

## 4 Resonante Quarz Drucksensoren

DR. S. DAGENBACH

W. HARTIG

MOTOMETER GMBH, LEONBERG

### 4.1 Verbundprojekts-Übersicht

#### 4.1.1 Zusammenfassung

Die vorteilhaften Eigenschaften von Quarz wie hervorragende Elastizität, sehr gute Langzeitstabilität, chemische Resistenz und vor allem sein piezoelektrisches Verhalten ermöglichen im Batchprozeß die kostengünstige Herstellung von Sensoren. Die Anzahl der notwendigen Prozeßschritte ist wesentlich geringer als bei vergleichbaren Siliziumsensoren.

Im Rahmen des Verbundvorhabens wurden Drucksensormembranen entwickelt, die durch Ätzen von Cr/Au-beschichteten Quarzscheiben im AT-Kristallschnitt derart strukturiert werden, daß bei einer Druckbeaufschlagung der Membran durch Ausnutzen des Kniehebel-effekts hohe mechanische Spannungen und somit ein hohes Nutzsignal entstehen. Die wegen des anisotropen Ätzverhaltens des Quarzes auftretenden Verzerrungen gegenüber dem Layout wurden durch Korrektur der Maske weitestgehend beseitigt. Die elektrische Schwingungsanregung und der Signalabgriff geschehen über beidseitige Cr/Au-Elektroden, die mit einem NdYAG-Laser auf einfache Weise strukturiert und in der Entwicklungsphase leicht modifiziert werden konnten.

Sowohl das mechanische als auch das piezoelektrische Verhalten wurde mit Hilfe der Finite Element Methode (FEM) simuliert und in mehreren Designschleifen optimiert. Die Ergebnisse der Simulation wurden jeweils in Zusammenarbeit mit dem Hahn-Schickard-Institut in Mustersensoren umgesetzt und meßtechnisch überprüft.

Zur Aufbau- und Verbindungstechnik wurden Technologien der Flüssigkristalltechnik (LCD) genutzt. Dort werden Gläser mit einer elektrisch leitfähigen und photolithografisch einfach

strukturierbaren Indium-Zinnoxid-(ITO)Beschichtung benutzt. Zur Verbindung zweier Gläser werden Kleberahmen mit eingelagerten Distanzhaltern (Spacern) verwendet. Beide Techniken wurden eingesetzt, um zum einen die dem Medium zugewandten Elektrodenflächen zu kontaktieren und zu anderen um den Quarzsensor auf einem Glasträger zu befestigen. Durch die im Kleberahmen eingelagerten Spacer kann darüberhinaus auf einfache Weise eine Überlastsicherung realisiert werden.

Die zum Projektabschluß vorliegenden Sensoren zeigen bei einem Nenndruck von ca. 2 bar eine Empfindlichkeit von 2500 Hz/bar sowie eine Linearitätsabweichung von 1,8 %. Die Nennfrequenz beträgt 36 kHz. Durch die im Rahmen des Projektes erarbeiteten Dimensionierungsgrundlagen können Gestaltungsregeln für andere Druckbereiche rasch aufgestellt werden.

#### 4.1.2 Projektdurchführung (Juli 1989 bis Dezember 1992)

Gegenüber der Vorhabenbeschreibung ergab sich im Projektverlauf folgende Änderungen.

- Die FEM Berechnungen zur Auslegung von druckempfindlichen Quarzmembranen mußten wesentlich intensiviert werden.
- Die bisher bekannten Anregearten für frequenzanaloge Quarz-Kraft-Sensoren ließen sich nicht unmittelbar auf einen Drucksensor übertragen. Deshalb mußte eine völlig neue Anregeart entwickelt werden.
- Die Bereitstellung der Quarztechnologie durch die Hahn-Schickard-Gesellschaft (HSG) war für MotoMeter eine unverzichtbare Voraussetzung. Die Planung und Durchführung aller praktischen Laborarbeiten, die zur MotoMeter-Drucksensorentwicklung anfielen, wurde von MotoMeter selbst am Hahn-Schickard-Institut (HSI) erledigt.
- Zwei am Projekt beteiligte Mitarbeiter im Bereich der Elektronikentwicklung schieden zur Projektmitte aus der Firma aus.
- Mitte 92 wechselte die Projektleitung von Dr. J.Erlewein an Dr. S.Dagenbach.
- Durch all diese Maßnahmen konnte die geplante intelligente Auswerteelektronik im Projektzeitraum nicht mehr realisiert werden.

#### **4.1.3 Verwendete wissenschaftl. und techn. Methoden**

- Finite Element Methoden Berechnung
- Photolithographische Maskierung
- Naßchemisches Quarzätzen in HF-Lösung
- Elektrodenstrukturierung der Goldbeschichtung mittels Laser, welcher über CAD-Daten angesteuert wird
- Packagingmethoden aus der Flüssigkristalltechnik
- Oszillatorschaltung zur Schwingungsanregung

#### **4.1.4 Erzieltes Ergebnis und sein Nutzen. (Wirtschaftliche Verwertbarkeit)**

- Biegeschwingungsanregung von Quarzmembranen (Quarzschnitt und Elektrodendesign)
- Spezielle Quarzmembranform für gute Druckempfindlichkeit (z.B. Musterdaten: 1500Hz Frequenzshift bei 600mbar Belastung und einer Grundfrequenz von 36kHz)
- Vertiefte Kenntnisse über das Ätzverhalten von AT-Quarz; Quarzätztechnologie
- Aufbau und Verbindungstechnik für Mustersensor
- Kleiner Linearitätsfehler des Rohsignals ( $< 1,8 \%$ )
- kostengünstige Batchherstellung
- keine großtechnischen Produktionsanlagen erforderlich (wie z.B. Sputteranlage)
- einfache Herstellung, da kein zusätzlicher Prozeßschritt zum Aufbringen einer piezoelektrischen Schicht (wie z.B. ZnO) erforderlich ist.

#### **4.1.5 Benutzte Dokumentationsdienste**

- HSI Infos
- Patentrecherche am Landesgewerbeamt Stuttgart

## 4.2 Gestaltung einer druckempfindlichen Membranform

### 4.2.1 Vorgaben

- Goldbeschichtete Quarz-Wafer als aktives Sensorelementmaterial
- Die Dicke des Wafers von  $125\ \mu\text{m}$  bis  $200\ \mu\text{m}$  bestimmt den Elektrodenabstand. Da der Quarz zur Anregung dieses Elektrodenpaar braucht, kann die Membran nicht großflächig dünnegeätzt werden, weil in diesem Fall eine Elektrode entfernt werden müßte.
- möglichst "kleiner" Membrandurchmesser ( $< 6\text{mm}$ )
- Membranstrukturierung durch naßchemisches Ätzen, da diese Technologie am HSI schon verfügbar war.

### 4.2.2 Definition der Druckempfindlichkeit

Ein Teilziel der Entwicklung ist das Erreichen einer möglichst großen Resonanzfrequenzänderung bezogen auf die Grundfrequenz bei angelegter Druckbelastung. Der sich ergebende Wert wird in  $\%/N$  oder in  $\%/bar$  angegeben. Um die Empfindlichkeit von ganz verschiedenartigen Resonatoren miteinander vergleichen zu können, sollte die Frequenzänderung nur auf die maximal mögliche Belastung bezogen werden. Aussagen wie "70 kHz Frequenzänderung je N" sind sonst irreführend, wenn die maximal anlegbare Kraft z.B. nur 0,15 N beträgt!

### 4.2.3 Empfindlichkeitsvergleich bekannter Sensoren

Aus Tabelle 4.1 kann man verschiedene Zusammenhänge ablesen:

- Am Anfang unserer Entwicklung stand die Empfindlichkeit von 1200 Hz bei einer Grundfrequenz von 48 kHz des ETA-Zugsensors als Sollziel im Raum.
- Das Prinzip des ETA-Drucksensors, der auf die erhöhte Dichte der Luft reagiert, war für größere Frequenzshifts nicht geeignet.
- Die quadratische Siliziummembran hat einen sehr großen Frequenzshift (9000Hz). Dieser kommt durch das sehr große Längen/Dicke Verhältnis ( $9600/25=384$ ) und der damit verbundenen großen Auslenkung bei Belastung zustande.
- Bei einer vergleichbaren Membran aus Quarz ist dieses Verhältnis hingegen klein (wegen der rel. großen vorgegebene Dicke von  $125\ \mu\text{m}$ ). Dadurch wird die Membran steifer, die Auslenkung und somit auch die Frequenzänderung geringer. Zudem hat Quarz durch seine

kleineren E-Module eine kleinere Steifigkeit was bei sonst gleicher Geometrie die Frequenzänderung ebenfalls vermindert.

- Würde der Durchmesser dieser unstrukturierte Quarzmembran nun auf 6000  $\mu\text{m}$  verringert werden, ergibt sich bei maximaler Druckbelastung nur noch eine Frequenzänderung von ca. 700 Hz.
- Berücksichtigt man zusätzlich noch die erforderlichen Sicherheiten, so ist der zu erwartende Frequenzshift bei einer unstrukturierten Quarzmembran zu gering.

Tabelle 4.1 Sensorenvergleich

Typ	Werkstoff und Hersteller	Dicke in $\mu\text{m}$	Durch- messer in $\mu\text{m}$	Grund- frequenz in kHz	max. Frequenz- änderung in Hz
Zugsensor Stimmgabel	Quarz ETA	125	5200 (Länge)	48	1200-1500
Drucksensor Stimmgabel	Quarz ETA			28	100
Quadratische Membran	Si mit ZnO	25	9600	5	9000
unstrukturierte Membran	Quarz (FEM- Berechnung)	125	9600	16	1500-1800
unstrukturierte- Membran	Quarz (FEM- Berechnung)	125	6000	38	700

#### 4.2.4 Grundprinzip

Eine druckabhängige Frequenzänderung resultiert im wesentlichen aus der Steifigkeitsänderung während der Druckbelastung. Bei einer dünnen Membran treten unter Druckbelastung große Verformungen und somit große Steifigkeitsänderungen auf. Die relativ dicke Quarzmembran muß derart strukturiert werden, daß sich auch bei kleineren Verformungen große Zug- bzw. Druckspannungen in der Membran ergeben.

Bild 4.1 zeigt das verwendete "Kniehebel"-Prinzip. Die unstrukturierte Membran wird bei Druckbelastung in der "neutralen Faser" gedehnt, wobei sich die Frequenz unabhängig von der Belastungsrichtung erhöht.

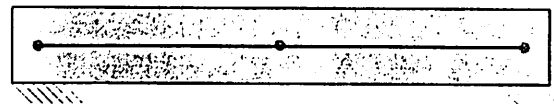
Ein eingezätzter Kreisring auf der Membranunterseite koppelt den unstrukturierten Membranteil "außermittig" an den Rand an (siehe Seitenansicht). Dadurch ergibt sich schon bei einer geringen Druckbelastung auf die Membran durch einen "Kniehebelfeffekt" (die Membranmitte wird dabei geometrisch durch einen sehr flachen Winkel an den Rand angekoppelt) eine große mechanische Spannung an den Membranrändern. Diese wiederum bewirkt die gewünschte Resonanzfrequenzverschiebung.

Eine Druckbeaufschlagung von der ringförmig strukturierten Seite ergibt eine Frequenzerhöhung, im anderen Fall ergibt sich eine Verringerung.

Die Seitenwände der überwiegend V-förmigen Ätzgrabenwinkel können dabei relativ beliebige Winkelwerte annehmen. Entscheidend für die Empfindlichkeit ist nur die Größe und Position des dünnen Steges über den die Membran an den Rand angekoppelt wird.

Um die erforderliche Anregeenergie zu verringern, kann auf der noch unstrukturierten Membranseite in der Mitte ein balkenförmiger Graben eingezätzt werden, der die Membran-

Unstrukturierte Quarzmembran



Einseitig strukturierte Membran



Beidseitig strukturierte Membran

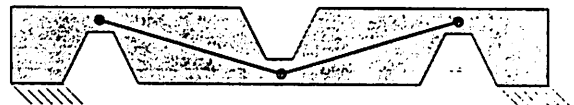


Bild 4.1 Membranstrukturierung

steifigkeit verringert. Allerdings erhöht sich mit dieser Maßnahme der Fertigungsaufwand.

Zu erwähnen wäre noch, daß diese "Kniehebelstruktur" das Ergebnis vielfältigster Untersuchungen bezüglich möglicher Membranformen darstellt. Dabei wurden folgende Punkte betrachtet, verändert bzw. miteinander kombiniert.

