperatur und dem Argon-Sauerstoff-Gasgemisch im Rezipienten abhängig ist [ABV 93]. Die Zusammenfassung der numerischen Resultate ist in **Tabelle 5.5** zu finden. Bezieht

Tabelle 5.5: Optimierung der Schichtdickenverhältnisse bei Silizium-Bimorphmembranen

Schicht	$AlN$	$ZnO$	$PZT$
$h_{Piezo}$ [ $\mu m$ ]	$5 \pm 1$	$10 \pm 1$	$15 \pm 1$
$h_{Si}/h_{Piezo}$	$\sim 4,0$	$\sim 2,0$	$\sim 1,3$
$E_{Si}/E_{Piezo}$	0,59	1,31	2,55
$f_s$ [Hz]	4520,5	3975,4	3286,2
$f_p$ [Hz]	4539,3	4072,6	3551,9
$k_{eff}$ [%]	9,1	21,7	38,0
$k_p^{mat}$ [%]	18	40	61
$k_{eff}/k_p^{mat}$	0,51	0,54	0,62

man die effektiven Kopplungsfaktoren  $k_{eff}$  auf die materialabhängigen Anteile  $k_p^{mat}$  der jeweiligen Piezoelektrika (siehe Tabelle 2.3), so ergibt sich für  $AlN$ - und  $ZnO$ -Dünnschichten ein Wert von  $k_{eff}/k_p^{mat} \approx 0,5$ . Bei der  $PZT$ -Keramik weicht der Wert geringfügig aufgrund des stärker abweichenden Schichtdickenverhältnisses ab. Werden alle drei Kurvenverläufe auf  $k_p^{mat}$  bezogen, so gibt es einen gemeinsamen Schnittpunkt der drei Kurven bei einem Schichtdickenverhältnis von etwa 4,2 mit dem gemeinsamen Wert von  $k_{eff}/k_p^{mat} \approx 0,5$ . Bei diesem Schichtdickenverhältnis verschwindet der Geometrieinfluß der Siliziummembran, so daß dieses eine ideale *materialunabhängige* Wandlerkonfiguration darstellt und sich als mikromechanische Teststruktur zur Charakterisierung piezoelektrischer Dünnschichteigenschaften eignet.

## 5.4 Modellierung der piezoelektrischen Anregung

Die experimentelle Bestimmung des effektiven elektromechanischen Kopplungsfaktors erfolgte in Kapitel 5.3 durch die Messung des frequenzabhängigen Impedanz- und Phasenverlaufes. Bei den piezoelektrischen FE-Berechnungen genügt es, mit Hilfe der Modalanalyse das Eigenwertproblem unter den beiden elektrischen Randbedingungen ( $\vec{E} = 0$ ) und ( $\vec{D} = 0$ ) zu betrachten, dessen Lösung aus den beiden *diskreten* Werten der Serien- und Parallelresonanzfrequenz besteht. In Meßanwendungen werden die piezoelektrisch angeregten Kraft- und Drucksensoren in einer Oszillatorschaltung betrieben, bei der das Impedanz- und Phasenverhalten (Zweipolbetrieb) bzw. das elektrische Übertragungsverhalten (Vierpolbetrieb) der Sensorelemente bekannt sein muß. Um den frequenzabhängigen Impedanz- und Phasenverlauf zu simulieren, ist es daher notwendig, eine gekoppelte Feldberechnung gemäß Gleichung (3.37) durchzuführen. Unter Vorgabe einer harmonischen Anregungsspannung  $U(\omega)$  und einer mechanischen Dämpfung  $[C_D]$  kann das mechanische und elektrische Verhalten der Bimorphwandler modelliert und neben den frequenzabhängigen Schwingungsamplituden  $A(\omega)$  der Impedanz-  $Z(\omega)$  und Phasenverlauf  $\theta(\omega)$  bestimmt werden. Im folgenden soll dieses für Siliziummembranen mit *PZT*-Keramik und *ZnO*-Dünnschicht erfolgen und mit Messungen verglichen werden.

### 5.4.1 Piezokeramik-Bimorphmembran

Zur Überprüfung der gekoppelten Feldberechnungen mit piezoelektrischer Anregung wurde erneut die Silizium-Bimorphmembran mit *PZT*-Keramik gewählt, um die unbekannten Fehlereinflüsse seitens des Dünnschichtsystems bei der Modellverifikation weitgehend zu minimieren. Berechnet wurde der frequenzabhängige Impedanz- und Phasenverlauf der Silizium-Bimorphmembran für den Frequenzbereich der ersten Biegeschwingung mit Hilfe einer harmonischen, linearen Frequenzganganalyse<sup>7</sup> gemäß der gekoppelten Feldgleichung (3.37). Die eigentliche Berechnung des Impedanz- und Phasenverlaufes wird im *Postprocessing* (bei ANSYS: POST26-Modul) vollzogen. Hierzu wird die von der dielektrischen Verschiebung  $\vec{D}$  an den Elektrodenflächen erzeugte elektrische Ladung mittels Integration nach  $Q = \int_{\Omega} \vec{D} d\Omega$  ermittelt<sup>8</sup>. Anschließend wird hieraus der induzierte elektrische Stromfluß  $I(\omega) = i\omega Q$  im Frequenzbereich errechnet und für eine vorgegebene Anregungsspannung  $U = \text{const}$  die komplexwertige Impedanz  $Z(\omega) = U/I(\omega)$  ermittelt [Eccardt 92]. Da dielektrische Dämpfungsbeiträge nicht erfaßt werden können, muß ein mechanischer Dämpfungsbeitrag gemäß Gleichung (3.30) vorgegeben werden. Dieses erfolgte mit Hilfe eines mittleren frequenzunabhängigen Dämpfungskoeffizienten. Bei der verwendeten Bimorphstruktur betrug die Membranseitenlänge 9,2 mm, die Dicke

<sup>7</sup>ANSYS-Option: *Harmonic Response Analysis*.

