

**6. Zwischenbericht**  
zum  
BMFT-Verbundprojekt  
"Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung  
frequenzanaloger Sensoren"

**Teilvorhaben**  
"Entwicklung der technologischen Grundlagen  
mit dem Schwerpunkt Silicium-Mikromechanik"

**Förderkennzeichen: 13 AS 0118**

**Berichtszeitraum: 01.01.1992 - 30.06.1992**

**Robert Bosch GmbH  
Postfach 10 60 50  
7000 Stuttgart 10**

**Dr. G. Flik, Dr. F. Lärmer, A. Schilp**

## Inhalt

1	Zusammenfassung.....	2
2	Batch-Prozesse zur Herstellung ZnO-getriebener Kraftsensoren.....	3
2.1	Naßchemisches Ätzverfahren.....	3
2.2	Propagation Ion Etching.....	4
2.3	PIE-Prozeß zur Herstellung von Biegebalkenresonatoren .....	5
2.4	Verbesserte modenselektive Anregungs- und Abtastgeometrie.....	6
3	Ergebnisse resonanter Drucksensoren .....	7
3.1	Ansteuerung.....	7
3.2	Meßergebnisse .....	7
3.3	Modenselektivität.....	8
3.4	Dämpfungsverhalten.....	8
3.5	Packaging.....	8
4	Weiterarbeit.....	9

## 1 Zusammenfassung

Im Berichtszeitraum wurden Batchprozesse zur Herstellung frequenzanaloger Kraftsensoren mit piezoelektrischem ZnO entwickelt und erfolgreich durchgeführt:

Mit einem im vorhergehenden Berichtszeitraum entwickelten Niedertemperatur-Plasmachichtsystem war es möglich, auf ZnO eine KOH-beständige Passivierung aufzu bringen, ohne die vorteilhaften Eigenschaften des piezoelektrischen Materials nachteilig zu beeinflussen. Da Metallflächen nicht zuverlässig passiviert werden konnten, wurde eine KOH-beständige Metallisierung in Form von Goldkontakte über den Passivierschichten aufgebracht. Damit war es möglich, die fertig prozessierten 100 µm dicken Membranen der Wafervorderseite durch beidseitiges Naßätzen zu 50 µm dicken Biegebalken zu strukturieren. Die so erhaltenen Kraftsensoren wurden mit dem Gain-Phase-Analyzer charakterisiert; die Gain-Phase-Kennlinien zeigen große Effekte im Bereich der Biegebalkenresonanzen. Anstelle einer Goldmetallisierung kann auch Aluminium eingesetzt werden, wenn anstelle von KOH mit Al-selektiven Ätzlösungen gearbeitet wird (z.B. Ammoniak/Wasser oder Tetramethylammoniumhydroxid/Wasser).

Mit der seit Jahresbeginn zur Verfügung stehenden Einrichtung für Propagation Ion Etching, einem Plasmaätzverfahren mit kombinierter Mikrowellen- und HF-Anregung, konnten in Silicium hohe Ätzraten bis 10 µm/min, eine kontrollierte Anisotropie und eine hervorragende Selektivität von 100-300:1 gegenüber gewöhnlichen Photolackmasken erreicht werden. Auf Basis des PIE-Verfahrens konnten Batch-Prozesse durchgeführt werden, bei denen fertig prozessierte, 50 oder 100 µm dicke Vorderseitenmembranen zu Biegebalken strukturiert wurden. Als Maske für den PIE-Trenchprozeß genügte eine 1-1.5 µm dicke Photoresistschicht, als Metallisierung wurden Aluminium oder Gold erfolgreich eingesetzt. Um ZnO und Metallisierung dauerhaft vor Umwelt einflüssen zu schützen, kann vor dem Trennen zusätzlich die erwähnte Plasmapassivierschichtfolge aufgebracht werden. Augeranalysen zeigten, daß die Passivierschichtoberflächen völlig frei sind von Zn-Verunreinigungen, so daß nach dem Aufbringen der Passivierschichtfolge kein Kontaminationsrisiko für Folgeprozesse besteht. Die so hergestellten Sensoren waren voll funktionsfähig; eine beträchtliche Anzahl wurde dem Verbundpartner Bizerba zur Verfügung gestellt.

