

FREQUENZANALOGUE SENSOREN

Prof. Dr. Stephanus Büttgenbach, Braunschweig

1. Einleitung

Moderne Meß- und Regelsysteme sind infolge der raschen Entwicklung der Mikroelektronik in zunehmendem Maße digitale Systeme. Für den Einsatz in analogen Meß- und Regelsystemen 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. Eine wichtige Gruppe solcher Sensoren sind frequenzanaloge Sensoren. Diese lassen sich unterteilen in

- Sensoren auf der Basis elektrischer Oszillatoren, deren frequenzbestimmendes Element der Sensor ist, und
- Sensoren auf der Basis mechanischer schwingungsfähiger Strukturen, deren Resonanzfrequenz empfindlich von der zu messenden Größe abhängt.

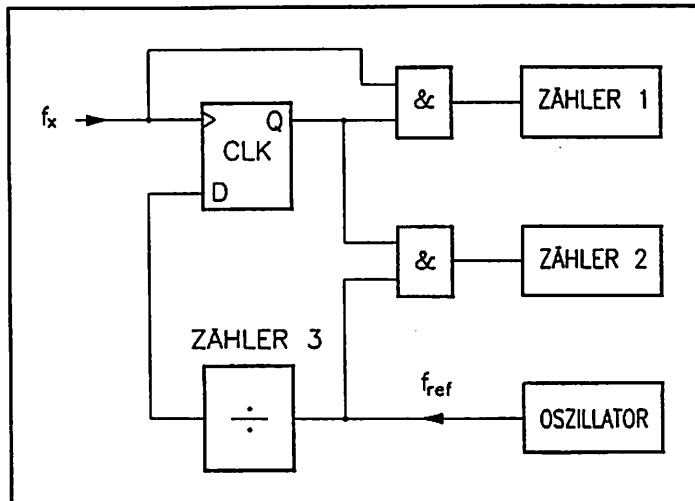


Bild 1. Blockschaltbild zur Frequenzmessung [1]

Die Umsetzung des Frequenzsignals in ein digitales Signal erfolgt durch Zähltechnik. Bild 1 zeigt das Blockschaltbild eines Verfahrens zur Frequenzmessung, das mit eingangssynchronisierter Torzeit arbeitet [1]. Bei diesem Verfahren werden drei Zähler benötigt.

Zähler 1 (N_1) erfasst die Eingangsimpulse, Zähler 2 (N_2) mißt die synchronisierte Torzeit, und Zähler 3 dient als programmierbarer Teiler zur Vorgabe der Torzeit. Die zu messende Frequenz ist gegeben durch

$$f_x = f_{\text{ref}} \cdot (N_1/N_2). \quad (1)$$

Der Quantisierungsfehler beträgt unabhängig von der zu messenden Frequenz einen Impuls der Referenzfrequenz, d.h. bei einer Referenzfrequenz von 10 MHz und einer Torzeit von 10 ms erhält man eine Auflösung von 10 ppm.

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 [2]. Anhand von Beispielen werden im folgenden Funktionsprinzipien, Herstellungsmethoden und Eigenschaften mikromechanischer frequenzanaloger Sensoren dargestellt.

2. Frequenzanaloge Sensoren auf der Basis elektrischer Oszillatoren

Zu dieser Gruppe von Sensoren, für die bisher allerdings nur wenige Beispiele existieren, gehören

- resistive, kapazitive und induktive Sensoren, die in RC- oder LC-Oszillatoren frequenzbestimmend sind,
- spannungsliefernde Sensoren, z.B. DMS-Brücken, deren Ausgangssignal über einen Spannungs-Frequenz-Wandler in ein frequenzanaloges Signal umgesetzt wird [3],
- Ringoszillatoren, deren Frequenz durch die zu messende Größe beeinflusst wird [4].

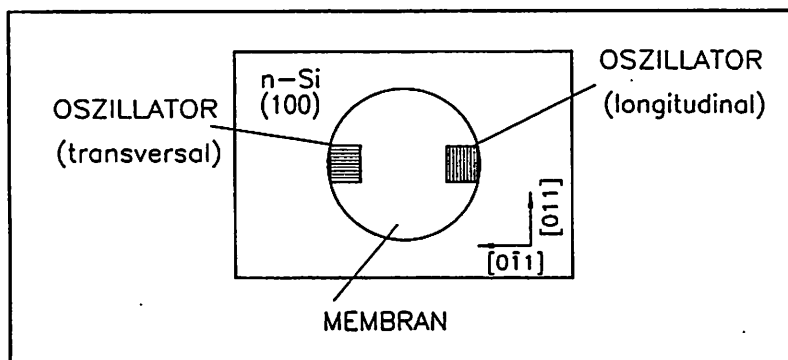


Bild 2. Schema eines Drucksensors mit zwei Ringoszillatoren [5]

Ein Beispiel für einen frequenzanalogen Sensor auf der Basis eines elektrischen Oszillators ist ein Drucksensor mit MOS-Ringoszillatoren [5]. Ein Ringoszillator besteht aus einer ungeraden

Zahl von Inverterstufen, wobei der letzte Inverter auf den ersten zurückgekoppelt ist. Ist die Verstärkung jedes Inverters größer als 1, so oszilliert die Schaltung mit einer Frequenz, die von der Zahl der Stufen und von der Verzögerungszeit jeder einzelnen Stufe bestimmt wird. Wird ein solcher Ringoszillator in die Membran eines Silizium-Drucksensors integriert, so ändern sich bei Einwirkung einer mechanischen Spannung aufgrund des piezoresistiven Effektes die Kanalwiderstände der Feldeffekttransistoren. Dies beeinflusst die Verzögerungszeit der Inverter und damit die Frequenz des Oszillators. Die Oszillatorfrequenz lässt sich folgendermaßen ausdrücken [5]:

$$f = f_0 \cdot [1 - \sigma\pi] F_1(U_B) F_2(T). \quad (2)$$

Darin ist f_0 die Frequenz des unbelasteten Oszillators, π der piezoresistive Koeffizient, σ die einwirkende Spannung, und $F_1(U_B)$ und $F_2(T)$ sind normierte Funktionen, die die Abhängigkeit der Frequenz von der Versorgungsspannung U_B und der Temperatur T beschreiben. Die Empfindlichkeit des Ringoszillators hängt von der Richtung der mechanischen Spannung bezüglich der Kanalorientierung ab. Der Einfluß der Versorgungsspannung und der Temperatur kann daher durch Bilden des Verhältnisses der Frequenz zweier geeigneter Ringoszillatoren kompensiert werden. In Bild 2 ist ein solcher Drucksensor schematisch dargestellt [5]. Zwei identische Ringoszillatoren bestehend aus je neun Inverterstufen sind in der Siliziummembran so angeordnet, daß zwei gegenläufige Effekte, der longitudinale und der transversale Effekt, genutzt werden können. Für das Verhältnis der Frequenzen ergibt sich:

$$r = f_t(\sigma)/f_l(\sigma) = (1 - \sigma\pi_t)/(1 - \sigma\pi_l). \quad (3)$$

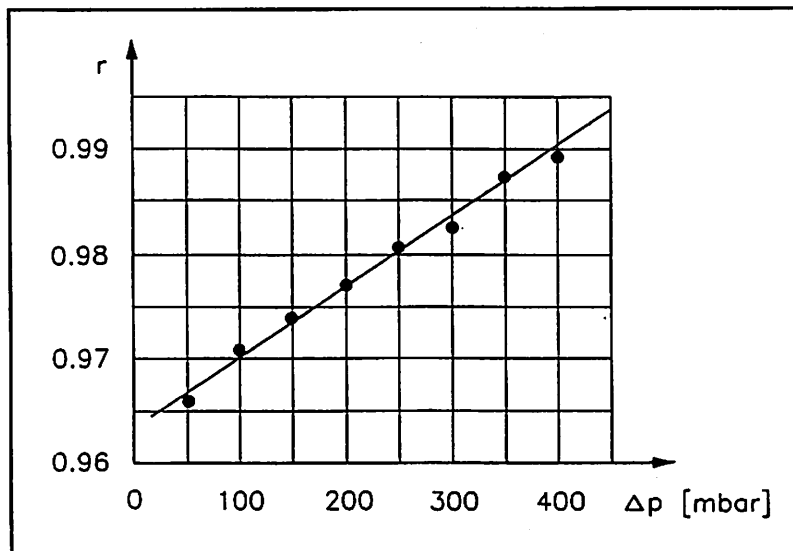


Bild 3. Abhängigkeit des Frequenzverhältnisses $r = f_t/f_l$ vom Druck [5]

π_t ist der transversale, π_l der longitudinale Piezokoeffizient. Bild 3 zeigt die Kennlinie eines solchen Differenzsensors. Das Frequenzverhältnis hängt nur wenig von der Versorgungsspannung ab ($dr/dU_B = -4 \cdot 10^{-4}/V$). Die

Temperaturabhängigkeit ist kleiner als 80 ppm/K im Temperaturbereich von 20 °C - 120 °C.

