

**"Dynamisches Verhalten mikromechanischer Strukturen -
Finite Elemente Simulation zur Entwurfsunterstützung
und deren meßtechnische Verifikation"**

Thomas Fabula

Dissertation

1994

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von
Thomas Fabula
aus Bad Godesberg

- 1994 -

Angefertigt mit Genehmigung der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Referent: Prof. Dr. S. Büttgenbach
Korreferent: Prof. Dr. S. Penselin

Tag der mündlichen Prüfung:

szeretettel édes gyerekeimnek

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Vorwort

1 Grundlagen der Mikromechanik	1
1.1 Herstellungstechnologien	2
1.2 Entwurf mikromechanischer Systeme	3
1.2.1 Maskenlayout	7
1.2.2 Simulation des Herstellungsprozesses	7
1.2.3 Simulation des Bauelementeverhaltens	9
1.3 Funktionsprinzip resonanter Sensoren	10
1.3.1 Drucksensor	12
1.3.2 Kraftsensor	13
1.3.3 Strömungssensor	14
2 Analytische Beschreibung	17
2.1 Physikalische Beschreibungsebenen	17
2.1.1 Mikroskopische Modelle	18
2.1.2 Kontinuumsmechanische Beschreibung	19
2.1.3 Thermodynamische Beschreibungsebene	21

2.2	Materialeigenschaften	26
2.2.1	Strukturmaterialien	29
2.2.2	Piezoelektrische Dünnschichten	30
2.3	Analytische Beschreibungsweise	33
2.3.1	Mikromechanische Resonatorstrukturen	33
2.3.2	Balkenresonatoren	36
2.3.3	Membranresonatoren	37
2.4	Skalierungsverhalten dynamischer Größen	39
2.5	Grenzen der analytischen Beschreibungsweise	42
3	Methode der finiten Elemente	43
3.1	Mathematische Grundlagen	44
3.1.1	Klassisches Randwertproblem	44
3.1.2	Konzept der schwachen Lösung	45
3.1.3	Finite Elemente Diskretisierung	45
3.2	Formulierung der Elementsteifigkeitsmatrix	47
3.3	Nichtlinearitäten	49
3.4	Dynamische Berechnungsverfahren	52
3.4.1	Das Eigenwertproblem	52
3.4.2	Modellierung von Dämpfungseffekten	53
3.5	Gekoppelte Feldberechnungen	54
3.5.1	Thermoelastische Kopplung	55
3.5.2	Elektromechanische Kopplung	56
3.6	Fehlerabschätzungen	58
4	Resonante Mikrostrukturen	61

4.1	Finite Elemente Modellbildung	62
4.1.1	Analytische Abschätzungen	62
4.1.2	Konvergenzverhalten	64
4.1.3	Modelleinflüsse	68
4.1.4	Dämpfungseinflüsse	69
4.2	Eigenfrequenzen und Schwingungsformen	72
4.2.1	Balkenresonatoren	72
4.2.2	Membranresonatoren	75
4.3	Charakterisierung der Sensorkennlinien	78
4.3.1	Kraftabhängige Frequenzänderung	78
4.3.2	Druckabhängige Frequenzänderung	80
4.4	Untersuchung des Temperatureinflusses	84
4.4.1	Statische Instabilitäten	85
4.4.2	Resonanzfrequenzverhalten	87
4.5	Fehlerbetrachtung	90
4.6	Zusammenstellung der Resultate	94
5	Piezoelektrische Dünnschichtstrukturen	97
5.1	FE-Modell der Bimorphstruktur	97
5.2	Einflüsse der Modellparameter	101
5.3	Elektromechanischer Kopplungsfaktor	103
5.3.1	Piezokeramik-Hybride	103
5.3.2	Zinkoxid-Dünnschichten	106
5.3.3	Schichtdickenabhängigkeit	110
5.4	Modellierung der piezoelektrischen Anregung	112

INHALTSVERZEICHNIS

5.4.1	Piezokeramik-Bimorphmembran	112
5.4.2	Bimorphmembran mit ZnO-Dünnschicht	113
5.5	Laterale Schichtstrukturierung	116
5.5.1	Erhöhung der Modenselektivität	116
5.5.2	Reduktion der Temperaturquerempfindlichkeit	118
5.6	Entwurfsmaßnahmen für Bimorphe	121
5.7	Fehlerdiskussion	121
5.8	Zusammenstellung der Resultate	122
6	FEM-unterstützte Sensorentwicklung	123
6.1	Dreifachbalken-Kraftsensor	123
6.1.1	Dynamische Momentenkompensation	124
6.1.2	Herstellungsverfahren	125
6.1.3	Schwingungsverhalten und Kraftempfindlichkeit	126
6.1.4	Verbesserung der Unimodalität	128
6.2	BOD-Drucksensor	131
6.2.1	Herstellungsverfahren und Funktionsprinzip	131
6.2.2	Einfluß des Balkenquerschnitts auf das Schwingungsverhalten	132
6.2.3	Meßtechnische Charakterisierung	136
6.2.4	Optimierung der Druckempfindlichkeit	139
6.3	Zusammenstellung der Resultate	146
6.3.1	Dreifachbalken-Kraftsensor	146
6.3.2	BOD-Drucksensor	147
7	Schlußbetrachtung	149
	Anhang: Experimenteller Meßaufbau	153

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde mit numerischen und experimentellen Methoden das statische und dynamische Verhalten mikromechanischer Strukturen untersucht. Da analytische Verfahren in der Regel von vereinfachenden Annahmen ausgehen und nur idealisierte Randbedingungen berücksichtigen, wurde als allgemeines numerisches Berechnungsverfahren die Finite-Elemente-Methode (FEM) eingesetzt und verschiedene Berechnungsmodelle entwickelt. Den Schwerpunkt bildete hierbei die Simulation frequenzanaloger Druck- und Kraftsensoren auf der Basis resonanter, mikromechanischer Bimorphstrukturen, sowie die Charakterisierung der meßgrößenabhängigen Frequenzänderung. Insbesondere wurden die Einflüsse anisotroper und temperaturabhängiger Materialeigenschaften, sowie prozeßbedingte Technologieeinflüsse beim Einsatz piezoelektrischer Dünnschichtstrukturen untersucht.

Zur Beschreibung des lastabhängigen dynamischen Verhaltens frequenzanaloger Sensoren wurden FE-Modelle entwickelt und unter Berücksichtigung geometrischer Nichtlinearitäten, insbesondere spannungsversteifender Effekte, Dimensionierungsvorschläge erarbeitet. Auf diese Weise konnten resonante Silizium-Membrandrucksensoren mit piezoelektrischen *ZnO*-Dünnschichten entworfen und realisiert werden, die sich durch eine gemessene Druckempfindlichkeit von 12,4 Hz/mbar in einem Druckbereich bis 500 mbar auszeichnen. Auf der Basis von dünnen Siliziumbiegebalken wurden elektro-thermisch mit Hilfe von *NiCr*-Dünnschichtwiderständen angetriebene Kraftsensoren entwickelt, die sich durch eine gemessene Kraftermpfindlichkeit von etwa 170 Hz/N auszeichnen. Insbesondere konnte das temperaturabhängige Resonanzverhalten der Balkenresonatoren rechnerisch und meßtechnisch charakterisiert und durch ein FEM-unterstütztes Redesign des Widerstandlayouts die Temperaturquerempfindlichkeit des Sensors um das Vierfache erniedrigt werden.