<sup>8</sup>RFORCE-Befehl zur Berechnung der Knotenreaktionskräfte mit der Option AMPS.



der Siliziummembran  $20\text{ }\mu\text{m}$  und die der Piezokeramik  $200\text{ }\mu\text{m}$ . Das FE-Modell<sup>9</sup> P2 wurde hierzu herangezogen und das Materialverhalten der Piezokeramik (*VIBRIT 420*) anisotrop unter Verwendung des ANSYS *Multi-Field-Elementes SOLID5* modelliert. Für die elektrische Anregungsspannung wurde  $1\text{ V}$  angenommen und an den ganzflächig die Membran überdeckenden Elektroden eingeprägt. Für die mechanische Schwingungsgüte  $Q$  wurde ein mittlerer Wert von  $1000$  zugrundegelegt, aus dem ein relatives Dämpfungsverhältnis von  $10^{-3}$  folgt. Mit diesen Vorgaben wurde der frequenzabhängige Impedanzverlauf berechnet, aus dem die Serienresonanzfrequenz  $f_s = 11,638\text{ kHz}$  und die Parallelresonanzfrequenz  $f_p = 11,984\text{ kHz}$  bestimmt wurden. Daraus folgt ein  $k_{eff}$ -Wert von etwa  $23,9\text{ }\%$ . An einer Silizium-PZT-Bimorphmembran wurden die Werte  $f_s = 11,495\text{ kHz}$  und  $f_p = 11,715\text{ kHz}$  gemessen, aus denen sich  $k_{eff}$  zu  $19,3\text{ }\%$  berechnen läßt. Ein Vergleich der FE-Resultate mit den Messungen zeigt eine gute Übereinstimmung. Die Abweichungen der Resonanzfrequenzen betragen nur etwa  $1\text{--}2\text{ }\%$ .

#### 5.4.2 Bimorphmembran mit ZnO-Dünnschicht

Zur Modellierung des frequenzabhängigen Verhaltens einer *ZnO*-beschichteten Siliziummembran, wurde das FE-Modell M3 aus Abbildung 5.1 herangezogen, das zusätzlich die Einspannung durch die (111)-Siliziumebenen berücksichtigt. Die Abmessungen wurden gemäß des in Kapitel 4 bereits optisch vermessenen Drucksensors gewählt. Die Siliziummembrandicke betrug  $50\text{ }\mu\text{m}$ , die Dicke der *ZnO*-Schicht  $11\text{ }\mu\text{m}$ . Das Materialverhalten wurde für Silizium und Zinkoxid anisotrop angenommen, wobei auf Literaturangaben [Landolt-Börnstein 82] zurückgegriffen wurde. Vorab wurden die Serien- und Parallelresonanzfrequenzen  $f_s$  und  $f_p$  mit dem *Householder*-Verfahren (MDOF=50) zu  $8,817\text{ kHz}$  und  $8,965\text{ kHz}$  berechnet, um den interessierenden Frequenzbereich für die Frequenzganganalyse festzustellen. Bei der Berechnung des frequenzabhängigen Amplituden- und Impedanzverlaufes wurden für die elektrische Anregungsspannung und die mechanische Schwingungsgüte die gleichen Werte, wie bei der *PZT*-Membran verwendet. Die Ergebnisse der transienten Berechnung (100 Iterationen) des mechanischen und elektrischen Schwingungsverhaltens der Silizium-Bimorphmembran mit *ZnO*-Dünnschicht sind in **Abbildung 5.4** dargestellt. Als mechanische Resonanzfrequenz  $f_{res}$  ergibt sich ein Wert von  $8,965\text{ kHz}$  bei einer Schwingungsamplitude von etwa  $0,02\text{ }\mu\text{m}$ . Die Serien- und Parallelresonanzfrequenzen sind bei diesen Berechnungen sehr stark abhängig von der Anzahl der Elemente und MDOFs. Außerdem haben die Dämpfung und die Anregungsspannung einen direkten Einfluß auf die Höhe der Resonanzamplitude. Aus diesem Grunde wurde mit einem relativ kleinem FE-Modell und den vereinfachten Annahmen gerechnet. Im folgenden soll daher auf eine quantitative Auswertung verzichtet und lediglich ein qualitativer Vergleich mit der experimentell charakterisierten Silizium-Bimorphmembran mit *ZnO*-Beschichtung durchgeführt werden.

In **Abbildung 5.5** sind die Ergebnisse der optischen und elektrischen Messungen ab-

<sup>9</sup> Elementanzahl: 1587, Knotenanzahl: 2382, MDOF: 300.