- Schwingungsform (Biegung, Längsdehnung, Scherung, ...)
- Nur Teilbereiche einer Membran zu Schwingungen anregen
- Betrieb im Grundmode oder Oberschwingung
- Einspannung
- Grabenform (Kreis, Ovalform, Quadrat, Rechteck)
- Einseitiger oder beidseitiger Graben
- Geometrische Abmessungen von Grabentiefe, Breite und Durchmesser

#### 4.2.5 Optimierung durch FEM Simulation

Zur Dimensionierung der Ätzstruktur wurden bei MotoMeter 2D-FEM-Modelle erstellt, deren Konturen einem rotationssymmetrischen Körper entsprachen. Dieses Vorgehen verringert Rechenzeit und Modellierungsaufwand. Bei der Auswertung der Ergebnisse dieser strukturellen und dynamischen Simulationen wurden unter anderem folgende Trends deutlich:

- Je schmaler der Steg ist, desto größer ist die Empfindlichkeit, aber auch desto schwieriger ist die Montage.
- Je kleiner der Radius des Ätzgrabenrings, desto größer die Empfindlichkeit, aber desto höher die Grundfrequenz. Da jedoch aber nun  $(\Delta f) / f$  ausgewertet wird, sollte man mit dem Durchmesser nicht zu klein werden. Zudem verringert sich die Elektrodenfläche und erhöht sich die MembranstEIFigkeit, was wiederum die Anregung erschwert.

Durch die Variation der verschiedenen geometrischen Formen und Abmessungen wurde eine Struktur ermittelt (bezogen auf einen rotationssymmetrischen Schnitt), die gekennzeichnet ist durch eine Steglänge von 50  $\mu\text{m}$ , Stegdicke von 25  $\mu\text{m}$ , Kreisringdurchmesser von 4200  $\mu\text{m}$ , Quarzwaferdicke von 125  $\mu\text{m}$  und einem Frequenzshift von 3400Hz bei einer Grundfrequenz von 50 kHz.

#### 4.2.6 Ätzgrabenform in der Ebene

In der Plattenebene könnte dieser runde Ätzgraben nun auch in 2 parallelen Reihen (a), als Rechteck (c) oder als Quadrat (b) ausgeführt werden. Bild 4.2 zeigt schematisch die möglichen Formen, wobei der hellgeschattierte Balken die Einätzung auf der Rückseite markiert. Die 3D-FEM-Simulationen ergaben, daß eine volle Umrandung der Membran durch einen quadratischen Graben die höchste Druckempfindlichkeit besitzt. Verwendet man eine kreisförmige Grabenstruktur, so vermeidet man die Spannungsspitzen in den Ecken (d).

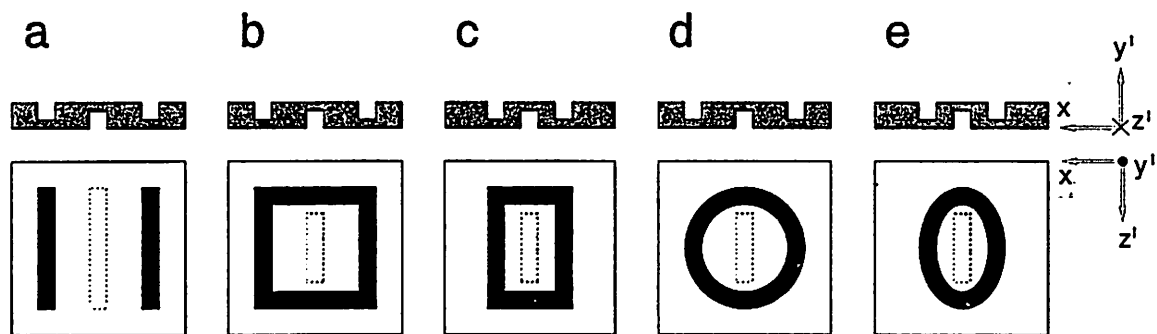


Bild 4.2 Verschiedene Membranformen

Die Ätzgrabengestaltung richtet sich nicht nur nach der max. Empfindlichkeit, sondern auch nach einer günstigen Schwingungsanregbarkeit. Deshalb wird im folgenden ein kleiner Vorgriff auf Kapitel 4.3 gemacht. Der erwähnte Schereffekt wird dort eingehend erläutert. Die durch die Elektroden erzeugte Scherung in X-Richtung bewirkt bei der Anregung eine Durchbiegung der Membran in Y'-Richtung (Plattennormale). Da in der dazu senkrecht stehenden Z'-Richtung keine Scherung erfolgt, wird aus dieser Richtung die Membranbiegung nicht unterstützt. Je steifer die Membran in dieser Richtung eingespannt ist, desto mehr wird die aus der X-Richtung erzeugte Auslenkung unterdrückt bzw. behindert. Ist die Membran in Z'-Richtung jedoch weicher eingespannt, so wird die Kopplung zwischen Anregung an den Elektroden und Auslenkung der Membran erhöht. Diese weichere Einspannung erhält man z.B. durch das Verlängern des Kreises in dieser Z'-Richtung zu einer Ovalform (e).

Bei der 2D-Simulation wurde von einem durchgehenden Ätzring ausgegangen. Um die Elektroden auf der Membranmitte ansteuern zu können, muß das Signal von dem Elementrand in die Membranmitte gebracht werden. Dazu bieten sich 2 Möglichkeiten an.



- Bondverbindung
- Ätzringunterbrechung

Für die ersten Muster wurden beide Übergänge realisiert, wobei die Bondverbindung mangels Bonder mit Leitkleber (zufriedenstellend) improvisiert werden konnte. Eine Bondverbindung hat faktisch keinen Einfluß auf die Schwingung, stellt aber einen zusätzlichen Fertigungsschritt dar und erschwert die Endmontage. Die Ätzringunterbrechung beeinflußt hingegen die Schwingungsgüte, die Frequenz und die Anregbarkeit, da diese Ätzunterbrechung die ursprüngliche biegesteifere Dicke des Wafers hat.

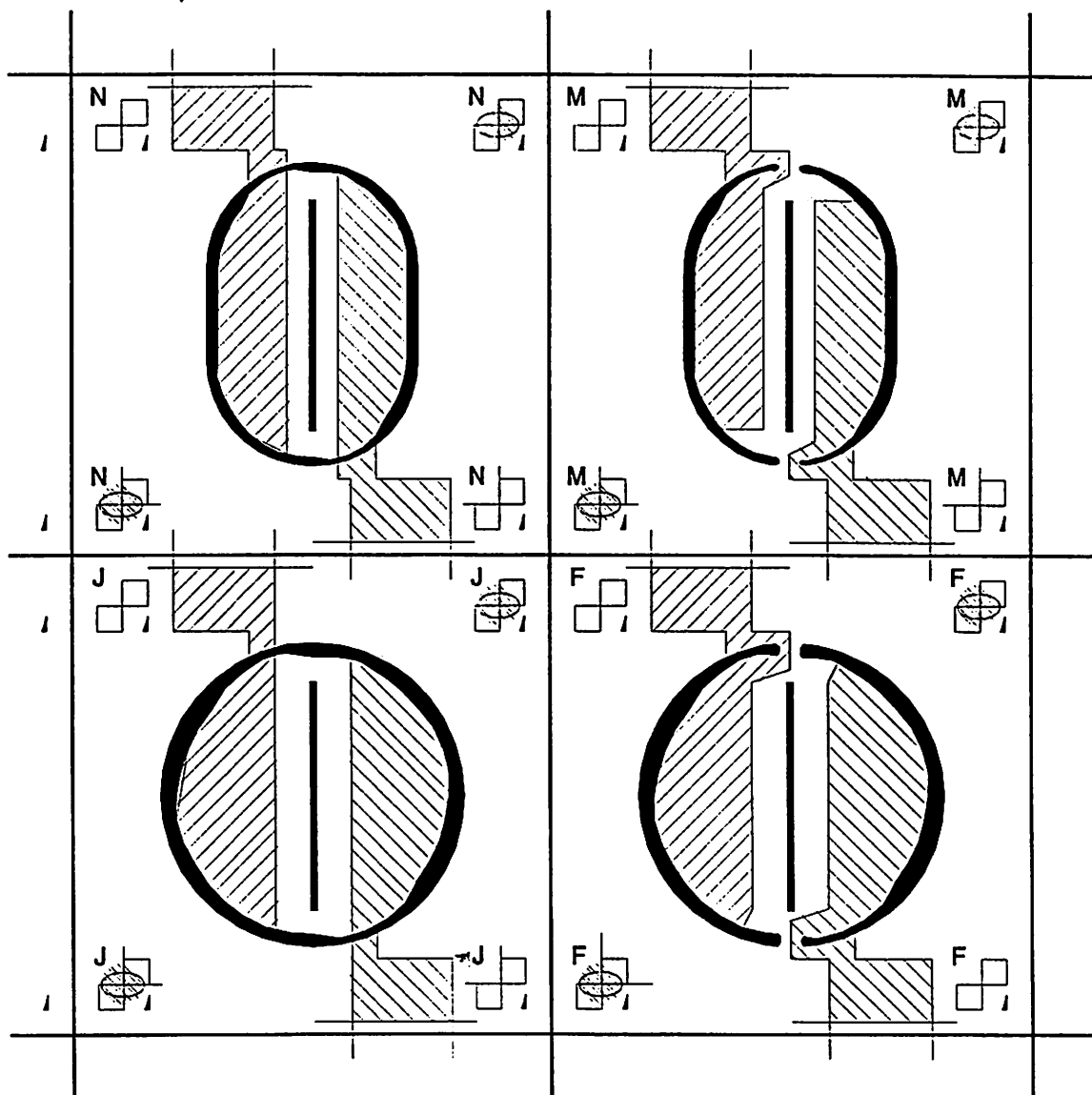


Bild 4.3 Grundformvarianten mit Elektroden

### 4.3 Schwingungsanregung von Quarzmembranen

#### 4.3.1 Allgemeines Vorgehen bei einer frequenzanalogen Quarz-Sensorentwicklung

##### 4.3.1.1 Welche Grundform hat das Sensorelement?

- Balken, Stab
- Stimmgabel, Kreuzform
- Membran
- Ist diese Form wirtschaftlich herstellbar? (bohren, sägen, ätzen,...)

##### 4.3.1.2 Welche Schwingungsform und welcher Mode ist belastungsabhängig?

- Druck, Kraft, Temperatur
- Grundmode, Erste Oberwelle, Zweite Oberwelle
- Biegeschwingung, Flächendehnung, Scheerschwingung, Torsionsschwingung

##### 4.3.1.3 Welche Teilbereichsverformung wird notwendig?

Wenn man die erforderliche (also belastungsabhängige) Schwingungsform ermittelt hat, muß untersucht werden, aus welchen Teilbereichsverformungen sich diese zusammensetzt. Damit man z.B. die in Bild 4.4 dargestellte Grundbiegeschwingung erhält, kann man entweder die Teilbereiche gegensinnig scheren (a) oder gegensinnig dehnen bzw. stauchen (b). In beiden Fällen unterscheidet sich die Art der Teilbereichsverformung von der sich ergebenden Gesamtverformung.

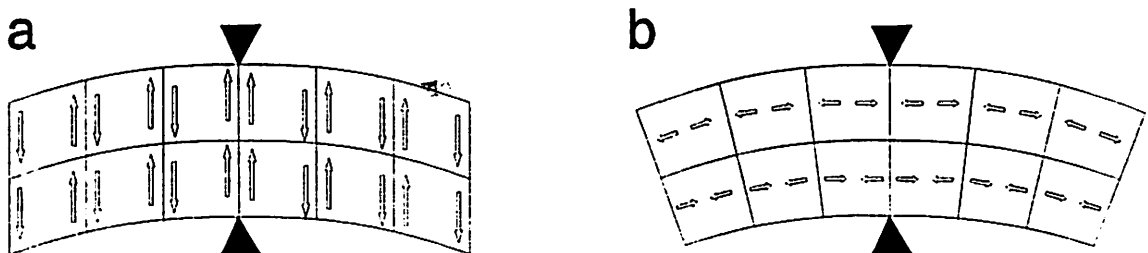


Bild 4.4 Auswirkung der Teilbereichsverformungen

#### 4.3.1.4 An welchen Stellen erfolgt die Einspannung

Als Beispiel sei eine Membran gegeben, die zur Grundbiegeschwingung angeregt werden soll, und deren Teilbereiche sich alle gleichzeitig stauchen bzw. dehnen (Bild 4.5). Man betrachte nun diese Membran im Querschnitt. Erfolgt die Einspannung am Membranrand mittig (c), erfolgt keine Biegung aus der Membranebene heraus.

Erfolgt die Einspannung am Membranrand außermittig (d), so wird durch die Exzentrizität eine Biegung erzwungen.

