

Kapitel 7

Schlußbetrachtung

Die Anforderungen an den Entwurf bei der Entwicklung von mikromechanischen Bauelementen bedingen den Einsatz rechnergestützter, numerischer Berechnungsmethoden, um sich überlagernde nichtlineare Effekte, anisotrope Materialeigenschaften und die elektro-thermo-mechanischen Wechselwirkungen bei Mehrschichtsystemen beschreiben zu können. So kann beispielsweise die Optimierung mikromechanischer Resonanzsensoren nur unter gleichzeitiger Betrachtung der statischen *und* dynamischen Eigenschaften unter Berücksichtigung des physikalischen Anregungsprinzips erfolgen. Mit den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten FE-Modellen in Verbindung mit den Möglichkeiten des kommerziellen Programmsystems ANSYS wurden gekoppelte Feldberechnungen durchgeführt und das Verhalten piezoelektrisch betriebener Sensoren untersucht. Damit ließen sich bereits in der Entwurfsphase wichtige Vorgaben, wie z.B. die günstigste Elektrodenanordnung und das optimale Schichtdickenverhältnis, für die nachfolgenden technologischen Prozeßschritte ableiten.

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, daß die *Methode der Finiten Elemente* geeignet ist, das dynamische Verhalten mikromechanischer Strukturen zu beschreiben. Weiterhin wurde gezeigt, daß bei der Berechnung der Resonanzfrequenzen und Schwingungsmoden, sowie der lastabhängigen Resonanzfrequenzänderungen eine gute Übereinstimmung mit den Meßergebnissen erzielt werden konnte. Insbesondere haben sich die Stärken der FE-Methode bei der Behandlung folgender Problemstellungen herausgestellt:

- Berücksichtigung nichtlinearer geometrischer Effekte, insbesondere der Spannungsversteifung bei großen Auslenkungen und Deformationen der Mikrostrukturen.
- Strukturierung der Elektroden zur selektiven Anregung von Schwingungsmoden und Unterdrückung von unerwünschten Oberwellen. Desweiteren erlauben Siliziumsensoren in Bimorph- und Mehrschichtaufbau durch eine geeignete laterale Schichtstrukturierung eine Temperaturkompensation der Sensorkennlinien.

- Modellierung des elektro-mechanischen Sensorverhaltens unter Berücksichtigung des piezoelektrischen Antriebsprinzips, mit dessen Hilfe die Ableitung elektrischer Kenngrößen (Impedanz- und Phasenverhalten) in Abhängigkeit geometrischer Randbedingungen möglich ist. Eine Variation der Schichtdickenverhältnisse erlaubt eine Optimierung der erzielbaren effektiven elektromechanischen Kopplungsfaktoren.
- Untersuchung des Einflusses der Resonatorquerschnitte und Einspannbereiche auf das Schwingungsverhalten mikromechanischer Resonatoren. Durch Einführung von Entkopplungsbereichen lassen sich Modenkopplungen erheblich unterdrücken.
- Die Einspanneffekte und die Hebelwirkung beim BOD-Drucksensor lassen sich bei dem vorgestellten komplexen Sensorentwurf nur noch numerisch optimieren.

Die Vorteile der FE-Methode bestehen darin, komplexe Geometrien unter vielfältigen Randbedingungen zu modellieren, Parameterstudien durchzuführen und Geometrie- und Materialeinflüsse separat betrachten zu können. Hierbei ist die Stärke der FE-Methode weniger die Berechnung von absoluten Größen und quantitativen Ergebnissen, die zwar bei *korrekten* Eingangsdaten¹ prinzipiell möglich sind, aber oft einen erheblichen Modellieraufwand und entsprechende Rechnerressourcen erfordern, sondern vielmehr die Berechnung der relativen Abhängigkeiten von den Modellparametern. Auf diese Weise können Parametervariationen und Sensitivitätsanalysen durchgeführt und mikromechanische Strukturen am Rechner analysiert und bereits im Vorfeld optimiert werden. Die FE-Methode hat sich dabei als ein effizientes Werkzeug bei der Entwicklung von mikromechanischen Strukturen erwiesen.

Einschränkend bleibt jedoch festzuhalten, daß beim mikromechanischen Entwurf der Einsatz der FE-Methode an einigen Stellen auch an ihre Grenzen stößt. So gehen die zugrundeliegenden Differentialgleichung, auf die in Kapitel 3 eingegangen wurde, beispielsweise von geschwindigkeitsproportionalen Dämpfungseffekten aus und erlauben nur die Behandlung kleiner Schwingungsamplituden. Dynamische Nichtlinearitäten, wie sie beim anharmonischen Oszillator oder bei chaotischem Systemverhalten auftreten können, lassen sich nicht erfassen. Um sie zu beschreiben muß auf vereinfachte analytische Ersatzmodelle zurückgegriffen werden, die in der Regel von Schwingern mit einem Freiheitsgrad ausgehen [Prak 93, Tilmans 93]. Weiterhin sind die kopplungsbeschreibenden Konstanten bei gekoppelten Feldberechnungen weitgehend unbekannt. Erschwerend kommt hinzu, daß die Materialeigenschaften in der Regel anisotrop sind und in erster Näherung daher isotrope Ersatzdaten ermittelt werden müssen. Außerdem sind die zugrundeliegenden physikalischen Effekte nichtlinear, so daß bei den beschreibenden Zustandsgleichungen Tensorbeiträge höherer Ordnung zu berücksichtigen sind. Diese sind in den kommerziellen und auch in den meisten an Hochschulen entwickelten FE-Programmen nicht implementiert. Weitere Beispiele für nichterfaßte gekoppelte Effekte ist die Elektrostriktion oder die Pyroelektrizität, sowie die Magnetostriktion, bei der die Kopplung zwischen einem äußeren

¹Dieses sind im wesentlichen die Strukturgeometrie, das Materialverhalten und die zugrundeliegenden Randbedingungen.

Magnetfeld und der Strukturmechanik in mikromechanischen Aktoranwendungen ausgenutzt wird. Eine Möglichkeit zur Modellierung solcher Effekte besteht in der Ausnutzung von Analogien, aufgrund der gleichen mathematischen Beschreibungsweise. Unter gewissen Vernachlässigung und in einigen Sonderfällen kann mit den FE-implementierten thermodynamischen Zustandsgleichungen und den nichtlinearen numerischen Lösungsalgorithmen gerechnet werden [Götz]. Ein weiteres Problem stellen die Materialeigenschaften dar, die zusätzlich von den thermodynamischen Randbedingungen abhängig sind, d.h. ob isotherme oder adiabatische Bedingungen vorliegen. Zukünftig sind hier weitere Anstrengungen notwendig, um die technologischen und meßtechnischen Arbeiten zu koordinieren und die nötigen Informationen in den Entwurfsprozeß einfließen zu lassen.

Als Ausblick sollen an dieser Stelle einige mögliche Anwendungen dynamisch betriebener mikromechanischer Strukturen abschließend aufgezeigt werden:

- **Resonante Multimode-Drucksensoren** können in verschiedenen Schwingungsmoden betrieben werden, deren Resonanzfrequenzen sich durch unterschiedliche Druck- und Temperaturempfindlichkeiten auszeichnen. Auf diese Art ist eine Temperaturkompensation *on-line* möglich, da zwischen den verschiedenen Schwingungsmoden während des Meßbetriebes umgeschaltet werden kann.
- **Mikromechanische Schwinger** lassen sich als Teststrukturen zur Bestimmung von Dünnschichteigenschaften einsetzen, falls die Materialeigenschaften des Substrates bekannt sind und Biegeschwingungsmoden gezielt angeregt werden. Über die Messung der Resonanzfrequenzverschiebung läßt sich die innere Spannung der Dünnschichten bestimmen. Weiterhin können mit Hilfe des effektiven elektromechanischen Kopplungsfaktors die piezoelektrischen Eigenschaften von Dünnschicht-Piezoelektrika charakterisiert werden.
- **Multimode-Aktoren** lassen sich resonant ansteuern und weisen durch die verschiedenen Schwingungsmoden unterschiedliche Bewegungsmöglichkeiten auf. Ein zusätzlicher Vorteil stellt die um die mechanische Schwingungsgüte erhöhte Amplitudenvergrößerung im Resonanzfall dar (siehe Gleichung 4.8). Auf diese Weise lassen sich Aktoranwendungen realisieren, die bei statischer Ansteuerung nicht durchführbar wären.