Die Elektrodengeometrie wurde optimiert, um eine modenselektive Schwingungsanregung zu erreichen. Mechanische Zug- und Druckspannungsbereiche wechseln einander auf dem Biegebalken so ab, daß dadurch der Grundmode selektiert wird; dieses Sensorverhalten ermöglicht eine Vereinfachung der Oszillatorelektronik hinsichtlich ihrer Bandpaßcharakteristik. Das elektrische Übersprechen von den Antriebs- zu den Aufnehmerelementen soll durch Spannungsdifferenzbildung an zwei Aufnehmerelementen von entgegengesetzter Spannung entscheidend reduziert werden. Die so hergestellten Sensoren erwiesen sich nach ersten Tests mit dem Gain-Phase-Analyzer als funktionsfähig, eine detailliertere Charakterisierung steht noch aus.

Resonante Drucksensormembranen mit piezoelektrischem ZnO wurden modenselektiv angeregt und mit dem Gain-Phase-Analyzer ausgewertet. Druckempfindlichkeit der Resonanzfrequenzen, Temperaturgang und Langzeitverhalten bei Last- und Temperaturwechseln wurden untersucht. Fertig prozessierte Drucksensorchips konnten anodisch auf Pyrexglasplatten gebondet werden ohne Beeinträchtigung ihrer Funktionsfähigkeit;

diese Aufbau- und Verbindungstechnik ist bekannt für eine sehr gute Sensorentkopplung gegenüber mechanischen Spannungen, wie sie aus der Sensorumgebung induziert werden können.

## 2 Batch-Prozesse zur Herstellung ZnO-getriebener Kraftsensoren

In diesem Abschnitt werden verschiedene Wege beschrieben, um ZnO-getriebene Kraftsensoren nach Art der Abbildung 1 herzustellen. Abbildung 2 zeigt eine Prozeßabfolge, bei der alle Schritte mit Ausnahme von Schritt e.) bereits im vorhergehenden Berichtszeitraum erfolgreich durchgeführt werden konnten: Bordiffusion in den Fenstern der Wafervorderseite (Schritt a.), Naßätzen Waferrückseite bei geschützter Vorderseite, so daß Membranen entstehen (Schritt b.), Aufbringen und Strukturieren von ZnO und Metallisierung (Schritt c.), Aufbringen von Passivierschichten Vorderseite, Erzeugen von Kontakt- und Trenchöffnungen in der Passivierschichtfolge (Schritt d.), Freiätzen von Biegebalken aus den fertig prozessierten Membranen der Wafervorderseite (Schritt e.). Beim letzten Schritt war es zwar gelungen, den Schutz des ZnO zu gewährleisten, jedoch konnte keine KOH-beständige Passivierung der Metallisierung erreicht werden. Gesputterte Aluminiumflächen wurden sofort zerstört, indem die Passivierschichten in KOH großflächig abplatzten. Bei aufgedampften Aluminiumflächen erfolgte die Zerstörung langsamer, indem KOH durch einzelne Pinholes in den Passivierschichten eindrang und das Aluminium unter der Passivierung regelrecht herausfraß. Goldkontakte wurden zwar selbst von KOH nicht angegriffen, jedoch ermöglichte die Ablösung der Passivierschicht auf den Au-Kontakten ein Eindringen der KOH vom Rand der Metallisierung her.

Die verfolgten Lösungsansätze gingen daher in zwei Richtungen:

Da Silicium und ZnO gegenüber dem Naßätzmedium sehr gut geschützt werden konnten und nur der Schutz der Metallisierung Probleme bereitete, wurde zum einen versucht, eine ätzbeständige Metallisierung über der Passivierung nach Art einer MIS-Struktur aufzubringen.