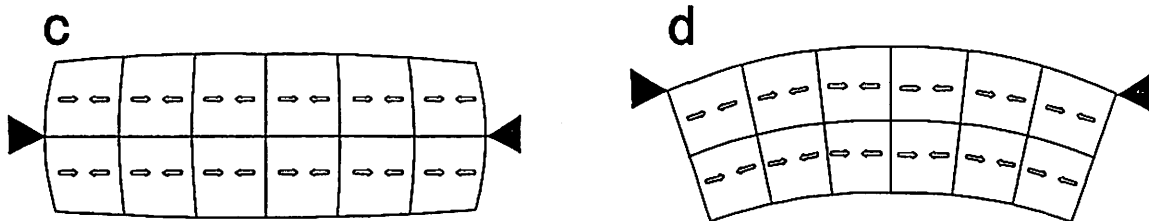


Bild 4.5 Einspannungs-Auswirkungen

#### 4.3.1.5 Welche Elektrodenanordnung erzwingt diese Teilbereichsdeformation?

Diese Frage muß für verschiedene Quarschnitte beantwortet werden. Bei der Auswahl des Quarschnitts ist auch dessen Ätzrate, Temperaturverhalten, Preis und verfügbare Wafergröße zu berücksichtigen.

Für die Auswahl der möglichen Quarschnitte und Elektrodenanordnung läßt sich die in Bild 4.6 dargestellte Matrix vorteilhaft einsetzen.

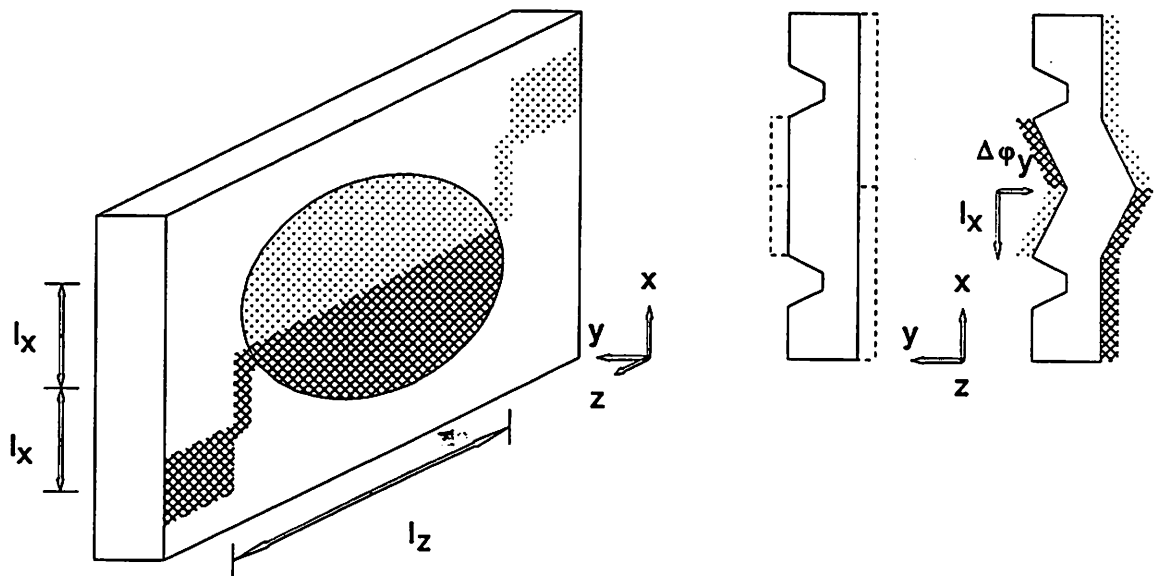
#### 4.3.2 Allgemeine Darstellung des piezoelektrischen Verhaltens im Quarz

Die grundsätzlichen Zusammenhänge lauten:

$$\text{El.Feldstärke} * \text{piezoelektr.Konstante} = \text{Verschiebung} = E * d = \epsilon$$

$$\text{Verschiebung} = \frac{\text{Längenänderung}}{\text{Ausgangslänge}} = \epsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

$E_x$	$E_y$	$E_z$	El. Feldstärke in $10^4 \text{ V/m} = 1\text{V}/100\mu\text{m}$		
*					
$d_{11}$ 2,3	0	0	$\epsilon_{xx}$	$\frac{\Delta l_x}{l_x}$	
.....			.....	.....	.....
$-d_{11}$ -2,3	0	0	$\epsilon_{yy}$	$\frac{\Delta l_y}{l_y}$	
.....			.....	.....	.....
0	0	0	$\epsilon_{zz}$	$\frac{\Delta l_z}{l_z}$	
.....			= .....	= .....	.....
$d_{14}$ 0,67	0	0	$\gamma_{yz}$	$\frac{\Delta \varphi_y}{l_z} = \frac{\Delta \varphi_z}{l_y}$	
.....			.....	.....	.....
0	$-d_{14}$ -0,67	0	$\gamma_{xz}$ -0,67	$\frac{\Delta \varphi_x}{l_z} = \frac{\Delta \varphi_z}{l_x}$	$\frac{40 \cdot 10^{-6}}{6000} = \frac{13 \cdot 10^{-6}}{2000}$
.....			.....	.....	.....
0	$-2d_{11}$ -4,6	0	$\gamma_{xy}$ -4,6	$\frac{\Delta \varphi_x}{l_y} = \frac{\Delta \varphi_y}{l_x}$	$\frac{6 \cdot 10^{-6}}{125} = \frac{92 \cdot 10^{-6}}{2000}$
piezoel. Koef. in $10^{-12} \text{ m/V}$			Deformation in $10^{-8}$	Längenänderung/Gesamtlänge in $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	

Bild 4.6 Piezoel. Schwing.anregung im MM Drucksensor ( $E \cdot d = \epsilon = \Delta l/l$ )

Die Matrizenschreibweise macht die globalen richtungsmäßigen Zusammenhänge deutlich, die zwischen der Anregung (El.Feld) und der Auswirkung (Verschiebung) bestehen. Sie zeigt, daß sich bei einem angelegten Feld mit X- bzw Y-Komponente jeweils in mehreren unterschiedlichen Richtungen eine Verschiebung im Quarz ergibt. Es tritt also in der Praxis - im Gegensatz zur üblichen Lehrbuchdarstellung - kein reiner Longitudinaleffekt oder Schubeffekt in einer Richtung auf, sondern es wird eine Verschiebung erzeugt, die sich aus mehreren Einzelverschiebungen zusammensetzt.

Das Ziel bei einer frequenzanalogen Sensorentwicklung ist nun, eine durch den Piezoeffekt verursachte Auslenkung zu erzwingen, die der gewünschten Eigenmodeform entspricht und deren Amplitude (also  $\Delta l$ ) dabei so groß wie möglich wird. Betrachtet man die Matrix, so erkennt man zwei Einflußmöglichkeiten, dieses Ziel zu erreichen.

1. Man bringt die Elektroden am Quarzkristall so an, daß die sich ergebende Feldstärke in solch eine Richtung weist, in der auch die betragsmäßig großen piezoel.Konstanten wirken. Daraus resultieren dann große Verschiebungen.
2. Damit sich aus dieser Verschiebung ( $\epsilon$ ) auch eine große Längenänderung ( $\Delta l$ ) ergibt, muß dazu die Ausgangslänge ( $l$ ) groß sein, und die Einspannung entsprechend gewählt werden.

Mit der vorgestellten Matrix kann nun sehr schnell abgeschätzt werden, wie groß die statisch erzwungene Auslenkung bei einer bestimmten Geometrie und einer bestimmten Feldrichtung sein wird. Die jeweilige bestimmte Geometrie besitzt eine mechanische Resonanzfrequenz. Wird der Quarz mit einem Feld dieser Frequenz angeregt, so erhöht sich die Amplitude im Resonanzfall um ein Vielfaches.

In Bild 4.6 ist als zahlenmäßiges Beispiel der MotoMeter Drucksensor in einer Vorläuferversion dargestellt.

### 4.3.3 Kristallorientierungen und deren Biegeschwingungsanregbarkeit

Im folgenden werden die wichtigsten Quarzschnitte aufgeführt, die sich für eine Membran-Grundswingungsanregung eignen.

#### 4.3.3.1 X-Schnitt: (alternativ dazu auch der GT-Schnitt)

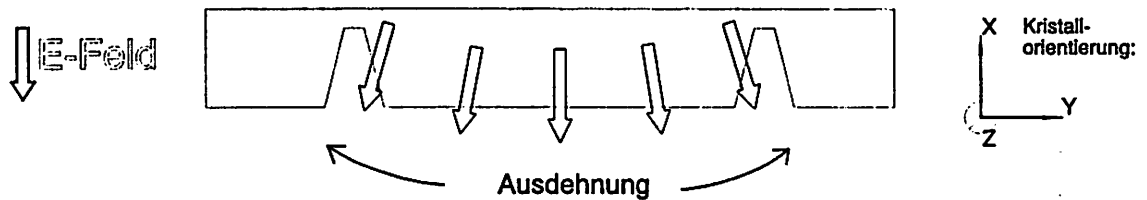


Bild 4.7 Biegeschwingungsanregung im X-Schnitt

Ein senkrechtes E-Feld in X-Richtung durch die Membran bewirkt aufgrund des piezoelektrischen Effekts eine Dehnung in der Membranebene in Y-Richtung. Da diese Membran nun außermittig am Rand festgehalten ist, dehnt sich der obere Teil der Membran nicht so stark aus wie der untere. Daraus entsteht eine Membrandurchbiegung nach unten.

Vorteil: Ganzflächige einfache Elektroden

Nachteile: X-Schnitt hat geringe Ätzrate und ist ein teurer Sonderschnitt

#### 4.3.3.2 Y-Schnitt:

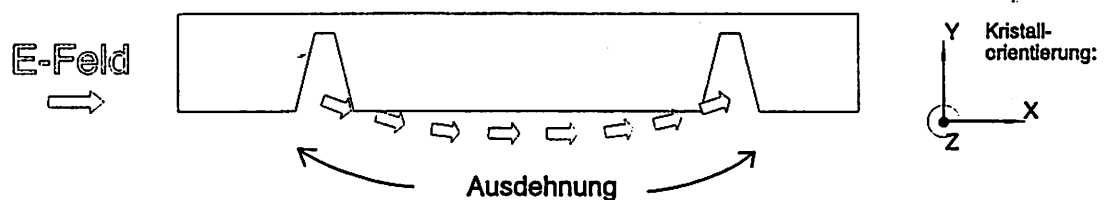


Bild 4.8 Biegeschwingungsanregung im Y-Schnitt

Ein Elektrodenstreifenmuster erzeugt in der unteren Hälfte der Membranebene ein E-Feld in X-Richtung. Dieses E-Feld bewirkt durch den piezoelektr. Effekt (in dieser unteren Membranebenenhälfte) eine Ausdehnung in gleicher Richtung. Aus dieser einseitigen Ausdehnung und der außermittigen Einspannung des Randbereiches resultiert ebenfalls eine Membrandurchbiegung.

Nachteile: geringe Ätzrate; Sonderschnitt; teuer; aufwendiges Elektrodenmuster; geringer Wirkungsgrad des Piezoeffekts

Das dazugehörige Elektrodenmuster für eine quadratische Membran ist in Bild 4.9 dargestellt.

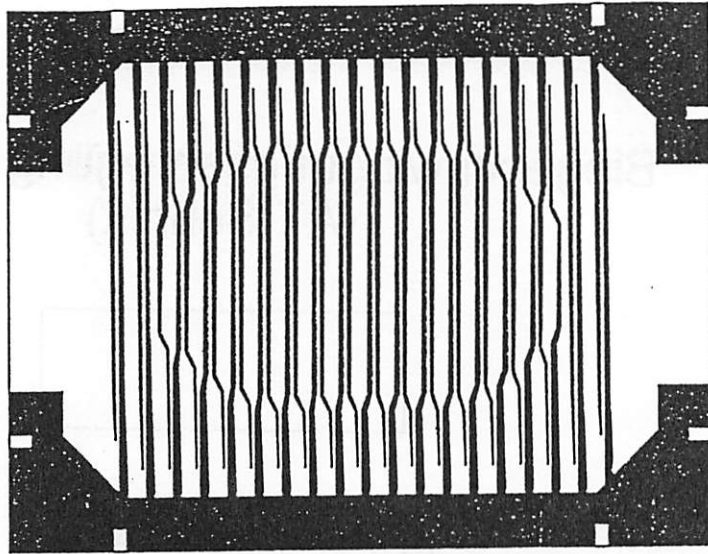


Bild 4.9 Elektrodenmuster für Y-Schnitt

#### 4.3.3.3 Z-Schnitt:

Berücksichtigt man die volle Steifigkeitsmatrix des Quarzes, so stellt man fest, daß eine durch den piezoelektrischen Effekt erzeugte Dehnung in der X-Richtung durch eine gleichzeitig erzeugte Stauchung in der Y Richtung kompensiert wird.