Die zukünftige Entwicklung wird zeigen ob die Anwendungen mikromechanischer Strukturen und die Integration in komplexen Mikrosystemen die heute in sie gesteckten Erwartungen bezüglich Zuverlässigkeit, Wirtschaftlichkeit und Funktionalität erfüllen können. Hierzu müssen neben den technologischen Herstellungsprozessen für eine wirtschaftliche Produktion von Mikrostrukturen und -systemen die Leistungsfähigkeit der bestehenden Entwicklungswerkzeuge erweitert und insbesondere im Bereich der Prozeßsimulation zum Teil neue Simulationsverfahren und -modelle entwickelt werden.

Anhang:

Experimenteller Meßaufbau

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden experimentelle Meßaufbauten zur meßtechnischen Charakterisierung des statischen und dynamischen Verhaltens mikromechanischer Strukturen konzipiert und realisiert. Um den Entwicklungsprozeß mikromechanisch gefertigter Resonanzsensoren im Rahmen des BMFT-Verbundprojektes auch meßtechnisch unterstützen zu können, mußten insbesondere neben den passiven Eigenschaften (Resonanzfrequenz, Amplituden, Schwingungsgüten) der Mikroresonatoren aus Silizium, die Sensoreffekte und die Störeinflüsse, wie temperatur- oder technologisch bedingte Verspannungen, die bei Multilayerstrukturen auftreten, untersucht werden. Die experimentellen Daten dienen hierbei einerseits dazu um Rückschlüsse auf technologische Prozeßschritte ziehen zu können, andererseits der Entwicklung geeigneter FE-Modelle und der meßtechnischen Verifikation der numerischen Berechnungsergebnisse.

In **Abbildung A** ist der gesamte experimentelle Meßaufbau zur Charakterisierung mikromechanischer Strukturen schematisch skizziert. Der gesamte Meßplatz ist modular aufgebaut und im Rahmen verschiedener Praktikums- und Diplomarbeiten den Meßaufgaben angepaßt und erweitert worden. Der Meßplatz besteht aus dem optischen Nachweisverfahren mittels eines Laservibrometers, der mechanischen Druck- bzw. hier nicht dargestellten Kraftbeaufschlagung, einem ansteuerbaren Temperaturtisch und einem PC-Meßwerterfassungssystem, das eine rechnergestützte Datenaufnahme und -speicherung über standardisierte HP-IB-Schnittstellen (*IEEE488*) ermöglicht.

Fremdanregung:

Es mußten experimentelle Möglichkeiten geschaffen werden, die Mikrostrukturen ohne Dünnschichtsystem mit Hilfe von externen Energiequellen zum Schwingen anzuregen. Für den niederen Frequenzbereich bis etwa 20 kHz können kommerzielle elektromagnetische Schwingungserzeuger, wie beispielsweise der Miniatur-Schwingtisch von Brül & Kjær (Typ B&K-4809) verwendet werden. Mit Hilfe eines elektrischen Leistungsverstärkers (Typ B&K-2706) war es möglich bei Membranstrukturen auch relativ große dynamische Schwingungsamplituden von einigen Mikrometern zu erzeugen. Zur Anregung hochfrequenter

Schwingungsmoden, insbesondere auch Resonatoren geringer Abmessungen ($l = 2\text{--}3\text{ mm}$), wurden Piezokeramiken (*PZT*) extern angebracht, um die Mikrostrukturen über Körperschall akustisch zum Schwingen anzuregen. Hierbei war zu beachten, daß sowohl die Art der Sensorhalterung, als auch das Schwingungsverhalten der Piezokeramik selbst das Amplitudenspektrum der mikromechanischen Resonatoren stark beeinflussen können. Es wurden schwingungsfähige Balken- und Membranstrukturen untersucht, die sowohl im Gesamtwafer als auch einzeln eingespannt waren. Hierbei zeigte sich, daß Messungen auf dem Gesamtwafer ungeeignet sind mikromechanische Strukturen quantitativ zu charakterisieren, da Schwingungsanteile der Piezokeramik, benachbarter Resonatoren und niederfrequente Waferresonanzen sich im Spektrum überlagern und über nichtlineare Effekte Modenkopplungen hervorrufen. Im Rahmen der durchgeführten Vorversuche wurde festgestellt, daß mit Hilfe von handelsüblichen *PZT*-Keramiken eine breitbandige akustische Anregung der Mikrostrukturen bis einige hundert Kilohertz gewährleistet ist. Auf diese Weise konnten Resonanzfrequenzen und Schwingungsamplituden, sowie Oberwellenspektren mikromechanischer Strukturen vermessen werden.

Im Rahmen einer Diplomarbeit [Braxmaier 92a] wurden die Auswirkungen der Anregung und der Resonatorhalterung auf das dynamische Verhalten von mikromechanischen Membranresonatoren weiter untersucht. Die Siliziumsensoren wurden hierzu direkt auf die Piezokeramik geklebt, so daß eine ideal starre Kopplung realisiert wurde und damit eine optimale Energieübertragung gegeben war. Diese Methode wies allerdings den Nachteil auf, daß die Siliziumsensoren anschließend nicht mehr zerstörungsfrei von der Keramik gelöst werden konnten. Durch Konstruktion einer universellen Einspannhalterung für Balkenresonatoren [Braxmaier 92b] konnten verschiedene Kraftsensoren vermessen und der Einfluß der Einspannbedingung auf die Resonanzfrequenz und die Schwingungsgüte getestet werden. Allerdings ist bei dieser Art der Resonatorfixierung darauf zu achten, daß die Massen- und Steifigkeitsverhältnisse der mechanischen Halterung und des Siliziumbalkens entsprechend groß gewählt wird, damit eine Überlagerung der Schwingungsmoden im Amplitudenspektrum nicht auftritt und eine genügend große Separation der Modenbeiträge erreicht wird.

Optisches Abtastsystem:

Die Abtastung der Eigenfrequenzen und Schwingungsformen erfolgte interferometrisch mit einem kommerziellen Laservibrometer (*POLYTEC OFV1102HR*) unter Verwendung der Laser-Doppler-Technik [Polytec 91]. Das Laservibrometer besteht aus einem *Mach-Zehnder*-Interferometer und einer elektronischen Signalverarbeitung, wie in Abbildung A schematisch dargestellt. Mit diesem Gerät ist es möglich, Biegeschwingungen aus der Strukturebene heraus zu detektieren und unter Ausnutzung des Dopplereffektes die Geschwindigkeitsschnelle $v(t)$ oder interferometrisch die Schwingungsamplitude $A(t)$ zu vermessen. Der Arbeitsfrequenzbereich des eingesetzten Laservibrometers erstreckt sich von 0,1 Hz bis maximal 1 MHz. Die Meßbereiche betragen bei der Vermessung von Geschwin-

digkeiten 10^{-6} – 10 m/s bei einer Auflösung von $0,5 \mu\text{m/s}$ und bei Amplituden 10^{-9} – 10^{-2} m. Die Auflösung bei der Amplitudenmessung beträgt minimal 8 nm bedingt durch den Einsatz eines hochauflösenden Interferenzstreifenzählers. Eine genaue Funktionsbeschreibung des Laservibrometers und seiner Betriebsmodi ist in [Selbach 88] und [Lewin 90] zu finden.

Das Ausgangssignal der Signalverarbeitung des Laservibrometers wird wahlweise in ein Speicheroszilloskop oder in einen Spektrumanalysator (*HP3588A*) eingespeist. Zur Ermittlung der Absolutamplituden wird das Zeitsignal $A(t)$ auf dem Oszilloskop herangezogen, während das in den Frequenzbereich transformierte Signal $A(\omega)$ direkt vom Spektrumanalysator ausgelesen und weiter verarbeitet werden kann. Hierzu wurde ein Meß- und Steuerprogramm (*HPMESS.EXE*) unter Turbo-Pascal 6.0 geschrieben [Müller 92] und ein Konvertier- (*TRANS.EXE*), sowie ein Batchprogramm (*HPLO.BAT*) zur Dokumentation der aufgenommenen Spektren erstellt.