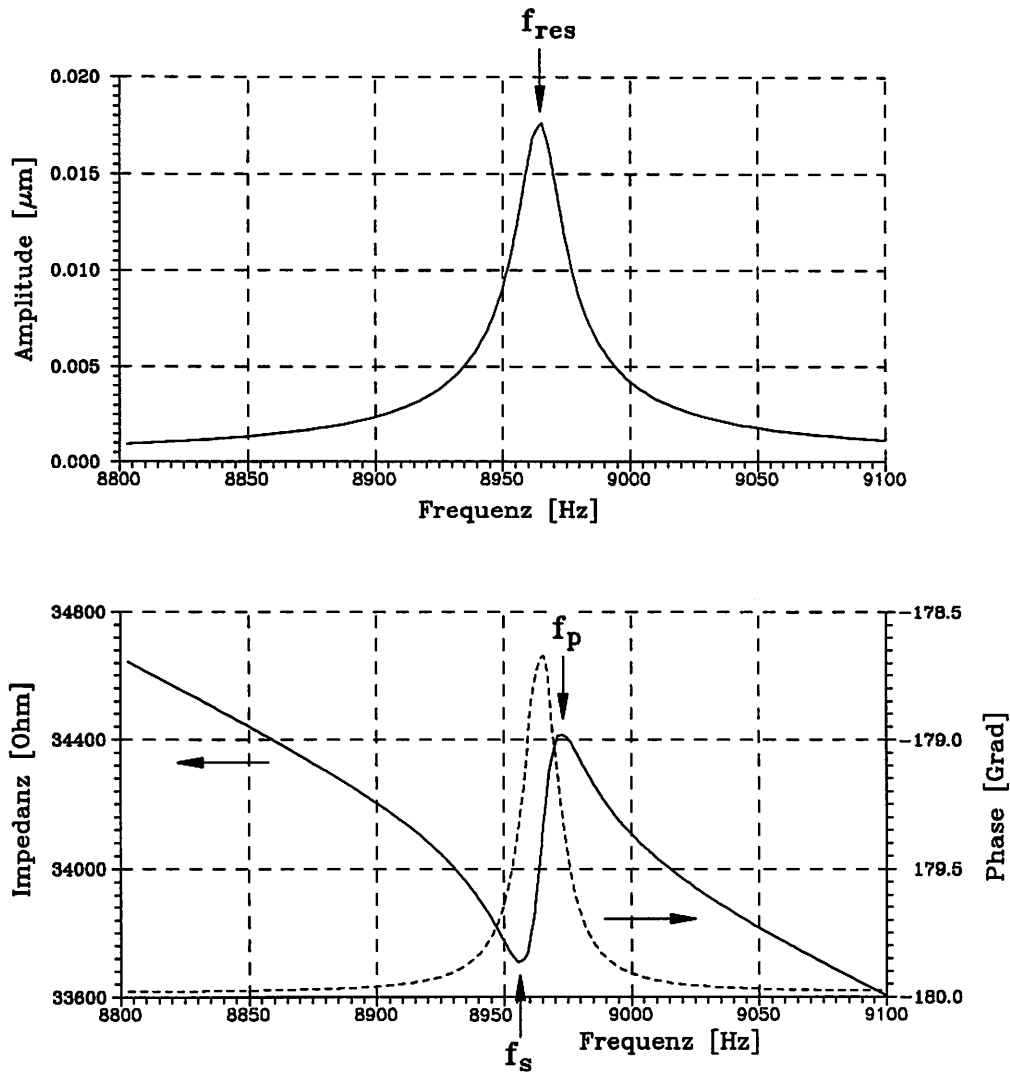


Abbildung 5.4: Modellierung des mechanischen und elektrischen Schwingungsverhaltens einer Silizium-Bimorphmembran mit einer  $ZnO$ -Dünnschicht

gebildet. Es handelt sich um den resonanten Membrandrucksensor aus Kapitel 4. Die frequenzabhängige Schwingungsamplitude wurde optisch mit Hilfe eines Laservibrometers schmalbandig in einem engen Frequenzbereich um die Grundmode  $M_{11}$  vermessen. Die mechanische Resonanzfrequenz  $f_{res}$  entspricht etwa 7,24 kHz und die mechanische Schwingungsgüte  $Q$  beträgt etwa 100. In der unteren Hälfte der Abbildung 5.5 ist der mit dem HP4194A-Impedanzanalysator elektrisch vermessene Impedanz- und Phasenverlauf dargestellt. Die Messung wurde an der großflächigen Aluminium-Zentralelektrode (siehe Abbildung 5.7) durchgeführt, wobei das Siliziumsubstrat den Massekontakt bildet. Deutlich sind die Serien- ( $f_s \approx 7,255$  kHz) und Parallelresonanzfrequenz ( $f_p \approx 7,295$  kHz) zu sehen, aus denen sich ein effektiver Kopplungsfaktor von etwa 10,5 % ergibt. Die Abweichung gegenüber dem theoretischen Wert von etwa 20 % (siehe Abbildung 5.3) ist einerseits auf die Prozeßbedingungen beim  $ZnO$ -Sputtern, andererseits möglicherweise

