

**Einsatz der Mikromechanik  
zur Herstellung  
frequenzanaloger Sensoren**

Verbundprojekt 1989 - 1992  
Abschlußbericht

# **Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung frequenzanaloger Sensoren**

Verbundprojekt 1989 - 1992  
Abschlußbericht

Bizerba-Werke Wilhelm Kraut GmbH & Co. KG, Balingen

Robert Bosch GmbH, Stuttgart

MotoMeter GmbH, Leonberg

Gesellschaft für Mikrotechnik und Sensorik mbH, St. Georgen

Hahn-Schickard-Gesellschaft, Villingen-Schwenningen

TU Braunschweig

Herausgeber:  
VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH  
Rheinstraße 10 B, D-14513 Teltow

Verantwortlich für den Inhalt sind die Autoren.  
Die VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH übernimmt keine Gewähr  
für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung der Rechte Dritter.

Teltow, Januar 1994



Förderungsschwerpunkt  
Mikrosystemtechnik

aus Forschung und Industrie gemeinsam an technologischen Problemen im Bereich zwischen industrieller Basisforschung und angewandter Forschung und Entwicklung unter besonderer Berücksichtigung der späteren industriellen Anwendung. Die Teilnehmer bringen dabei ihre jeweiligen Stärken entsprechend ihrer Kompetenzen in die Verbundprojekte ein. Diese Zusammenarbeit bietet eine gute Voraussetzung für den schnellen Transfer der Forschungsergebnisse in die industrielle Praxis.

Die Kurzstudien zur Mikrosystemtechnik beinhalten Informationen zu Technologiefeldern der Mikrosystemtechnik, in denen noch ein größerer Nachholbedarf bezüglich der Technologieentwicklung besteht. In den Studien werden der Stand der Technik und die Entwicklung der technologischen Trends in dem jeweiligen Technologiefeld aufgezeigt und darüber hinaus auch Auswirkungen von Technologien auf bestimmte Märkte und damit verbundene Absatzmöglichkeiten analysiert.

In dem vorliegenden Abschlußbericht werden unter frequenzanalogen Sensoren mechanisch schwingende Mikrostrukturen (Resonatoren) verstanden, die aus einkristallinen Materialien wie Quarz und Silizium bestehen und deren Resonanzfrequenzen in geeigneter Weise von den zu messenden Größen, wie zum Beispiel Kraft, Druck oder Feuchte, abhängen.

Der zunehmende Einsatz von digitaler Informationsverarbeitung in der industriellen Meßtechnik führt zu der Forderung nach Sensoren mit digitalen oder frequenzanalogen Schnittstellen. Die frequenzanaloge Signalübertragung hat den Vorteil der störunempfindlichen, aber trotzdem einfachen physikalischen Übertragungsprotokolle und der kostengünstigen Ankopplung an Mikroprozessorsysteme durch Standard-Timer-Bauelemente. Durch die gleichzeitige Nutzung von frequenzanalogem Sensorprinzip und Signalübertragung wird die Analog-Digital- bzw. Spannungs-Frequenz-Wandlung überflüssig.

In dem Verbundprojekt wurden neben der Entwicklung von speziellen Technologien und Prinzipien der Resonatoranregung auch konkrete Funktionsmuster mit klaren Anwendungsorientierungen realisiert, zum Beispiel ein Drucksensor auf der Basis einer strukturierten Quarzmembran für Anwendungen im Kraftfahrzeug und Kraftsensoren als Biegebalkenschwingungen für den Einsatz in Waagen. Für weitergehende Informationen steht Ihnen der Projektleiter unter der Telefonnummer 03328/435-132 gern zur Verfügung.

Die Schriftenreihe "Innovationen in der Mikrosystemtechnik" ist auf die aktuellen Bedürfnisse von Entscheidungsträgern zugeschnitten. Sie bietet einerseits die Grundlagen für eine Diskussion zwischen dem Technologiemanagement und den Entwicklern im Unternehmen und andererseits Informationen für einen weitergehenden Dialog zwischen den Technologieanwendern und Technologieentwicklern. Die VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH hofft, mit dieser Informationsreihe den Diskussionsprozeß zu unterstützen, durch den Unternehmen in Deutschland aktiv an der Richtungsbestimmung der Mikrosystemtechnik mitwirken können.