Die Justierung der Mikrostrukturen unter dem Laserstrahl kann mit Hilfe einer *xy*-Schrittmotorsteuerung erfolgen. Desweiteren wird der LWL-Meßkopf mit Hilfe mechanischer Mikrometerschrauben justiert. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, über mehrere Probernadeln die zu vermessenden Strukturen elektrisch zu kontaktieren [Schorer 93]. Der Gesamtaufbau des optischen Meßplatzes erfolgte auf einem schwingungsgedämpften Tisch, um äußere Störeinflüsse, wie Lüftervibrationen, Trittschall und sonstige Geräusche möglichst zu eliminieren.

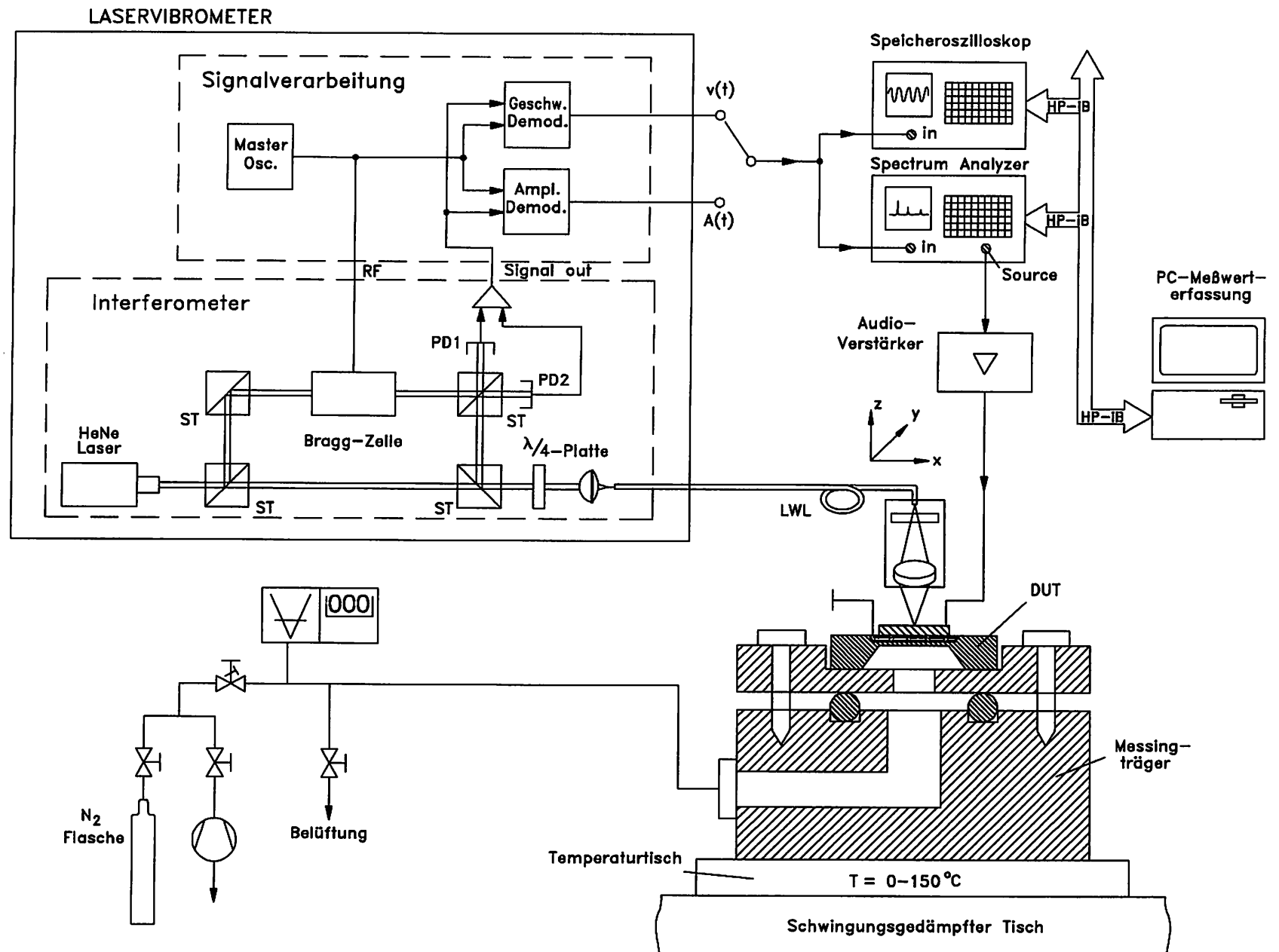
Meßgrößeneinleitung:

Zur Druckbeaufschlagung von Membranen ist ein spezieller Druckchuck konstruiert worden, der sowohl Überdrücke (bis etwa 5 bar) mit Hilfe einer N_2 -Druckflasche, als auch Unterdrücke durch eine Vorvakuumpumpe ermöglicht. Die Druckmessung erfolgt mit einem kommerziellen Digitaldruckmanometer (*RUSKA, Serie 6200*) mit einer Auflösung besser als ± 1 mbar. Der Druckchuck ist aus Messing gefertigt, um eine möglichst hohe Wärmekapazität aufzuweisen und somit bei thermischen Messungen ein zeitliches Driften zu vermeiden.

Unterhalb des Druckchucks befindet sich ein heizbarer Temperaturtisch, der in einem Temperaturbereich von 0–150 °C extern geregelt werden kann. Die Halterungen für die Drucksensormembranen (*DUT = Device-Under-Test*) wurden aus Aluminium, Messing und Edelstahl gefertigt, um auch unterschiedliche Temperatúrausdehnungen untersuchen zu können. Die Abdichtung der Membranträger erfolgte mit Hilfe eines O-Rings.

Für die Kraftbeaufschlagung von Siliziumstrukturen stand neben der im Rahmen der Diplomarbeit von Müller erstellten Konstruktion [Müller 92] zum Abschluß des BMFT-Verbundprojektes ein kommerzieller Kraftmeßstand der Fa. *MICOS* zur Verfügung. Dieser ist mit einer Präzisionsreferenzkraftmeßdose (Typ Q11, Fa. *Hottinger Baldwin Meßtechnik*) ausgestattet und ermöglichte durch eine Motorsteuerung die automatisierte Aufnahme von Frequenz-Kraft-Kennlinien [Wagner].

Abbildung A: Meßplatz zur experimentellen Charakterisierung mikromechanischer Strukturen



Abbildungsverzeichnis

1.1	Rechnergestütztes Ablaufschema beim mikromechanischen Entwurfsprozeß (nach [Wachutka 93])	6
1.2	Blockschaltbild eines Resonanzsensors	11
1.3	Schema eines resonanten Silizium-Drucksensors mit piezoelektrischem Antrieb	12
1.4	Geometrie und elektrisches Layout der elektrothermisch angetriebenen Kraft- und Strömungssensoren	14
2.1	Allgemeine intensive Zustandsvariablen eines mikromechanischen Systems (nach [Wachutka 92])	22
2.2	Wechselwirkung der intensiven und extensiven thermodynamischen Zu- standsvariablen bei elektro-thermo-mechanischer Kopplung (nach [Nye 57])	24
2.3	Gesamtmatrix der elektro-thermo-mechanischen Wechselwirkungseffekte in einem Festkörper (nach [Nye 57])	25
2.4	Besetzungsschema der Materialmatrizen bei hexagonaler Kristallsymmetrie (nach [Nye 57])	28
2.5	Wellentypen in elastischen Festkörpern	35
2.6	Mikromechanische Grundstrukturen	39
3.1	Approximation einer Funktion unter Verwendung linearer Formfunktionen .	46
3.2	Iterationsprozeß beim <i>Newton-Raphson</i> -Verfahren	51
4.1	Konvergenzverhalten der Resonanzfrequenz	65
4.2	Konvergenzverhalten der Membranmittenauslenkung	67