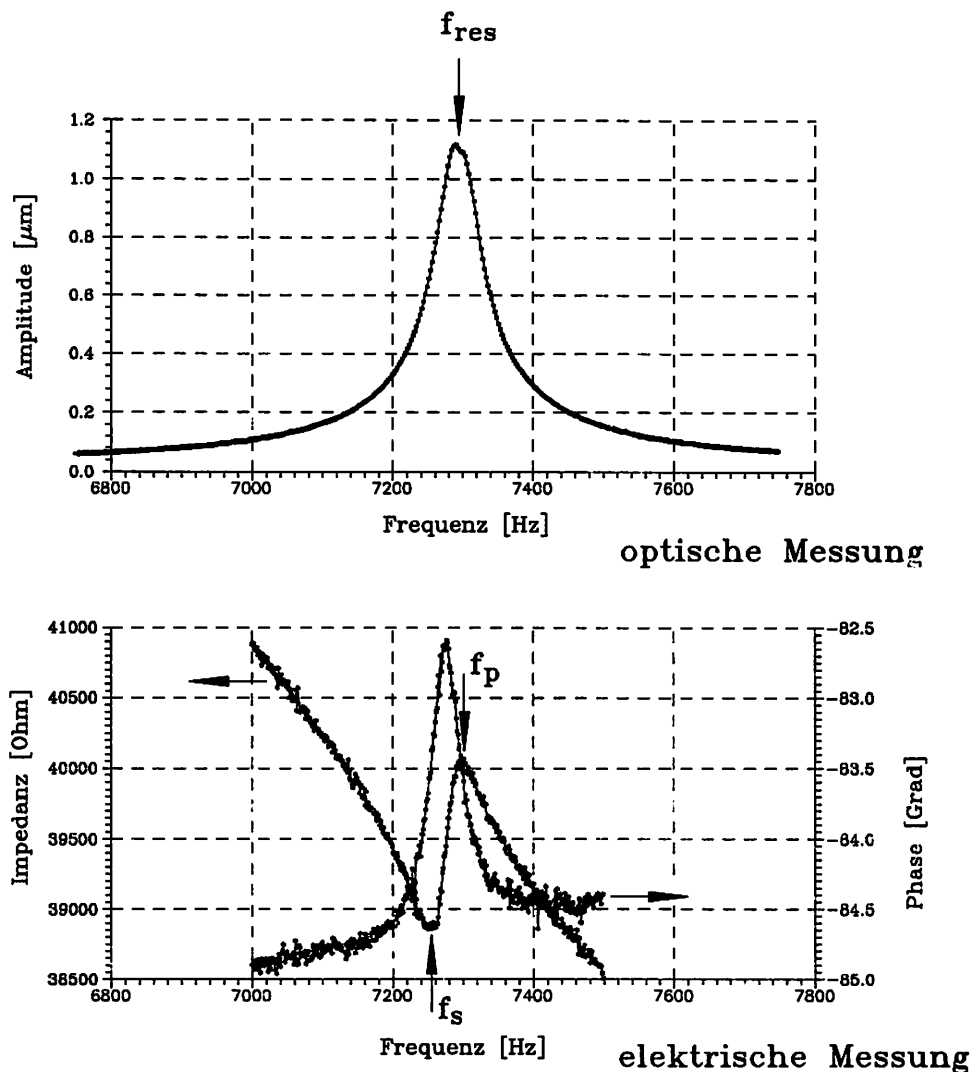


Abbildung 5.5: Experimentelle Charakterisierung einer Silizium-Bimorphmembran mit *ZnO*-Beschichtung

auf Degradationsmechanismen in der *ZnO* Dünnschicht zurückzuführen, die durch Temperaturlastwechseluntersuchungen verursacht wurden [Flik]. Ein Vergleich der Meßkurven (Abbildung 5.5) mit den FE-Resultaten (Abbildung 5.4) zeigt eine qualitativ gute Übereinstimmung. Die Abweichungen bei den Resonanzfrequenzen lassen sich einerseits auf die getroffenen Modellvereinfachungen (z.B. geringe Elementanzahl, MDOF) und der dadurch hervorgerufenen Modellversteifung, andererseits durch die inneren Spannungen in der *ZnO*-Schicht erklären. Im Gegensatz zu Piezokeramik-Bimorphen entspricht die gemessene mechanische Resonanzfrequenz der Parallelresonanzfrequenz:  $f_{\text{res}} \approx f_p$ . Ferner sind die geringen Phasenhübe von etwa  $1\text{--}2^\circ$  für die *ZnO*-beschichteten Bimorphwandler charakteristisch. Im Vergleich dazu zeichnen sich *PZT*-Keramikwandler durch Phasenhübe bis zu  $90^\circ$  aus.

## 5.5 Laterale Schichtstrukturierung

Durch eine laterale Strukturierung der piezoelektrischen Dünnschicht und der Elektroden kann bei Bimorphstrukturen zum einen die Modenselektion erhöht und zum anderen eine Temperaturkompensation des Wanderverhaltens erreicht werden. Während für die Erhöhung der Modenselektivität von Balkenresonatoren eine eindimensionale Betrachtungsweise ausreicht [Prak 93], erfordern Membranresonatoren zweidimensionale Untersuchungen. Die prinzipielle Möglichkeit der Temperaturkompensation eines Membranschwingers wurde bereits an *AlN*-beschichteten Siliziummembranen<sup>10</sup> von *Lakin et al.* gezeigt [Lakin 82]. Im folgenden soll mit Hilfe der FE-Methode am Beispiel der *ZnO*-beschichteten Silizium-Bimorphmembranen die Optimierung der Resonatorunimodalität und *gleichzeitig* die Reduktion der Temperaturquerempfindlichkeit unter Berücksichtigung von elektrothermo-mechanischen Wechselwirkungen gezeigt werden.