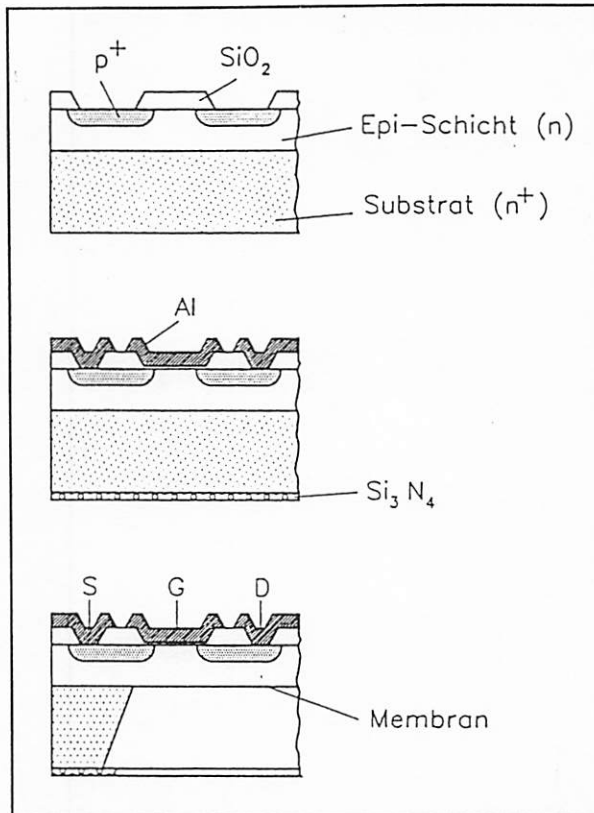


Bild 4. Prozessschritte bei der Herstellung eines Drucksensors mit MOS-Ringoszillatoren

In Bild 4 ist die Herstellung der Sensoren schematisch und vereinfacht dargestellt. Ausgangsmaterial sind hochdotierte (100)-Siliziumscheiben ($N_D > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) mit einer 25 μm dicken, schwach dotierten epitaktischen Schicht ($N_D = 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$). Zunächst werden durch Oxidation, Fotolithographie und p⁺-Dotierung die Source- und Drain-Bereiche erzeugt. Nach Abscheidung des Gateoxids wird auf die Scheibenrückseite mittels CVD eine Siliziumnitridschicht aufgebracht. Anschließend erfolgt die Metallisierung der Scheibenvorderseite. Als letzter Schritt wird nach Öffnen eines Fensters in der

Siliziumnitridschicht die druckempfindliche Membran durch elektrochemisches Ätzen des n⁺-Substrats in einer 5%igen HF-Lösung erzeugt.

3. Frequenzanalogue Sensoren auf der Basis mikromechanischer Resonatoren (Resonanzsensoren)

3.1 Funktionsprinzipien für Resonanzsensoren

Anregung und Abtastung mikromechanischer Resonatoren können folgendermaßen erfolgen:

- **Anregung:** Piezoelektrisch, elektrostatisch, magnetisch, elektrothermisch, photothermisch.

- **Abtastung:** Piezoelektrisch, kapazitiv, magnetisch, piezoresistiv, optisch.

Die Frequenz mikromechanischer 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 Grenzschicht.** 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.

3.2 Quarzresonatoren als frequenzanaloge Sensoren

Besonders einfach lassen sich mikromechanische Resonatoren über den piezoelektrischen Effekt anregen. Daher spielt einkristalliner Quarz als Werkstoff für mikromechanische Resonatoren eine sehr wichtige Rolle; denn als nicht-zentrosymmetrischer Kristall ist er piezoelektrisch. Die hochstabilen elastischen Eigenschaften von Quarz erlauben die Herstellung von Resonatoren hoher Güte ($Q = 10^4 - 10^7$) und damit eine weitgehende Unabhängigkeit des mechanischen Resonators von den Ei-

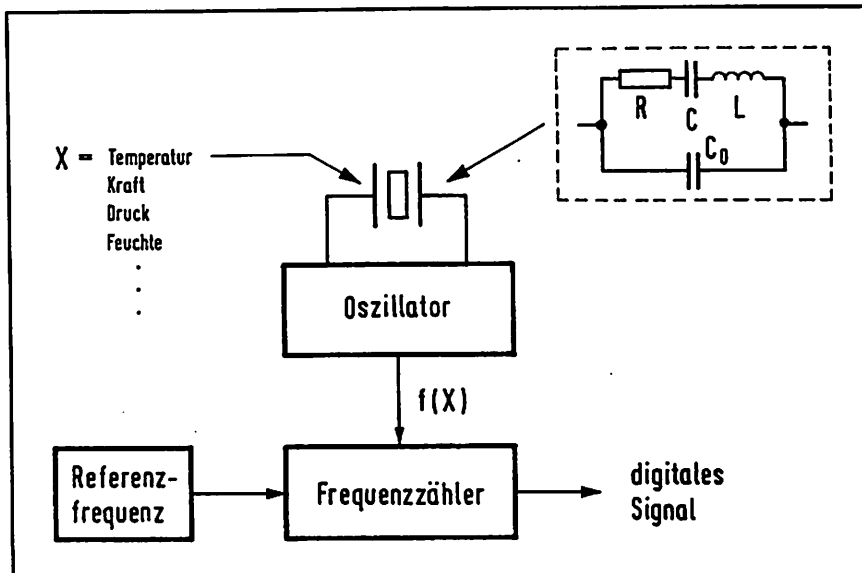


Bild 5. Blockschaltbild eines Quarzsensors

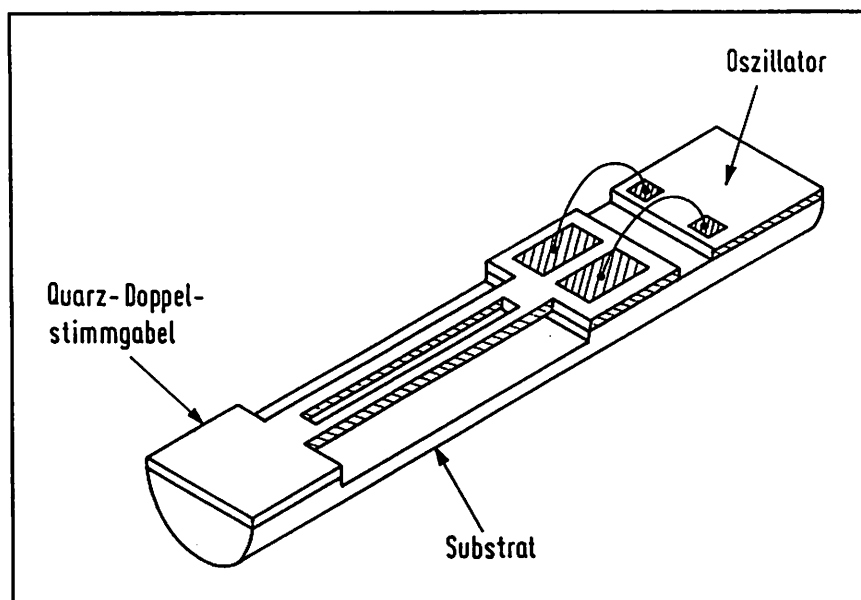
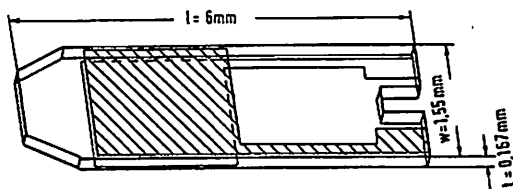


Bild 6. Schema eines Temperatursensors auf der Basis einer Quarzdoppelstimmgabel

enschaften des elektrischen Oszillators, dessen frequenzbestimmendes Element der Quarzschwinger ist (Bild 5). Grundstrukturen für miniaturisierte Quarzsensoren sind Dickenschwinger in Form von dünnen Plättchen und Biegeschwinger in Form von Stimmgabeln und Doppelstimmgabeln, die in einem Batchprozess mit Hilfe der fotolithographischen Ätztechnik aus polierten Quarzscheiben hergestellt werden können.