4.3	Eigenschwingungsformen eines Silizium-Biegebalkens	73
4.4	Numerisch ermittelte Schwingungsmoden und normierte Eigenfrequenzen c_{ij} einer ebenen Siliziummembran	75
4.5	Optische Vermessung des frequenz- und ortsabhängigen Amplitudenspektrums $A(f, x)$ eines piezoelektrisch angetriebenen Silizium-Membrandrucksensors	76
4.6	Lastabhängige Resonanzfrequenzänderung beim elektrothermisch angetriebenen Silizium-Kraftsensor	79
4.7	Druckabhängige Membranmittenauslenkung eines Silizium-Drucksensors (Vergleich: analytische Beschreibung – FE-Berechnung – Messung)	81
4.8	Druckabhängige Frequenzänderung eines piezoelektrisch angetriebenen Silizium-Drucksensors (Vergleich: FE-Berechnungen – Messung)	82
4.9	Statische Auslenkung eines Silizium-Balkenresonators in Abhängigkeit der Temperaturüberhöhung (Vergleich: FE-Berechnungen – Messungen)	86
4.10	Frequenzcharakteristik eines Silizium-Balkenresonators in Abhängigkeit der Temperaturüberhöhung (Vergleich: Analytische Beschreibung – FE-Berechnungen – Messungen)	88
5.1	FE-Modell einer Silizium-Bimorphmembran	98
5.2	Resonanzfrequenzen einer Silizium-Bimorphmembran mit piezoelektrischer ZnO -Dünnschicht in Abhängigkeit der Membrangesamtdicke und elektrisches Ersatzschaltbild für piezoelektrische Resonatoren	99
5.3	Effektiver elektromechanischer Kopplungsfaktor k_{eff} einer Silizium-Bimorphmembran in Abhängigkeit des Schichtdickenverhältnisses für verschiedene Piezoelektrika (Meßwerte für ZnO -Dünnschichten)	110
5.4	Modellierung des mechanischen und elektrischen Schwingungsverhaltens einer Silizium-Bimorphmembran mit einer ZnO -Dünnschicht	114
5.5	Experimentelle Charakterisierung einer Silizium-Bimorphmembran mit ZnO -Beschichtung	115
5.6	Simulierte Spannungsverteilung auf der Membranoberfläche bei Druckbeaufschlagung	117

5.7	Elektrodenlayout für die selektive Anregung der Grundbiegeschwingungs- mode von Membranen	118
5.8	Experimenteller Nachweis der modenselektiven Anregung der Grundmode eines <i>ZnO</i> -beschichteten Membrandrucksensors	119
5.9	Einfluß der lateralen Schichtstrukturierung auf die Temperaturqueremp- findlichkeit einer Silizium-Bimorphmembran	120
6.1	Geometrie des Dreifachbalken-Kraftsensors	124
6.2	FE-Schalenmodell und Biegeschwingungsmoden M1, M2 und M3 des Drei- fachbalkenresonators	127
6.3	Abhängigkeit der Modenaufspaltung der Schwingungsmoden M1, M2 und M3 von der Länge des Entkopplungsbereiches	128
6.4	Amplitudenspektrum eines Dreifachbalkenresonators mit Bulkeinspannung .	129
6.5	Amplitudenspektrum eines Dreifachbalkenresonators mit einer Entkopp- lungslänge von 200 μm	129
6.6	Herstellungsprinzip der Siliziumbalken mit dreieckigem Querschnitt	132
6.7	Optisch vermessenes Geschwindigkeitsspektrum eines doppelseitig einge- spannten Siliziumbalkens mit dreieckigem Querschnitt	134
6.8	Vergleich der numerisch berechneten Frequenzänderungen von Balkenreso- natoren mit dreieckigem und trapezförmigem Balkenquerschnitt	136
6.9	Geometrie des BOD-Drucksensors	136
6.10	REM-Aufnahme des BOD-Drucksensors (Gesamtansicht)	137
6.11	REM-Aufnahme des BOD-Drucksensors (Balkeneinspannung)	137
6.12	Gemessene Frequenz-Druck-Kennlinie eines BOD-Drucksensors	139
6.13	Berechnete Auslenkungen u_z (1), Spannungsverteilung σ_y (2), Elementie- rung (3) und Membranschwingungsmoden (4) des BOD-Drucksensors	141
6.14	Berechnete Modenaufspaltung beim BOD-Drucksensor in Abhängigkeit der Membrandicke	142
6.15	Einfluß der Membrandicke auf die Druckempfindlichkeit von BOD- Drucksensoren	143

6.16 Geometrieinfluß (Membranseitenlänge [mm]/ -dicke [μm]) auf die Druck- empfindlichkeit von BOD-Drucksensoren	146
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich der grundlegenden physikalischen Eigenschaften von Silizium, Zinkoxid und Quarz	26
2.2	Eigenschaften mikromechanischer Strukturmaterialien	29
2.3	Materialeigenschaften von Piezoelektrika	32
2.4	Normierte Eigenfrequenzen λ_{ij}^2 einer ebenen Siliziummembran	38
2.5	Frequenzkonstanten c_f verschiedener Grundgeometrien	39
2.6	Größenordnung der Resonanzfrequenzen von Grundbiegeschwingungen . . .	40
4.1	Einfluß der Modellparameter auf die Resonanzfrequenz beim Schalenmodell	65
4.2	Zusammenfassung der Modellparameter und numerischen Resultate	67
4.3	Einfluß der Materialanisotropie auf die Resonanzfrequenz bei unterschiedlicher Resonatorgeometrie	69
4.4	Resonanzfrequenzen von Silizium-Biegebalken bei Fremdanregung (Vergleich: FE-Berechnungen – Messungen)	72
4.5	Normierte Resonanzfrequenzen c_{ij} eines <i>ZnO</i> -beschichteten Silizium-Drucksensors (Vergleich: Analytische Beschreibung – FE-Berechnungen – Messungen)	77
4.6	Experimentelle Kenndaten des elektrothermisch angetriebenen Kraftsensors	78
4.7	Charakteristische Kenndaten des piezoelektrisch angetriebenen Silizium-Drucksensors (Vergleich: analytische Beschreibung – FE-Berechnung – Messung)	83
4.8	Temperaturabhängigkeit charakteristischer Kenngrößen von Silizium-Balkenresonatoren (Vergleich: FE-Berechnungen – Messungen)	89

4.9	Charakteristische Kenngrößen des elektrothermisch angetriebenen Kraftsensors in Abhängigkeit des Widerstandslayouts	89
4.10	Maßabweichungen bei mikromechanischen Strukturen	92
4.11	Größenordnung der Meßfehler	93
5.1	Einfluß der Modellparameter bei der Berechnung der Resonanzfrequenzen f_s , f_p und des effektiven elektromechanischen Kopplungsfaktors k_{eff}	102
5.2	Experimentelle Charakterisierung von Silizium-Bimorphmembranen mit hybrider Piezokeramik	105
5.3	FE-Modellierung von Silizium-Bimorphmembranen mit hybrider Piezokeramik	106
5.4	Charakteristische Kenndaten ZnO -beschichteter Siliziumzungenstrukturen (Vergleich: FE-Berechnung – Messung)	108
5.5	Optimierung der Schichtdickenverhältnisse bei Silizium-Bimorphmembranen	111
5.6	Einflußgrößen zur Erzielung anwendungsspezifischer Eigenschaften bei piezoelektrisch betriebenen Bimorph-Bauelementen	121
6.1	Vergleich der berechneten statischen und dynamischen Eigenschaften von Einfachbalken- und Dreifachbalken-Kraftsensoren	128
6.2	Relative Modenaufspaltung von Dreifachbalkenresonatoren in Abhängigkeit der Entkopplungslänge (Vergleich: FE-Berechnungen – Messungen)	130
6.3	Einfluß des Resonatorquerschnitts auf die Resonanzfrequenzen	133
6.4	Resonanzfrequenzen von Siliziumbalken mit dreieckigem Resonatorquerschnitt (Vergleich: FE-Berechnung – Messung)	135
6.5	Charakteristische Kenngrößen verschiedener BOD-Drucksensoren in Abhängigkeit der Membrandicke	144
6.6	Charakteristische Kenngrößen verschiedener BOD-Drucksensoren bei Variation von Membranseitenabmessungen und -dicke	145