Deshalb ist der Z-Schnitt, der vorteilhaft die größten Ätzraten besitzt, für eine Membran-Biegeanregung durch den piezoelektrischen Effekt nicht geeignet.

#### 4.3.3.4 Biegeschwingungsanregung im AT-Schnitt

Ein AT-Quarzschnitt wird gewöhnlich als Scherschwinger eingesetzt. Zu dessen Anregung ist nur ein Elektrodenpaar nötig. Wird nun auf der Membran ein zweites Elektrodenpaar angebracht, das entgegengesetzt gepolt ist, so ergeben sich durch den piezoelektrischen Effekt zwei gegenläufige Scherbewegungen, die bei geeigneter Einspannung zu einer Durchbiegung der Plattenmitte führen (Bild 4.10).

- Vorteile:
- gängiger Quarzschnitt, in quadratischen 1.5" Blanks erhältlich.
  - AT-Schnitt hat die zweitgrößte Ätzrate aller Schnitte
  - einfache Elektrodenform (mit Laser realisierbar)
  - keine doppelseitige Photolithographie notwendig
  - AT-Schnitt hat günstiges Temperaturverhalten

## Biegeschwingungsanregung im Quarz (AT-Schnitt)

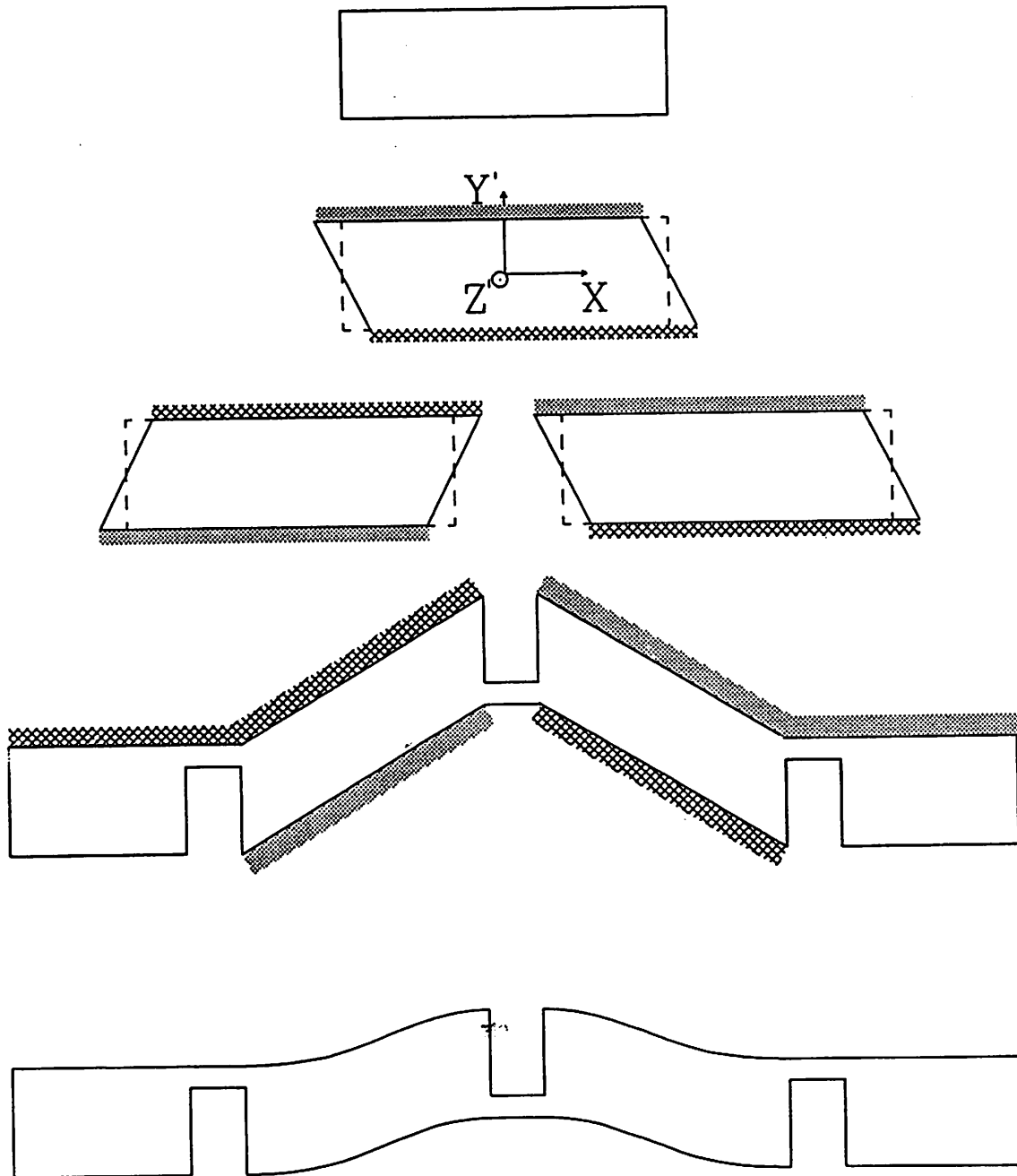


Bild 4.10 Anregungsprinzip im AT-Quarz



#### 4.4 Technologie

Bild 4.11 zeigt die Quarz- und Elektrodenstrukturierung am Quarzwafer in einer Übersicht.

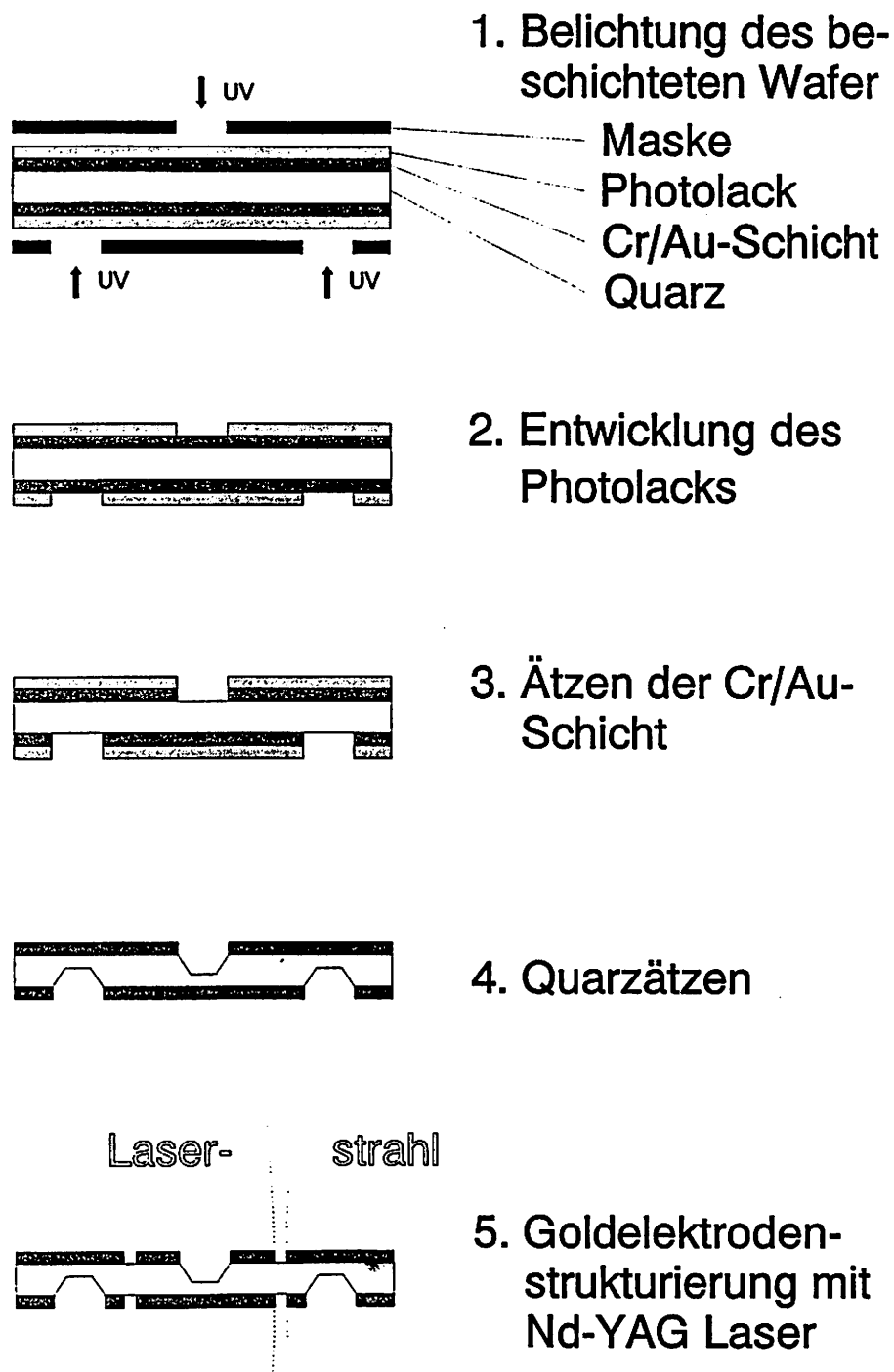


Bild 4.11 Fertigungsschritte am Quarzwafer

#### 4.4.1 Maskenherstellung

- Layout mit einfachem CAD Programm erstellt
- Erzeugen eines Plots
- Photoabzug auf Lithographiefilm
- 1:10 Verkleinerung auf High-Resolution-Plate. Diese wird als Maske im Maskaligner verwendet.

#### 4.4.2 Testlayout "FAS4"

In diesem Layout wurden verschiedene Teststrukturen (Bild 4.11) untergebracht.

##### 4.4.2.1 Justierhilfen für Laser

Der Wafer ist in 16 Felder unterteilt. Jedes Feld (Sensorelement) erhielt in allen vier Ecken eine Justiermarke, die aus zwei aneinandergrenzenden Quadraten besteht. Beim Beginn der Laserstrukturierung müssen dann nur noch von Hand zwei diagonalliegende Ecken angefahren werden. Der Laser errechnet sich dann daraus selbst die Mitte des Elementes und die einzelnen Positionen für seine Schnittbewegung.

##### 4.4.2.2 Flatzeichen und Element-Kennbuchstaben

Jedes der 16 Elemente erhält einen eigenen Kennbuchstaben, damit man ihnen nach dem Trennen der Elemente noch die alte Position auf dem Wafer zuordnen kann. Dieser Kennbuchstabe ist gegenüber dem Flatzeichen untergebracht. Das spitzwinklige Dreieck unter dem einen Quadrat soll die Orientierung des Elementes zum Gesamtwufer darstellen. Die schräge Seite hat dabei die gleiche Orientierung wie der Flat an der Waferaußenseite.

##### 4.4.2.3 Maßbalken zur Tiefenbestimmung

Da beim naßchemischen Quarzätzen auf Zeit geätzt wird, ist es ratsam, nach einer bestimmten Zeit den Ätzvorgang zu unterbrechen, um nachzuprüfen, ob die erwartete Ätzrate auch tatsächlich vorhanden ist, oder ob durch irgend welche Umstände (Sättigung der Ätzlösung, Verunreinigung durch Resist oder Cr/Au, Temperaturschwankung, Alterung...) Abweichungen eingetreten sind. Mit den im folgenden beschriebenen Tiefenbestimmungsbalken kann man dies schnell und einfach feststellen.