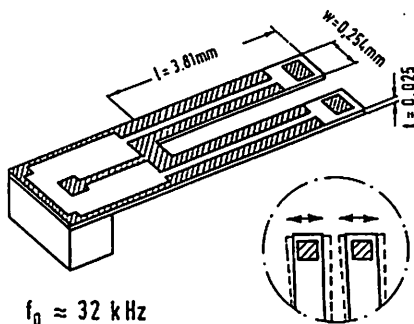
$f_0 \approx 10 \text{ MHz}$

AT-Quarz (Dickenscherschwung)

$$\frac{\Delta f}{\Delta m} \approx -\text{Konst} \frac{f_0^2}{A}$$

A aktive Fläche
 Δm Massenbelegung

typischer Wert : $\frac{\Delta f}{\Delta m} \approx -10 \text{ Hz/ng}$



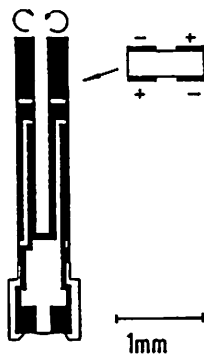
$f_0 \approx 32 \text{ kHz}$

Stimmgabel (Biegeschwung)

$$\frac{\Delta f}{f_0} \approx -\frac{\pi}{4} \frac{g}{g_a} \frac{t}{w}$$

g_a Dichte von Quarz
 g, p Gasdichte, Gasdruck

typischer Wert in Luft : $-\frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\Delta f}{f_0} \right) \approx 500 \text{ ppm/bar}$



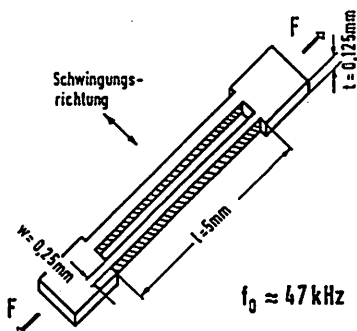
$f_0 \approx 258 \text{ kHz}$

Stimmgabel (Torsionsschwung)

$$\frac{\Delta f}{f_0} \approx \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2 + \dots$$

ΔT Temperaturdifferenz

typische Werte : $\alpha \approx 35 \text{ ppm/K}$
 $\beta \approx 2 \cdot 10^{-8} / \text{K}$



$f_0 \approx 47 \text{ kHz}$

Doppelstimmgabel (Biegeschwung)

$$\frac{\Delta f}{f_0} \approx \text{Konst} \frac{1}{E} \frac{l^2}{w^3 t} F$$

E E-Modul

typischer Wert : $\frac{\partial}{\partial F} \left(\frac{\Delta f}{f_0} \right) \approx 1\% / \text{N}$

Bild 7. Beispiele miniaturisierter Quarzsensoren [6-9]

Beispiele für Quarzsensorenstrukturen gibt Bild 7. Im folgenden soll die Quarzdoppelstimmgabel, die man sich aus zwei in der Mitte miteinander verbundenen Stimmgabeln entstanden denken kann, detaillierter beschrieben werden. Jeder Ast der Doppelstimmgabel kann als beidseitig eingespannter Biegebalken betrachtet werden, wobei sich die Biegemomente beider Äste kompensieren. Dadurch ist eine gute mechanische Isolierung des Resonators von seiner Halterung gewährleistet. Die Frequenz der Biegeschwingung erhöht sich unter mechanischem Zug und verringert sich bei Druckbelastung. Diese Struktur kann zur Messung von Kräften, Drücken und anderer physikalischer Größen, die sich in eine Kraft umformen lassen, dienen.

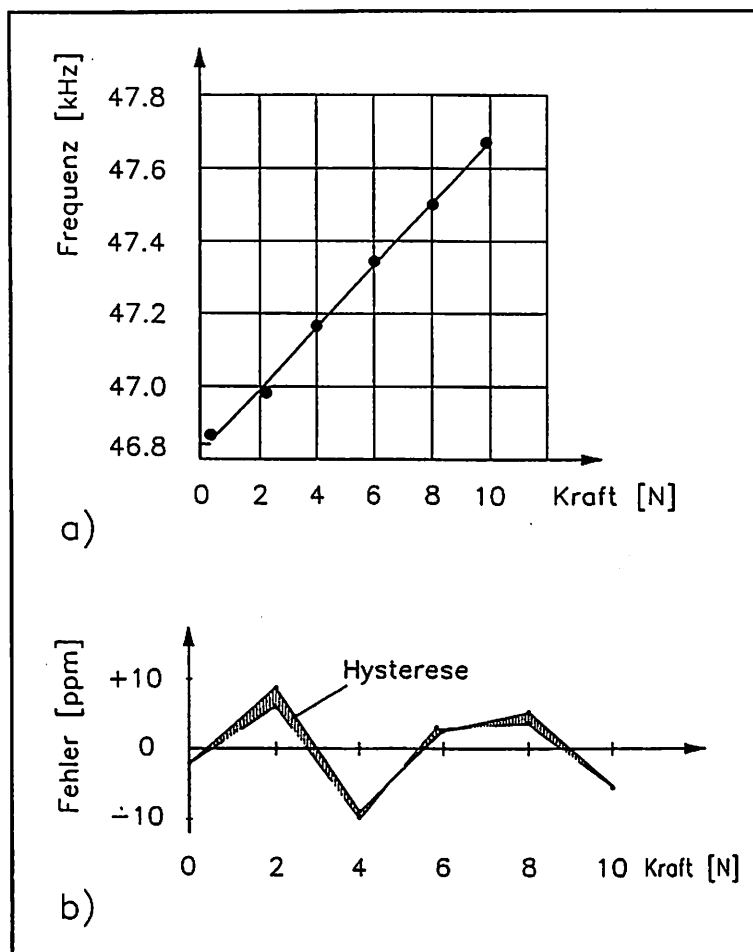


Bild 8. Quarzdoppelstimmgabel als frequenzanaloger Kraftsensor. (a) Kraft-Frequenz-Charakteristik. (b) Richtigkeitskurve nach Linearisierung mit einem Polynom 2. Grades

Zum Beispiel kann die hohe Empfindlichkeit bezüglich der Kraft zur Temperaturmessung ausgenutzt werden, indem man die Doppelstimmgabel auf ein Substrat mit unterschiedlichem thermischen Ausdehnungskoeffizient bondet (Bild 6). So lassen sich Temperaturempfindlichkeiten von bis zu 1000 ppm/K realisieren, im Vergleich zu ca. 35 ppm/K bei der Torsionsstimmgabel in Bild 7.

Bild 8a zeigt die gemessene Kennlinie eines

kommerziell erhältlichen Kraftsensors (ETA SA, Grenchen). Nach Linearisierung der Kennlinie mit einem Polynom 2. Grades ist die Abweichung von der Linearität

kleiner als 10 ppm (Bild 8b). Aus Bild 8b ist auch zu ersehen, daß die Hysterese sehr gering ist.

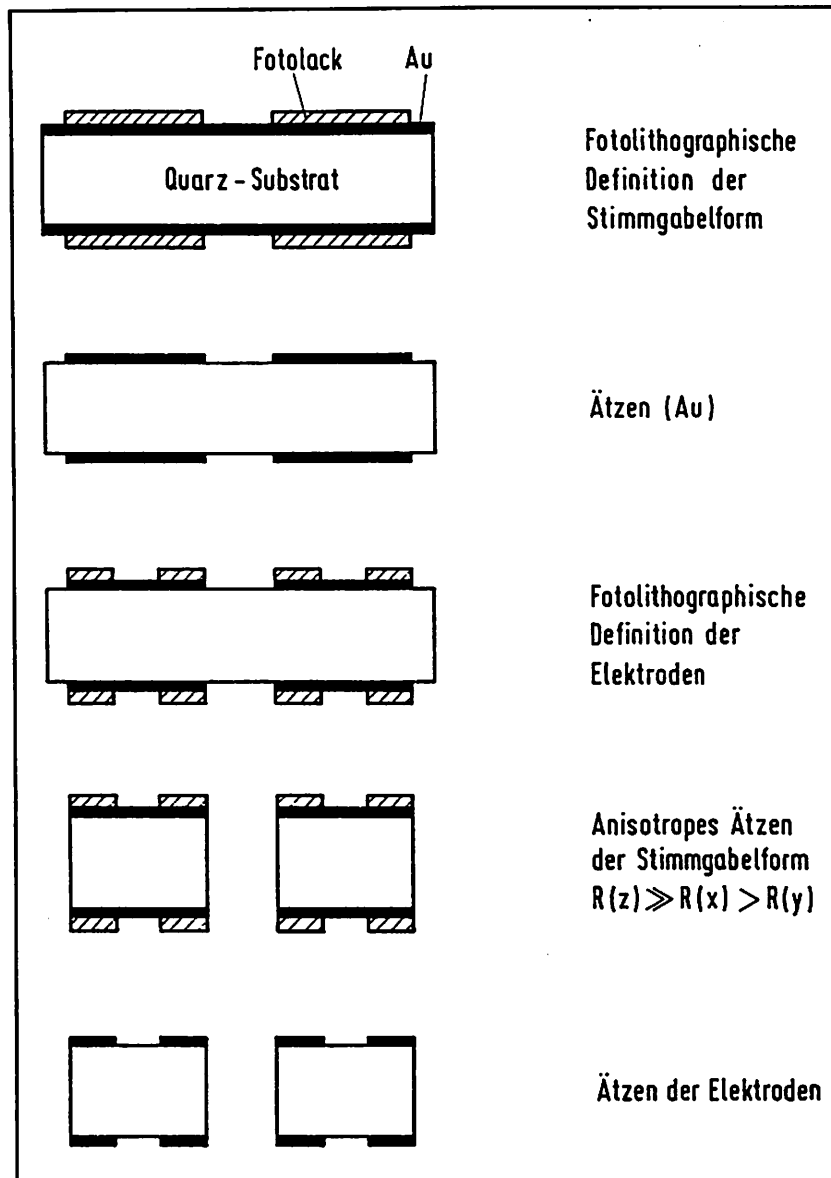


Bild 9. Prozeßschritte zur Erzeugung einer Quarzstimmgabel mittels fotolithographischer Ätztechnik. $R(x)$, $R(y)$ und $R(z)$ sind die Ätzraten in x-, y- bzw. z-Richtung