Literaturverzeichnis

- [ABV 93] Abschlußbericht zum BMFT-Verbundprojekt: Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung frequenzanaloger Sensoren, VDI-VDE IT GmbH, Berlin (1993)
- [Alavi 91] M. Alavi, S. Büttgenbach, A. Schumacher, H.-J. Wagner, Laser machining of silicon for fabrication of new microstructures, Proc. TRANSDUCERS '91, Digest of technical papers, San Francisco (1991) 512–515
- [Alavi 92a] M. Alavi, S. Büttgenbach, A. Schumacher, H.-J. Wagner, Fabrication of micro-channels by laser machining and anisotropic etching of silicon, Sensors and Actuators A, 32 (1992) 299–302
- [Alavi 92b] M. Alavi, Th. Fabula, A. Schumacher, H.-J. Wagner, Monolithic microbridges in silicon using laser machining and anisotropic etching, EUROSENSORS VI, San Sebastian (1992) erschienen in: Sensors and Actuators A, 37–38 (1993) 661–665
- [Alavi 93] M. Alavi, Th. Fabula, A. Schumacher, H.-J. Wagner, Monolithisch integriertes Halbleiterelement, dessen Verwendung sowie Verfahren zur Herstellung eines solchen Halbleiterelementes, Deutsche Patentanmeldung, Nr.: 4332653 (1993)
- [Albert 88] W.C. Albert, A low cost force sensing crystal resonator applied to weighing, Proc. 42th. Annual Frequency Control Symposium (1988) 78–84
- [Allik 70] H. Allik, T.J.R. Hughes, Finite element method for piezoelectric vibration, Int. Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 2 (1970) 151–157
- [Andres 87] M.V. Andres, K.W.H. Foulds and M.J. Tudor, Nonlinear vibrations and hysteresis of micromachined silicon resonators designed as frequency-out sensors, Electron. Lett. 23 (1987) 952–954
- [Andres 88] M.V. Andres, K.W.H. Foulds and M.J. Tudor, Sensitivity and mode spectrum of a frequency-output silicon pressure sensor, Sensors and Actuators, 5 (1988) 417–426
- [Bach] W.H. Bach, persönliche Mitteilung
- [Bartuch 93] H. Bartuch, S. Büttgenbach, Th. Fabula, H. Weiss, Resonante Silizium-Sensoren mit elektrothermischer Anregung und DMS in Metalldünnschichttechnologie, SENSOR 93, Nürnberg, 11.–14. Oktober (1993) 17–24

- [Bathe 82] K.J. Bathe, Finite element procedures in engineering analysis, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1982) und deutsche Ausgabe: Finite-Elemente-Methoden, Springer, Berlin (1990)
- [Becker 86] E.W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner, D. Münchmeyer, Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanofforming, and plastic moulding (LIGA process), *Microelectronic Eng.* 4 (1986) 35
- [Bin 87] T.Y. Bin, R.S. Huang, CAPSS: a thin diaphragm capacitive pressure sensor simulator, *Sensors and Actuators* 11 (1987), 1–22
- [Blevins 84] R.D. Blevins, Formulas for natural frequency and mode shapes, Krieger Publishing Company, Malabar/Florida (1984)
- [Blom 90] F.R. Blom, Resonant silicon beam force sensor, Dissertation, Universität Twente, Enschede, Niederlande (1990)
- [Blom 92] F.R. Blom, S. Bouwstra, M. Elwenspoek, J.H.J. Fluitman, Dependence of the quality factor of micromachined silicon beam resonators on pressure and geometry, *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 10, No. 1 (1992) 19–26
- [Boley 85] B.A. Boley, J.H. Weiner, Theory of thermal stresses, R.E. Krieger Publishing Comp., John Wiley and Sons (1985)
- [Bouwstra 90] S. Bouwstra, Resonating microbridges mass flow sensor, Dissertation, Universität Twente, Enschede, Niederlande (1990)
- [Bouwstra 91] S. Bouwstra, B. Geijselaers, On the resonance frequencies of microbridges, *Proc. TRANSDUCERS '91*, Digest of technical papers, San Francisco (1991) 538–542
- [Braess 91] D. Braess, Finite Elemente, Springer, Berlin (1991)
- [Braxmaier 92a] C. Braxmaier, Aufbau und Erprobung eines Meßplatzes zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens von mikromechanischen Grundstrukturen, Diplomarbeit, FH-Furtwangen / HSG-IMIT, Villingen-Schwenningen (1992) unveröffentlicht
- [Braxmaier 92b] C. Braxmaier, Fremdanregung von Balken durch Dickenschwinger zur Eigenfrequenzbestimmung, Praktikumsarbeit, HSG-IMIT, VS-Villingen (1992) unveröffentlicht
- [Brice 85] J.C. Brice, Crystals for quartz resonators, *Rev. Modern Physics*, Vol. 57, No. 1 (1985) 105–146
- [Büttgenbach 91a] S. Büttgenbach, Mikromechanik, B. G. Teubner, Stuttgart (1991)

- [Büttgenbach 91b] S. Büttgenbach, Frequenzanaloge Sensoren, in: Technologietrends in der Sensorik, VDI Bildungswerk, Düsseldorf (1991)
- [Burrer 93] Ch. Burrer, J. Esteve, Thermally driven micromechanical bridge resonators, EUROSENSORS VII, Budapest (1993) erschienen in: Sensors and Actuators A. Physical, Vol. 42, No. 1–3 (1994) 680–684
- [Buser 91a] R.A. Buser, L. Schultheis, N.F. de Rooij, Silicon pressure sensor based on a resonating element, Sensors and Actuators A, 25–27 (1991) 717–722
- [Buser 91b] R.A. Buser, N.F. de Rooij, ASEP: a CAD program for silicon anisotropic etching, Sensors and Actuators A 28, (1991) 71–78
- [Buser 94] R.A. Buser, Resonant Sensors, in: Sensors, Volume 7, Mechanical Sensors, ed.: H.H. Bau, N.F. de Rooij, B. Kloeck, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim (1994) 205–284
- [Camon 90] H. Camon, Micromachining: First development of an atomic scale chemical etching simulator, MME '90, 2nd Workshop on Micromachining Micromechanics and Microsystems, Berlin (1990) 13–18
- [Chau 87] H.-L. Chau, K.D. Wise, Scaling limits in batch-fabricated silicon pressure sensors, IEEE Transactions on Electronic Devices, Vol. ED-34, No. 4 (1987) 850–858
- [Char 91] B.W. Char, K.O. Geddes, G.H. Gonnet, B.L. Leong, M.B. Monagan, S.M. Watt, MAPLE V - Language Reference Manual, Springer, New York (1991)
- [Christen 83] M. Christen, Air and gas damping of quartz tuning forks, Sensors and Actuators, 4 (1983) 555–564
- [Ciarlet 78] P.G. Ciarlet, The finite element method for elliptical problems, North-Holland, Amsterdam (1978)
- [COMP] COMPOSITE, User Manual, Version 1.5, FhG-AIS, Erlangen
- [Crary 91] S.B. Crary, O. Juma, Y. Zhang, Software tools for designers of sensors and actuator CAE Systems, Proc. TRANSDUCERS '91, Digest of technical papers, San Francisco (1991) 498–501
- [Eccardt 92] P.C.Eccardt, ANSYS-Seminar Piezoelektrizität, CADFEM GmbH, Ebersberg (1992)
- [Eer Nisse 88] E.P. Eer Nisse, R.W. Ward, R.B. Wiggins, Survey of quartz bulk resonator sensor technologies, IEEE Transactions on UFFC, Vol. 35, No. 3 (1988) 323–330
- [Eisley 64] J.G. Eisley, Nonlinear vibration of beams and rectangular plates, J. of Appl. Mathematics and Physics, 15 (1964) 167–175