Mit Hilfe gekoppelter elektro-mechanischer Feldberechnungen wurden piezoelektrische Dünnschichtstrukturen modelliert, mit denen ein Beitrag zur Optimierung der technologischen Abscheideprozesse geleistet werden konnte. Hierzu wurden FE-Modelle für piezoelektrische Bimorphwandler entwickelt, die das dynamische Verhalten unter Berücksichtigung der elektro-mechanischen Anregung beschreiben, und Entwurfsregeln zur anwendungsspezifischen Optimierung abgeleitet. Für gesputterte *ZnO*-Dünnschichtstrukturen wurden durch Vergleich mit experimentellen Messungen effektive elektro-mechanische Kopplungsfaktoren bestimmt. Weiterhin wurde für unterschiedliche Piezoelektrika (*AlN*, *ZnO*, *PZT*) der Geometrieinfluß auf den effektiven elektro-mechanischen Kopplungsfaktor simuliert

und optimale Schichtdickenverhältnisse berechnet. Insbesondere konnte für resonante Membrandrucksensoren in Bimorphaufbau ein modenselektives Elektrodenlayout erarbeitet und die Modenselektivität meßtechnisch verifiziert werden. Eine gleichzeitige Temperaturkompensation der Frequenz-Druck-Kennlinie konnte durch laterale Schichtstrukturierung rechnerisch nachgewiesen werden.

Entwurfsunterstützend wurde mit Hilfe der FE-Methode auf der Basis einer Dreifachbalkenstruktur ein Layout für einen resonanten Kraftsensor erarbeitet. Eine hohe Unimodalität des Resonators wurde erreicht, indem die beidseitigen Balkeneinspannbereiche geeignet strukturiert wurden. Hierdurch konnte die Modenaufspaltung zwischen der Grundmode und der gewünschten, antisymmetrischen Schwingungsmode, bei dem der Kraftsensor betrieben wird, um einen Faktor 30 verbessert werden. Der realisierte Sensor zeichnet sich durch eine gemessene Kraftempfindlichkeit von 8,6 kHz/N im Meßbereich bis 5 N aus.

Ein neuartiger Drucksensor auf der Basis einer BOD-Struktur (*Beam-on-diaphragm*) wurde mit Hilfe der FE-Berechnungen konzipiert und in Bezug auf Modenentkopplung und Meßgrößenempfindlichkeit rechnerisch optimiert. Insbesondere wurde die Wirkung des Hebelmechanismus der druckeinleitenden Membran auf den schwingenden Balken simuliert und dabei die durch den Herstellprozeß bedingte komplexe Balkeneinspanngeometrie berücksichtigt. Der beschriebene BOD-Drucksensor weist mehrere Geometrieparameter zur variablen Auslegung der Druckempfindlichkeit, des Druckbereiches und des Überlastverhaltens auf. Rechnerisch konnte nachgewiesen werden, daß durch Änderung der Membrandicke Sensoren für einen Druckbereich von 0,5–12 bar mit *gleichem Layout* bei gleicher Überlastsicherheit herzustellen sind. Der experimentell realisierte BOD-Drucksensor besitzt eine Druckempfindlichkeit von 4,47 kHz/bar im Druckbereich von -0,8 bis 1,0 bar, bei einer Kennliniennichtlinearität von etwa $\pm 3,8\%$.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des BMFT-Forschungsprojektes „Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung frequenzanaloger Sensoren“ (Förderkennzeichen: 13 AS 0114) am Institut für Mikro- und Informationstechnik der Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung durchgeführt. In diesem Verbundprojekt wurden mikromechanische Sensoren für verschiedene Meßanwendungen auf der Basis des frequenzanalogen Meßprinzips realisiert. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, entwurfsunterstützend numerische Berechnungsmodelle zu entwickeln und verschiedene experimentelle Meßmethoden einzusetzen, um das dynamische Verhalten mikromechanischer Strukturen zu charakterisieren. Es sollten insbesondere unterschiedliche Strukturgeometrien und Schichtsysteme, Antriebs- und Detektionsprinzipien, sowie verschiedene Elektrodenkonfigurationen für die Sensorelemente modelliert und die daraus resultierenden Einflüsse auf die Sensoreigenschaften untersucht werden. Die Arbeit dokumentiert die Möglichkeiten, statische, dynamische und gekoppelte *Finite-Elemente-Berechnungen* im Entwurfsprozeß von resonanten mikromechanischen Sensoren einzusetzen. Ein Vergleich von numerischen und experimentellen Ergebnissen zeigt die erreichbaren Modellierungsgenauigkeiten der FE-Berechnungsmethode auf.

Kapitel 1 führt in die Grundlagen der Mikromechanik, die Herstellungstechnologien und den Entwurf von mikromechanischen Strukturen am Beispiel resonanter Druck-, Kraft- und Strömungssensoren ein.

Kapitel 2 gibt einen Überblick über verschiedene theoretische Beschreibungsweisen mikromechanischer Strukturen. Die analytische Beschreibung mikromechanischer Bauelemente unter Berücksichtigung von Nichtlinearitäten wird behandelt und die Wechselwirkung physikalischer Einflußgrößen diskutiert. Eine Abschätzung der Skalierung von Resonanzfrequenzen und erzielbaren Empfindlichkeiten soll die physikalischen Grenzen mikromechanischer resonanter Sensoren aufzeigen.

Die mathematischen Grundlagen und die numerischen Berechnungsverfahren der FE-Methode werden in **Kapitel 3** vorgestellt. Es werden die verwendeten statischen, dynamischen und gekoppelten Berechnungsverfahren, sowie Fehlerabschätzungen vorgestellt.

Kapitel 4 behandelt die Modellierung des Schwingungsverhaltens von Balken- und Membranresonatoren und die verschiedenen Einflüsse der Modellparameter. Die Sensorkennlinien von Kraft- und Drucksensoren werden berechnet und statische Instabilitäten bei

Balkenresonatoren infolge von thermischen Störeinflüssen untersucht. Durch experimentelle Charakterisierung technologisch realisierter Resonanzsensoren erfolgt die meßtechnische Verifikation der numerischen Berechnungen.

Die in **Kapitel 5** durchgeführten gekoppelten Feldberechnungen gestatten es, das elektrothermo-mechanische Verhalten mikromechanischer Strukturen zu untersuchen. Insbesondere wird das piezoelektrische Antriebsprinzip unter Verwendung von piezoelektrischen Dünnschichten modelliert und der Einfluß der Strukturgeometrie auf den elektro-mechanischen Kopplungsfaktor untersucht und mit experimentellen Resultaten verglichen. Weiterhin werden Entwurfsregeln für die Erhöhung der Modenselektivität bei resonanten Membrandrucksensoren abgeleitet und die Temperaturquerempfindlichkeit von Membranzustrukturen in Bimorphaufbau¹ minimiert.

In **Kapitel 6** wird der Entwurf und die Realisierung alternativer Sensorgeometrien für die Kraft- und Druckmessung vorgestellt. Der Einsatz eines Dreifachbalkenschwingers erlaubt durch eine geeignete Strukturierung der Resonatoreinspannung die Modenselektivität zu erhöhen. Weiterhin wird durch Ausnutzung der dynamischen Momentenkompensation bei einer gegenphasigen Schwingungsmoden die Schwingungsgüte des Sensorelementes verbessert. Auf der Basis eines monolithisch in Silizium integrierten „Balken-auf-Membran“-Schwingers wird die Realisierung eines resonanten Drucksensors vorgestellt. Mit Hilfe der FE-Berechnungen konnte das dynamische Verhalten der Strukturen grundlegend untersucht werden. Die Auswirkungen von Geometrievariationen wurden modelliert, so daß die Druckempfindlichkeit entscheidend erhöht werden konnte.