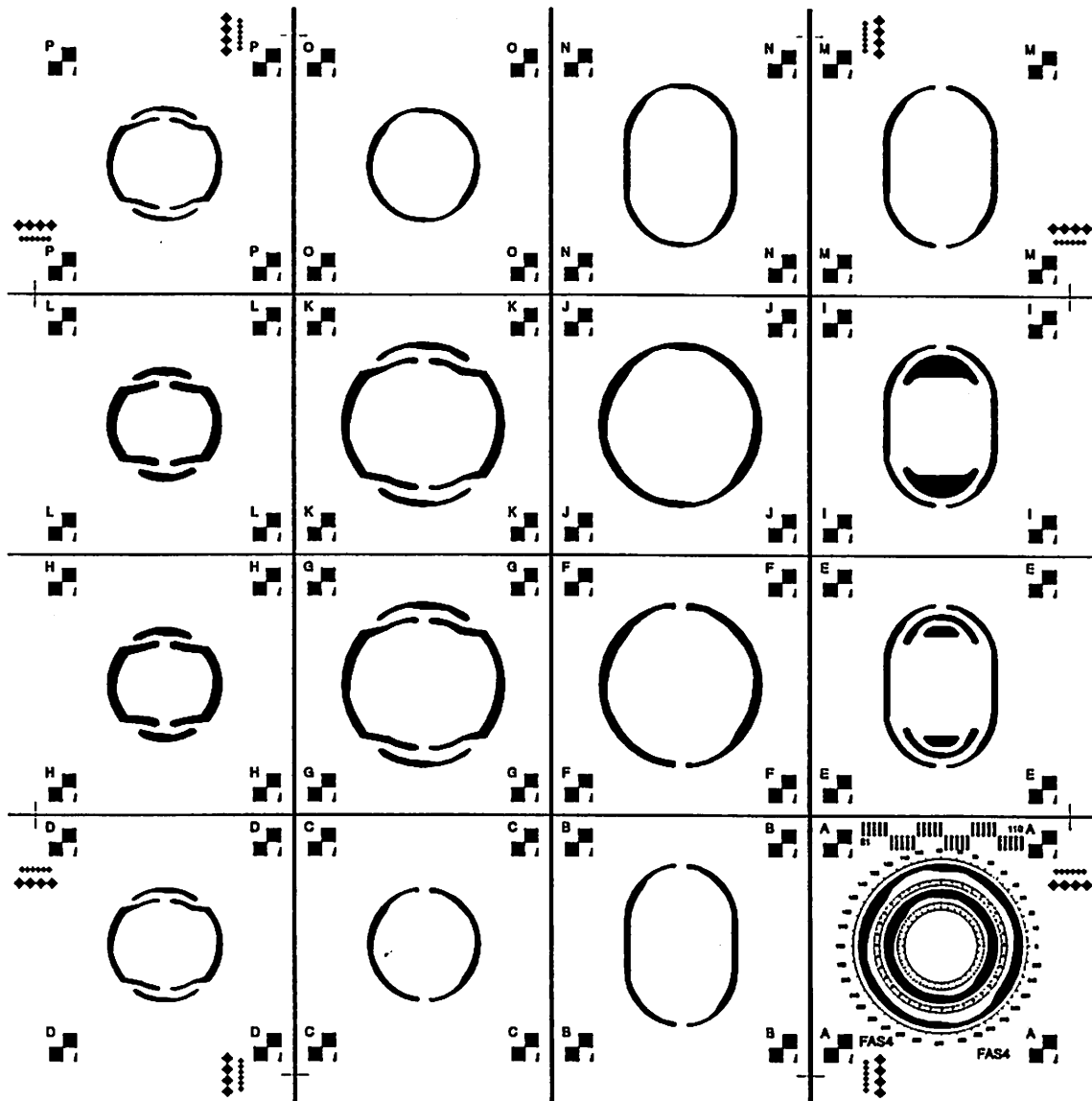


Bild 4.12 Layout der Testmaske FAS4

Wird auf der Maske ein länglicher Balken senkrecht zur X-Richtung angebracht, so wird beim AT-Quarz in dessen Breitenrichtung ein V-Graben eingätzt. Zu Beginn der Ätzung ist der Boden des V-Grabens so breit wie die Breite des Rechtecks. Je tiefer der Graben wird, desto schmaler wird der Ätzgrund, bis er schließlich zu einem dünnen Strich wird. Durch die seitlichen Ätzstoppebenen, die sich in diesem Strich berühren, kann hier nicht bzw nur sehr langsam weiter geätzt werden. Es besteht also ein Zusammenhang zwischen der Rechteckbreite und der Äztiefe bei der nur noch ein Strich als Ätzgrund übrig bleibt.

Bringt man nun auf einen Blank eine Schar verschieden breiter Rechtecke (deren Maße bezeichnet sind), so kann anhand des Rechteckes, dessen Ätzgrund zuletzt zu einem Strich geworden ist über die experimentell ermittelten Äzwinkel auf die Äztiefe und über die verstrichene Zeit auf die aktuelle Ätzrate zurückgeschlossen werden. Daraus kann dann wiederum die noch verbleibende Ätzzeit berechnet werden, um so die gewünschte Tiefe zu erreichen.

#### 4.4.2.4 Justiermarken für doppelseitiges Quarzätzen

Das Ausrichten der Masken am Blankrand ist durch die Resistaufwerfung nur grob möglich. Für die Laserstrukturierung ist jedoch eine doppelseitig exakte Ausrichtung nötig. Dazu wird eine Bohrung genau an der Stelle auf der Waferrückseite angebracht, an der auf der Wafer-vorderseite die Ausrichtquadrate platziert sind (im Bild 4.3 gestrichelt dargestellt). Von der Vorderseite werden links unten und rechts oben je ein Quadrat eingätzt (dunkle Flächen im oberen Bild). Die Quadratbereiche links oben und rechts unten bleiben stehen. Die Eckpunkte der stehengebliebenen Quadrate sind somit von der Vorderseite und von der Rückseite aus zu sehen. Dies ermöglicht bei der beidseitigen Laserstrukturierung eine exakte Positionierung.

### 4.4.3 Belackung

#### 4.4.3.1 Mit Standard-Chuck

Durch die Zentrifugalkraft wird der Photoresist auf dem rotierenden Wafer nach außen geschleudert. Dabei kommt es zu einer Ansammlung des Resists am gesamten Waferrand. Diese Aufwerfung ist nur durch eine höhere Drehzahl (4000 1/min) verringerbar. Ein Teil des über den Rand hinausgeschleuderte Resist wird von den rotierenden Ecken des quadratischen Wafers eingeholt und lagert sich auf deren Ober- und Unterseite ab. Diese Ablagerungen bereiten Probleme

- beim Softbake auf dem Heiz-Chuck (ungleichmäßige Erwärmung)
- bei der Rückseitenbelackung (Positionierung)
- im Maskaligner (Bruchgefahr)
- beim Entwickeln durch ungleichmäßige Resist-Schichtdicke

#### 4.4.3.2 mit Silizium-Chuck

Ein vom HSI entwickelter Silizium-Chuck brachte eine deutliche Verbesserung in Bezug auf die ungleichmäßige Resist Schichtdickenverteilung. Bei der doppelseitigen Belackung ergeben sich jedoch noch Probleme. Vermutlich durch die Aufwerfungen am Rand klebt der Quarzwafer bei der Rückseitenbelackung genau an der Vertiefung des Siliziumchucks und der darin liegenden Aufwerfung der Vorderseite zusammen. Dies behindert die Trennung des Quarzwafers vom Silizium und macht die erste Lackschicht wegen Beschädigung unbrauchbar.

Ideen zur weiteren Modifikation des Siliziumchucks sind vorhanden, müssen jedoch noch umgesetzt werden. Man denkt dabei an eine Vergrößerung des Quadratdurchmessers und das Anbringen von Anschlagnasen.

#### 4.4.3.3 Standard-Chuck mit Zusatzabdeckung

Für die Rückseitenbelackung wurden deshalb Abdeckhauben zum frühzeitigen Abfangen des fortgeschleuderten Resists verwendet. Nach einigen Niveaueinstellungen zwischen Haube und Quarz konnten brauchbare, jedoch keineswegs optimale Belackungen hergestellt werden. Da das Layout relativ unkritisch ist, war die erzielte Qualität aber ausreichend.

#### 4.4.4 Belichtung

Um die Maskenstruktur genau auf den Quarz abzubilden, müssen beide Teile möglichst dicht aneinandergebracht werden. Sind die Aufwerfungen des Resists zu hoch oder ungleichmäßig, so kann es dabei zum Bruch des Quarzwafers kommen. Nach dem Belichten erfolgt ein Hardback damit der strukturierte Lack widerstandsfähiger wird. Die selbe Prozedur wird nun auch mit der Rückseite durchgeführt. Anschließend wird der Resist entwickelt.

#### 4.4.5 Au/Cr Ätzung

Das Ätzen der 2000 nm dicken Goldschicht mit einer Kaliumjodidlösung braucht ca. 40 sec. Die Chromätzlösung aus Ammoniumcer (IV) nitrat und Perchlorsäure braucht für die 200 nm dicke Chromschicht ca. 20 sec. Beide Vorgänge finden bei Zimmertemperatur in einem einfachen Becherglas statt.

#### 4.4.6 Anisotropes Quarzätzen

Es wurde die vom HSI erprobte Lösung aus 3 Teilen 48% HF und 2 Teilen 40%  $\text{NH}_4\text{F}$  verwendet. Ebenso der geschlossene Ätzbehälter, der wegen der Erhitzung der Flußsäure unerlässlich ist.

##### 4.4.6.1 Ätzdaten

Ätzlösung: 3 Teile 48% HF, 2 Teile 40%  $\text{NH}_4\text{F}$

Ätztemp.: Zwischen 78,6 und 79,4°C

Ätzrate: 1,23  $\mu\text{m}$  je min

Äztiefen: 100  $\mu\text{m}$ ;

Beim Z-Schnitt beträgt die Ätzrate zum Vergleich bei der selben Ätzlösung aber 60°C Ätztemperatur 1,25  $\mu\text{m}$  je min.

##### 4.4.6.2 Äzwinkel

Wenn man in einen Z-Schnitt Quarz eine Kreisringstruktur ätzt, so erkennt man an der sich ergebenden Breite des Ätzgrabens deutlich die hexagonale Kristallstruktur (rotationssymmetrisch je 120° um die Z-Achse) des Quarzes.

Beim AT-Schnitt ergeben sich durch seine spezielle Lage im Kristall (Doppeldrehung) keine Symmetrien im Ätzmuster. Auffallend ist nur eine starke Unterätzung gegen die Z-Richtung. Dies läßt sich dadurch erklären, daß der Quarz in dieser Richtung die größte Ätzrate besitzt.

Zur Bestimmung der sich ergebenden Ätzwinkel wurde eine Kreisring-Testmaske angefertigt und geätzt. Unter dem Mikroskop wurden die Breite des Ätzgrundes (ca. 5% Ablesefehler) und die dazugehörigen Unterätzungen in allen Richtungen bestimmt. Eine schematische Skizze mit Bezeichnungen zeigt Bild 4.13.

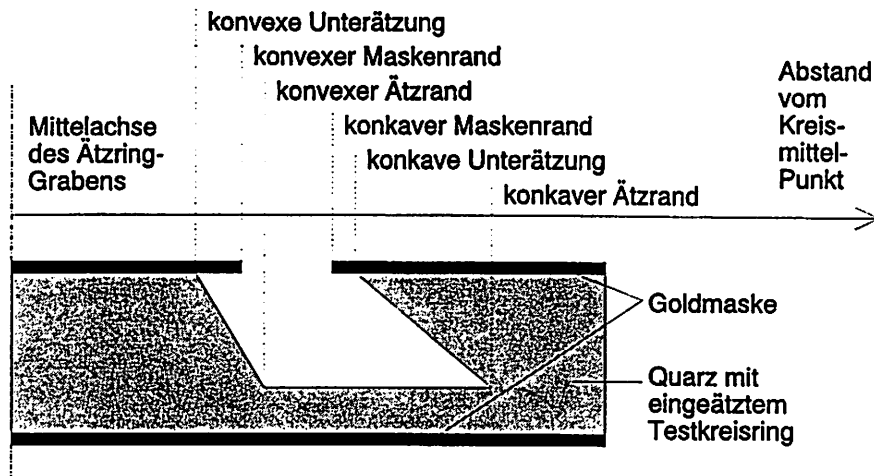


Bild 4.13 Ätzgraben des Testkreisrings im Schnitt

#### 4.4.6.3 Maskenkorrektur

In Bild 4.14 ist das Ätzergebnis aufgetragen, das mit einem  $200\text{ }\mu\text{m}$  breiten Maskenring erzeugt wurde. Die beiden dicken Linien mit dem großen Kreis und Quadrat als Markierung deuten die Position des konvexen und des konkaven Maskenrandes an. Zwischen diesen Linien hat die Maske eine Öffnung, in die gewöhnlich eine V-förmige Vertiefung geätzt wird. Die beiden dünnen Linien zeigen dann die Position/Form des Ätzgrundes (senkrecht schraffierte Fläche) nach dem Ätzen an.

Zwei Dinge fallen auf. Erstens schwankt die Ätzgrundbreite sehr stark ( $0\text{ }\mu\text{m}$  bis  $150\text{ }\mu\text{m}$  bei einer Maskenbreite von  $200\text{ }\mu\text{m}$  und einer Tiefe von  $100\text{ }\mu\text{m}$ ). Zweitens kommt es in den Winkelbereichen bei  $100^\circ$  und bei  $280^\circ$  bezogen auf die X-Richtung zu Ätzwinkeln größer  $90^\circ$ , d.h. der Ätzgrund wandert unter die abgedeckten Maskenbereiche. Ursache dafür ist, daß an diesen beiden Stellen (entgegen der Z-Richtung) der Quarz die größte Ätzrate aufweist.