Dr. Helmut Sturm  
Projektleiter

VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH

## **Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung frequenzanaloger Sensoren**

Mikrosystemtechnik bedeutet die systemische Nutzung von Mikro- und Systemtechniken vor dem Hintergrund einer ganzheitlichen Strategie des Innovationsprozesses. Dabei wird unter der systemischen Nutzung eine systemtechnische Vorgehensweise verstanden, die mit der Zielvorgabe der Marktfähigkeit von Produkten beginnt und über den abgestimmten Einsatz von Mikrotechniken, Aufbau- und Verbindungstechniken, Systemarchitektur- und Signalverarbeitungskonzepten sowie Systemtechniken in Entwicklung und Fertigung bis zur Lösungsoptimierung des Gesamtprozesses reicht.

Die Märkte für Produkte der Informationstechnik werden sich auch in Zukunft dynamisch entwickeln. Dieser Prozeß zeigt sich besonders deutlich bei der industriellen Nutzung der Mikrosystemtechnik. Schon heute verfügen über 3700 Unternehmen in Deutschland über Mikrotechniken und damit über das Potential zur Realisierung von mikrosystemtechnischen Lösungen.

Für eine zügige Umsetzung von neuen Erkenntnissen in der Mikrosystemtechnik in innovative Produkte ist vor allem die enge Verflechtung von technologischen und managementbezogenen Strukturen im Unternehmen ein wesentlicher Erfolgsfaktor im internationalen Wettbewerb. Die Komplexität anspruchsvoller Technologien beim Einsatz in der Produktinnovation beherrschen Firmen, die sich frühzeitig sowohl mit den Technologien als auch auf der Managementebene mit der Mikrosystemtechnik befaßt haben, deutlich schneller und erfolgreicher als andere Unternehmen.

Ein wesentlicher Faktor beim Innovationsmanagement in der Mikrosystemtechnik ist die Beschaffung und Analyse von Informationen, um im Unternehmen optimale Strukturen für in die Zukunft gerichtete Technologie- und Produktinnovationen rechtzeitig und zielgerichtet aufbauen zu können. Eine ständig aktualisierte Wissensbasis über die Mikrosystemtechnik ist deshalb zur Bewältigung von komplexen Entscheidungsprozessen wichtig und notwendig. Durch fehlende Informationen über Technologien der Mikrosystemtechnik oder Kooperationsmöglichkeiten, über Marktpotentiale oder Qualifizierungsmöglichkeiten kann der Innovationsprozeß erheblich verlangsamt oder gar blockiert werden. Das gilt besonders dort, wo Forschungs- und Entwicklungspotentiale erst aufgebaut oder extern genutzt werden. Die richtigen Informationen zur rechten Zeit stellen insofern ein zentrales Element für die Positionierung des eigenen Technologiestandards von Unternehmen dar und bieten die Grundlage für einen Diskussions- und Entscheidungsprozeß zum Einsatz neuer innovativer Technologien.

Die VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH möchte diesen Prozeß aktiv unterstützen und durch die Bereitstellung von Informationen Entscheidungshilfen für den Einsatz der Mikrosystemtechnik im Unternehmen geben. Hierzu soll die neue Schriftenreihe "Innovationen in der Mikrosystemtechnik" dienen, in der namhafte Vertreter aus Wissenschaft und Industrie ihre Forschungs- und Entwicklungsergebnisse auf dem Gebiet der Mikrosystemtechnik in Form von Abschlußberichten und Kurzstudien vorstellen. Diese Schriftenreihe bietet die VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie im Rahmen des Förderungsschwerpunktes "Mikrosystemtechnik" an.