Abschließend werden in **Kapitel 7** weitere mögliche Anwendungen aufgezeigt und ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen resonanter Sensoren gegeben.

¹Strukturen die aus *zwei* unterschiedlichen Materialien bestehen (z.B. Siliziumsubstrat mit piezoelektrischer *ZnO*-Dünnschicht).

Kapitel 1

Grundlagen der Mikromechanik

Die Mikromechanik ist ein junger interdisziplinärer Forschungsbereich, der den Technologievorrat der Mikroelektronik nutzt, um miniaturisierte Bauelemente hauptsächlich aus Silizium für verschiedene Anwendungsbereiche zu realisieren. Sie befaßt sich mit dem Entwurf, der Herstellung und der Anwendung mechanischer Strukturen und Systeme, die zumindest in einer Dimension eine Abmessung im Mikrometerbereich aufweisen, so daß feinmechanische Formgebungsverfahren nicht mehr sinnvoll eingesetzt werden können [Büttgenbach 91a]. Die wesentlichen Vorteile der Mikromechanik gegenüber den konventionellen Fertigungstechniken sind:

- Ausnutzung der Vorteile des einkristallinen Siliziummaterials
- hochgenaue Strukturübertragung mittels lithographischer Verfahren und damit gute Reproduzierbarkeit der mikromechanischen Bauelemente
- hoher Integrationsgrad durch minimale Strukturgrößen, verbunden mit einer wesentlichen Erhöhung der Zuverlässigkeit der Bauelemente
- Integration mechanischer, elektronischer und optischer Funktionen in komplexen Mikrosystemen
- kostengünstige Herstellung durch Fertigung im Batch-Betrieb.

Hauptanwendungen mikromechanischer Strukturen sind derzeit Sensoren und Aktoren, sowie spezielle mechanische Funktionselemente beispielsweise in der integrierten Optik. Zum Einsatz mikromechanischer Systeme werden spezielle Anforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik gestellt, um die mechanische Stabilität und gleichzeitig eine einwandfreie Funktion der Bauelemente zu gewährleisten. Bei Sensoren stellt die Art der Meßgrößeneinleitung einerseits, die Sensorgehäusung als Schutz vor unerwünschten Umwelteinflüssen andererseits oft ein erhebliches Problem dar, das in der Regel nur durch

anwendungsspezifische Aufbau-, Kontaktierungs- und Gehäusungstechniken gelöst werden kann.

Die Funktionsweise mikromechanischer Sensoren und Aktoren beruht auf verschiedenen physikalischen Wirkprinzipien, bei denen meist eine Energieumwandlung vom Mechanischen ins Elektrische stattfindet. Als Detektionsprinzipien finden piezoresistive, piezoelektrische, kapazitive, chemische und optische Sensoreffekte Anwendung, während bei Aktoren z.B. elektrostatische, -magnetische, -thermische und piezoelektrische Antriebsprinzipien eingesetzt werden. Mikromechanische Aktoranwendungen sind beispielsweise Mikroventile und Mikropumpen für miniaturisierte Dosiersysteme, Mikroschalter, sowie aktive Positionierelemente für die integrierte Optik (z.B. für die Glasfaser-Chip-Kopplung).

Das zur Zeit am weitesten fortgeschrittene Arbeitsgebiet der Mikromechanik stellt die Sensorik dar. Insbesondere können die hohen Anforderungen der Präzisionsmeßtechnik durch mikromechanische Sensoren, auf der Basis des frequenzanalogen Sensorprinzips, gut abgedeckt werden.

Die Weiterentwicklung der Mikromechanik stellt die Mikrosystemtechnik dar, die sich mit der Realisierung multifunktionaler Mikrosysteme durch Integration verschiedener Bauelementefunktionen beschäftigt. Mögliche industrielle Anwendungsgebiete von Mikrosystemen finden sich in der Produktions- und Fertigungsautomatisierung, Konsumgüterindustrie, Rechner- und Kommunikationstechnik, Verkehrs-, Medizin-, sowie Umweltschutztechnik.

1.1 Herstellungstechnologien

Wegen seiner hohen Reinheit, der technischen Verfügbarkeit und der hochentwickelten Verfahrenstechnik nimmt Silizium eine Sonderstellung bei den in der Mikromechanik verwendeten Werkstoffen ein. Die Existenz eines Eigenoxids ermöglicht die Nutzung als Maskierschicht bei selektiven Dotier- und Ätzprozessen und zusätzlich den Einsatz als Isolations- und Passivierungsschicht. Im Gegensatz zur Mikroelektronik werden in der Mikromechanik außer Silizium auch andere Werkstoffe¹ mit unterschiedlichen Eigenschaften verwendet und neben den elektrischen vor allem die mechanischen, thermischen und piezoelektrischen Eigenschaften der Materialien ausgenutzt. Bei der technologischen Herstellung handelt es sich zum einen um planare Prozesse, bei denen auf einem einkristallinen Siliziumsubstrat komplexe Dünnschichtfolgen aufgebracht und strukturiert werden. Verschiedene photolithographische Verfahren, wie optische oder Elektronenstrahl-Lithographie dienen der Strukturierung der Schichten. Mit Hilfe der Dünnschicht-Technologien werden Schichtsysteme unter verschiedenen Bedingungen, beispielsweise aus der Gasphase (*CVD* = *Chemical Vapor Deposition*) oder unter Verwendung physikalischer Abscheideprozesse (*PVD* = *Physical Vapor Deposition*) abgeschieden. Zur gezielten Veränderung der Materialeigenschaften werden Implantation, Diffusion und Oxidation eingesetzt. Neben den

¹z.B. Quarz, Gläser, Keramiken.

additiven Prozessen der Schichtabscheidung werden subtraktive Prozesse zur isotropen und anisotropen Strukturierung der mikromechanischen Bauelemente verwendet. Insbesondere nimmt das anisotrope Naßätzen², bei dem die Ätzraten stark von der Kristallrichtung des einkristallinen Siliziums abhängig sind, in der dreidimensionalen Strukturierung eine dominierende Stellung ein. Die Anisotropie des Ätzverhaltens gestattet eine definierte Strukturierung in lateraler Richtung, während eine Selektivität durch Einbau von Ätzstoppschichten (z.B. mittels Dotierung mit Fremdatomen) eine vertikale Strukturierung des Siliziums erlaubt. Verschiedene Trockenätzverfahren wie das Plasmaätzen ($PE = \text{Plasma Etching}$) oder reaktive Ionenstrahlätzen ($RIE = \text{Reactive Ion Etching}$) gewinnen aufgrund der erhöhten Prozeßkompatibilität und besseren Möglichkeit der Integration in der Batch-Verarbeitung zunehmend an Bedeutung. Andere Prozeßtechnologien, wie laserunterstützte Verfahren ([Alavi 92a] und Referenzen darin), die Kernspurtechnik [Spohr 90] und die *LIGA*-Technik (*Lithographie-Galvanoformung-Abformung*, [Becker 86]) sind zur Zeit im Forschungsstadium und erweitern zukünftig das technologische Spektrum. Die Technologien zur Herstellung von dreidimensionalen Mikrostrukturen in Silizium unter Verwendung von anisotropen Ätztechniken mit oder ohne Ätzstoppverfahren werden unter dem Oberbegriff Bulk-Mikromechanik (*BMM*) zusammengefaßt, da die Siliziumscheibe (Wafer) i.a. über ihre gesamte Dicke strukturiert wird. Neue technologische Entwicklungen, wie beispielsweise die Oberflächenmikromechanik (*OFM*) mit Hilfe von Opferschichten³, sollen der weiteren Miniaturisierung und dem Bedarf an beweglichen Teilen in komplexen Mikrosystemen Rechnung tragen [Howe 87, Fan 87]. Hierbei werden auf der Basis z.B. von Poly-Silizium (*poly-Si*) freitragende Strukturen auf der Waferoberfläche realisiert, bei der Mehrlagenstrukturen aus Siliziumoxid (Opferschicht) und *poly-Si* mit Schichtdicken im Mikrometerbereich verwendet werden. Statt *poly-Si* kann auch Siliziumnitrid als Material der Mikrostruktur eingesetzt werden [Smits 92a].