### 5.5.1 Erhöhung der Modenselektivität

Die Anregung resonanter Siliziumstrukturen zu Biegeschwingungen erfolgt durch aufgesputterte *ZnO*-Dünnschichten, die infolge des piezoelektrischen Effektes Dehnungen und Kontraktionen auf der Bauelementoberfläche erzeugen. Um eine möglichst hohe Modenselektivität zu erreichen, ist es notwendig, den genauen Spannungsverlauf auf der Bauteiloberfläche zu kennen und durch eine geeignete Elektrodenformgebung sicherzustellen, daß im Bereich von Zugspannungen nur Dehnungen und im Bereich von Druckspannungen nur Kontraktionen erzeugt werden. Als Entwurfparameter für die Elektrodenauslegung ist der Nulldurchgang des lateralen Spannungsverlaufes (d.h. der Übergang von Zug- in Druckspannungsbereiche) auf der Oberfläche des Resonators anzusehen. Ausgehend von einer Siliziummembran wurden verschiedene FE-Modellen untersucht, wobei der Einfluß unterschiedlicher Membrandicken, variabler Druckbeaufschlagung, der Einspannung infolge der ätzbegrenzenden (111)-Ebenen und nichtlinearer Effekte, infolge Spannungsversteifung der Membran, berücksichtigt wurden. Die FE-Berechnungen an Schalen- und Volumenmodellen ergaben für den Nulldurchgang des lateralen Spannungsverlaufes einen Wert von etwa 17 % der Membranseitenlänge. Im Vergleich dazu beträgt für beidseitig festeingespannte Biegebalken der Nulldurchgang etwas weniger als 25 % der Balkenlänge. In diesen Bereichen sollten daher *keine* Elektroden angeordnet werden.

In **Abbildung 5.6** ist die symmetrische Spannungsverteilung auf einer von unten mit Druck beaufschlagten Membranoberfläche zu sehen. Die FE-Berechnungen wurden mit einem Schalenmodell (S43) durchgeführt und die Abbildung zeigt die graphisch überlagerten Spannungsverläufe  $\sigma_x$  und  $\sigma_y$ . Im Randbereich bilden sich auf der Schalenoberfläche Druckspannungen (Isolinien A–B) und in Membranmitte Zugspannungen (Isolinie C) aus. Unter der Annahme, daß die statische Membranauslenkung in erster Näherung der Grund-

<sup>10</sup>TCCR (= Temperature Compensated Composite Resonator)

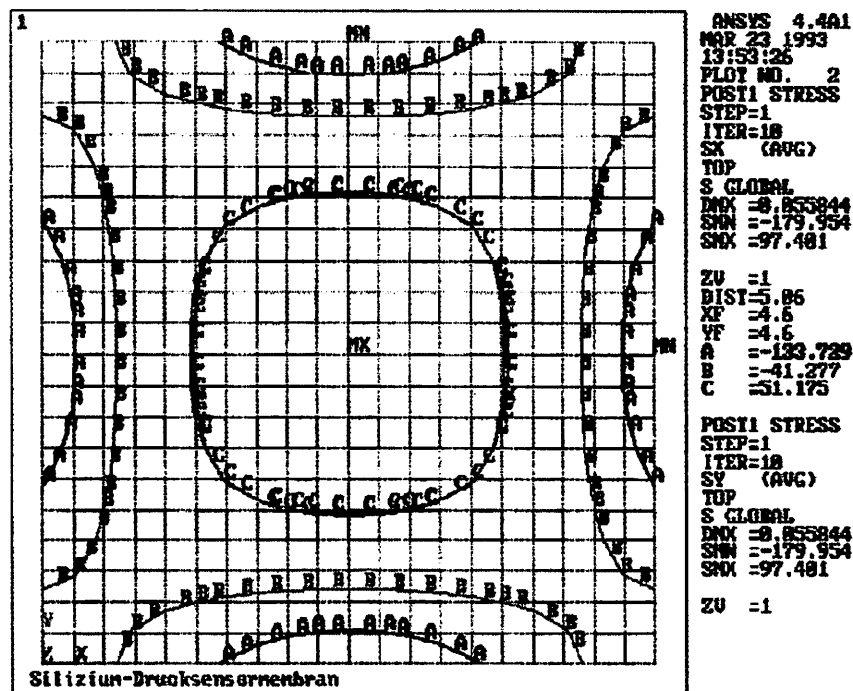


Abbildung 5.6: Simulierte Spannungsverteilung auf der Membranoberfläche bei Druckbeaufschlagung

biegeschwingungsmode der Membran entspricht, kann aus der flächenhaften Spannungsverteilung direkt ein modenselektives Elektrodenlayout abgeleitet werden.

In **Abbildung 5.7** ist das für die resonanten Membrandrucksensoren verwirklichte Elektrodenlayout für eine selektive Anregung der Grundmode  $M_{11}$  dargestellt. Um Störeffekte durch elektrische Zuleitungen und Streukapazitäten möglichst gering zu halten, wurde die Zentralelektrode mit einer vierfach symmetrischen Zuleitung versehen. Die vier Randelektroden überlappen die Siliziummembran bis ins Bulkmaterial und besitzen kleine Anschlußpads, an die die elektrischen Zuleitungen (*Au*-Draht) gebondet wurden. Im Gegensatz zu den piezoelektrisch betriebenen Balkenresonatoren weisen die Membranelektrodenlayouts ein wesentlich günstigeres Verhältnis von aktiver Elektrodenfläche zu Anschlußpadfläche auf. Die rückseitige Membranätzung ist durch eine gestrichelte Linie angedeutet. Um eine gegenphasigen Ansteuerung der Elektrodengebiete zu ermöglichen sind die Elektrodenflächen und die ins Substrat diffundierten Masseanschlüsse nicht miteinander verbunden. Auf diese Weise war es möglich, den Sensor sowohl im Zweipol- als auch im Vierpolbetrieb zu testen und verschiedene Anregungs- und Abtastkonfigurationen zu untersuchen.

Durch die Strukturierung der Elektroden und der gegenphasigen Ansteuerung zwischen Rand- und Zentralelektrode konnte die Modenselektivität der Grundmode deutlich erhöht und der Betrag der Resonanzamplitude bei konstanter Ansteuerspannung verdoppelt werden. Hierdurch kann der Sensor im Kleinsignalbereich betrieben und dynamische Nichtlinearitäten, hervorgerufen durch große Schwingungsamplituden, vermieden werden.