In den Abschlußberichten zu den Verbundprojekten der Mikrosystemtechnik werden von den Teilnehmern die aktuellen Ergebnisse ihrer Forschungsarbeiten präsentiert. In einem Verbund arbeiten Partner

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	
1.1	Bedeutung frequenzanaloger Sensoren	1- 1
1.2	Funktionsprinzipien für Resonanzsensoren	1- 2
1.3	Entwicklungsziele des Verbundvorhabens	1- 6
1.4	Literaturverzeichnis	1- 7
<b>2</b>	<b>Finite-Elemente-Modellierung resonanter Sensoren</b>	
2.1	Einleitung	2- 1
2.2	Dynamische Eigenschaften mikromechanischer Resonatoren	2- 7
2.3	Piezoelektrische Anregung resonanter Sensoren	2-17
2.4	Zusammenfassung	2-23
	Literaturverzeichnis	2-25
<b>3</b>	<b>Entwicklung der technologischen Grundlagen frequenzanaloger Sensoren mit dem Schwerpunkt Silicium-Mikromechanik</b>	
3.1	Einleitung	3- 1
3.2	Piezoelektrisch angetriebene Sensorstrukturen	3- 3
3.3	Prozeßintegration von piezoelektrischem ZnO	3- 6
3.4	Ergebnisse frequenzanaloger Sensoren	3-13
3.5	Geregelte Oscillatorschaltung	3-20
	Zusammenfassung	3-21
<b>4</b>	<b>Resonante Quarz Drucksensoren</b>	
4.1	Verbundprojekts-Übersicht	4- 1
4.2	Gestaltung einer druckempfindlichen Membranform	4- 4
4.3	Schwingungsanregung von Quarzmembranen	4-10
4.4	Technologie	4-17
4.5	Aufbau- und Verbindungstechnik	4-27
4.6	Messungen und Leistungsdaten	4-29
4.7	Ausblick, Weiterentwicklungsmöglichkeiten	4-33

<b>5</b>	<b>Mehrfachbalken-Resonatoren in Silizium mit piezoelektrischem Antrieb</b>	
5.1	Einleitung	5- 1
5.2	Herstellung von dünnen Zinkoxid-Schichten	5- 7
5.3	Dreifachbalken-Resonatoren aus Silizium	5-13
5.4	Aufbau- und Verbindungstechnik	5-23
5.5	Messungen	5-24
5.6	Zusammenfassung	5-27
	Literaturverzeichnis	5-28
<b>6</b>	<b>Thermisch angeregte resonante Siliziumsensoren mit DMS</b>	
6.1	Aufgabenbeschreibung	6-1
6.2	Herstellung und Charakterisierung anisotrop geätzter resonanter Balkenstrukturen	6- 2
6.3	Realisierung des thermischen Anregungsprinzips	6- 7
6.4	Sensitives Verhalten der thermisch angeregten Si-Resonatoren	6-13
6.5	Zusammenfassung	6-17
6.6	Literaturnachweis	6-18
<b>7</b>	<b>Anwendung frequenzanaloger Kraftsensoren in der Wägetechnik</b>	
7.1	Einleitung	7- 1
7.2	Theoretische Betrachtungen für Resonator-Kraftaufnehmer	7- 3
7.3	Messwertverarbeitung	7- 7
7.4	Messungen mit Quarz-Sensorelementen	7- 9
7.5	Materialalternativen für Resonatorelemente	7-20
7.6	Messungen mit Silizium-Sensorelementen	7-23
7.7	Andere Anwendungen	7-32
7.8	Demonstrationsmodell einer Waage mit Si-Resonatoraufnehmer	7-36
7.9	Literaturverzeichnis	7-38
7.10	Daten der verwendeten Resonatoren	7-40