Die in der vorliegenden Arbeit experimentell untersuchten mikromechanischen Bauelemente wurden ausnahmslos in Bulk-Mikromechanik ohne Verwendung von Ätzstoppschichten hergestellt und weisen als minimale Strukturabmessungen Balken- und Membrandicken von etwa 20 μm auf.

1.2 Entwurf mikromechanischer Systeme

Der Entwurf von mikromechanischen Systemen muß in das Gesamtherstellungskonzept integriert werden und rechnerunterstützt erfolgen, da das Gesamtsystemverhalten äußerst komplex ist und durch das unterschiedliche Verhalten der Einzelkomponenten bestimmt wird. Die Vorteile des rechnerunterstützten Entwurfs ($CAD = \text{Computer Aided Design}$) bestehen im möglichen Einsatz verschiedener Entwicklungswerkzeuge⁴, den schnellen Ände-

²z.B. in Alkalilaugen (KOH -, $NaOH$ -Lösung).

³engl.: *Sacrificial-Layer-Method*.

⁴Layout-Editoren, Volumenmodellierer, Simulatoren, Datenbanken, etc.

rungsmöglichkeiten und den damit verbundenen kürzeren Entwicklungszeiten. Die Analyse des Funktionsprinzips und der Bauelementeeigenschaften mit Hilfe der Simulation, beispielsweise der *Finite-Elemente-Methode (FEM)*, fördert das Verständnis und erlaubt die Prüfung von Teilfunktionen bereits in einer sehr frühen Entwicklungsphase. Ferner sind Parametervariationen ein effektives Hilfsmittel zur Optimierung und gleichzeitig zur Reduktion der Prototypenanzahl, so daß die Gesamtkosten der Bauelementeentwicklung niedrig gehalten werden können. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Schaffung einer rechnergestützten Dokumentationsgrundlage zur Hinterlegung des Entwurfswissens und zur Überprüfung der in der Optimierung vollführten Variationen.

In der Mikroelektronik ist eine Durchgängigkeit der Entwicklungswerkzeuge, z.B. für *ASICs* (= *Application Specific Integrated Circuits*) gegeben und Stand der kommerziellen Technik. Es existieren hochentwickelte rechnergestützte Werkzeuge für Layout, Simulation und Verifikation, so daß die gesamte Fabrikation der elektronischen Bauelemente am Rechner simuliert werden kann. Während die Mikroelektronik durch eine starke Standardisierung der Herstellungsverfahren gekennzeichnet ist, gibt es in der Mikromechanik eine Vielzahl von flexiblen Technologien und anwendungsspezifischen Anforderungen. Zudem befindet sich der Entwicklungsstand mikromechanischer Entwurfswerkzeuge heute noch am Anfang. Daher beschränkt sich der Einsatz von rechnergestützten Werkzeugen zur Zeit im wesentlichen auf die Maskenerstellung mit Layout-Editoren und die Bauelementesimulation mit Hilfe der FE-Methode. Zur Verifikation der Simulationsmodelle sind daher experimentelle Messungen *parallel* zu den Berechnungen erforderlich, um die Eckdaten des Modellparameterraumes abzustecken.

In **Abbildung 1.1** ist der schematische Ablauf des mikromechanischen Entwurfsprozesses für *Mikro-elektro-mechanische-Systeme (MEMS)* dargestellt, wie er sich in einer geschlossenen rechnergestützten Entwurfsumgebung zukünftig darstellen könnte [Wachutka 93]. Der Entwurf geht von den Anforderungen und Spezifikationen aus, die in einem Pflichtenheft definiert werden. Für einen Sensor enthält das Pflichtenheft beispielsweise Forderungen bezüglich der Empfindlichkeit gegenüber der Meßgröße, der Kennlinienlinearität, der Querempfindlichkeiten und des Überlastverhaltens. Im Layout-Design (*Maskenentwurf*) wird unter Zugrundelegung der zur Verfügung stehenden Herstellungstechnologien die Bauelementegeometrie und das Funktionsprinzip, d.h. die nutzbaren physikalischen Wirkprinzipien, festgelegt. Hierfür müssen unter Verwendung prozeßspezifischer Entwurfsregeln (*Design Rules*) die *zweidimensionalen* Maskensätze für die verschiedenen benötigten technologischen Schritte erstellt werden. Anschließend wird mit Hilfe der Prozeßsimulation unter Berücksichtigung prozeßspezifischer technologischer Parameter und Verwendung geeigneter physikalischer Modelle die *dreidimensionale* Bauelementestruktur abgeleitet. Als wichtiges Beispiel für die Mikromechanik ist hier die Simulation des anisotropen Naßätzens zu nennen, auf die in Kapitel 1.2.2 kurz eingegangen wird. Die Bauelementesimulation modelliert das Betriebsverhalten der mikromechanischen Struktur unter Berücksichtigung der speziellen Materialeigenschaften und äußeren Betriebsbedingungen, unter Zugrundelegung der in der Prozeßsimulation abgeleiteten Bauelementestruktur. Als Ergebnis wird die „Ein-/Ausgabe-Charakteristik“ (z.B. Sensorkennlinie) des Bauelementes zur Verfügung

gestellt. Auf einer nächst höheren Modellebene wird das Systemverhalten ausgehend von dem elektrischen Ersatzschaltbild des mikromechanischen Bauelementes auf Schaltungsebene mit einem Netzwerksimulator (z.B. SPICE) modelliert. Der Entwurfsvorgang wird solange iterativ durchlaufen, bis die Anforderungen erfüllt sind und ein optimiertes Design eines Prototyps erreicht ist. Anschließend erfolgt die technologische Realisation und Vermessung des Prototyps. Wenn eine experimentelle Verifikation der Anforderungen nicht erreicht werden kann, ist eine Entwurfsverbesserung, ein sogenanntes *Redesign*, notwendig. Die Wiederaufnahme der Entwurfsschleife kann hierbei durch einen Rücksprung auf verschiedene Entwurfsebenen erfolgen.