In den 70er Jahren entwickelte STAUDTE einen Batchprozeß zur Herstellung von Quarzresonatoren, der sowohl eine starke Minutisierung als auch eine Rationalisierung und Kostenreduktion bewirkte [10]. Bei dieser Technik werden die polierten Quarzscheiben nach einem Reinigungsvorgang beidseitig mit Gold beschichtet. In mehreren fotolithographischen Prozessen (Bild 9) werden die Umrisse der Stimm-

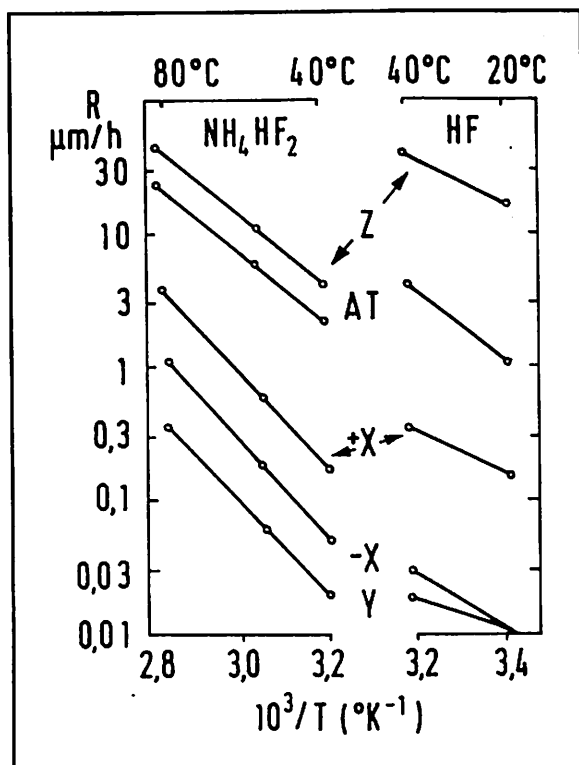


Bild 10. Temperaturabhängigkeit der Ätzrate für einige Kristallrichtungen [11]

gabel und die Elektrodenmuster, die zur piezoelektrischen Anregung der Schwingungen dienen, durch chemisches Ätzen auf die Metallschicht übertragen. Anschließend werden die Quarzstimmgabeln chemisch freigeätzt. Als Ätzmittel werden Lösungen von Flußsäure oder Ammoniumbifluorid benutzt. In beiden Lösungen ist der Ätzbvorgang stark anisotrop, wobei die Ätzgeschwindigkeit in Richtung der z-Achse maximal ist. Die Ätzrate beträgt für Ammoniumbifluorid bei 80 °C ca. 1,3 μm/min, für Flußsäure (51%) bei 23 °C etwa 0,3 μm/min (Bild 10).

3.3 Akustische Oberflächenwellenelemente als frequenzanaloge Sensoren

Akustische Oberflächenwellen sind elektromechanische Wellen, die sich entlang der Oberfläche eines piezoelektrischen Substrats ausbreiten. Es gibt verschiedene Arten von Oberflächenwellen, die sich im wesentlichen durch die Richtung der Verschiebung der Gitterpunkte und die Ausbreitungsgeschwindigkeit unterscheiden. Von besonderer Bedeutung sind Rayleigh-Wellen, die eine longitudinale Komponente und eine vertikale Scherkomponente besitzen. Die Überlagerung dieser beiden Komponenten führt zu einer elliptischen Bahn der Gitterpunkte in einer Ebene senkrecht zur Substratoberfläche. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit liegt in der Größenordnung von 3000 m/s, die Frequenz im Bereich von 30 MHz bis 30 GHz, d.h. die Wellenlänge liegt zwischen 1 μm und 100 μm. Die Eindringtiefe in das Substrat beträgt nur etwa eine bis zwei Wellenlängen, so daß eine starke Wechselwirkung mit der Umgebung der Substratoberfläche möglich ist.

Rayleigh-Wellen werden in piezoelektrischen Substraten durch Anlegung einer hochfrequenten Spannung an ineinander verzahnte kammförmige Elektroden angeregt. Die Elektroden werden lithographisch in einer auf das Substrat aufgedampften Metallschicht erzeugt. Der Abstand zwischen benachbarten Elektroden beträgt $\lambda/2$. Häufig verwendete Substrate sind ST-Quarzscheiben (um $42,5^\circ$ gedrehter Y-Schnitt), bei denen der lineare Temperaturkoeffizient bei etwa 25°C verschwindet, oder YZ-Lithiumniobat mit einem höheren piezoelektrischen Kopplungsfaktor, jedoch mit nicht verschwindender Temperaturabhängigkeit.

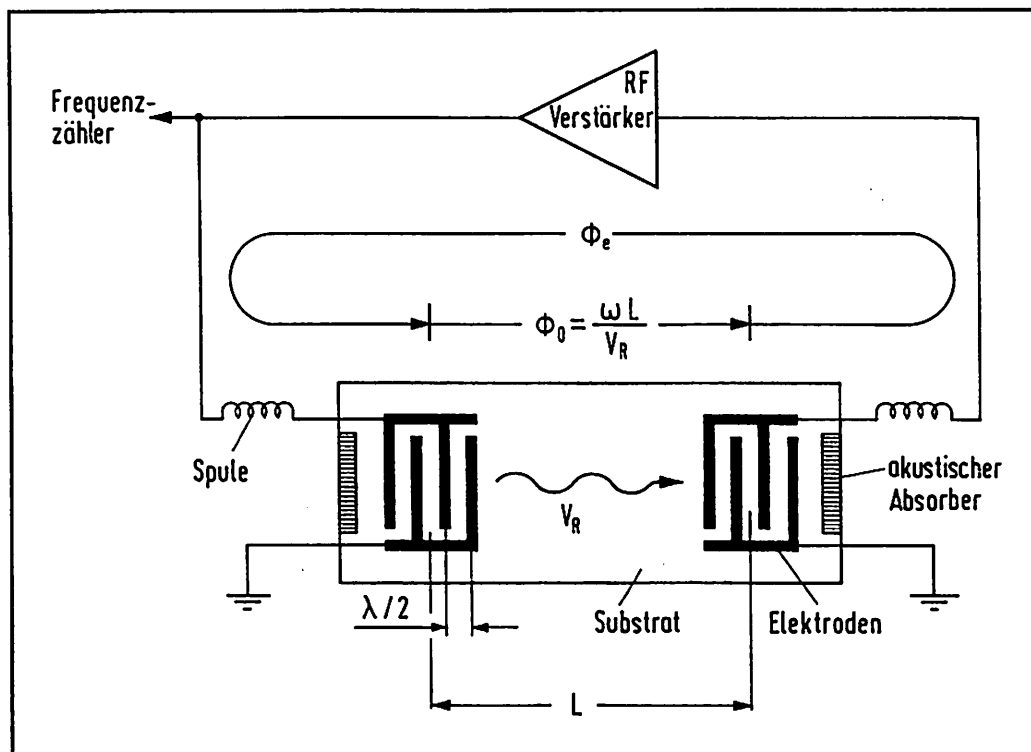


Bild 11. Schema eines Oszillators mit einer Oberflächenwellen-Verzögerungsleitung

Ein grundlegendes Oberflächenwellenbauelement für Sensoranwendungen ist eine Verzögerungsleitung (Bild 11). Sie besteht aus zwei kammförmigen Elektroden, die als Sender bzw. Empfänger dienen, und befindet sich in der Rückkoppelschleife eines Verstärkers. Die Resonanzfrequenz dieses Oszillators wird durch die Laufzeit der Oberflächenwelle zwischen Sender und Empfänger bestimmt:

$$\omega = (2n\pi - \Phi_0) \cdot v_R / L. \quad (4)$$

n ist eine ganze Zahl, Φ_e ist die Phasenverschiebung durch den Verstärker und weitere elektronische Schaltelemente, L ist der Abstand zwischen Sender und Empfänger. Grundsätzlich sind also viele Resonanzfrequenzen möglich; wegen der begrenzten Bandbreite der Elektroden ist n jedoch auf einen oder einige wenige Werte beschränkt. Im allgemeinen ist Φ_e konstant, so daß eine Änderung der Resonanzfrequenz durch eine Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit v_R und/oder durch eine Änderung des Abstandes L bewirkt wird. Darauf beruht eine Vielzahl von Sensoranwendungen.