# 1 Einführung

S. BÜTTGENBACH

INSTITUT FÜR MIKROTECHNIK, TU BRAUNSCHWEIG

## 1.1 Bedeutung frequenzanaloger Sensoren

Moderne Meß- und Regelsysteme sind infolge der raschen Entwicklung der Mikroelektronik in zunehmendem Maße digitale Systeme. Für den Einsatz in analogen Systemen wurde in der Vergangenheit eine Vielzahl von Sensoren zur Erfassung des Ist-Wertes physikalischer und chemischer Größen entwickelt, deren Ausgangssignal ein analoges elektrisches Signal ist, zum Beispiel eine Spannung oder ein Strom. Diese Sensoren können nicht unmittelbar in digitalen Systemen eingesetzt werden, sondern ihr analoges Ausgangssignal muß zunächst in ein digitales Signal umgewandelt werden. Da digitale Signale wesentlich störsicherer übertragen werden können als analoge Signale, sollte die Digitalisierung möglichst in unmittelbarer Nähe der Meßstelle erfolgen. Dies kann durch Integration des Sensorelementes mit einem Analog-Digital-Wandler in monolithischer oder hybrider Technik realisiert werden.

Für das weitere Vordringen digitaler Meß- und Regelsysteme ist jedoch die Verfügbarkeit von Sensoren von entscheidender Bedeutung, die direkt ein digitales oder quasi-digitales Ausgangssignal liefern, so daß eine Analog-Digital-Wandlung und die damit verbundenen Probleme bezüglich der Zuverlässigkeit, der Kosten und der Ansprechzeiten entfallen [1]. Eine wichtige Gruppe solcher Sensoren sind frequenzanaloge Sensoren auf der Basis mechanischer schwingungsfähiger Strukturen [2], deren Resonanzfrequenz empfindlich von der zu messenden Größe abhängt (Bild 1.1). Die Umsetzung des Frequenzsignals in ein digitales Signal erfolgt durch Zähltechnik.

Die für digitale Systeme benötigten Sensoren müssen auch hinsichtlich der Abmessungen und des Preises der Mikroelektronik angepaßt sein und mit dieser räumlich zu einer Funktionseinheit integriert werden können. Zu ihrer Herstellung bieten sich daher die Miniaturisierungstechnologien der Mikromechanik an [3].



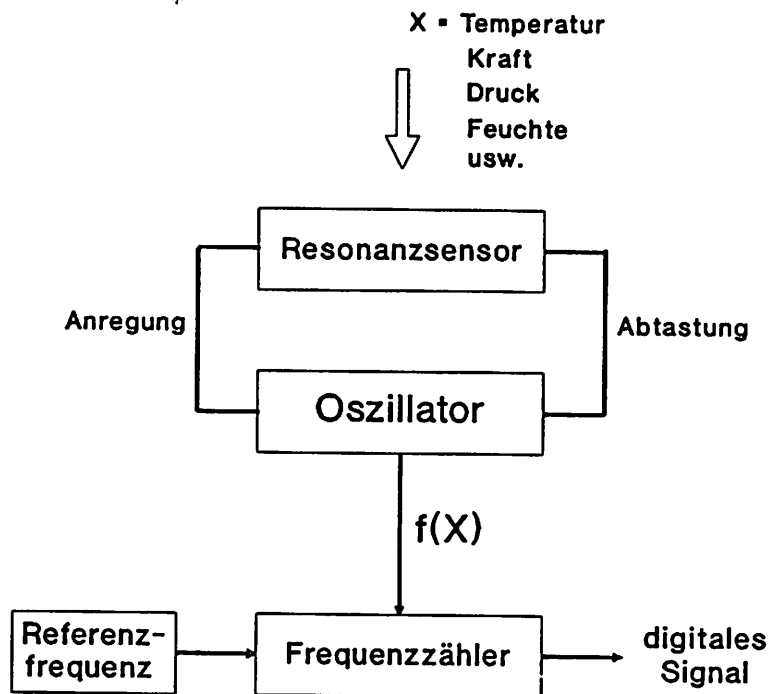


Bild 1.1 Blockschaltbild eines Resonanzsensors

## 1.2 Funktionsprinzipien für Resonanzsensoren

Grundstrukturen für mikromechanische Resonanzsensoren sind Membranen, Platten, Brücken, Zungen und Stäbe, die piezoelektrisch, elektrostatisch, elektrothermisch, optisch oder magnetisch angeregt werden. Die Abtastung der Schwingungen erfolgt piezoelektrisch, kapazitiv, piezoresistiv, optisch oder magnetisch.