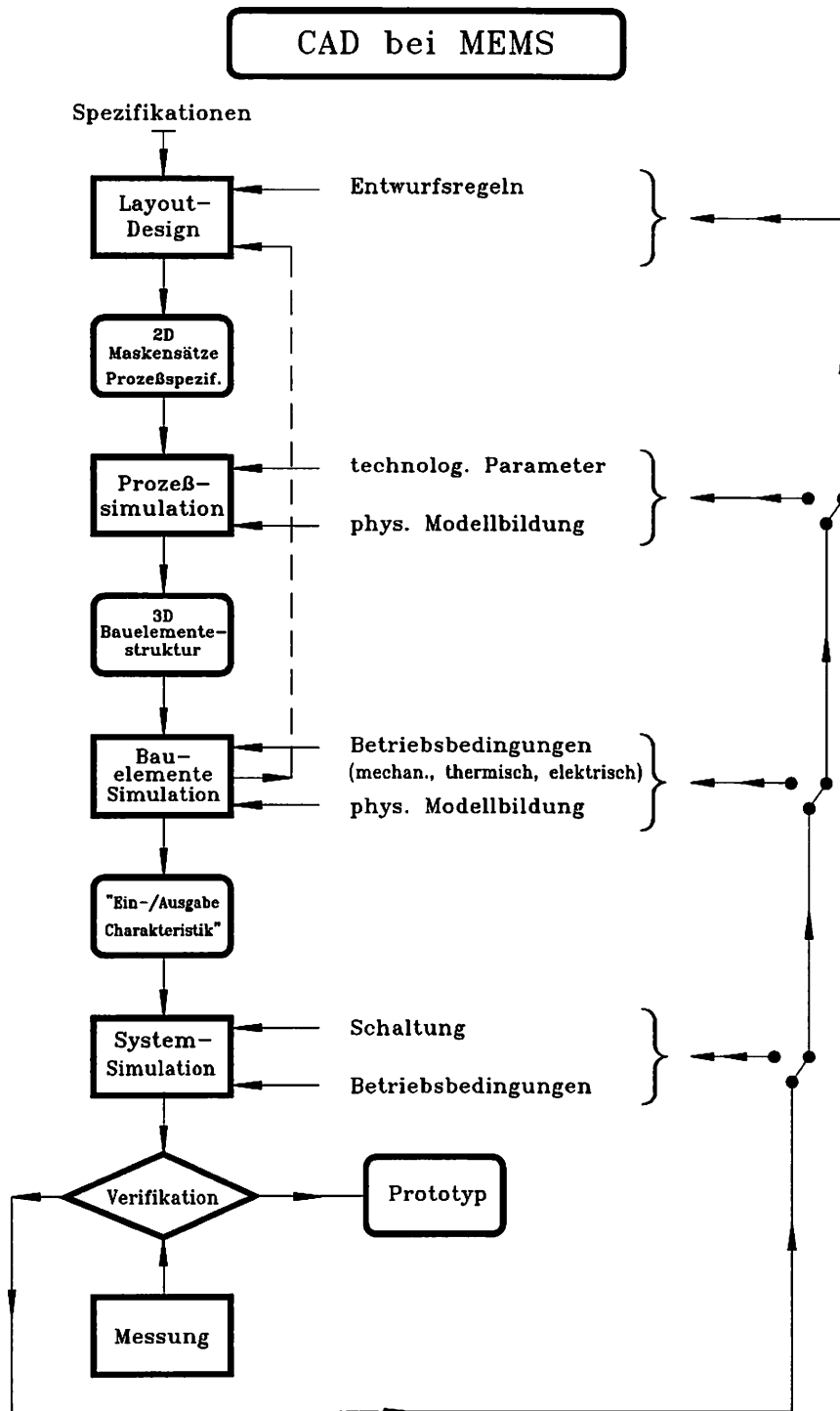


Abbildung 1.1: Rechnergestütztes Ablaufschema beim mikromechanischen Entwurfsprozeß (nach [Wachutka 93])

1.2.1 Maskenlayout

Bei mikromechanischen Komponenten erfolgt die Strukturübertragung von der Maske auf das Substrat (z.B. Siliziumwafer) auf photolithographischem Wege. Die Erstellung der Masken wird mit kommerziellen Layout-Editoren vorgenommen, die in der Mikroelektronik eingesetzt werden. Für die gesamttechnologische Herstellung der Strukturen ist ein Maskensatz notwendig, der in der Regel aus fünf bis acht Maskenebenen bestehen kann. Für jeden einzelnen Prozeßschritt ist eine entsprechende Maske, bei einigen sogar Vorder- und Rückseitenmaske erforderlich. Insbesondere sind die prozeßspezifischen Eigenheiten und deren Auswirkungen bereits im Entwurf zu berücksichtigen. Beim Maskenentwurf muß sichergestellt werden, daß die erlaubten Prozeßtoleranzen nicht überschritten werden. Beim anisotropen Naßätzen muß beispielsweise die laterale Unterätzung konvexer Ecken berücksichtigt werden, so daß entsprechende Kompensationsstrukturen im Maskenlayout vorzusehen sind. Unter Verwendung verschiedener Kompensationsmodelle werden Entwurfsregeln erarbeitet und Hinweise zur Dimensionierung abgeleitet [Haffner 92]. Zusätzlich spielen die Reproduzierbarkeit und die Maßhaltigkeit der technologischen Prozesse bei der Herstellung der mikromechanischen Strukturen eine wesentliche Rolle. Hierfür müssen im Maskenlayout Teststrukturen vorgesehen werden, die an verschiedenen Stellen des Wafers angeordnet sind, um gleichzeitig Informationen bezüglich der Prozeßhomogenität über den Gesamtwafer zu erhalten. Die Teststrukturen gestatten das Prozeßverhalten quantitativ zu charakterisieren, indem Eigenschaften der mikromechanischen Elemente meßtechnisch bestimmt werden, um so Rückschlüsse auf technologie- oder entwurfsbedingte Fehler zu ermöglichen.

1.2.2 Simulation des Herstellungsprozesses

Eine systematische und gezielte Entwicklung von komplexen Mikrosystemen ist ohne ein grundlegendes Verständnis ihrer inneren Funktionsmechanismen nicht möglich. Die Komplexität des Systemverhaltens nimmt mit der Zahl der technologischen Herstellungsschritte und der stark ausgeprägten Wechselwirkungen infolge hoher Integrationsdichten ständig zu. Aus diesem Grunde ist die Modellierung und numerische Simulation des Herstellungsprozesses und des Betriebsverhaltens bei komplexer werdenden Bauelementen unerlässlich. Statt des herkömmlichen experimentellen Weges „*by trial and error*“ kann durch Nachbildung am Rechner das Design zielgenauer optimiert werden. Ein weiterer Vorteil der Modellierung ist die Möglichkeit meßtechnisch nur schwer oder überhaupt nicht zugängliche physikalische Parameter zu bestimmen und dadurch die Funktionsweise der Mikrosysteme besser verstehen zu können. Dies hilft die Zahl der Entwicklungszyklen zu reduzieren und somit Zeit und Kosten einzusparen.