Der alternative Ansatz zielt auf den Ersatz des letzten Naßätzschritts durch ein Trockenätzverfahren. Mit dem PIE-Verfahren steht ein hervorragendes Werkzeug zur Tiefenstrukturierung von Silicium zur Verfügung, das auch bei Ätztiefen von 100 µm und mehr lediglich eine dünne Photolackmaskierung erfordert.

Beide Ansätze ließen sich erfolgreich realisieren.

### 2.1 Naßchemisches Ätzverfahren

Für den Einsatz eines Naßätzverfahrens beim letzten Prozeßschritt 2 e.) sprechen der geringe apparative Aufwand und die kostengünstigen Medien, die ja bereits für Prozeßschritt 2 b.) sowieso benötigt werden. Darüberhinaus können in einfacher Weise mehrere Wafer gleichzeitig prozessiert werden. Nachteilig ist dagegen die Beschränkung der realisierbaren Resonatorgeometrien, da diese durch 111-Kristallflächen begrenzt sein müssen.

Abbildung 3 zeigt die Anordnung von Passivierschichten und Metallisierung: über strukturiertes ZnO bzw. Silicium werden Niedertemperaturplasmaoxid und -nitrid abgeschieden und in der Passivierung Kontaktfenster zum Silicium geöffnet. Dann wird die Metallisierung aufgebracht und strukturiert. Durch die Kontaktfenster wird eine

elektrische Verbindung zwischen Silicium und Metallisierung hergestellt. Zwischen den ZnO-Bereichen und der Metallisierung befindet sich die Passivierschicht, d.h. es besteht keine direkte elektrische Verbindung. Ein Teil des später angelegten elektrischen Potentials fällt also in der Passivierschicht (Dielektrikum) ab. Nach dem Öffnen der Ätzfenster in der Passivierung wird die Membran beidseitig naß durchgeätzt, so daß Biegebalken entstehen.

Wird KOH als Naßätzmedium benutzt, kommen für die Metallisierung z.B. Chrom oder Gold in Frage. Gold (mit WTi-Haftschicht) wurde wegen seiner besseren Kontaktierbarkeit der Vorzug gegeben. Die Tatsache, daß Au nicht zu den Prozessen der Halbleitertechnik kompatibel ist ("carrier lifetime killer"), stellt bei den Sensoren der gegenwärtigen Größe keine echte Einschränkung dar. Bei einem Einsatz von Al-selektiven Naßätzmedien wie Ammoniak/Wasser oder Tetramethylammoniumhydroxid/Wasser für den letzten Schritt ist zu erwarten, daß der Prozeßablauf analog auch für eine Aluminiummetallisierung durchgeführt werden kann.

Der Prozeßdurchlauf ließ sich problemlos durchführen. Die Plasmapassivierschicht zeigte auf Silicium und ZnO nirgends Ausfälle. An einigen Stellen löste sich die Au-Metallisierung gegen Ende des 3 h dauernden Ätzprozesses ab - erstaunlicherweise nicht direkt auf Silicium und nicht über den ZnO-Bereichen, so daß alle Sensorstrukturen voll funktionsfähig sind. Die Haftungsschwierigkeiten lassen sich durch Modifikationen der Haftschicht und der Siliciumnitridpassivierschichtoberfläche mit Sicherheit überwinden.

Die fertiggestellten Sensoren zeigten keine Beeinträchtigung ihrer Performance durch die Isolationsschicht zwischen Metallisierung und ZnO, in der ein Teil der elektrischen Potentiale abfällt. Sie zeigten sich den Sensoren mit direkter elektrischer Kontaktierung des ZnO in keiner Weise unterlegen. Abbildung 4 zeigt eine typische Gain-Phase-Kurve eines solchen Sensors mit einer Resonanzstruktur, die zwischen Serien- und Parallelresonanz beinahe 20 dB übersteicht.