- [Fabula 92a] Th. Fabula, A. Schroth, Simulation des dynamischen Verhaltens mikromechanischer Membranen, VDI-Fachtagung für Geräte- und Mikrosystemtechnik, TU Chemnitz (1992), VDI-Bericht 960, VDI-Verlag Düsseldorf (1992)
- [Fabula 92b] Th. Fabula, Dynamische Berechnungen in der Mikromechanik - Simulation / Messung, 10. ANSYS Users' Meeting, Arolsen, 28.-30.10.1992, CADFEM GmbH, Grafing
- [Fabula 93a] Th. Fabula, H.-J. Wagner, B. Schmidt, S. Büttgenbach, Triple-beam resonant silicon force sensor based on piezoelectric thin films, EUROSENSORS VII, Budapest (1993), erschienen in: Sensors and Actuators, A41-42, No. 1-3 (1994) 375-380
- [Fabula 93b] Th. Fabula, N. Hey, S. Messner, Gekoppelte Feldberechnung eines mikromechanischen Strömungssensors, 11. CADFEM Users' Meeting, Bamberg, 27.-29.10.1993, CADFEM GmbH, Grafing
- [Fan 87] L.-S. Fan, Y.-C. Tai, R.S. Muller, Pin joints, gears, springs, cranks, and other novel micromechanical structures, Proc. TRANSDUCERS '87, Digest of technical papers, Tokio, Japan (1987) 849-852
- [Flik] G. Flik, persönliche Mitteilung
- [Franz 88] J. Franz, Piezoelektrische Sensoren auf Siliziumbasis für akustische Anwendungen, VDI-Berichte, Reihe 10: Informatik/Kommunikationstechnik, Nr. 87, VDI-Verlag Düsseldorf (1988)
- [Frühauf 90] J. Frühauf, Simulation of orientation dependent etching of masked silicon structures (SIMODE), MME '90, 2nd Workshop on Micromachining Micromechanics and Microsystems, Berlin (1990)
- [Funk 93] K. Funk, Entwurf und monolithische Integration einer Schaltung für mikromechanische Sensoren mit piezoelektrischem Antrieb, Diplomarbeit, TU Chemnitz (1993) unveröffentlicht
- [Geijselaers 91] H.J.M. Geijselaers, H. Tjeldema, The dynamic mechanical characteristics of a resonating microbridge mass-flow sensor, Sensors and Actuators A, 29 (1991) 37-41
- [Gieseler 92] T. Gieseler, J.-U. Meyer, Plattenwellen für Biosensoren, Mikroelektronik 6, Nr. 2, Beilage Mikroperipherik (1992) S. XLV
- [Goldstein 78] H. Goldstein, Klassische Mechanik, Akademische Verlagsgesellschaft, 5. Auflage, Wiesbaden (1978)
- [Götz] S. Götz, persönliche Mitteilung
- [Göhner 93] U. Göhner, ANSYS-Seminarunterlagen: Fehleranalyse in der FEM, CADFEM GmbH, Ebersberg (1993)

- [Grabowski 91] R. Grabowski, Dünnschichtkurs, FhG-IPM, Freiburg (1991)
- [Greenwood 88] J.C. Greenwood, D.W. Satchell, Miniature silicon resonant pressure sensor, IEE Proceedings, Vol. 135, No. 5 (1988) 369–372
- [Hackbusch 86] W. Hackbusch, Theorie und Numerik elliptischer Differentialgleichungen, B.G. Teubner, Stuttgart (1986)
- [Haffner 92] H. Haffner, Untersuchung zu Toleranzen und Fehlern in Lithographie- und Ätzprozessen, Diplomarbeit, TU Chemnitz / HSG-IMIT, Villingen-Schwenningen (1992) unveröffentlicht
- [Heiland 66] Heiland, Ibach, Pyroelectric properties of zinc oxid, Solid State Comm. 4 (1966) 353
- [Heuberger 89] A. Heuberger (Hrsg.), Mikromechanik, Springer, Berlin (1989)
- [Hellwege 88] K.-H. Hellwege, Einführung in die Festkörperphysik, 3. Auflage, Springer, Berlin (1988)
- [Howe 87] R.T. Howe, Resonant microsensors, Proc. TRANSDUCERS '87, Digest of technical papers, Tokio, Japan (1987) 843–848
- [IEEE 78] An American National Standard: IEEE standard on piezoelectricity, ANSI/IEEE Std. 176-1978, American National Standards Institute (1978)
- [Ikeda 90a] T. Ikeda, Fundamentals of Piezoelectricity, Oxford University Press, Oxford (1990)
- [Ikeda 90b] K. Ikeda, H. Kuwayama, T. Kobayashi, T. Watanabe, T. Nishikawa, T. Yoshida, K. Harada, Silicon pressure sensor integrates resonant strain gauge on diaphragm, Sensors and Actuators, A21–A23 (1990) 146–150
- [Jauch 94] A. Jauch, Spannungsarmes Kleben mikromechanischer Bauteile, Diplomarbeit, FH-Furtwangen / HSG-IMIT, Villingen-Schwenningen (1994)
- [Johnson 91] B.P. Johnson, S. Kim, J.K. White, S.D. Senturia, J. White, MEMCAD capacitance calculations for mechanically deformed square diaphragm and beam microstructures, Proc. TRANSDUCERS '91, Digest of technical papers, San Francisco (1991) 494–497
- [Kamins 90] T.I. Kamins, Design properties of polysilicon crystalline silicon, Sensors and Actuators, A21–A23 (1990) 817–824
- [Kim 86] C.S. Kim, S.M. Dickinson, The flexural vibration of slightly curved slender beams subject to axial end displacement, J. of Sound and Vibration, Vol. 104, No. 1 (1986) 170–175

- [Kim 87] E.S. Kim, R.S. Muller, IC-Processed piezoelectric microphone, *IEEE Electron Device Letters*, Vol. EDL-8, No. 10 (1987) 467–468
- [Kirman 83] R.G. Kirman, A vibrating quartz force sensor transducer, *Transducers TEMPCON Conference Papers*, London, 14–16 June (1983) 97–121
- [Kittel 88] C. Kittel, *Einführung in die Festkörperphysik*, 7. Auflage, R. Oldenburg, München (1988)
- [Kohnke 92] P. Kohnke, ed., *ANSYS User's Manual for Revision 5.0, Volume IV, Theory*, Swanson Analysis Systems, Inc., Houston, PA, USA (1992)
- [Koppelman 89] G.M. Koppelman, OYSTER – a 3D structural simulator for micro electromechanical design, *MEMS '89*, Salt Lake City (1989), erschienen in: *Sensors and Actuators*, Vol. 20, (1989) 179–185
- [Lakin 82] K.M. Lakin, J.S. Wang, A.R. Landin, Aluminium nitride thin film and composite bulk wave resonators, *Proc. 36th Annual Frequency Control Symposium* (1982) 517–524
- [Landau 74] L.D. Landau, E.M. Lifshic, *Theoretische Physik, Elastizitätstheorie*, Band VII, ungarische Ausgabe: Tankönyvkiado, Budapest (1974)
- [Landolt-Börnstein 82] Landolt-Börnstein, *Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaft und Technik*, Gruppe III, Band 17a, Springer, Berlin (1982)
- [Lee 82] K.W. Lee, K.D. Wise, SENSIM: A simulation program for solid-state pressure sensors, *IEEE Trans. on Electron Devices*, Vol. ED-29, No. 1 (1982) 34–41
- [Lerch 90] R. Lerch, Simulation of piezoelectric devices by two- and three-dimensional finite elements, *IEEE Trans. on UFFC*, Vol. 37, No. 2 (1990) 233–247
- [Lewin 90] A. Lewin, F. Mohr, H. Selbach, Heterodyn-Interferometer zur Vibrationsanalyse, *Technisches Messen* 57, Heft 9 (1990) 335–345
- [Lindberg 93] U. Lindberg, J. Söderkvist, T. Lammerink, M. Elwenspoek, Quasi-buckling of micromachined beams, *MME '93 Micro Mechanics Europe* (1993) 115–118
- [Lorenz 85] J. Lorenz, J. Pelka, H. Ryssel, A. Sachs, A. Seidl, M. Svoboda, COMPOSITE – A complete modeling program of silicon technology, *IEEE Trans. on CAD*, Vol. CAD-4, No. 4 (1985) 1977
- [Marsal 89] D. Marsal, *Finite Differenzen und Elemente*, Springer, Berlin (1989)
- [Matzenmiller 93] A. Matzenmiller, W. Rust, *ANSYS-Seminarunterlagen: Nichtlinearitäten*, CADFEM GmbH, Grafting (1993)
- [Messner 93] S. Messner, *Finite-Elemente Berechnung der Fluid-Struktur-Wechselwirkung bei einem mikromechanischen Strömungssensor*, Diplomarbeit, Universität Stuttgart / HSG-IMIT, Villingen-Schwenningen (1993) unveröffentlicht