Wie bei Quarzstimmgabeln besteht ein großer Vorteil der akustischen Oberflächenwellensensoren darin, daß sie sehr klein sind - bei einer Frequenz von 300 MHz beträgt z.B. die erforderliche Fläche für eine Verzögerungsleitung mit einer Laufstrecke von 300 Wellenlängen etwa 1 mm^2 - und sich in einem fotolithographischen Batchprozeß preisgünstig herstellen lassen. Nachteilig sind die kleinen relativen Frequenzänderungen (typischerweise $< 10^{-3}$). Deshalb ist eine gute Temperaturkompensation sehr wichtig. Ein häufig angewendetes Konzept zur Temperaturkompensation ist der aus zwei Oberflächenwellenoszillatoren bestehende Differenzsensor, bei dem die zu messende Größe nur auf einen der beiden Oszillatoren wirkt, während der andere als Referenzoszillator dient.

Mechanische Größen (Bild 12a) oder elektrische Spannungen (Bild 12b) erzeugen im Ausbreitungsmedium der akustischen Wellen ein statisches elektromagnetisches Feld, das die Ausbreitungsgeschwindigkeit und damit die Resonanzfrequenz des Oszillators beeinflusst [14]. Hinzu kommt bei mechanischen Meßgrößen die mit einer Dehnung verbundene Längenänderung der Verzögerungsstrecke. Bei Gas- und chemischen Oberflächenwellensensoren werden auf das Substrat dünne Schichten aufgebracht, die als chemisches Interface wirken und selektiv und reversibel mit der nachzuweisenden Substanz reagieren (Bild 12c). Die damit verbundene Änderung der physikalischen Eigenschaften (Massendichte, elastische Konstanten) beeinflusst die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oberflächenwellen. Ein Beispiel ist ein ST-Quarz-Feuchte-sensor auf der Basis einer Verzögerungsleitung, die bei einer Frequenz von 158 MHz arbeitet und eine aktive Fläche von 8 mm^2 hat. Die Empfindlichkeit beträgt ca.

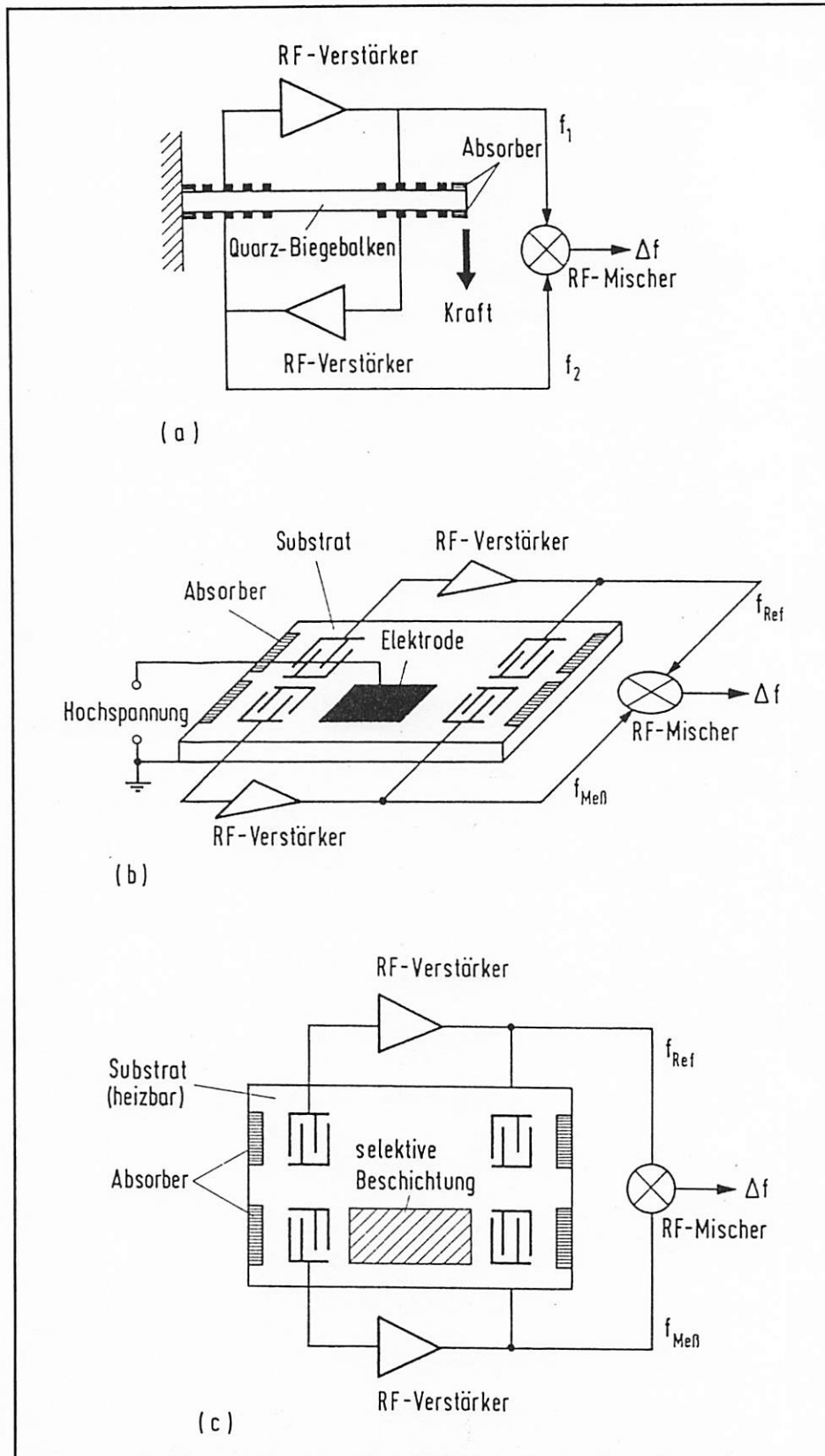


Bild 12. Beispiele für den Einsatz von akustischen Oberflächenwellen-Oszillatoren als Sensoren [12,13]. (a) Kraftsensor. (b) Hochspannungssensor. (c) Chemischer Sensor

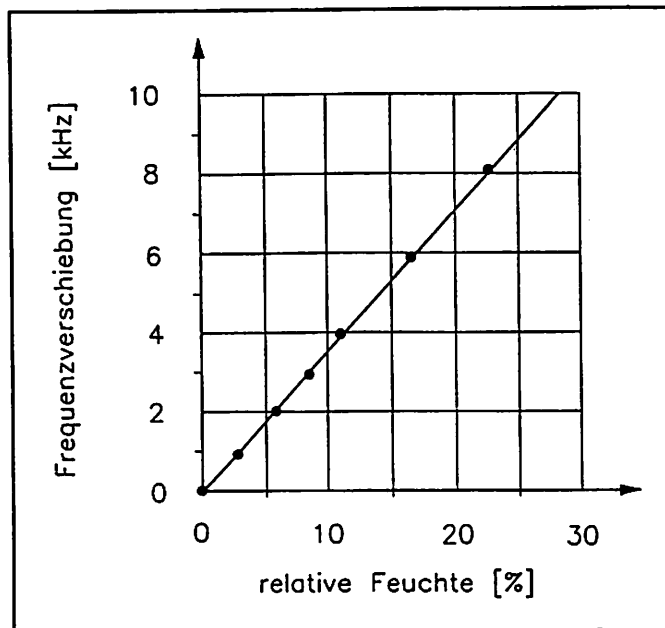


Bild 13. Kennlinie eines Oberflächenwellen-Feuchtesensors [13]

400 Hz/ng [13]. Die aktive Fläche ist mit einem hygroskopischen Polymer beschichtet (Natrium-Polystyren-Sulfonat). Unterhalb 25% rel.F. ist die Kennlinie nahezu linear (Bild 13). Die Zeitkonstante liegt zwischen 5 s und 25 s. Selbst nach mehreren Monaten Gebrauch zeigen sich keine Alterungserscheinungen.