## 2.2 Propagation Ion Etching

Seit Anfang dieses Jahres steht bei Bosch das Propagation Ion Etching (PIE)-Verfahren mit kombinierter Mikrowellen- und Hochfrequenzanregung für Hochratenätzten von Silicium zur Verfügung. Abbildung 5 zeigt das Schema der Anlage, aus dem das Funktionsprinzip ersichtlich wird. Im oberen Teil ist ein Mikrowellenhohlleiter zu erkennen, der mittig von einem Quarzglastrichter durchbrochen wird. Von oben strömt das Reaktionsgasgemisch in den Quarztrichter ein. In der Wechselwirkungszone von Mikrowellenfeld und Reaktionsgas wird ein intensives Plasma unterhalten, das sich durch den Surfatroneffekt entlang des Trichters nach unten bis zur Substratelektrode hinab ausbreitet. Dieses Mikrowellenplasma ist gekennzeichnet durch eine sehr hohe Dichte von reaktiven Spezies aus der Dissoziation der eingelegten Gase sowie eine hohe Ionendichte. Die Energie, mit der diese Ionen auf die Substrate eingefallen, wird unabhängig kontrolliert durch eine zusätzlich an die Substratelektrode gelegte Hochfrequenzleistung. Durch diese Entkopplung von Plasmadichte und Ionenenergie ist eine sehr genaue Prozeßkontrolle möglich, die es erlaubt, bei hohen Ätzraten gleichzeitig hohe Selektivität und Anisotropie zu erreichen.

Abbildung 6 zeigt REM-Aufnahmen einer 110 µm tief geätzten Siliciumstruktur. Die Ätzrate beträgt in diesem Beispiel 6 µm/min, die Anisotropie 0.5 und die Selektivität

zur 1.1  $\mu\text{m}$  dicken Photolackmaske liegt bei etwa 150:1 (bis 300:1 wurden erreicht). Bemerkenswert sind die glatten Kantenprofile und der spiegelblanke Ätzgrund. Abbildung 7 zeigt eine Lichtmikroskopaufnahme einer etwa 20  $\mu\text{m}$  tief geätzten Siliciumstruktur mit einer nahezu perfekt anisotropen, d.h. senkrechten Kante. Durch eine spezielle Prozeßführung wird erreicht, daß die Selektivität zur Photolackmaske trotz der hohen Anisotropie der Ätzung bei >100:1 liegt.

### 2.3 PIE-Prozeß zur Herstellung von Biegebalkenresonatoren

Mit dem PIE-Verfahren lassen sich in einfacher Weise Siliciummembranen von beispielsweise 100  $\mu\text{m}$  Dicke durchätzen und damit zu Biegebalken strukturieren. Dem höheren prozeßtechnischen Aufwand eines Plasmastrukturierungsverfahrens steht der wesentliche Vorteil gegenüber, daß damit praktisch beliebige Resonatorgeometrien realisiert werden können (z.B. Vermeidung von Ecken mit Spannungskonzentration, gleichförmig auslaufende Entkopplungsbereiche usw.). Abbildung 8 zeigt den letzten Maskierungsschritt für diese Prozeßvariante:

Auf mit strukturiertem ZnO, Al-Metallisierung und Passivierungsschichtfolge versehenen Siliciummembranen werden eine Photolackschicht aufgebracht und photolithographisch die späteren Kontaktfenster zum Aluminium sowie die Trenchöffnungen definiert. Beim anschließenden PIE-Trenchprozeß wird zunächst die Passivierungsschichtfolge durchgeätzt bis zum Silicium bzw. Aluminium. Während die Ätzung auf den Aluminiumkontakte stoppt, wird das Silicium in den freigelegten Trenchöffnungen mit einer hohen Rate durchgeätzt. Die aus einem ungleichmäßigen Durchbruch der Ätzung der Passivierschichtfolge zum Silicium resultierende Ätzgrundrauhigkeit stört nicht, da die Membran sowieso vollständig durchgeätzt werden muß. Die Photolackmaske der Wafervorderseite muß also während des Durchätzens der Passivierschichtfolge und dem anschließenden Durchtrennen der Membranen in einem Schritt dem Plasmaangriff standhalten; dafür kann ein weiterer Lithographieschritt eingespart werden.