Da der Zusammenhang zwischen den zweidimensionalen Maskenebenen und dem dreidimensionalen mikromechanischen Bauelement nicht eindeutig umkehrbar ist, müssen Berechnungswerkzeuge für die Prozeßsimulation (*Process Modeling*) eingesetzt werden, um

die Strukturgeometrie abzuleiten. Ferner sind die Materialeigenschaften der mikrotechnisch hergestellten Schichtsysteme zu bestimmen, die extrem stark von den technologischen Herstellungsprozessen abhängig sind. Für die Technologien der Mikroelektronik existieren bereits kommerziell erhältliche Simulationswerkzeuge für optische Lithographie, Ionenimplantation, Diffusion, Oxidation, Epitaxie, Schichtabscheidung und Trockenätzen. Sie gestatten es, technologische Prozeßschritte mittels geeigneter physikalischer Modelle zu simulieren, und stellen Eingangsdaten beispielsweise in Form von Implantations- und Dotierprofilen für die anschließende Bauelementesimulation (*Device Modeling*) zur Verfügung, in der die elektrischen Eigenschaften berechnet werden [Lorenz 85]. Eindimensionale Simulationswerkzeuge wie ICECREAM [Pichler 90] und SUPREM-III [TMA] erlauben Tiefenprofile für Diffusion, Implantation und Oxidation zu bestimmen, während zweidimensionale Simulationsprogramme wie COMPOSITE [COMP] und SUPREM-IV [TMA] die flächenhafte Berechnung von Dotier-, Implantations- und Photolackprofilen gestatten.

Die Anforderungen der Mikromechanik an die Prozeßsimulation gehen darüber hinaus, und machen neben der Ableitung der dreidimensionalen Bauelementestruktur auch die Vorhersage von Materialeigenschaften in Abhängigkeit der technologischen Prozeßführung erforderlich. Die Abgrenzungen zur Mikroelektronik bestehen zusätzlich in der Berücksichtigung der Tiefenstrukturierung, der beidseitigen Photolithographie und Scheibenprozessierung, sowie der speziellen Aufbau- und Verbindungstechniken. Zur Zeit befindet sich die mikromechanische Prozeßsimulation im Forschungsstadium. Für die spezifischen mikromechanischen Herstellungstechnologien müssen vorhandene Simulationsmodelle stark erweitert oder ganz neu entwickelt werden. Zur Prozeßmodellierung werden zum einen atomistische Modelle, zum anderen aufwendige empirische Modellansätze, die auf experimentell ermittelte Daten zurückgreifen, verwendet. In der Literatur werden verschiedene Methoden für die Modellierung des anisotropen Ätzens von Silizium auf atomistischer Ebene vorgestellt [Camon 90, Than 94], um eine Vorhersage der Richtungsabhängigkeit des Ätzvorgangs zu ermöglichen. Auf der anderen Seite greifen geometriebasierte Simulationsprogramme wie SIMODE [Frühauf 90] oder ASEP [Buser 91b] auf empirisch am Siliziumkristall ermittelte Ätzraten zurück und sind in der Lage, die dreidimensionale Geometrie an FE-Programme über ein neutrales Datenaustauschformat (z.B. DXF⁵) zu übergeben. Das ursprünglich für den Entwurf von integrierten Schaltkreisen entwickelte Programm OYSTER [Koppelman 89] erlaubt unter Vorgabe der zweidimensionalen Maskensätze und der technologischen Prozeßabfolge dreidimensionale mikromechanische Strukturen abzuleiten, benötigt jedoch weitere manuelle Eingaben seitens des Benutzers, so daß nur ein beschränkter praktischer Einsatz möglich ist. Das Programmsystem MEMCAD [Shulman 91, Senturia 92] stellt eine neuere Entwicklung dar, aus vorgegebenen zweidimensionalen Maskenentwürfen die dreidimensionale Strukturgeometrie abzuleiten. Zusätzlich sind in einer objekt-orientierten Materialdatenbank für einzelne technologische Herstellungsverfahren algebraische Zusammenhänge zwischen den Materialeigenschaften

⁵ *Drawing-eXchange-Format* ist ursprünglich das neutrale Datenaustauschformat des CAD-Programms AutoCAD und inzwischen neben IGES (= *Initial-Graphics-Exchange-Specification*) ein genormtes Industriestandardformat zur Geometrieübergabe.

und bestimmten Prozeßparametern abgelegt. Programmintern wird hierbei auf empirische Datensammlungen zurückgegriffen, wobei weiterführende Literaturreferenzen die Angaben ergänzen. Verschiedene Forschungsgruppen [Crary 91, Johnson 91, Sandmaier 90] arbeiten an der Schaffung integrierter Entwicklungsumgebungen für komplexe Mikrosysteme. Diese Sensor- und Mikrosystem-Entwurfswerkzeuge verwenden eine Kombination von analytischen und numerischen Methoden (meist FEM) und stellen erste Ansätze in Richtung einer geschlossenen Entwurfsumgebung für Mikrosysteme dar. Diese Systeme sind jedoch in der Regel auf bestimmte Sensorklassen, beispielsweise Sensoren für mechanische Größen, beschränkt.

1.2.3 Simulation des Bauelementeverhaltens

Für die Modellierung von Bauelementen werden in der Mikromechanik verschiedene Methoden eingesetzt. Zur ersten Auslegung der Geometrie und zur Festlegung des Arbeitspunktes dienen analytische Abschätzungen, in denen die physikalischen Grenzen, wie maximal erreichbare Kräfte, Hübe, Empfindlichkeiten und Grenzfrequenzen ermittelt werden (siehe Kapitel 2.4). Analytische Programmwerkzeuge, wie SENSIM [Lee 82] und CAPSS [Bin 87], erlauben die Berechnung von idealisierten Membrangeometrien für Drucksensoranwendungen und beschränken sich somit auf bestimmte Klassen von Problemfällen. Neben den analytischen Berechnungsverfahren werden für aufwendige Parameterstudien auch symbolische Manipulationsverfahren, sogenannte Computeralgebra-Programme wie MAPLE [Char 91] oder MATHEMATICA [Wolfram 91] eingesetzt. Diese Programmsysteme ermöglichen auch äußerst komplexe algebraische Zusammenhänge schnell zu bearbeiten und Parameterabhängigkeiten effizient zu analysieren.

Die Beschreibung mikromechanischer Bauelemente setzt im allgemeinen eine dreidimensionale Formulierung voraus, da die geometrischen Abmessungen in allen drei Raumrichtungen von gleicher Größenordnung sind, so daß die Randbedingungen einen erheblichen Einfluß auf das Bauelementeverhalten haben. Daher kommt beim mikromechanischen Entwurf den numerischen Methoden, wie der Simulation mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode, eine wichtige Bedeutung zu. Diese gestatten bereits in der Entwurfsphase, auch komplexe Geometrien mit vielfältigen Randbedingungen und die technologisch zu realisierenden Funktionsprinzipien unter Berücksichtigung prozeßtechnischer Einschränkungen zu modellieren. Zusätzlich ermöglicht die FE-Methode unterschiedliche Strukturgeometrien unter Verwendung verschiedener Materialien in Mehrlagenaufbau, sogenannte Multilayerstrukturen⁶, zu berechnen. Als Ausgangswerte für die numerischen Modellrechnungen dienen analytische Abschätzungen, die in der Regel nur für einfache, idealisierte Strukturgeometrien durchgeführt werden können. An komplexen FE-Modellen lassen sich anschließend Parametervariationen vornehmen, um Toleranzuntersuchungen und Sensitivitätsanalysen durchzuführen. So kann beispielsweise der Einfluß der Strukturgeometrie und der Materialeigenschaften der Dünnschichtsysteme bereits *vor* der Herstellung studiert

⁶ Auch Sandwich-, Komposit- oder Bimorphstrukturen genannt.

werden. Die FE-Methode erlaubt somit mikromechanische Strukturen geeignet auszulegen und die Bauelementeeigenschaften gezielt im Vorfeld zu optimieren.