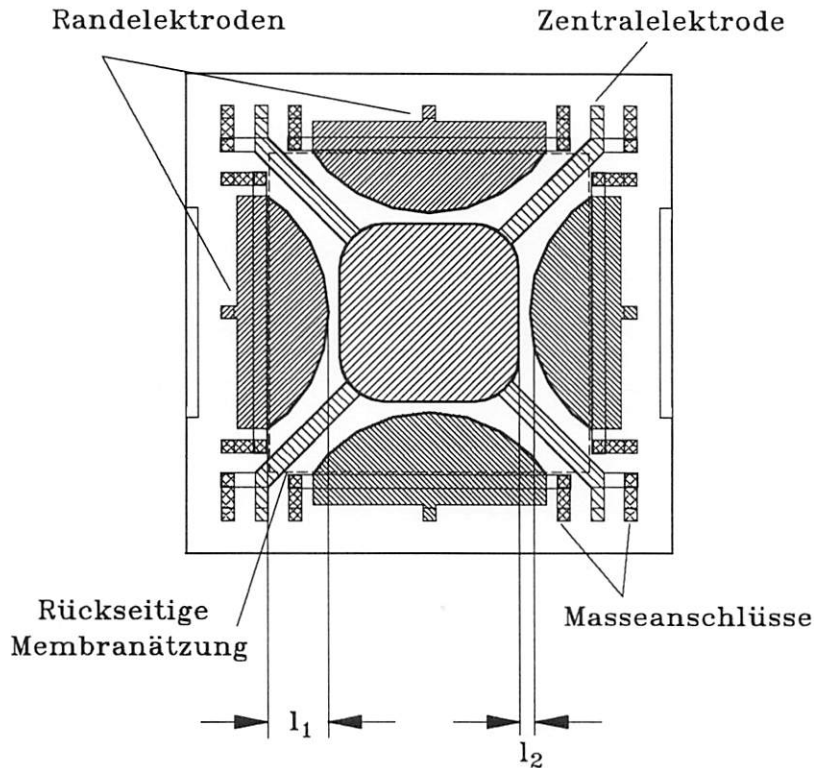


Abbildung 5.7: Elektrodenlayout für die selektive Anregung der Grundbiegeschwingungsmoden von Membranen

In **Abbildung 5.8** ist der experimentelle Nachweis der modenselektiven Anregung der Grundmode einer  $ZnO$ -beschichteten Siliziummembran dargestellt. Vermessen wurde eine Siliziummembran mit einer Dicke von  $50\ \mu\text{m}$  und einer  $ZnO$ -Schichtdicke von etwa  $14,4\ \mu\text{m}$ . Bei einer symmetrischen Anregung an den vier Randeletroden (oberes Spektrum) sind zwei deutlich ausgeprägte Resonanzen im Amplitudenspektrum zu beobachten, die Grundmode  $M_{11}$  bei  $9,1\ \text{kHz}$  und die erste Oberschwingung  $M_{13}$  bei etwa  $33,5\ \text{kHz}$ . Bei der Anregung mit Hilfe der Zentralelektrode bleibt das Modenspektrum qualitativ gleich, jedoch nimmt die Amplitude der Grundmode um etwa  $30\ \%$  zu. Erst bei der gegenphasigen Anregung von Rand- und Zentralelektrode (unteres Spektrum) wird die Oberschwingung stark unterdrückt und die Schwingungsamplitude der Grundmode steigt auf etwa das zweieinhalbfache an. Durch die vorgestellte Elektrodenstrukturierung kann die Grundmode bei gegenphasiger Anregung gut selektiert und gleichzeitig eine Amplitudenerhöhung erreicht werden.

### 5.5.2 Reduktion der Temperaturquerempfindlichkeit

Neben der Modenselektion hat die laterale Schichtstrukturierung einen wesentlichen Einfluß auf das Temperaturverhalten von Resonatoren im Bimorphaufbau. Ausgehend vom Elektrodenlayout (Referenzlayout), das in **Abbildung 5.7** dargestellt ist, wurden die äü-

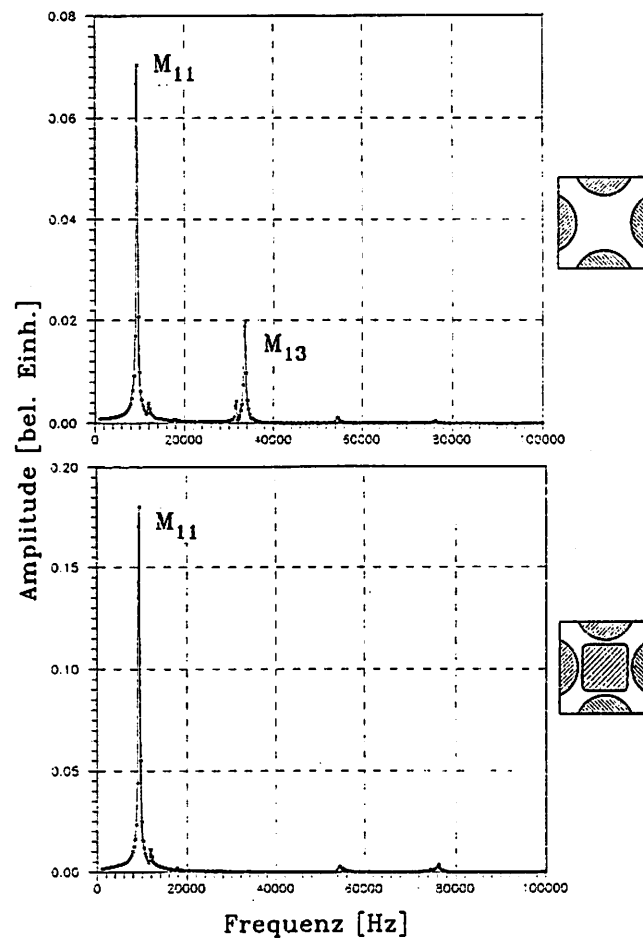


Abbildung 5.8: Experimenteller Nachweis der modenselektiven Anregung der Grundmode eines *ZnO*-beschichteten Membrandrucksensors

ren und inneren Elektrodenflächen verändert, indem die Geometrieparameter  $l_1$  und  $l_2$  variiert wurden.