3.4 Silizium-Resonanzsensoren

Im Gegensatz zu Quarz ist Silizium nicht piezoelektrisch. Zur Anregung mikromechanischer Resonatoren aus Silizium muß daher entweder eine piezoelektrische Schicht auf das Silizium aufgebracht werden, oder Anregung und Abtastung der Schwingung müssen auf andere Weise erfolgen.

3.4.1 Piezoelektrische Anregung

Als piezoelektrisches Schichtmaterial für Silizium-Resonanzsensoren eignet sich Zinkoxid, das sich durch (reaktives) Sputtern auf Silizium abscheiden läßt. Durch die Kombination von Silizium-Mikromechanik und ZnO-Dünnschichttechnik lassen sich eine Vielzahl frequenzanaloger Sensoren realisieren. Erste Labormuster solcher Sensoren liegen bereits vor.

Als Beispiel ist in Bild 14 schematisch ein Kraftsensor auf der Basis eines beidseitig eingespannten Siliziumbiegebalkens dargestellt, der über den piezoelektrischen Effekt einer ZnO-Schicht zu Schwingungen angeregt wird [15]. Die Abtastung der Schwin-

gung erfolgt ebenfalls piezoelektrisch. Die Herstellung des Sensors erfolgt in drei Schritten:

- Prozessierung der Vorderseite der (100)-Siliziumscheibe. Herstellung einer p^{++} -ZnO-Al-Multilayer-Struktur zur piezoelektrischen Anregung und Abtastung. Die Strukturierung der ZnO-Schicht erfolgt naßchemisch in einer Mischung aus HAc, H_3PO_4 und H_2O .
- Prozessierung der Rückseite der Scheibe. Anisotropes naßchemisches Ätzen in KOH zur Herstellung einer Membran, deren Dicke der Dicke des Biegebalkens entspricht.
- Freiätzen des Biegebalkens durch Strukturierung der Membran mittels eines Trockenätzprozesses.

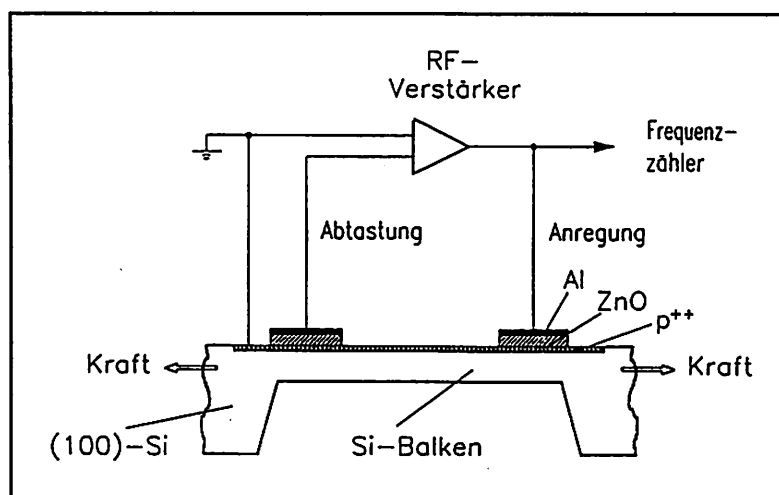


Bild 14. Schematische Darstellung eines Kraftsensors auf der Basis eines resonanten Silizium-Biegebalkens [15]

Für einen Biegebalken von 6 mm Länge, 0,2 mm Breite und $25\ \mu\text{m}$ Dicke beträgt die Resonanzfrequenz ca. 7,5 kHz. Im Bereich von 0 bis 0,4 N wird eine Empfindlichkeit von ca. 30 kHz/N gemessen [15].

3.4.2 Elektrothermische Anregung

Ein aus technologischer Sicht interessantes Prinzip zur Anregung mikromechanischer Resonatoren ist die elektrothermische Anregung mit Hilfe von Dünnschichtwiderständen.

Bild 15 zeigt das Schema eines Durchflusssensors auf der Basis einer resonanten Siliziumnitridbrücke [16]. Die Brücke ist aus drei dünnen Schichten aufgebaut, einer

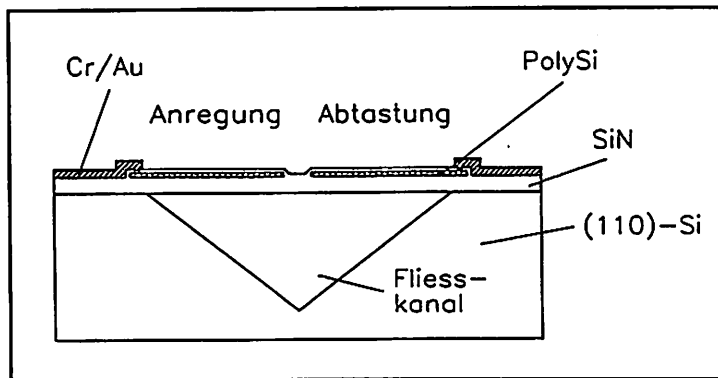


Bild 15. Schematische Darstellung eines elektrothermisch angeregten, resonanten Durchflußsensors [16]

1,8 μm dicken, spannungskompensierten Siliziumnitridschicht, einer 0,16 μm dicken phosphordotierten Polysiliziumschicht zur Herstellung der Widerstände und einer 0,15 μm dicken Siliziumnitrid-Passivierungsschicht. Die

Strukturierung der Brücke erfolgt in einem Trockenätzprozeß. Die Cr/Au-Metallisierungsschicht zur Herstellung der elektrischen Kontakte dient gleichzeitig als Maske für den anisotropen naßchemischen Ätzschritt, in dem der V-förmige Fließkanal hergestellt wird.

An den Polysiliziumwiderstand wird eine Gleichspannung, der eine Wechselspannung überlagert ist, angelegt. Der dynamische Anteil der elektrothermisch erzeugten Wärmeleistung regt die Brücke infolge thermischer Ausdehnung zu einer Biegeschwingung an, die mit Hilfe einer Brückenschaltung aus Piezowiderständen detektiert wird. Die statische Temperaturerhöhung der Brücke, von der die Resonanzfrequenz empfindlich abhängt, wird beeinflusst von dem Wärmeentzug durch das durch den Fließkanal strömende Medium. Die Resonanzfrequenz ist daher ein Maß für die Durchflußgeschwindigkeit. In einem Labormuster mit Brückenabmessungen von 600 μm x 200 μm x 2,1 μm beträgt die Resonanzfrequenz 85 kHz, und es wird eine Verschiebung von 0,8 kHz bei einer Luftgeschwindigkeit von 3m/s gemessen [16].

3.4.3 Elektrostatische Anregung

Mit Hilfe der anisotropen, selektiven Ätztechnik werden in einer Siliziumscheibe dreidimensionale Strukturen hergestellt. Der Wunsch, freistehende und bewegliche mikromechanische Strukturen herzustellen, hat zu einem neuen technologischen Ansatz geführt, der sogenannten Oberflächen-Mikromechanik. Basis sind Sandwichstrukturen, z.B. aus Siliziumdioxid und Polysilizium, mit Schichtdicken im Mikro-

meterbereich, die auf die Siliziumscheibe aufgebracht werden. Nach der Strukturierung wird das Siliziumdioxid (sacrificial layer) herausgeätzt, so daß freistehende Polysiliziumstrukturen entstehen.

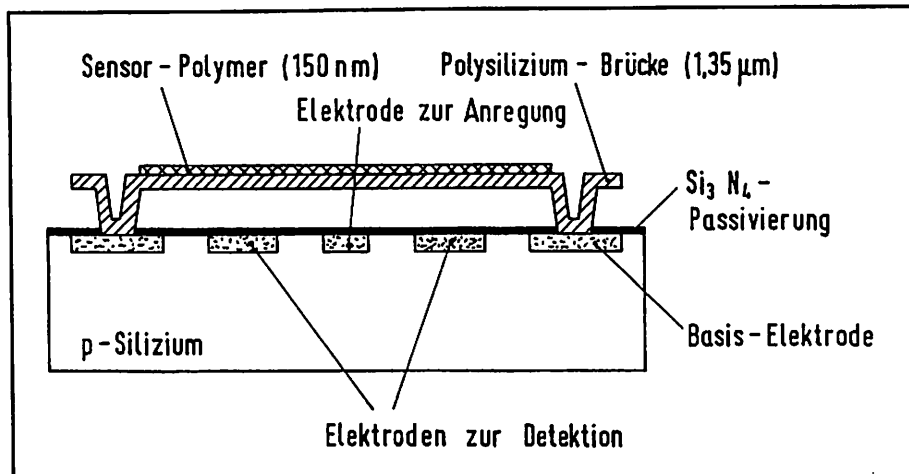


Bild 16. Freistehende Polysiliziumbrücke als Gassensor [17]

Eine mit Hilfe der Oberflächen-Mikromechanik hergestellte freistehende Polysiliziumbrücke eignet sich zum Beispiel als Gassensor (Bild 16). Die Brücke, auf der eine dünne, gassensitive Polymerschicht aufgebracht ist, wird elektrostatisch zu Schwingungen angeregt; die Änderung der Resonanzfrequenz infolge einer Änderung der Massenbelegung der Brücke durch Gasabsorption in der Polymerschicht wird kapazitiv detektiert [17].