In dieser Arbeit werden mit Hilfe *dynamischer FE-Berechnungen* die Eigenfrequenzen und -schwingungsformen (rechnerische Modalanalyse) mikromechanischer Resonatorstrukturen bestimmt und der Einfluß der zu untersuchenden physikalischen Meßgrößen ermittelt. Die Berechnung der Meßgrößenempfindlichkeit erfolgt durch eine nichtlineare, *statische FE-Berechnung*, in welcher die durch die Meßgröße hervorgerufene Steifigkeitsänderung des Gesamtsystems bestimmt wird. Die geänderte Struktursteifigkeit wird anschließend herangezogen, um die Eigenfrequenzen des Sensors unter einer äußeren Belastung zu ermitteln. Durch einen Vergleich der berechneten Sensorcharakteristiken mit experimentellen Daten mikromechanischer Bimorphstrukturen kann auf Materialeigenschaften, insbesondere auf eine Vordehnung oder Spannung der Dünnschichten zurückgeschlossen werden. *Gekoppelte FE-Berechnungen* unter Berücksichtigung der elektromechanischen Wechselwirkung ermöglichen eine gezielte Vorhersage des statischen und dynamischen Verhaltens von piezoelektrisch betriebenen Sensoren und Aktoren. Das Frequenzgangverhalten wird ermittelt, indem das mechanische Amplitudenspektrum und der elektrische Impedanz- und Phasenverlauf unter Einschluß der piezoelektrischen Anregung modelliert wird. Um die thermische Fluid-Struktur-Wechselwirkung zwischen einem mikromechanischen Bauelement und dem umströmenden Fluid zu beschreiben, muß die Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung in der Strömung berechnet und die Auswirkungen auf die Struktur infolge der temperaturinduzierten Spannungen betrachtet werden. Auf diese Weise ist es möglich das Verhalten eines Strömungssensors zu berechnen.

Bei der vorliegenden Arbeit wurde für die numerischen Strukturberechnungen das kommerziell verfügbare Programmsystem ANSYS von Swanson Analysis Systems, Inc. [SASI] verwendet. Bei der Erstellung komplexer dreidimensionaler Geometrien und zu deren Vernetzung wurde der Volumenmodellierer und Preprozessor I-DEAS [SDRC] eingesetzt. Die analytischen Abschätzungen erfolgten mit MAPLE.

1.3 Funktionsprinzip resonanter Sensoren

In modernen Meß- und Regelsystemen, die in zunehmendem Maße digitale elektronische Bauelemente einsetzen, spielt die Klasse der resonanten Sensoren auf der Basis mechanischer, schwingungsfähiger Strukturen eine wichtige Rolle [Büttgenbach 91b]. Im Gegensatz zu konventionellen Sensoren, die für die Signalaufbereitung einen Analog-Digital-Wandler benötigen, zeichnen sich resonante Sensoren⁷ durch den Vorteil eines Frequenzgangs aus, so daß die Meßgröße frequenzanalog zur Verfügung steht. Weitere Vorteile frequenzanaloger Sensoren sind die erzielbare Empfindlichkeit und die damit verbundene hohe Meßgrößenauflösung, sowie die Störsicherheit durch den Wegfall der analogen Signalübertragung. Weiterhin besteht die Möglichkeit zur ständigen Funktionskontrolle

⁷ Auch als Resonanzsensoren bezeichnet.

des Sensors in sicherheitsrelevanten Anwendungen (z.B. Beschleunigungssensor in Airbag-Steuersystemen), da die Detektion der Resonanzfrequenz die Unversehrtheit des Sensors sicherstellt. Resonante Sensoren können für die Messung mechanischer Größen wie Druck, Kraft, und Beschleunigung, aber auch für die Messung von Massenlagerung⁸, der relativen Feuchte und zur Temperaturmessung verwendet werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit der Messung abgeleiteter physikalischer Größen (z.B. Strömungsmessung). Das Funktionsprinzip der in dieser Arbeit betrachteten resonanten Sensoren beruht auf der Abhängigkeit der Eigenfrequenz des Resonators von einer äußeren physikalischen Größe, indem der mechanische Spannungszustand beeinflusst oder die Trägheit des Resonators über eine Massenbelegung verändert wird. Die Änderung der Resonanzfrequenz durch Dämpfungseffekte infolge Druckschwankungen des umgebenden Gases können bei Resonatoren mit hoher Schwingungsgüte in erster Näherung vernachlässigt werden (siehe Kapitel 4.1.4). Die Resonanzfrequenz stellt als Meßgröße ein quasi-digitales Ausgangssignal dar. Die Umsetzung des Frequenzsignals erfolgt gemäß **Abbildung 1.2** durch Zähltechnik [ABV 93]. Der Sensor wird einerseits durch seine passiven Resonatoreigenschaften wie

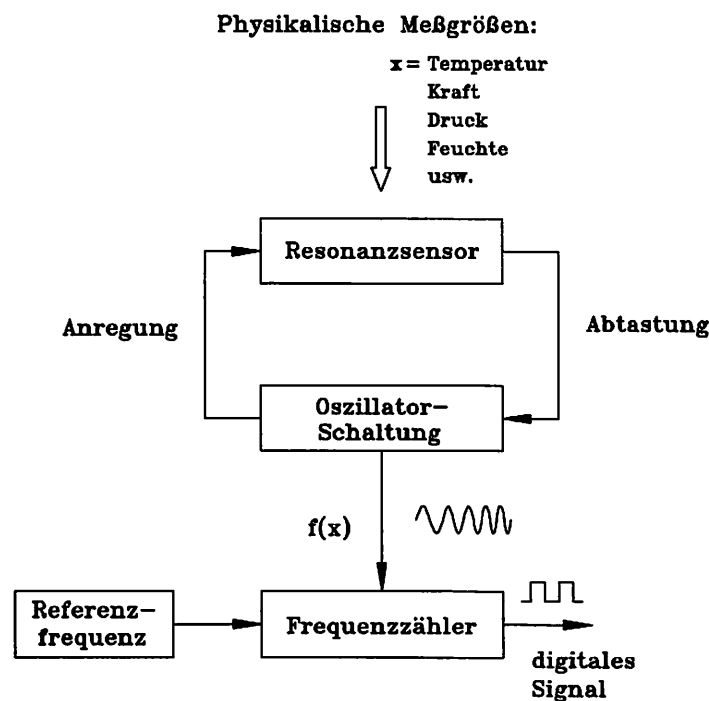


Abbildung 1.2: Blockschaltbild eines Resonanzsensors

Eigenfrequenz, Schwingungsmoden, Schwingungsgüte und der Meßgrößenempfindlichkeit, andererseits durch die Eigenschaften der Schwingungsanregung und -detektion, beispielsweise der Modenselektivität, der Effizienz der Energieeinkopplung und der Auflösung des Abfragesystems charakterisiert. Infolge der Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von verschiedenen physikalischen Parametern, sind einerseits die Querempfindlichkeiten (z.B. gegenüber Temperatur) der zu entwickelnden Sensoren genau zu untersuchen, andererseits

⁸ Mikrowägung nach [Sauerbrey 59].

ist die prinzipielle Einsatzmöglichkeit solcher Resonatorelemente als Multifunktionssensor gegeben. In der vorliegenden Arbeit wird das dynamische Verhalten mikromechanischer Strukturen am Beispiel resonanter Sensoren untersucht, da diese Sensorklasse durch ihr Funktionsprinzip inhärent die statischen *und* dynamischen Eigenschaften des Sensors widerspiegelt.