- [Messner] S. Messner, persönliche Mitteilung
- [Middelhoek 89] S. Middelhoek, S.A. Audet, Silicon sensors, Academic Press Limited, London (1989)
- [Mullem 91] C.J. van Mullem, F.R. Blom, J.H.J. Fluitman, M. Elwenspoek, Piezoelectrically driven silicon beam force sensor, Sensors and Actuators A, 25–27 (1991) 379–383
- [Mullem 92] C.J. van Mullem, H.A.C. Tilmans, A.J. Mouthaan and J.H.J. Fluitman, Electrical cross-talk in two-port resonators - the resonant silicon beam force sensor, Sensors and Actuators, A31 (1992) 168–173
- [Müller 92] M. Müller, Aufbau und Inbetriebnahme eines optischen Meßplatzes zur Charakterisierung von resonanten mikromechanischen Strukturen, Diplomarbeit, FH-Furtwangen / HSG-IMIT, Villingen-Schwenningen (1992) unveröffentlicht
- [Muro 92] H. Muro, H. Kaneko, S. Kiyota, P.J. French, Stress analysis of SiO_2/Si bi-metal effect in silicon accelerometers and its compensation, Sensors and Actuators A, 34 (1992) 43–49
- [Naillon 83] M. Naillon, R.H. Coursant, F. Besnier, Analysis of piezoelectric structures by a finite element method, Acta electronica, 25, 4 (1983) 341–362
- [Nye 57] J.F. Nye, Physical properties of crystals, Oxford science publ., Clarendon Press, Oxford (1957)
- [Ostergaard 89] D.F. Ostergaard, ANSYS Coupled field analysis, Rev. 4.4 Tutorial, Swanson Analysis Systems Inc. (1989)
- [Olaf 92] J.M. Olaf, Ein Verfahren zur Bewertung des mechanischen Verhaltens von Randschichten, Dissertation, Universität Freiburg (1992)
- [Over 77] H.-H. Over, Elastische und plastische Eigenschaften von einkristallinem Silicium in Abhängigkeit von der Temperatur und der Versetzungsdichte, Dissertation, RWTH Aachen (1977)
- [Parsons 92] P. Parsons, A. Glendinning, D. Angelidis, Resonant sensors for high accuracy pressure measurement using silicon technology, IEEE AES Magazine, July (1992) 45–48
- [Paul 75] R. Paul, Halbleiterphysik, Alfred Hüthig, Heidelberg (1975)
- [Petersen 79] K.E. Petersen, C.R. Guarnieri, Young's modulus measurements of thin films using micromechanics, J. Appl. Phys., Vol. 50, No. 11 (1979) 6761–6766
- [Pfeifer 89] G. Pfeifer, R. Werthschützky, Drucksensoren, VEB, Berlin, 1. Auflage (1989)
- [Pichler 90] P. Pichler, R. Dürr, ICECREAM 4.2, User's Guide, FhG-AIS, Erlangen (1990)

- [Polla 84] D.L. Polla, R.S. Muller, R.M. White, Fully-integrated ZnO on silicon pyroelectric infrared detector array, IEDM (1984) 382–384
- [Polla 86] D.L. Polla, R.S. Muller, Zinc-oxide thin films for integrated-sensor applications, IEEE Solid State Sensor Workshop, Hilton Head Island, June 1986
- [Polytec 91] Bedienungsanleitung: OFV 1102 Laservibrometer, Polytec GmbH, Waldbronn (1991)
- [Pons 91] P. Pons, G. Blasquez, Natural vibration frequencies of silicon diaphragms, Proc. TRANSDUCERS '91, Digest of technical papers, San Francisco (1991) 543–546
- [Prak 91] A. Prak, F.R. Blom, M. Elwenspoek, T.S.J. Lammerink, Q-factor and frequency shift of resonating silicon diaphragms in air, Sensors and Actuators A, 25–27 (1991) 691–698
- [Prak 93] A. Prak, Silicon resonant sensors: operation and response, Dissertation, Universität Twente, Enschede, Niederlande (1993)
- [Quickert 93] M. Quickert, Ableitung netzwerktheoretischer Ersatzschaltbilder für piezoelektrische Resonatoren, Diplomarbeit, TU Dresden (1993) unveröffentlicht
- [Ramm 90] E. Ramm, G. Müller, J. Müller, K. Schweizerhof, Dynamische Berechnungen mit der Methode der finiten Elemente, ANSYS-Seminarunterlagen, CAD-FEM GmbH, Ebersberg (1990)
- [Rankin 86] C.C. Rankin, F.A. Brogan, An element independent corotational procedure for the treatment of large rotations, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 108, May (1986) 165–174
- [Ricco 91] A.J. Ricco, S.J. Martin, R.M. White, Short course: fundamentals of ultrasonic sensors, TRANSDUCERS '91, San Francisco (1991)
- [Reichl 89] H. Reichl, Ed., Halbleitersensoren, Expert, Ehningen (1989)
- [Roszhart 90] T.V. Roszhart, The effect of internal friction on the Q of micromachined silicon resonators, IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, South Carolina (1990)
- [Sandmaier 90] H. Sandmaier, Simulationswerkzeuge zum Design systemfähiger Mikrosensoren (SENSOR), Digest of Anwenderforum of Micro System Technologies 90, Berlin (1990) 170–175
- [SASI] Swanson Analysis Systems, Inc., Houston, PA, USA
- [Satchell 89] D.W. Satchell, J.C. Greenwood, A thermally-excited silicon accelerometer, Sensors and Actuators, Vol. 17 (1989) 241–245

- [Sathe 93] A.D. Sathe, E.S. Kim, Techniques to control residual stress in ZnO thin films, 7th International conference on solid-state sensors and actuators, Tokyo (1993) 158–161
- [Sauerbrey 59] G. Sauerbrey, Verwendung von Schwingquarzen zur Wägung dünner Schichten und zur Mikrowägung, Z. Phys. 155 (1959) 206
- [Schroth 92] A. Schroth, Modellierung mikromechanischer Membranen, Diplomarbeit, TU Chemnitz / HSG-IMIT, Villingen-Schwenningen (1992) unveröffentlicht
- [Schorer 93] A. Schorer, Aufbau und Erprobung eines universellen Meßplatzes für Messungen an mikromechanischen Bauelementen, Diplomarbeit, FH-Furtwangen / HSG-IMIT, Villingen-Schwenningen (1993) unveröffentlicht
- [Schumacher 93] A. Schumacher, Th. Fabula, H.-J. Wagner and M. Alavi, Monolithic bridge-on-diaphragm transducer with piezoelectric excitation fabricated by laser micromachining, EUROSENSORS VII, Budapest (1993)
- [Schumacher 94] A. Schumacher, M. Alavi, Th. Fabula, B. Schmidt, H.-J. Wagner, Monolithic bridge-on-diaphragm microstructure for sensor applications, Proc. Micro System Technologies 94, Berlin, 19.–21. Okt. (1994)
- [Schumacher] A. Schumacher, Untersuchung des laserunterstützten Naß- und Trockenätzens von Silizium zur Herstellung dreidimensionaler Mikrostrukturen, Dissertation, Universität Stuttgart / HSG-IMIT (in Vorbereitung)
- [SDRC] Structural Dynamics Research Corporation, Milford, Ohio, USA
- [Selbach 88] H. Selbach, A. Lewin, Laser-Inferferometrie zur Positions- und Schwingungsmessung, Feinwerktechnik und Messen, 96. Jahrgang (1988) Heft 1+2
- [Senturia 92] S.D. Senturia, R.M. Harris, B.P. Johnson, S. Kim, K. Nabors, A. Shulman, J.K. White, A computer-aided design system for microelectromechanical systems (MEMCAD), Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 1, No. 1 (1992) 3–13
- [Shulman 91] M.A. Shulman, M. Ramaswamy, M.L. Heytens, S.D. Senturia, An object oriented material-property database architecture for microelectromechanical CAD, Proc. TRANSDUCERS '91, Digest of technical papers, San Francisco (1991) 486–489
- [Smits 83] J.G. Smits, H.A.C. Tilmans, K. Hoen, H. Mulder, J. van Vuuren, G. Boom, Resonant diaphragm pressure measurement system with ZnO on Si excitation, Sensors and Actuators, 4 (1983) 565–571
- [Smits 92a] J.G. Smits, W. Choi, Very large deflection with quadratic voltage dependence of ZnO on Si₃N₄ bimorph, IEEE Transactions on UFFC, Letters, Vol. 39, No. 2 (1992) 302–304