Um ein gewisses Überätzen der Strukturen zu erlauben ohne die Unterseite der Biegebalken dabei einem rückseitigen Ätzangriff auszusetzen, ist auch die Membranunterseite durch Photolack geschützt. Nach dem PIE-Ätzschritt wird der fertig prozessierte Wafer ganzflächig abgelackt und die Sensoren vereinzelt.

Abbildung 9 zeigt REM-Aufnahmen eines so hergestellten 50  $\mu\text{m}$  dicken Biegebalkenresonators mit piezoelektrischem ZnO-Antriebs- und Aufnehmerbereich, Al-Metallisierung und Passivierung. Man erkennt nochmals die glatte Kantenstruktur.

Abbildung 10 zeigt eine Photographie eines fertig prozessierten Wafers mit 21 Sensoren vor der Vereinzellung.

In Abbildung 11 sind typische Gain-Phase-Kennlinien eines dieser Sensoren dargestellt. Die Resonanzstruktur in der Transmissionskurve überstreicht wieder etwa 20 dB im Bereich zwischen Serien- und Parallelresonanz.

Abbildung 12 zeigt Gain-Phase-Kennlinien eines dieser Sensoren im unbelasteten und belasteten Fall. Hierzu wurde der Sensor in einen Bizerba-Hebellenker für Magnetstromkompensation eingesetzt, wobei die Kraftuntersetzung von der "Waagschale" auf den Sensor zu 5:1 gewählt wurde. Die Sensorgrudresonanzfrequenz bei 21975 Hz im unbelasteten Fall verschiebt sich für eine Last von 1 kg entsprechend 10 N bzw. 2 N direkt auf den Sensor um 1900 Hz auf 23875 Hz. Diese hohe Empfindlichkeit ist kon-

sistent mit früher erhaltenen Werten an hybrid aufgebauten Kraftsensormustern (aufgebondete PZT-Keramiken, vgl. Bericht 1/91).

## 2.4 Verbesserte modenselektive Anregungs- und Abtastgeometrie

Für eine kontinuierliche Schwingung des Biegebalkenresonators muß dieser durch eine elektronische Oszillatorschaltung entdämpft werden, d.h. die aus dem Schwingungssystem abfließende Energie muß (unter Beachtung der Phasenbedingungen) ständig ersetzt werden. Normalerweise sorgt ein Bandpaßfilter dafür, daß die richtige Mode (in der Regel die Grundmode) entdämpft wird. Der Filteraufwand läßt sich erheblich verringern, wenn die Anregungsgeometrie bereits den gewünschten Mode selektiert. Dazu müssen durch den piezoelektrischen Antrieb Zug- und Druckspannung auf den Biegebalken jeweils da erzeugt werden, wo sie auch im gewünschten Mode auftreten. Im Grundmode der out-of-plane-Biegeschwingung findet die Spannungsumkehr gerade in einem Abstand von  $\frac{1}{4}$  der Resonatorlänge von den Einspannpunkten statt. Dieser Tatsache wurde in dem nachfolgend beschriebenen Design Rechnung getragen.