In **Abbildung 5.9** ist der Einfluß der lateralen Strukturierung der *ZnO*-Dünnschicht auf die Temperaturquerempfindlichkeit einer Silizium-Bimorphmembran dargestellt. Die Dicke der Siliziummembran betrug bei den Berechnungen  $50\ \mu\text{m}$ , die der *ZnO*-Schicht  $10\ \mu\text{m}$ . Die untersuchten FE-Modellen besaßen etwa 2300–2600 Elemente mit etwa 3300–3800 Knoten und es wurde mit 50 MDOFs gerechnet. Variiert wurde die Größe der äußeren Randelektrode während die Zentralelektrode konstant blieb. Deutlich ist zu sehen, daß infolge einer Verkleinerung (Durchmesser  $l_1$ ) der Randelektrode die Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz der Grundmode  $M_{11}$  abnimmt. Der effektive elektromechanische Kopplungsfaktor  $k_{eff}$  ändert sich nur unwesentlich, die Verminderung beträgt lediglich 2 %, aber die relative Temperaturquerempfindlichkeit ( $\frac{1}{f} \frac{\Delta f}{\Delta T}$ ) der Resonanzfrequenz der Grundmode  $M_{11}$  verringert sich um fast das Fünffache. Das Referenzlayout REF mit den Parametern  $l_1 = 1,85\ \text{mm}$  und  $l_2 = 0,345\ \text{mm}$  weist eine relative Temperaturquerempfindlichkeit von

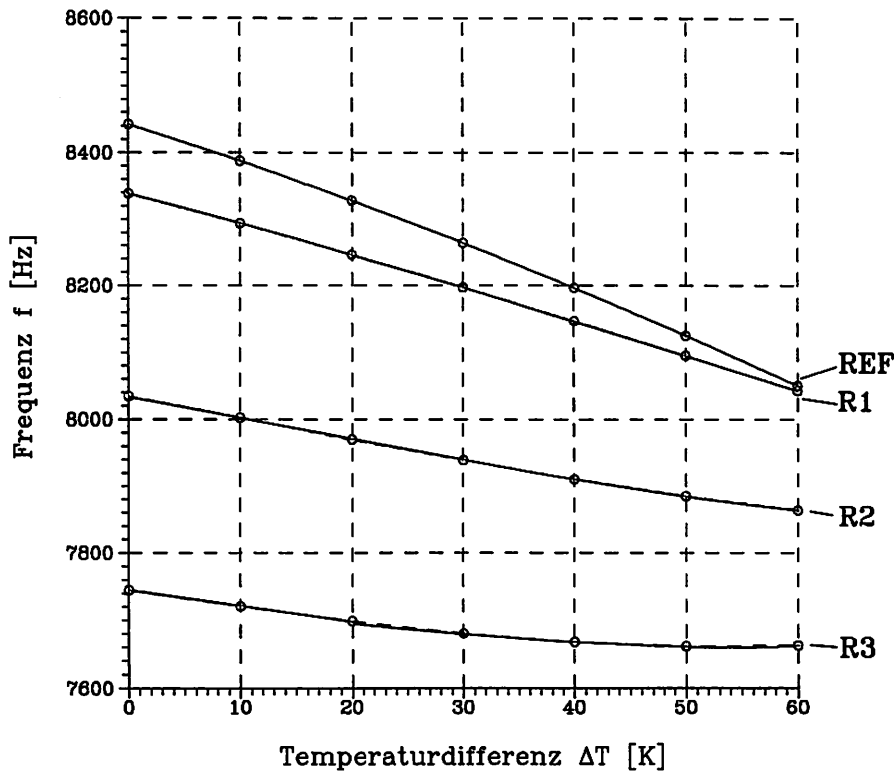


Abbildung 5.9: Einfluß der lateralen Schichtstrukturierung auf die Temperaturquerempfindlichkeit einer Silizium-Bimorphmembran

etwa 775 ppm/K auf. Die Resonanzfrequenz  $f_0$  beträgt 8443 Hz. Das optimierte Layout R3 mit den Parametern  $l_1 = 0,55$  mm und  $l_2 = 1,645$  mm weist eine Querempfindlichkeit von nur noch etwa 176 ppm/K bei einer Frequenz von 7745 Hz auf. Bei den thermischen Berechnungen wurden anisotrope, temperaturabhängigen Materialdaten sowohl für Silizium, als auch für *ZnO* benutzt [Landolt-Börnstein 82]. Die ermittelten Frequenzwerte  $f_0=f(\Delta T=0)$  stimmen mit den Serienresonanzfrequenzen  $f_s$  der piezoelektrischen Rechnungen sehr gut überein. Durch die laterale Strukturierung der *ZnO*-Schicht konnte eine Temperaturkompensation beim resonanten Membrandrucksensor erreicht werden.