- [Smits 92b] J.G. Smits, Design consideration of a piezoelectric-on-silicon microrobot, *Sensors and Actuators A*, 35 (1992) 129–135
- [Sommerfeld 49] A. Sommerfeld, Vorlesungen über theoretische Physik, Band II, Mechanik deformierbarer Medien, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig (1949)
- [Spohr 90] R. Spohr, *Ion Tracks and Microtechnology*, Wiesbaden, Vieweg (1990)
- [Stemme 91a] G. Stemme, Resonant silicon sensors, *J. Micromech. Microeng.* 1 (1991) 113–125
- [Stemme 91b] E. Stemme, G. Stemme, A balanced dual-diaphragm resonant pressure sensor in silicon, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 37, No. 3 (1990) 648–653
- [Steinmann 93] R. Steinmann, H. Friedmann, C. Prescher, R. Schellin, Mechanical behaviour of micromachined sensor-membranes under uniform external pressure affected by in-plane stresses using a Ritz-Method and Hermite-Polynomials, *EUROSENSORS VII*, Budapest (1993) preprint
- [Tabata 89] O. Tabata, et al., Mechanical properties of thin films using load-deflection of composite rectangular membranes, *Sensors and Actuators*, Vol. 20 (1989) 135
- [Than 94] O. Than, S. Büttgenbach, Simulation of anisotropic chemical etching of crystalline silicon using cellular automata model, *Sensors and Actuators*, (1994) preprint
- [Thornton 90] K.E.B. Thornton, D. Uttamchandani, B. Culshaw, A sensitive optically excited resonator pressure sensor, *Sensors and Actuators A*, 24 (1990) 15–19
- [Tichy 80] J. Tichy, G. Gautschi, *Piezoelektrische Meßtechnik*, Springer, Berlin (1980)
- [Tijhen 91] W. Tijhen, T. Tamagawa, C.P. Ye, C.C. Hsueh, P. Schiller, D.L. Polla, Properties of piezoelectric thin films for micromechanical devices and systems, *Proc. 4th Micro-Electro-Mechanical-Systems*, Nara, Japan (1991) 114
- [Tilmans 92] H.A.C. Tilmans, M. Elwenspoek, J.H.J. Fluitman, Micro resonant force gauges, *Sensors and Actuators A30*, No. 1–2 (1992) 35–53
- [Tilmans 93] H.A.C. Tilmans, Micro-mechanical encapsulated built-in resonant strain gauges, Dissertation, Universität Twente, Enschede, Niederlande (1993)
- [Timoshenko 87] S.P. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger, *Theory of plates and shells*, 2nd Edition, McGraw-Hill Book Co., New York, (1987)
- [TMA] Programme: SUPREM-III und SUPREM-IV, Technology Modeling Associates, Inc., Palo Alto, CA, USA
- [Tolksdorf 92] T. Tolksdorf, Statische Berechnung eines mikromechanischen Drucksensors mit der Methode der finiten Elemente, Diplomarbeit, Universität Stuttgart (1992) unveröffentlicht

- [UBM91] Bedienungsanleitung: Optisches Meßsystem Microfocus, UBM-Meßtechnik GmbH, Ettlingen (1991)
- [Uttamchandi 87] D. Uttamchandi, K.E.B. Thornton, J. Nixon, B. Culshaw, Optically excited resonant diaphragm pressure sensor, *Electronics Letters*, Vol. 23, No. 4, (1987) 152–153
- [VIBRIT-Piezokeramiken] VIBRIT - Piezoceramics from Siemens, Ord.-No.: N-281/5035-101, Siemens AG, München
- [VIBRIT-Datenblatt 81] VIBRIT - Piezokeramik von Siemens, Datenblatt, Siemens AG, Redwitz, Stand: Januar 1981
- [Wachutka 90] G. K. Wachutka, Rigorous thermodynamic treatment of heat generation and conduction in semiconductor device modeling, *IEEE Trans. on Computer-Aided-Design*, Vol. 9, No. 11 (1990) 1141–1149
- [Wachutka 91] G. Wachutka, Unified framework for thermal, electrical, magnetic, and optical semiconductor device modeling, *NASECODE VII Transactions, COMPEL*, Vol. 10, No. 4 (1991) 311–321
- [Wachutka 92] G. Wachutka, Tailored modeling of miniaturized electrothermomechanical systems using thermodynamic methods, in: *Micromechanical Sensors, Actuators, and Systems*, Eds.: D. Cho, J.P. Petersen, A.P. Pisano, C. Friedrich, DSC-40, ASME, New York (1992) 183–198
- [Wachutka 93] G. Wachutka, Problem-oriented modeling of microtransducers: state of the art and future challenges, *EUROSENSORS VII*, Budapest (1993) preprint
- [Wagner] H.-J. Wagner, Charakterisierung und Evaluierung der Technologie zur Herstellung von piezoelektrisch angeregten, mikromechanischen Resonatorstrukturen in Silizium und Quarz, Dissertation, TU Braunschweig / HSG-IMIT (in Vorbereitung)
- [Wandt] M.A.E. Wandt, persönliche Mitteilung
- [Weaver 90] W. Weaver, S.P. Timoshenko, D.H. Young, *Vibration problems in engineering*, 5th edition, John Wiley and Sons, New York (1990)
- [Wenzel 88] S.W. Wenzel, R.M. White, A multisensor employing an ultrasonic Lamb-wave oscillator, *IEEE Trans. on Electronic Devices* 35 (1988) 735–743
- [White 70] R.M. White, Surface elastic waves, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 58, No. 8, (1979) 1238–1276
- [White 87] R.M. White, P.J. Wicher, S.W. Wenzel, E.T. Zellers, Plate-mode ultrasonic oscillator sensors, *IEEE Trans. on UFFC*, Vol. 34, No. 2 (1987) 162–171

- [Wiedemann 93] M.-C. Wiedemann, Entwicklung eines intelligenten Sensorsystems unter Nutzung eines elektrothermisch angeregten mikromechanischen Resonators, Diplomarbeit, FH-Kiel (1993) unveröffentlicht
- [Wolfram 91] S. Wolfram, MATHEMATICA - A system for doing mathematics by computers, 2nd Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Redwood City (1991)
- [Young 50] D. Young, Vibration of rectangular plates by the Ritz method, Journal of applied Mechanics, Dec., (1950) 448–453
- [Zienkiewicz 84] O.C. Zienkiewicz, Methode der finiten Elemente, 2. Auflage, Carl Hanser, München-Wien (1984)
- [Zienkiewicz 87] O.C. Zienkiewicz, J.Z. Zhu, A simple error estimator and adaptive procedure for practical engineering analysis, Int. Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 24 (1987) 337–357
- [Zook 92] J.D. Zook, D.W. Burns, H. Guckel, J.J. Sniegowski, R.L. Engelstad, Z. Feng, Characteristics of polysilicon resonant microbeams, Sensors and Actuators A, 35 (1992) 51–59