Die Frequenz der Resonatoren kann durch folgende Einflüsse verändert werden:

- **Temperaturänderung.** Durch die thermische Ausdehnung ändern sich die geometrischen Abmessungen und die Dichte der schwingenden Struktur. Auch die elastischen Konstanten sind temperaturabhängig. Außer zur Temperaturmessung kann dieser Effekt über die Erwärmung bei Absorption von Strahlung zum Nachweis von Infrarotstrahlung oder über die Temperaturabsenkung infolge des Wärmeentzugs durch ein strömendes Medium zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten genutzt werden.

- **Einwirkung einer äußeren Kraft.** Es lassen sich Kräfte und Drücke, mit Hilfe einer seismischen Masse auch Beschleunigungen und durch Ausnützung unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten von Resonatorstruktur und einem Substratmaterial auch die Temperatur messen.
- **Massenbelegung bzw. mitschwingende Grenzsicht.** Eine zusätzliche mitschwingende Masse ändert das Trägheitsmoment und damit die Frequenz. Dieser Effekt hat bereits etablierte Anwendungen bei der Mikrowägung und der Schichtdickenmessung gefunden, er kann jedoch auch zur Messung der Dichte von Gasen und über selektiv absorbierende Schichten zur Messung von Gaskonzentrationen und der relativen Feuchte eingesetzt werden.

Die wichtigsten Typen mikromechanischer Resonanzsensoren sind Eigenresonanz-Sensoren, Oberflächenwellen-Sensoren und Biege-Plattenwellen-Sensoren.

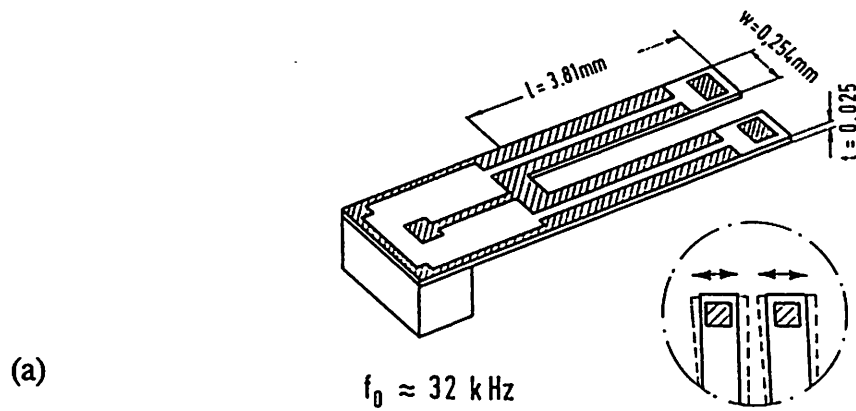
- **Eigenresonanz-Sensoren (Bulk Acoustic Wave-Sensoren).**

Erfolgt die Schwingung des Sensors in Form einer stehenden Welle, so spricht man von Eigenresonanz-Sensoren. Hierzu gehören die Quarzsensoren in Form von dünnen Plättchen (Dickenscherschwinger), Stimmgabeln (Biegeschwingungen, Bild 1.2a, oder Torsionsschwingungen) und beidseitig eingespannten Biegebalken [4].