Bild 17 zeigt als weiteres Anwendungsbeispiel für eine elektrostatisch angeregte Polysiliziumbrücke das Konzept eines Beschleunigungssensors, der die Beschleunigung in x- und y-Richtung mißt [18]. Der Sensor besteht aus einer seismischen Masse und zwei Paar Polysiliziumbrücken mit den Abmessungen $250\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ }\mu\text{m} \times 1,6\text{ }\mu\text{m}$. Um eine Rotation und eine vertikale Bewegung der seismischen Masse zu verhindern, befinden sich auf der Rückseite acht $8\text{ }\mu\text{m}$ dicke Siliziumbrücken. Erste experimentelle Untersuchungen zeigen eine Empfindlichkeit von 150 Hz/g .

Elektrostatisch oder elektrothermisch angeregte Polysiliziumbalken sind auch als Kraftsensoren gut geeignet. Um hohe Resonatorgüten zu gewährleisten, ist es notwendig, daß sich der schwingende Balken im Vakuum befindet. Die Oberflächen-

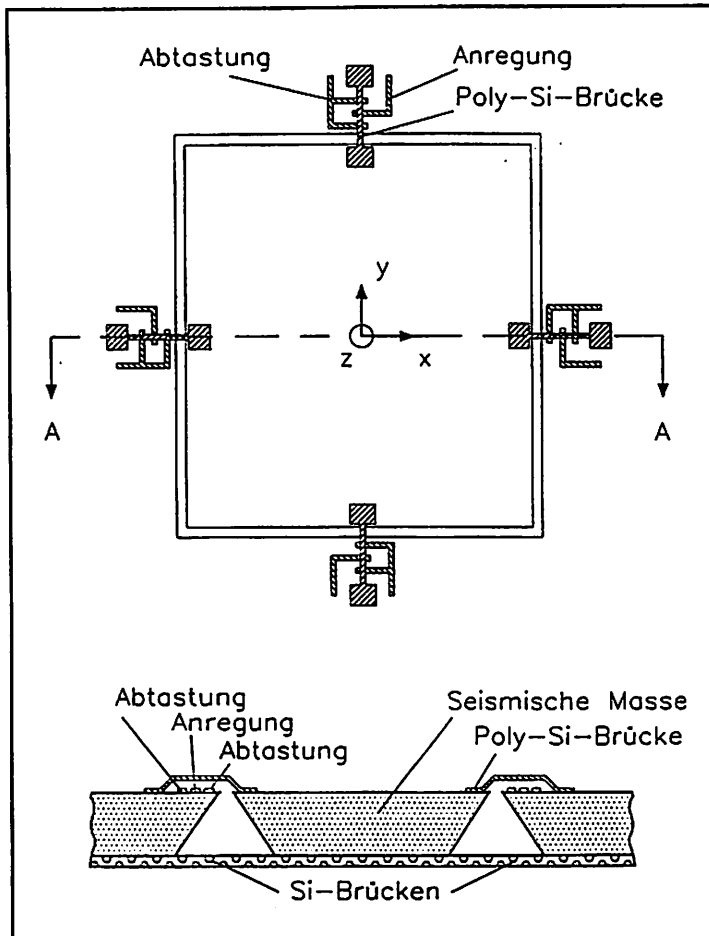


Bild 17. Konzept eines Beschleunigungssensors mit resonanten Polysiliziumbrücken [18]

von 35000 und eine Empfindlichkeit von ca. 150 Hz/dyn [20].

Mikromechanik bietet eine interessante technologische Möglichkeit für ein Resonator-Micropackaging [19]; über die Polysiliziumstruktur wird eine LPCVD-Siliziumnitridschicht und eine zweite Polysiliziumschicht abgeschieden. Anschließend wird die Resonatorstruktur durch dünne Kanäle freigeätzt (Bild 18). Für einen derartigen Resonanzsensor mit einem Balken von 200 μm Länge, 45 μm Breite und 2,2 μm Dicke ergibt sich eine Resonanzfrequenz von ca. 650 kHz, eine Güte

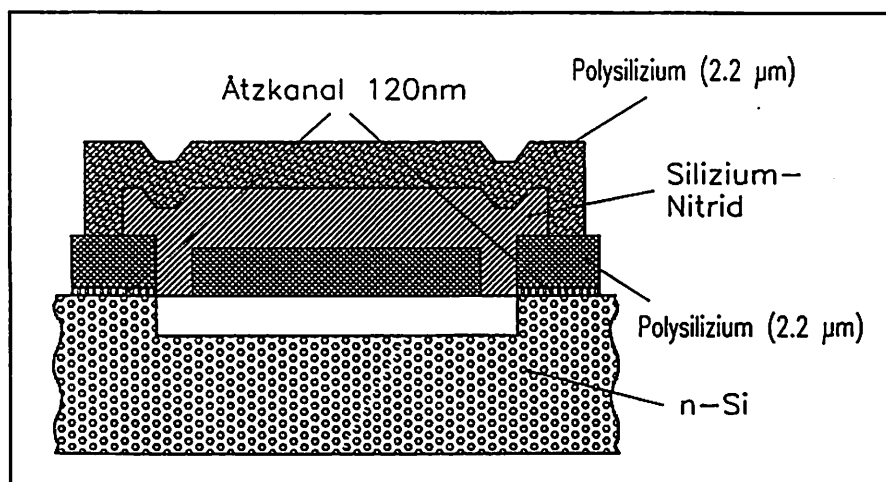


Bild 18. Micropackaging für Polysilizium-Resonatoren [19]

3.4.4 Magnetische Anregung

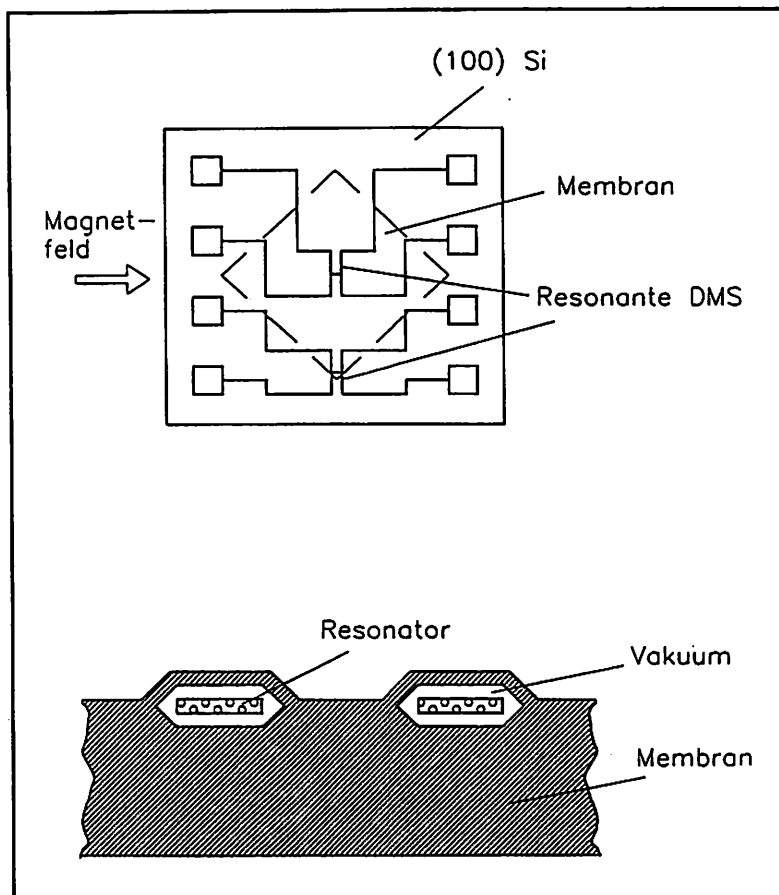


Bild 19. Resonanter Silizium-Drucksensor [21]

Zwei in eine Siliziummembran integrierte H-förmige resonante Dehnungsmeßstreifen (Bild 19) bilden die Basis eines neuartigen Drucksensors [21]. Die Dehnungsmeßstreifen, deren vier Enden mit der Membran verbunden sind, schwingen im Vakuum. Die Schwingung wird magnetisch mit Hilfe eines Permanentmagneten und eines Wechselstroms angeregt.