## 5.6 Entwurfsmaßnahmen für Bimorphe

Die in diesem Kapitel durchgeführten Untersuchungen ermöglichen es, Entwurfsmaßnahmen für piezoelektrisch betriebene Bimorphwandler abzuleiten. Zur Erzielung anwendungsspezifischer Eigenschaften lassen sich bei mikromechanischen Sensoren und Aktoren mit piezoelektrischem Antrieb folgende Maßnahmen durchführen. Insbesondere handelt

Tabelle 5.6: Einflußgrößen zur Erzielung anwendungsspezifischer Eigenschaften bei piezoelektrisch betriebenen Bimorph-Bauelementen

Eigenschaft	Sensor	Aktor	Einflußgröße
Resonanzfrequenz	mittel	niedrig	Strukturdicke $h$
Schwingungsgüte	hoch	niedrig	Einspannung
Empfindlichkeit	hoch	—	$(l/h)$ -Verhältnis
Nichtlinearität	gering	hoch	$(h/l)$ -Verhältnis
Temperaturkomp.	erwünscht		Schichtstrukturierung
elektromechan. Kopplungsfaktor	mittel	hoch	Schichtstrukturierung $h_{Si}/h_{Piezo}$ -Verhältnis
Modenselektivität	hoch	—	Elektrodenstrukt.
Multimodebetrieb	anwendungsabhängig		Elektrodenstrukt.
Auslenkung	niedrig	hoch	$h_{Si}/h_{Piezo}$ -Verhältnis
Stellkräfte	—	hoch	$(l/h)$ -Verhältnis

es sich hierbei um resonante Sensoren, d.h. mit frequenzanalogem Meßprinzip, und *nicht-resonante* Aktoren<sup>11</sup>.

## 5.7 Fehlerdiskussion

Aufgrund der starken Prozeßabhängigkeit der Dünnschichteigenschaften, schwanken die in der Literatur angegebenen Materialdaten erheblich. Die Materialangaben weichen beispielsweise für gesputterte  $ZnO$ -Dünnschichten im Vergleich zu den Bulk-Daten bei den Elastizitätsmoduln um etwa  $\pm 20$  % ab, die Schichtspannungen bewegen sich im Bereich bis einige hundert MPa (Zug- und Druckspannung), die Abweichung bei den Dielektrizitätskonstanten (Permittivitäten) betragen  $\pm 10$  %, die piezoelektrischen Koeffizienten  $d_{31}$  variieren um etwa  $\pm (15-20)$  % [Blom 90, Heiland 66, Polla 86, Tijhen 91].

Der Fehler des materialabhängigen Anteils des elektromechanischen Kopplungsfaktors  $k_{31}$  berechnet sich infolge von Schwankungen der Materialeigenschaften nach Gleichung (2.15)

<sup>11</sup>In Kapitel 7 wird kurz auf den Einsatz von *resonant* betriebenen Mikroaktoren eingegangen.

zu:

$$\frac{\Delta k_{31}}{k_{31}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta d_{31}}{d_{31}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_{11}^E}{2S_{11}^E}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon_{33}^\sigma}{2\varepsilon_{33}^\sigma}\right)^2} \quad (5.6)$$

Unter Zugrundelegung der oben angegebenen Abweichungen und den im Rahmen dieser Arbeit bestimmten Materialdaten ergibt sich für die möglichen Abweichungen des transversalen elektromechanischen Kopplungsfaktors  $\frac{\Delta k_{31}}{k_{31}} \approx \pm 23 \%$ .

## 5.8 Zusammenstellung der Resultate

Die in diesem Kapitel vorgestellten piezoelektrischen FE-Modelle und durchgeführten gekoppelten Feldberechnungen erlauben die Simulation des Verhaltens piezoelektrisch angetriebener Bimorphstrukturen. Mit Hilfe meßtechnisch charakterisierter Piezokeramik- und *ZnO*-Dünnschichtwandlern konnten die numerischen Ergebnisse im Rahmen der Fehlerinflüsse verifiziert werden. Somit ließen sich bereits in der Entwurfsphase wichtige Vorgaben, wie beispielsweise die günstigste Elektrodenanordnung und das optimale Schichtdickenverhältnis, für die nachfolgenden technologischen Prozeßschritte ableiten. Weiterhin konnte mit Hilfe der numerischen Modellierung ein Beitrag zur Optimierung der technologischen Abscheideprozesse geleistet werden. Die Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen an piezoelektrisch mit *ZnO*-Dünnschichten betriebenen Balken- und Membranstrukturen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Für gesputterte *ZnO*-Dünnschichten wurden durch Vergleich der experimentellen Messungen mit den FE-Resultaten effektive Materialeigenschaften, wie elektromechanische Kopplungsfaktoren und prozeßspezifische piezoelektrische Kopplungskoeffizienten, bestimmt.
- An mikromechanischen Bimorphmembranstrukturen wurden für unterschiedliche Piezoelektrika (*AlN*, *ZnO*, *PZT*) optimale Schichtdickenverhältnisse zur Erzielung maximaler effektiver elektromechanischer Kopplungsfaktoren numerisch errechnet.
- Für Membrandrucksensoren wurde ein modenselektives Elektrodenlayout entwickelt, bei dem die Unimodalität des passiven Resonators durch Elimination der  $M_{13}$ -Oberschwingung erhöht wurde. Zusätzlich konnte experimentell eine Amplitudenverdopplung der Grundbiegeschwingungsmoden  $M_{11}$  bei gleichen Ansteuerbedingungen nachgewiesen werden.
- Durch laterale Schichtstrukturierung konnte rechnerisch eine Reduktion der Temperaturquerempfindlichkeit der Grundresonanzfrequenz um das Vierfache nachgewiesen werden.