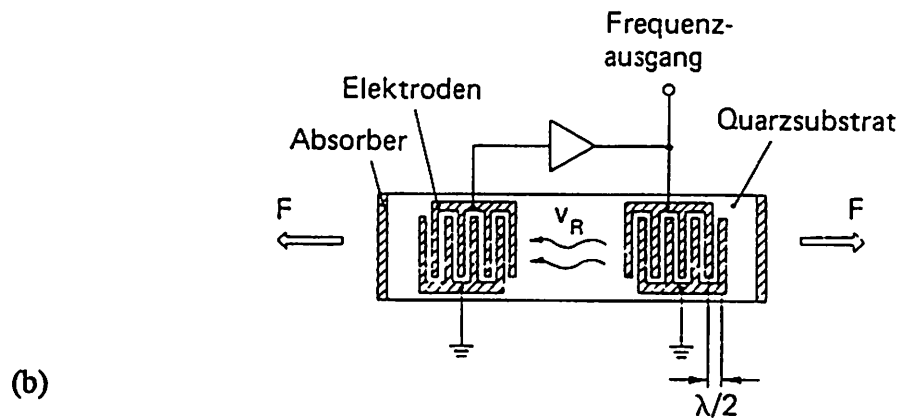
Einkristalliner Quarz spielt als Werkstoff für mikromechanische Resonatoren eine sehr wichtige Rolle, da er als nichtzentrosymmetrischer Kristall piezoelektrisch ist. Dies ermöglicht die einfache elektrische Anregung der elastischen Schwingungen. Die hochstabilen elastischen Eigenschaften von Quarz erlauben die Herstellung von Resonatoren hoher Güte und damit eine weitgehende Unabhängigkeit des mechanischen Resonators von den Eigenschaften des elektrischen Oszillators, dessen frequenzbestimmendes Element der Quarzschwinger ist.

Aufgrund der hochentwickelten Verfahrenstechniken der Siliziumtechnologie und aufgrund seiner hervorragenden mechanischen Eigenschaften spielt auch Silizium als Werkstoff für mikromechanische Resonatoren eine wichtige Rolle [5]. Im Gegensatz zu Quarz ist Silizium nicht piezoelektrisch. Zur Anregung mikromechanischer Resonatoren

### Bulk Acoustic Wave (BAW)-Sensoren 10 kHz - 20 MHz



### Surface Acoustic Wave (SAW)-Sensoren 20 MHz - 2 GHz



### Flexural Plate Wave (FPW)-Sensoren 500 kHz - 10 MHz

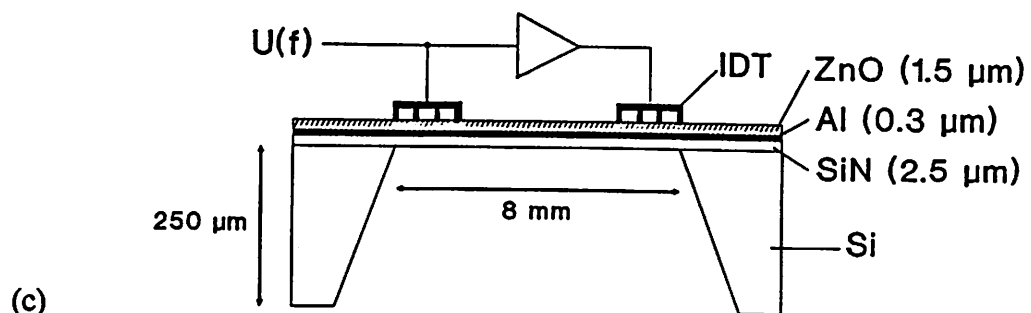


Bild 1.2 Wichtige Typen mikromechanischer Resonanzsensoren

aus Silizium wird daher entweder eine piezoelektrische Schicht (z.B. ZnO [6]) auf das Silizium aufgebracht, oder Anregung und Abtastung der Schwingung erfolgen auf andere Weise.

Das Gebiet der BAW-Sensoren hat sich in den vergangenen Jahren sehr stürmisch entwickelt. International wird inzwischen an vielen Stellen an der Entwicklung solcher Sensoren gearbeitet. Erste kommerzielle Anbieter für spezielle Anwendungen sind auf dem Markt.