Der Herstellungsprozeß für die in die Membran integrierten Dehnungsmeßstreifen ist in Bild 20 skizziert. Die wichtigsten Schritte sind die selektive Abscheidung epitaktischer p^+ - und p^{++} -Schichten sowie das selektive elektrochemische Freiatzen der Resonatorstrukturen in einer $N_2H_4 \cdot H_2O$ -Lösung [22]. Mit einem Labormuster werden folgende Sensoreigenschaften erzielt: Güte ca. 50000, k-Faktor ($\Delta f/f/\epsilon$) ca. 3000, Temperaturkoeffizient ca. 40 ppm/K.

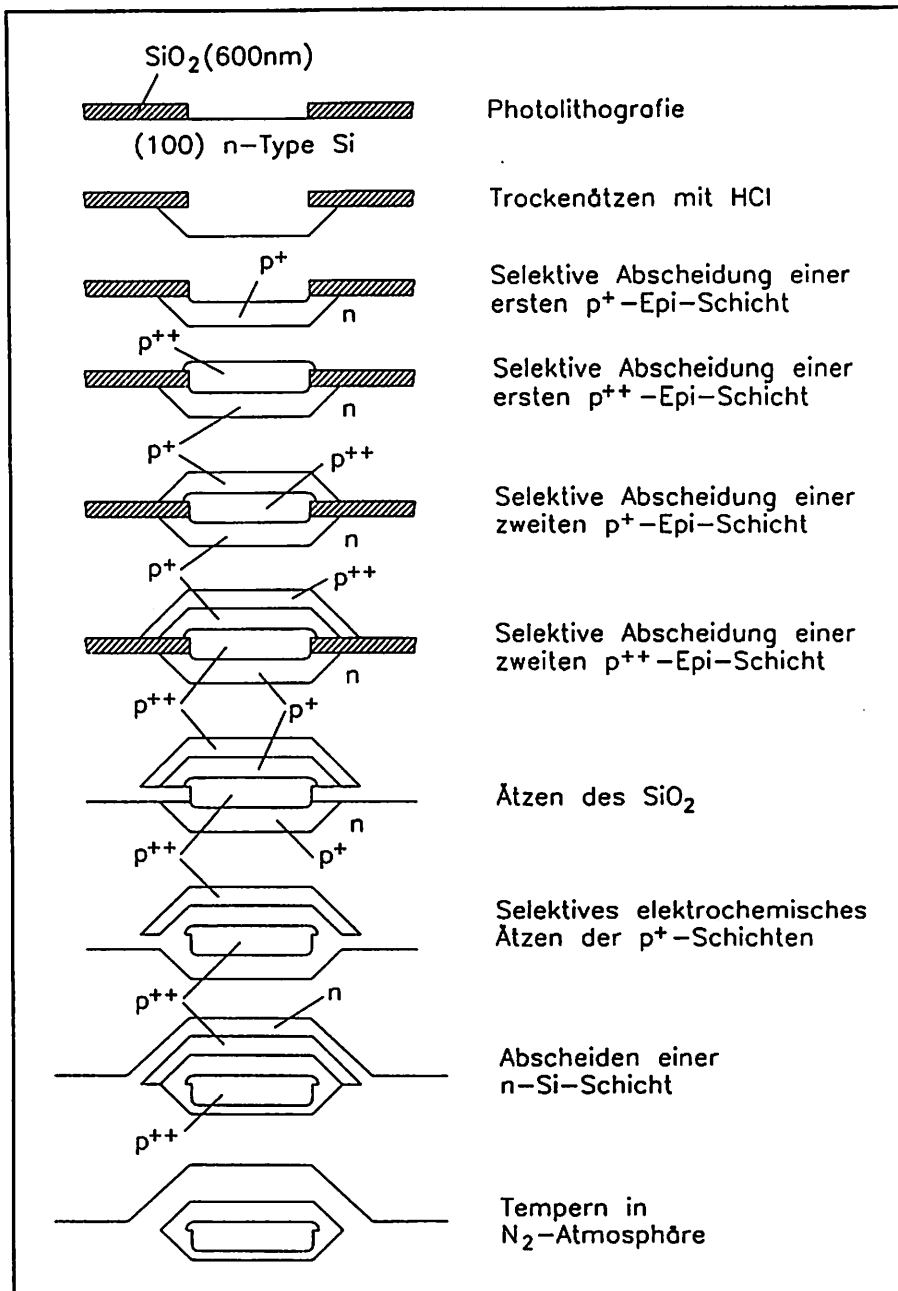


Bild 20. Prozeßschritte bei der Herstellung resonanter Dehnungsmeßstreifen [22]

Literatur

- [1] Tränkler, H.-R.: Signal Processing. In: T. Grandke; W.H. Ho (eds.): Sensors. Fundamentals and General Aspects. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft 1989, p.279
- [2] Büttgenbach, S.: Mikromechanik. Einführung in Technologie und Anwendungen. Stuttgart: Teubner 1991
- [3] Sugiyama, S.; Takigawa, M.; Igarashi, I.: Integrated Piezoresistive Pressure Sensor with Both Voltage and Frequency Output. Sensors and Actuators 4 (1983) 113
- [4] Reichl, H.; Hwang, H.J.; Riedel, H.: Frequency Analog Sensor Using the I²L Technique. Sensors and Actuators 4 (1983) 247
- [5] Neumeister, J.; Schuster, G.; Münch, W.v.: A Silicon Pressure Sensor Using MOS Ring Oscillators. Sensors and Actuators 7 (1985) 167
- [6] Chuang, S.S.: Force Sensor Using Double-Ended Tuning Fork Quartz Crystals. Proc. 37th Ann. Freq. Contr. Symp. 1983, p. 248
- [7] Dinger, R.J.: The Torsional Tuning Fork as a Temperature Sensor. Proc. 36th Ann. Freq. Contr. Symp. 1982, p. 265
- [8] Randin, J.P.; Züllig, F.: Relative Humidity Measurements Using a Coated Piezoelectric Quartz Crystal Sensor. Sensors and Actuators 11 (1987) 319
- [9] Vogel, R.F.: Dual Crystal Gas Density Sensor. Sensors and Actuators 5 (1984) 21
- [10] Staudte, J.H.: Subminiature Quartz Tuning Fork Resonator. Proc. 27th Ann. Freq. Contr. Symp. 1973, p. 50
- [11] Ueda, T.; Kohsaka, F.; Yamazaki, D.; Iino, T.: Quartz Crystal Micromechanical Devices. Proc. 3rd Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, Philadelphia 1985, p. 113
- [12] Joshi, S.G.: Surface Acoustic Wave Device for Measuring High Voltages. Rev. Sci. Instrum. 54 (1983) 1012
- [13] Wohltjen, H.: Surface Acoustic Wave Microsensors. Proc. 4th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators, Tokio 1987, p. 471
- [14] Sinha, B.K.: Elastic Waves in Crystals under a Bias. Ferroel. 41 (1982) 61.

- [15] Mullem, C.J.v.; Blom, F.R.; Fluitman, J.H.J.; Elwenspoek, M.: Piezoelectrically Driven Silicon Beam-Force Sensor. *Sensors and Actuators* A25-A27 (1991) 379
- [16] Bouwstra, S.; Legtenberg, B.; Tilmans, H.A.C., Elwenspoek, M.: Resonating Microbridge Mass Flow Sensor. *Sensors and Actuators* A21-A23 (1990) 332
- [17] Howe, R.T.; Muller, R.S.: Resonant-Microbridge Vapor Sensor. *IEEE Trans. Electron Devices* ED-33 (1986) 499
- [18] Chang, S.C.; Putty, M.W.; Hicks, D.B.; Li, C.H.; Howe, R.T.: Resonant-Bridge Two-Axis Microaccelerometer. *Sensors and Actuators* A21-A23 (1990) 342
- [19] Guckel, H.; Sniegowski, J.J.; Christenson, T.R.; Raissi, F.: The Application of Fine-Grained, Tensile Polysilicon to Mechanically Resonant Transducers. *Sensors and Actuators* A21-A23 (1990) 346
- [20] Sniegowski, J.J.; Guckel, H.; Christenson, T.R.: Performance Characteristics of Second Generation Polysilicon Resonating Beam Force Transducers. *Proc. IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head 1990*, p. 9
- [21] Ikeda, K.; Kuwayama, H.; Kobayashi, T.; Watanabe, T.; Nishikawa, T.; Yoshida, T.; Harada, K.: Silicon Pressure Sensor Integrates Resonant Strain Gauge on Diaphragm. *Sensors and Actuators* A21-A23 (1990) 146
- [22] Ikeda, K.; Kuwayama, H.; Kobayashi, T.; Watanabe, T.; Nishikawa, T.; Yoshida, T.; Harada, K.: Three-Dimensional Micromachining of Silicon Pressure Sensor Integrating Resonant Strain Gauge on Diaphragm. *Sensors and Actuators* A21-A23 (1990) 1007