Damit man eine konstante Breite des Ätzgrundes erhält, muß die Kreisringmaske entspre-

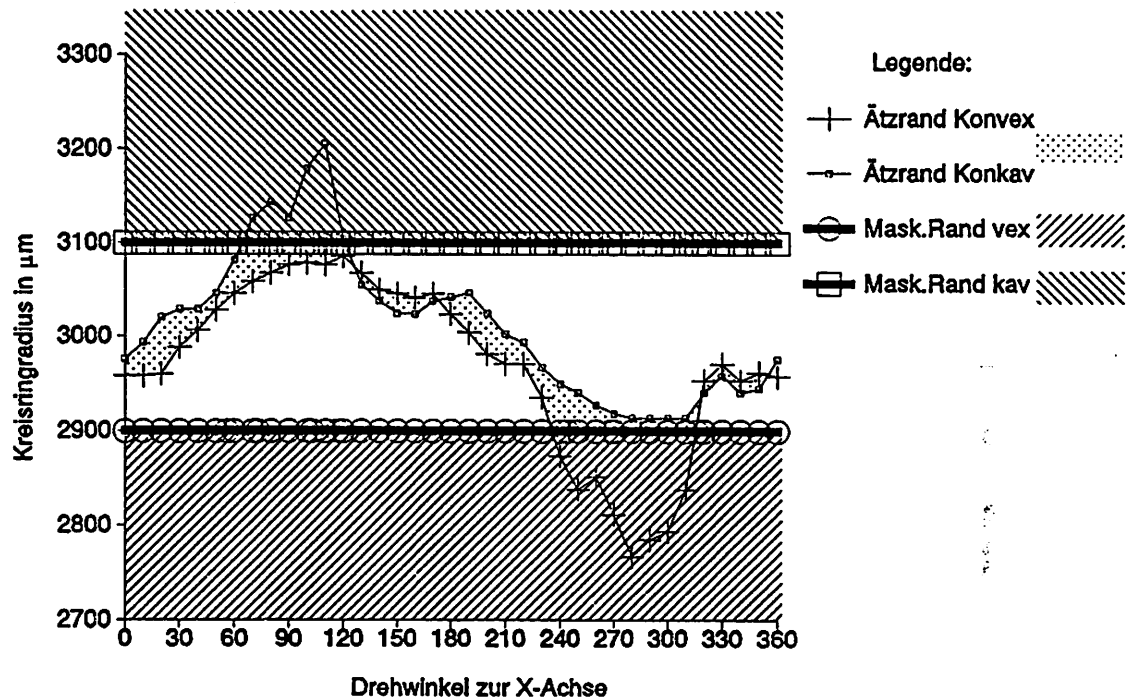


Bild 4.14 Geätzter Kreisring im AT-Quarz

chend korrigiert werden.

In Bild 4.15 ist die äußerste Kreisringmaske korrigiert worden. Der gewünschte konkave Ätzrand beim Kreisringradius  $3100\mu\text{m}$  ist bis auf die Stelle bei 120 Grad nahezu ideal. Bei dem konvexen Ätzrand sind an den Stellen 230, 270 Grad leichte Abweichungen, und an der Stelle 320 Grad starke Abweichungen von dem angestrebten  $2900\mu\text{m}$  Radius festzustellen. Diese Abweichungen sind Ätzecken, die durch die schnellen Ätzrichtungen erzeugt werden. Eine Korrektur ist möglich, muß jedoch speziell auf einen bestimmten Kreisradius und Äztiefe zugeschnitten sein.

Auf dem Ätzgrund des Kreisringes konnte an bestimmten Stellen eine leichte Rauigkeit festgestellt werden. Die  $5\mu\text{m}$  Oberflächenrauigkeit der geläppten Blanks ist jedoch bei weitem größer. Diese Rauigkeit hat im Bereich des geätzten Steges ( $20\mu\text{m}$  Restdicke) einen stark dämpfenden Einfluß, der im weiteren Projektverlauf durch die Verwendung von polierten Quarzblanks beseitigt wurde.



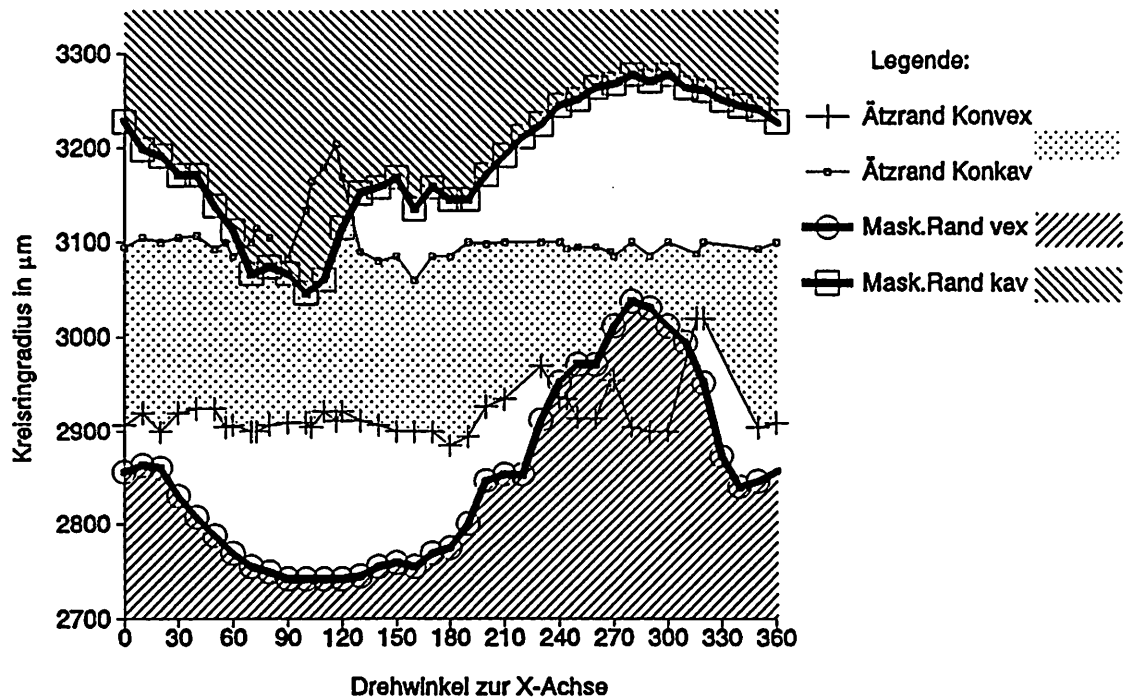


Bild 4.15 Kreisring durch Maskenkorrektur

#### 4.4.6.4 Ätzgrabenformen:

Vom HSI Stuttgart wurden Schliffbilder von den Ätzquerschnitten hergestellt (Bild 4.16). Die beiden hellen, dünnen horizontalen Linien sind die Goldschicht, zwischen denen sich der geätzte Quarz befindet. Neben dem normalen V - Gräben sind auf dem geätzten AT-Quarz auch senkrechte Ätzkanten und Ätzwinkel sowohl größer als auch kleiner  $90^\circ$  zu finden.



Bild 4.16 Ätzgrabenschliffbilder im AT-Quarz

#### 4.4.7 Elektrodenstrukturierung mittels Laser

##### 4.4.7.1 Ansteuerung des Lasers

Mittels CAD wird der gewünschte Laserschnitt gezeichnet (passend zur Quarzstruktur) und als HPGL File abgespeichert (unter Verwendung eines ADI-Treibers). Dieses File steuert dann die Bewegung eines XY-Tisches, auf dem der Quarzblank befestigt ist. Desgleichen steuert dieses File auch das An- und Abschalten des feststehenden Nd-YAG-Lasers.

Diese Ansteuerart zeichnet sich durch eine sehr hohe Flexibilität bei Änderungen aus. Der Laserschnitt ist ca 30  $\mu\text{m}$  breit. Die Verfahrensgeschwindigkeit beträgt ca 1mm/sec.

##### 4.4.7.2 Breite der Mittelelektrode

Aus den bisherigen Messungen ist zu erkennen, daß es speziell bei 4-Pol-Anregung wichtig ist, daß zwischen der anregenden und abgreifenden Elektrode eine Mittelelektrode/"Quasi-Masse" vorhanden ist, um das Überkoppeln zu verringern. Je breiter diese Mittelelektrode allerdings ist [vergleiche Element E mit F], desto schmaler sind die Anrege- und Abgriffelektroden. Dies wirkt sich wieder nachteilig für die Anregung aus. Es zeigte sich auch, daß es gut ist, alle unbenutzten Goldflächen (Randbereiche) zur "Quasi-Masse" dazuzuschalten.

##### 4.4.7.3 Beidseitiges Lasern

Wenn der Laserstrahl beim Strukturieren über den Wafer fährt, wird im allgemeinen gleichzeitig die Goldschicht auf der Oberseite und auf der Unterseite des Quarzwafers abgetragen (Bild 4.11 unten). Fährt der Laserstrahl jedoch über einen Ätzgraben, so wird dieser an den sehr glatten schrägen Fläche weggespiegelt bzw. gebrochen. Daraus folgt, daß an dieser Stelle auf der Rückseite kein Gold abgetragen wird. Es bleibt also eine el.leitende Brücke stehen.

Da die Ansteuerung des Lasers am HSI über die schon oben erwähnten HPGL-Files erfolgt, ist es durch Spiegeln der Laserstruktur sehr einfach möglich, die Rückseite des Wafers nochmals mit dem Laser zu bearbeiten. Die Ausrichtung erfolgt über die von beiden Seiten sichtbaren Ausrichtquadrate.

## 4.5 Aufbau- und Verbindungstechnik

### 4.5.1 Sensor Musteraufbau - Überblick

Basisträger ist eine 1,1 mm dicke Indium-Zinnoxid (ITO) beschichtete Glasplatte. In der Mitte befindet sich eine Bohrung mit  $\varnothing 4$  mm, die mit einem Ultraschallbohrer erzeugt wurde. Um die Bohrung wird mittels Siebdrucktechnik ein UV-Kleber auf die ITO-beschichtete Seite aufgebracht. Dieser Kleberahmen ist ca 0,7 mm breit und hat die gleiche Form wie der Ätzgraben (Ovalform). In den Kleber sind 22  $\mu\text{m}$  dicke Kugeln (Spacer) untergemischt, die einen definierten Abstand zwischen Quarz und Glas ermöglichen.

Vor dem Zusammenfügen von Quarzelement und Glasträger werden noch 4 Leitsilberpunkte auf die 4 Elektrodenpads auf der Quarzunterseite aufgebracht. Von der strukturierten ITO-Schicht können nun die Signale über die Leitsilberpunkte auf die unteren Elektrodenpads gelangen, und von dort über die Stege auf die Membranunterseite.

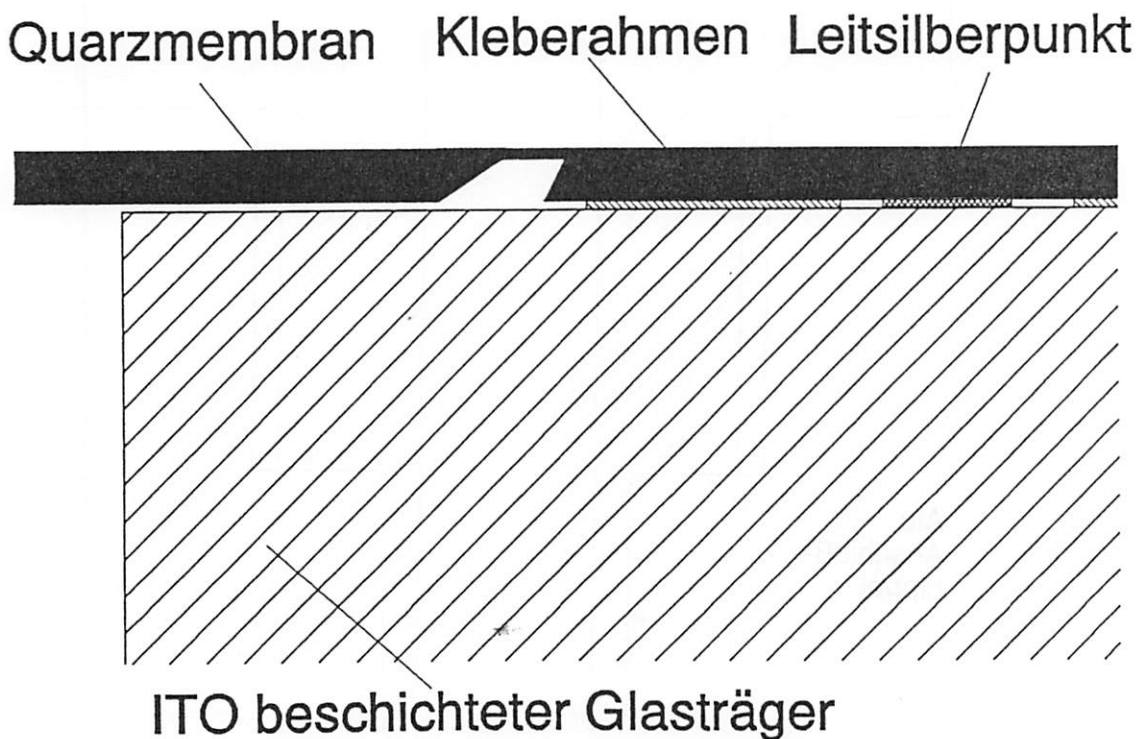


Bild 4.17 Sensor Aufbau am Kleberahmen

An beiden Seiten des Glasträgers werden dann je 4 EPOXI-DIL Pins angebracht. Über Verbindungsdrähte werden die 4 oberen Quarz-Elektrodenpads mit den Pins verbunden (Löten oder Bonden). Von dort geht es dann zur Elektronik.