1.3.1 Drucksensor

Im folgenden soll das frequenzanaloge Funktionsprinzip stellvertretend am Beispiel eines resonanten, mikromechanischen Membrandrucksensors aufgezeigt werden, der in **Abbildung 1.3** schematisch dargestellt ist. Die erste technologische Realisierung solcher Silizium-Membrandrucksensoren erfolgte von *Smits et al.* unter Verwendung piezoelektrischer *ZnO*-Dünnschichten [Smits 83]. Dieses Sensordesign war Ausgangspunkt für die im Rahmen des BMFT-Verbundprojektes durchgeführten Arbeiten. Die Anregung des

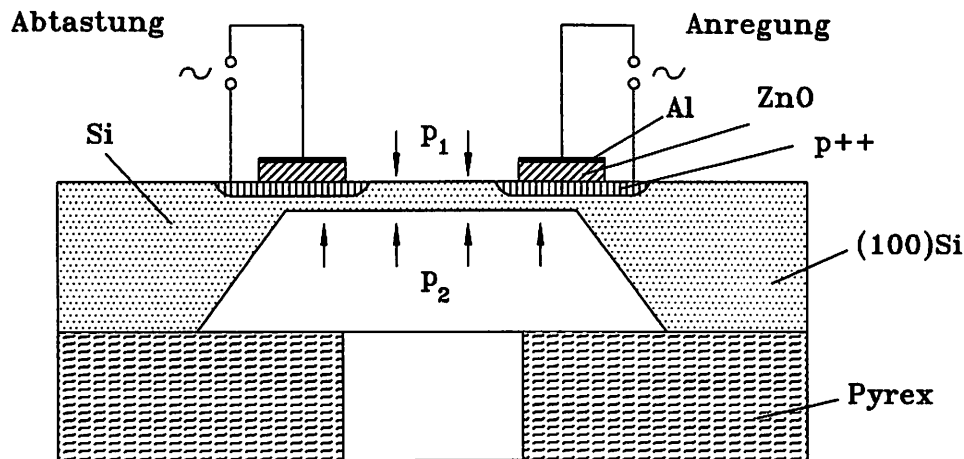


Abbildung 1.3: Schema eines resonanten Silizium-Drucksensors mit piezoelektrischem Antrieb

Sensors wird durch eine piezoelektrische Dünnschicht (hier: Zinkoxid) bewerkstelligt, die substratseitig eine hochdotierte p^{++} -Elektrode und als obere Deckelektrode eine Aluminiumschicht aufweist. Mit Hilfe des transversalen piezoelektrischen Effektes werden bei Anlegen einer elektrischen Wechselspannung infolge Dehnungen auf der Membranoberfläche Biegemomente erzeugt und periodische Membranauslenkungen induziert. Durch eine Druckdifferenz zwischen Unter- und Oberseite der Membran wird der Siliziumresonator deformiert. Der Betrag der statischen Auslenkung ist hierbei ein Vielfaches größer als die

dynamische Schwingungsamplitude. Bei genügend großer statischer Auslenkung⁹ stellen sich durch Reaktionskräfte Membranspannungen ein, die zu einer Versteifung des Resonators führen, so daß sich die *Frequenz analog* zur Meßgröße ändert. Wird umgekehrt der piezoelektrische Effekt auch zur Schwingungsdetektion genutzt, so kann mit einer geeigneten Auswerteschaltung der Sensor in Eigenresonanz betrieben und die Frequenzänderung über einen Frequenzzähler ausgelesen werden [Funk 93].

1.3.2 Kraftsensor

Frequenzanaloge Silizium-Kraftsensoren beruhen auf beidseitig eingespannten Balkenstrukturen, die als mechanische Resonatoren Einfachbalken- [Blom 90] oder auch Mehrfachbalken-Strukturen [Wagner] einsetzen. Das Funktionsprinzip ist dem der Drucksensoren identisch. Unter einer äußeren, axialen Zugkraftbeaufschlagung nimmt die Resonanzfrequenz infolge der Spannungsänderung im Resonator zu, während sie bei Beaufschlagung mit einer Druckkraft abnimmt. Zur Anregung kann neben dem piezoelektrischen auch das elektrothermische Antriebsprinzip eingesetzt werden [Bouwstra 90]. Hierzu wird in einem Zweischichtsystem mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten eine lokale Erwärmung durch Mikroheizwiderstände erzeugt, das analog zum Bimetalleffekt zu einem Biegemoment führt und den Balken auslenkt. Durch Ansteuerung der Mikroheizer mit Impulsen geeigneter Folgefrequenz und ausreichender elektrischer Leistung werden die Siliziumbalken in Resonanz versetzt. In **Abbildung 1.4** ist die Geometrie und das elektrische Layout eines elektrothermisch angetriebenen Siliziumsensors dargestellt, der zur Kraft- und Strömungsmessung eingesetzt wird. Das elektrothermische Antriebsprinzip stellt eine technologisch einfach zu realisierende Möglichkeit dar, da Anregung und Detektion analog zum piezoelektrischen Antrieb in der gleichen Technologie realisiert werden können, wobei eine gute Kompatibilität mit der Silizium-Ätztechnologie zur Herstellung der Balkenstrukturen gegeben ist. Die Abtastung der Schwingung erfolgt resistiv mit Hilfe in Balkenmitte angeordneter *NiCr*-Dehnmeßstreifen (*DMS*), die zu einer *Wheatstoneschen* Vollbrücke verschaltet sind. Zur Steigerung der Anregungseffizienz werden die Mikroheizwiderstände an den Balkenenden platziert, während die *DMS*-Widerstände in Balkenmitte und in Nähe der Balkenenden so angeordnet sind, daß eine möglichst große Brückenverstimmung erreicht wird. Die in dieser Arbeit untersuchten Sensoren setzen sowohl den piezoelektrischen Antrieb auf der Basis von Dreifachbalkenresonatoren [Wagner], als auch elektrothermisch angetriebene Einfachbalkenresonatoren mit *NiCr*-Widerständen ein, die durchgängig in Metalleiterschichttechnologie realisiert wurden [Bartuch 93].

⁹Die statische Auslenkung kann bis zu zwei Größenordnungen größer als die dynamische Schwingungsamplitude sein (siehe Kapitel 4).

erwünscht ist und durch geeignete Maßnahmen kompensiert werden muß, kann sie gezielt zur Strömungsmessung in einem bekannten Medium eingesetzt werden. Wird der Sensor in einem Strömungsrohr betrieben, so lassen sich Gasströmungen erfassen und die Fluidgeschwindigkeit messen. Der Einfluß der thermischen Fluid-Struktur-Wechselwirkung wurde numerisch untersucht [Messner 93] und eine universelle elektrische Ansteuerschaltung für die elektrothermische Schwingungsanregung entwickelt [Wiedemann 93]. Die im Rahmen des BMFT-Verbundprojektes entwickelten Balkenresonatoren konnte auf diese Weise meßtechnisch weiter charakterisiert und die Strömungssensitivität nachgewiesen werden [Fabula 93b].