#### ■ Oberflächenwellen-Sensoren (Surface Acoustic Wave-Sensoren).

SAW-Sensoren [7] arbeiten als Wellenleiter-Sensoren, d.h. die akustische Welle, die über ineinander verzahnte kammförmige Elektroden (Interdigital Transducers, IDTs) ein- und ausgekoppelt wird, schreitet entlang einer Trägerstruktur fort. Im allgemeinen handelt es sich um die Ausbreitung von Rayleigh-Wellen längs einer piezoelektrischen Trägerstruktur. Häufig verwendete Substratmaterialien sind Quarz und Lithiumniobat. Bei der Verwendung nicht-piezoelektrischer Materialien werden piezoelektrische Schichten auf das Substrat aufgebracht [8]. SAW-Sensoren werden im Frequenzbereich von ca. 20 MHz - 2 GHz betrieben.

Ein grundlegendes Oberflächenwellenbauelement für Sensoranwendungen ist die Verzögerungsleitung (Bild 1.2b). Sie besteht aus zwei Elektroden, die als Sender bzw. Empfänger dienen, und befindet sich in der Rückkoppelschleife eines Verstärkers. Die Resonanzfrequenz dieses Oszillators wird durch die Laufzeit der akustischen Welle zwischen Sender und Empfänger bestimmt.

#### ■ Biege-Plattenwellen-Sensoren (Flexural Plate Wave-Sensoren).

FPW-Sensoren sind mikrostrukturierte Membran-Sensoren, z.B. aus Silizium oder Siliziumnitrid (Bild 1.2c). Die Membrandicke liegt im Bereich von einigen  $\mu\text{m}$ . Auf die Membran wird eine dünne piezoelektrische Schicht aufgebracht. Mittels IDTs erfolgt über diese piezoelektrische Schicht die Anregung von Biegewellen in der Membran. Ist die Membrandicke klein gegenüber der Wellenlänge, spricht man von Biege-Platten- oder Lamb-Wellen. FPW-Sensoren werden im allgemeinen im asymmetrischen Mode

niedrigster Ordnung mit Frequenzen von 500 kHz - 10 MHz betrieben. Der Vorteil besteht darin, daß bei Anregung dieses Modes nur ein geringer Bruchteil der Energie in das umgebende Medium, z.B. eine Flüssigkeit, gestreut wird. Damit ist eine hohe akusto-gravimetrische Empfindlichkeit in Fluiden erreichbar. FPW-Sensoren sind daher in der Biosensorik von großem Interesse [9].

### 1.3 Entwicklungsziele des Verbundvorhabens

Das Verbundvorhaben hatte sich die Erarbeitung der Technologien zur Herstellung mikromechanischer Eigenresonanz-Sensoren auf der Basis von Quarz und Silizium zum Ziel gesetzt. Der Schwerpunkt lag dabei auf piezoelektrisch angeregten Sensoren. Des weiteren wurde die elektrothermische Anregung von Silizium-Balkenstrukturen mit Hilfe von Dünnschicht-Heizelementen untersucht, da diese Art der Anregung resonanter Strukturen eine technologisch relativ einfache Variante darstellt.

Das Vorhaben gliederte sich in die folgenden Themenkreise:

- Erarbeitung der Technologie zur Herstellung miniaturisierter Resonatoren aus Quarz und Silizium, insbesondere
  - Strukturierung der Quarzform durch einen naßchemischen Ätzprozeß,
  - dreidimensionale Mikrostrukturierung von Silizium mit naßchemischen und Trockenätzprozessen,
  - Erzeugung, Strukturierung und Passivierung piezoelektrischer Schichten auf Silizium,
  - Erzeugung und Strukturierung von Widerstandsschichten auf Silizium für Heizelemente und Dehnungsmeßstreifen.
- Modellierung resonanter Sensoren mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente.
- Herstellung mikromechanischer Resonatoren und Untersuchung ihrer Eignung als frequenzanaloge Sensoren für die Größen Kraft, Druck und Durchfluß.

Die Ergebnisse des Projekts werden in den folgenden Kapiteln 2 - 7 ausführlich dargestellt.