Der Glasträger wird schließlich auf einen Alu-Anschlußnippel geklebt, über den der Druck eingeleitet wird.

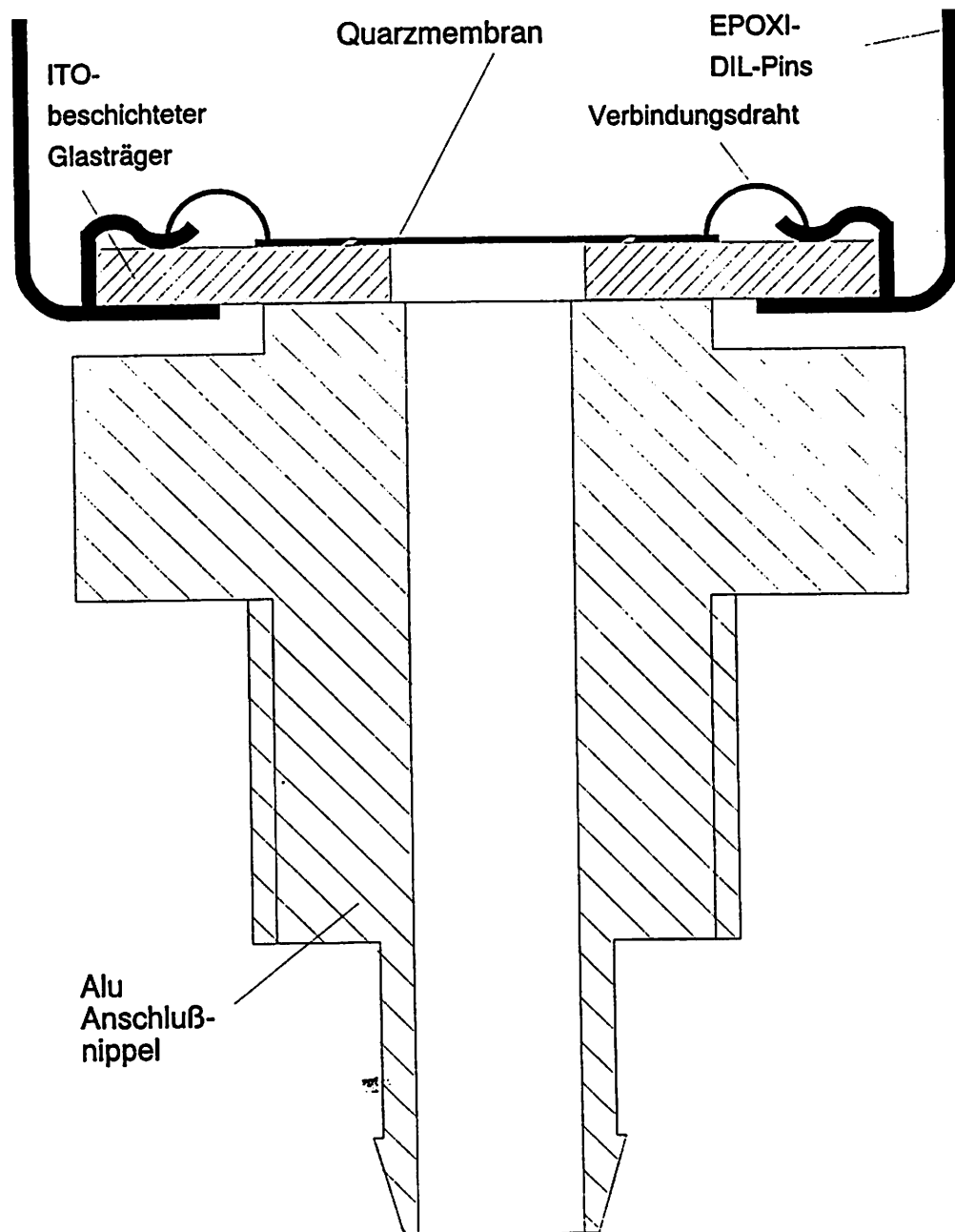


Bild 4.18 Gesamter Musteraufbau

## 4.6 Messungen und Leistungsdaten

### 4.6.1 Laservibrometer-Messungen

Am HSI wurden Laservibrometermessungen durchgeführt, die eine deutliche Resonanzstelle des Grundbiegemodes bestätigen (Bild 4.19).

Trace-Titel: Quarz-Drucksensor MotoMeter GmbH  
 Kommentar: Dr.Dagenbach, W.Hartig  
 Swept-Spektrum  
 Datum: 17.2.199      Uhrzeit: 15:15      Operator: tf/mf  
 Messgeraete: Spektrumanalyzer HP3588A ; Laservibrometer OFV1102.  
 Y-Achse: linear      Skalierung: Vrms  
 LaserVibr.: Ampl      Einheit: 2  $\mu\text{m/V}$       Bemerkung: Swept  
 Anregung: elektrisch - beidseitig      Lagerung: eingespannt  
 Struktur: Langloch 3N      Resonator: 3N  
 Datei: mm3n4

Frequenzzentrum : 35000 Hz  
 Frequenzspanne : 10000 Hz  
 Startfrequenz : 30000 Hz  
 Stopfrequenz : 40000 Hz  
 Sweeptime : 26.2144 s  
 Sample-Time : 0.000004 s  
 Res.-Bandbreite : 1.1 Hz  
 Quellen-Amplitude : 10.0 dBm  
 Quellen-Ausg.Widerstand : 50 Ohm  
 Eingangs-Widerstand : 1000000 Ohm

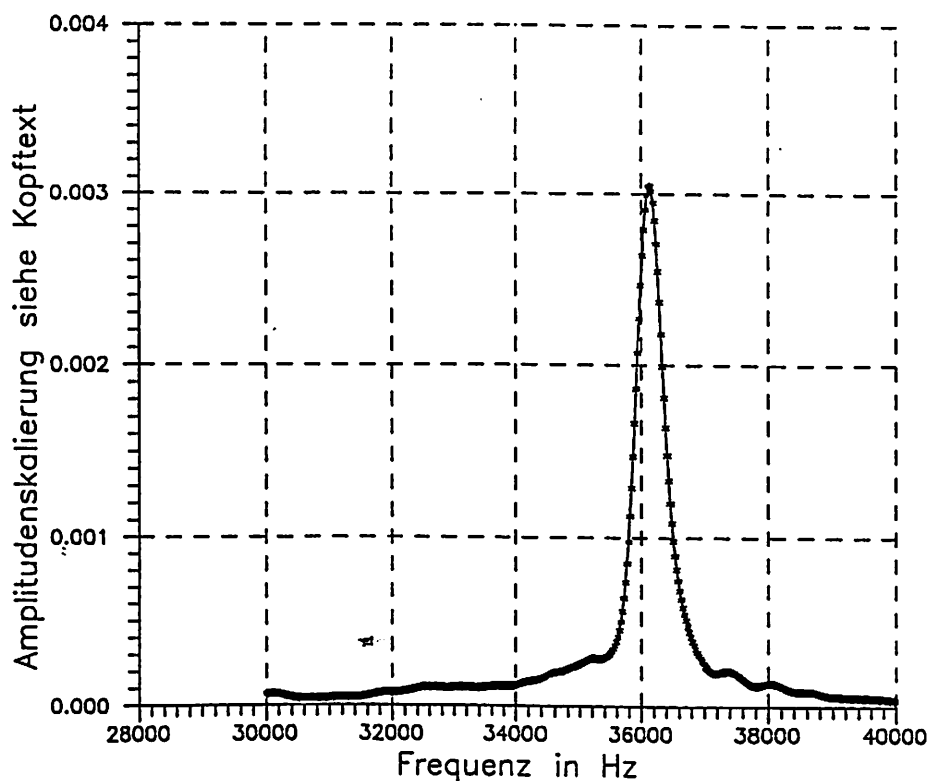


Bild 4.19 Laser-Vibrometer-Messung

#### 4.6.2 Oszillator-Schaltung

Der FAS in Vierpolausführung wird charakterisiert durch einen Übertragungsfaktor für den Meßeffect (Kopplung elektrisch-mechanisch-elektrisch) und einen Übertragungsfaktor infolge kapazitiver Kopplung. Die kapazitive Kopplung zwischen Eingangs- und Ausgangselektroden bewirkt am Ausgang ein Gleichtaktsignal und ein Differenzsignal.

Die Übertragungsfaktoren haben die folgenden Größenordnungen für:

- Meßeffect-Signal: ca. 5000:1
- Gleichtakt-Signal: ca. 10:1
- Differenz-Signal: ca. 10000:1

Die Signale des Meßeffects und der kapazitiven Kopplung besitzen eine Phasendifferenz von ca.  $180^\circ$ , so daß zwischen Nutzsignal aus dem Meßeffect und dem Signal aus der kapazitiven Kopplung unterschieden werden kann.

Der Unterdrückung des Gleichtaktsignals dienen ein symmetrischer Aufbau, Abschirmelektroden zwischen Anrege- und Abnahmeseite, Montage des Sensors auf einer leitenden Fläche, die mit der sensorinternen Abschirmung verbunden ist und der Betrieb in einer symmetrischen Verstärkerschaltung.

Der Verstärker besteht aus 2 symmetrischen Stufen. Mit einem Tiefpaß-Glied zwischen den Stufen kann die Phase eingestellt werden. Die Gesamtverstärkung läßt sich im Bereich von 1500 bis 6500 abgleichen.

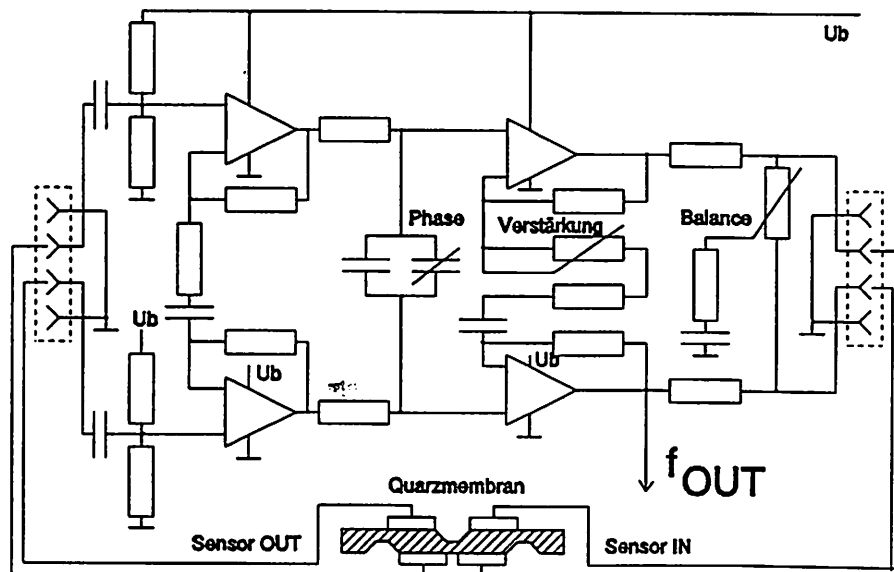


Bild 4.20 Oszillatorschaltung

### 4.6.3 Druckempfindlichkeit

Grundsätzlich kann das Sensorelement beidseitig mit einer Druckbelastung (positiv oder negativ) beaufschlagt werden. Es muß dabei nur darauf geachtet werden, daß die Quarzbefestigung auf die Druckrichtung abgestimmt ist, d.h. daß eine Klebeverbindung nicht extrem auf Zug beansprucht wird. Je nach Druckrichtung wird der oben beschriebene "Kniehebel" weiter geschlossen (wie bei Muster 3M) oder geöffnet (wie bei Muster 3B, 3X, 2N). Entsprechend verringert sich die Resonanzfrequenz oder sie erhöht sich. Bild 4.21 zeigt die entsprechenden Kennlinien.

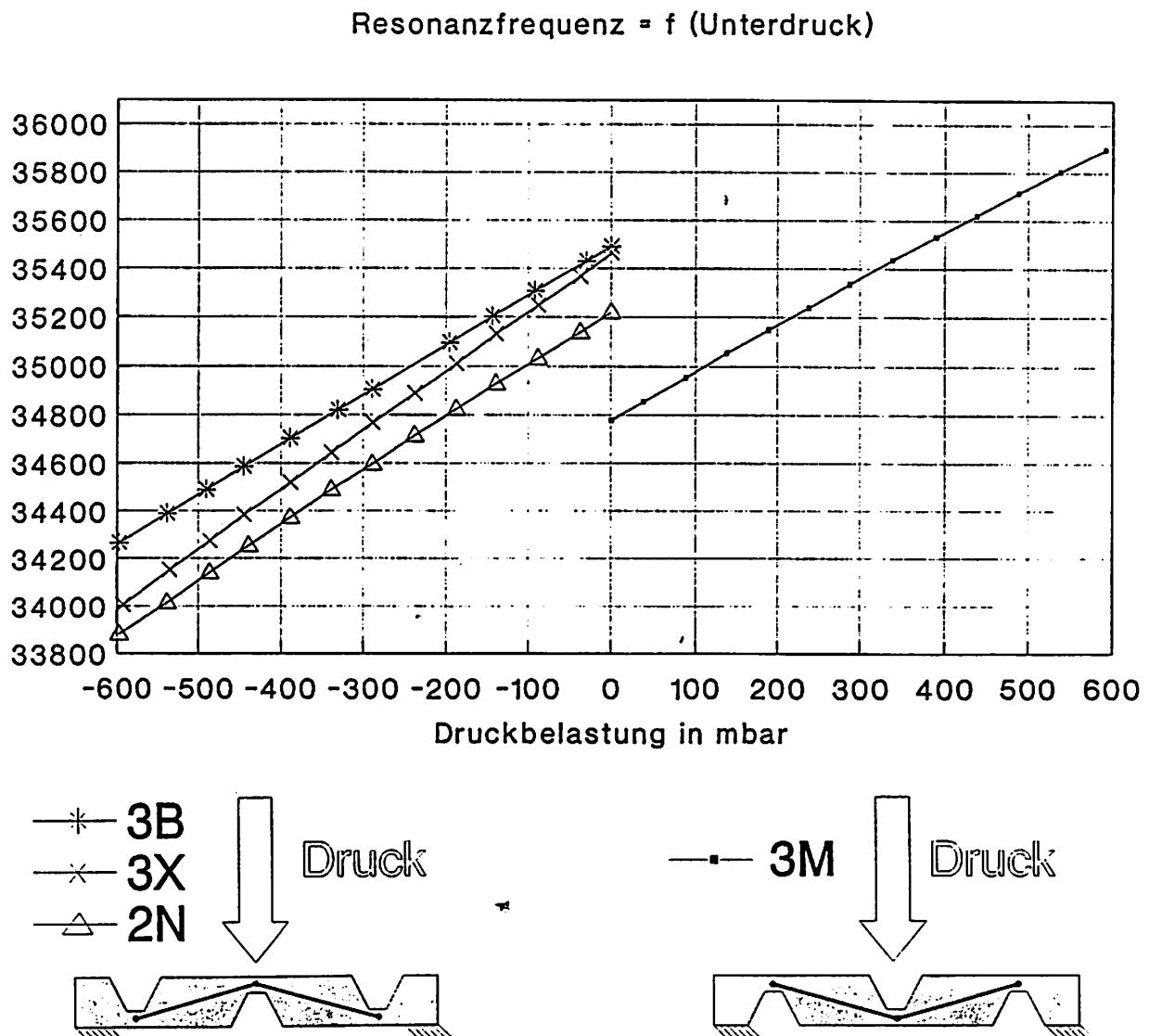


Bild 4.21 Druckempfindlichkeit

Der Linearitätsfehler des Musters ATP3N1 ist in Bild 4.22 wiedergegeben. Die maximale Abweichung des Rohsignals bezogen auf den Frequenzhub ist mit 1,8% ein üblicher Wert. Durch zusätzliche Linearisierungsmaßnahmen (siehe Kapitel 7) ist eine weitere Verbesserung möglich. Es wurde bei diesem Muster eine Empfindlichkeit von 1400Hz je 600 mbar gemessen (Bild 4.22). Die maximale Druckbelastung dieser Membran liegt bei 2 bar. Dazu müßte der Aufbau jedoch für Überdruckeinleitung angepaßt werden.

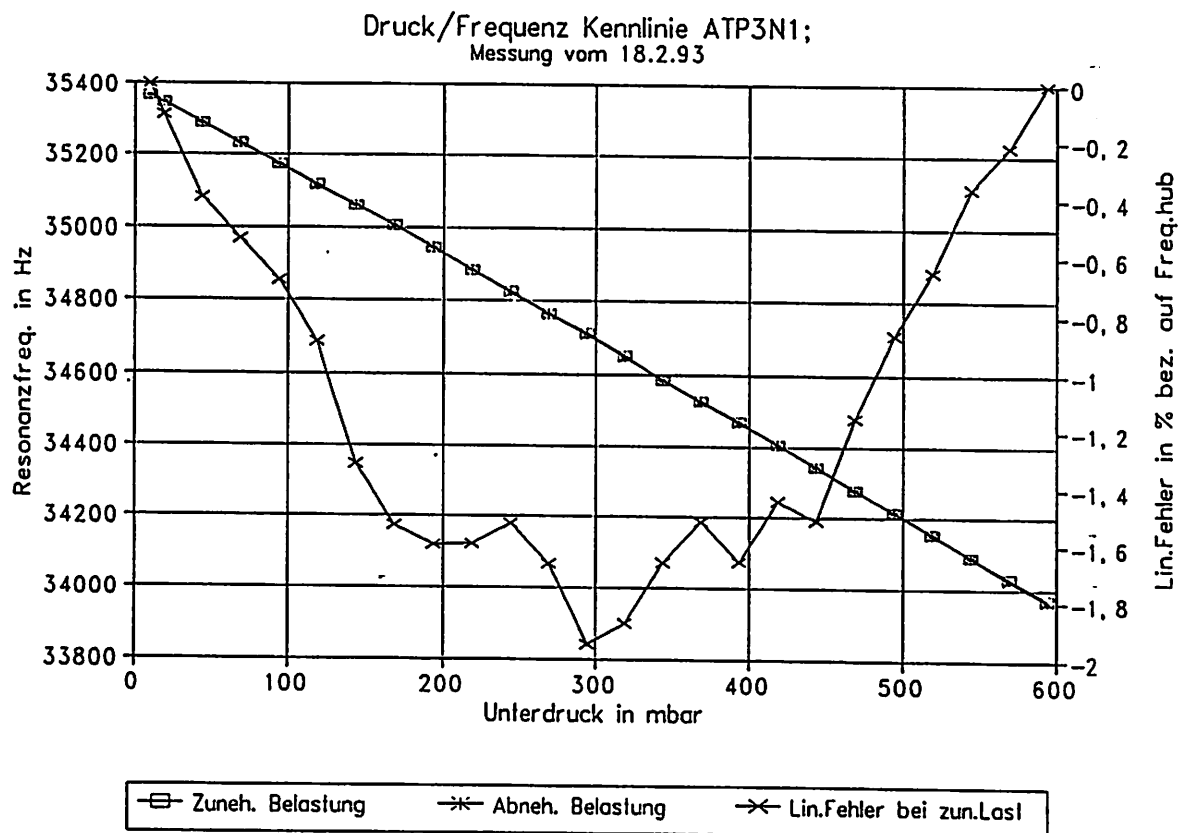


Bild 4.22 Empfindlichkeit und Linearität



## 4.7 Ausblick, Weiterentwicklungsmöglichkeiten

### 4.7.1 Membranform

Mit der Membrangröße des Mustersensors von 4mm x 6mm ist auf einem 1,5" Wafer ein 20er Nutzen realisierbar. Durch Variationen dieser Membrangrößen und der Ätztiefe lassen sich der Nutzen, die Nennfrequenz und der Nenndruck verändern.

### 4.7.2 Technologie

Für eine wirtschaftliche Herstellung erscheint eine Sprühbelackungsanlage notwendig, da damit die Probleme der Randaufwerfungen und doppelseitigen Belackung entfallen.

### 4.7.3 Aufbau und Verbindungstechnik

Die Druckeinleitung muß so modifiziert werden, daß auch Überdruck angelegt werden kann. Als Grundträgermaterial kann Keramik eingesetzt werden, auf der die Elektronik in Hybridtechnik mit integriert wird. Wie in Bild 4.23 zu sehen ist, kann zur Kontaktierung auch Leitgummimaterial eingesetzt werden. Der Temperaturgang des Gesamtaufbaus muß ermittelt werden und gegebenenfalls Maßnahmen zu dessen Kompensation getroffen werden.

### 4.7.4 Elektronik

Die Schaltung kann verkleinert werden. Ziel ist außerdem die Verringerung der Versorgungsspannungen von bisher  $\pm 8$  Volt auf + 5 Volt. Eine PLL-Stufe könnte zur Frequenzselektion eingesetzt werden und der Abgleich könnte vereinfacht werden.

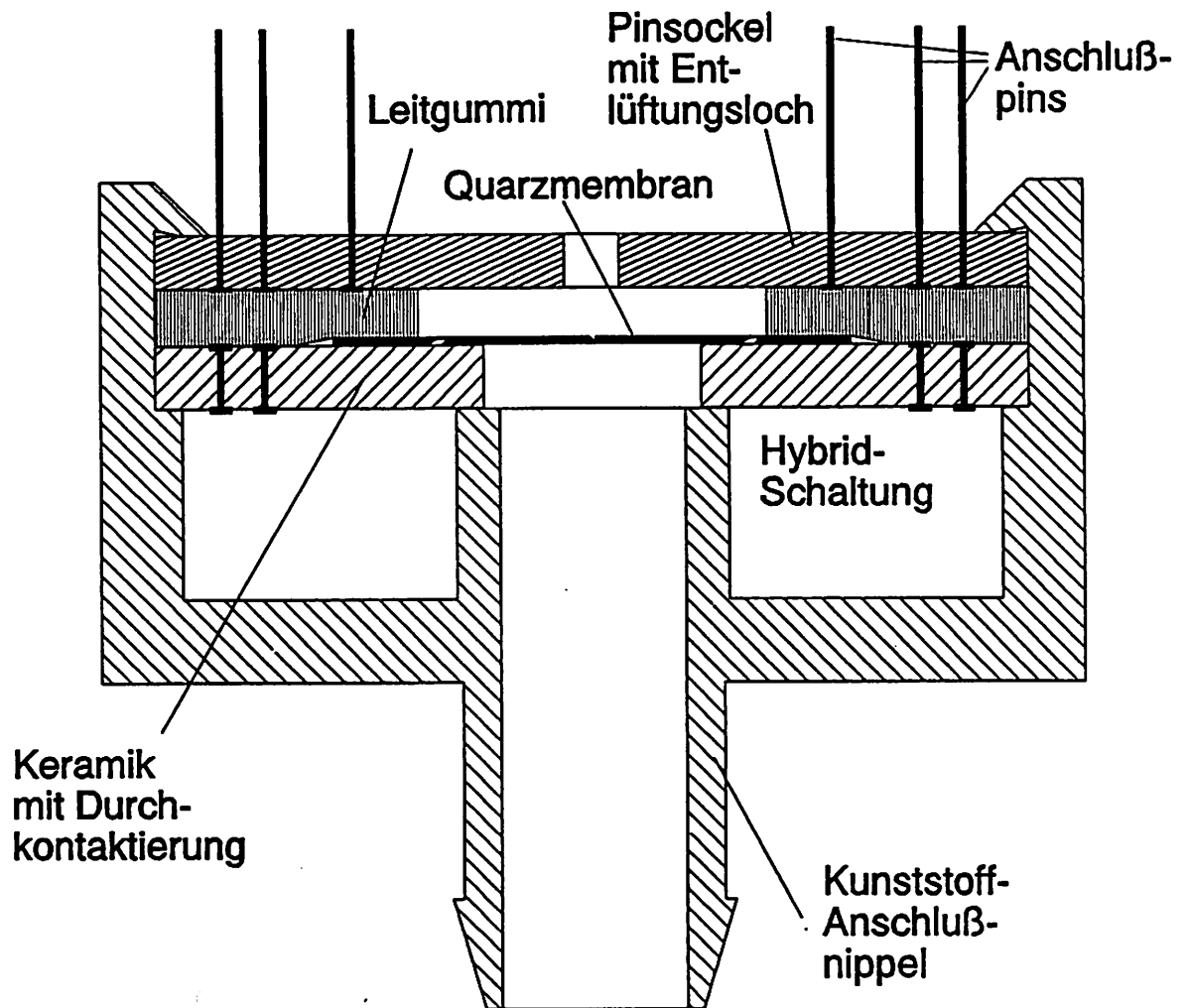


Bild 4.23 Sensoraufbau mit Leitgummi