**Abbildungen 13 - 15** zeigen die wesentlichen Schritte. Nach der Rückseitenätzung der Membranen wird auf der Wafervorderseite eine dünne Isolationsschicht von thermischem  $\text{SiO}_2$  aufgebracht bzw. dort belassen. In diese Isolationsschicht werden, wie in **Abbildung 13** veranschaulicht, 6 Fenster zum Silicium geätzt: 2 Fenster zum Siliciumfestland, 4 Fenster von  $\frac{1}{4}$  Resonatorlänge auf den Silicumbiegebalken. Anschließend wird ganzflächig  $\text{ZnO}$  abgeschieden und so strukturiert, daß  $\text{ZnO}$  nur noch in den vier  $\text{SiO}_2$ -Fenstern auf den Biegebalken verbleibt. Die beiden Fenster auf dem Siliciumfestland, durch die das Silicium kontaktiert werden soll, werden also wieder von  $\text{ZnO}$  befreit. Anschließend wird die Metallisierung ganzflächig abgeschieden und wie in **Abbildung 14** gezeigt strukturiert. Es kann sich dabei um Aluminium oder um Gold ( $\text{Au}/\text{WTi}$ ) handeln. Bei diesem Design dient  $\text{ZnO}$  also nur noch da als elektrische Isolation, wo auch wirklich ein piezoelektrisches Material benötigt wird, nämlich in den Antriebs- und Aufnehmerbereichen auf den Biegebalken. Die Kontaktflächen und die Leiterbahnen von den Antriebs-/Aufnehmerbereichen zu den Kontaktflächen verlaufen dagegen auf thermischem  $\text{SiO}_2$ , das wesentlich bessere elektrische Isolationseigenschaften besitzt als  $\text{ZnO}$  und keine Energieverluste durch den Piezoeffekt bewirkt; der Energieabfluß aus dem Resonator ins Siliciumfestland durch die bei der vorherigen Sensorgeneration angewandte Isolation der Kontaktbereiche durch piezoelektrisches Material sollte damit ebenfalls reduziert werden. Darüberhinaus können jetzt prinzipiell auch Kontaktierverfahren, die lokal höhere Bondtemperaturen erfordern (z.B. Löten) eingesetzt werden, da sich unter den Kontaktflächen kein temperaturempfindliches Material mehr befindet. Nachdem die Wafervorderseite fertigprozessiert wurde, kann sie mit Niedertemperatur-Plasmaschichten passiviert werden. Mit einer Photolackmaskierung werden anschließend analog zu 2.3 im PIE-Verfahren aus den Membranen Biegebalken erzeugt. Alternativ kann hierzu auch das in 2.1 beschriebene naßchemische Strukturierungsverfahren eingesetzt werden.

**Abbildung 15** zeigt das Schaltungsprinzip für eine modenselektive Entdämpfung des Biegebalkenresonators. Eine Verstärkerschaltung mit komplementären (bipolaren) Ausgängen und einer Differenzschaltung der beiden Eingänge wird wie dargestellt mit den 4 piezoelektrischen Bereichen verbunden. Selbstverständlich muß die Rückkopp lungsschaltung eine ausreichende Aufholverstärkung und die korrekte Phasenbeziehung zwischen Ein- und Ausgängen liefern. Durch die komplementäre Ansteuerung der beiden Antriebsfelder werden bevorzugt solche Moden angetrieben, die in der Mitte zwi-

schen beiden Feldern einen Spannungsknoten aufweisen, wie dies für den Grundmode der Fall ist. Genauso werden aufnehmerseitig bevorzugt diese Moden detektiert.

Diese komplementäre Anregung hat darüberhinaus den Vorteil, daß über die Strom-/Spannungscharakteristik des ZnO Substratströme von entgegengesetztem Vorzeichen auftreten, die einander zumindest teilweise kompensieren. Die dadurch induzierten verminderten Spannungsabfälle im Si-Substrat treten an beiden Aufnehmerelementen identisch auf und werden bei der elektrischen Spannungsdifferenzbildung eliminiert. Dadurch soll das elektrische Übersprechen von den Antriebs- zu den Aufnehmerelementen entscheidend reduziert werden, was besonders bei stark verkleinerten Sensor-dimensionen von Bedeutung sein wird.

Erste Batch-Durchläufe dieser neuen Sensorgeneration wurden durchgeführt, und zwar sowohl mit Aluminium- als auch mit Goldmetallisierung (Gold wegen der besseren Kontaktierbarkeit im Vergleich zu Aluminium). Die detaillierte Charakterisierung in Bezug auf die vorstehend diskutierten Eigenschaften und Vorteile ist bis jetzt noch nicht abgeschlossen; jedoch konnten erste Gain-Phasekurven aufgenommen werden.

Abbildungen 16 und 17 zeigen Transmissions- und Phasenverlauf eines Sensors mit dieser Anregungs- und Abtastgeometrie. Es wurde jeweils ein äußeres (a-) oder ein inneres (i-) piezoelektrisches Feld auf dem Biegebalken elektrisch angetrieben und die Piezospaltung als Funktion der Anregungsfrequenz an einem äußeren (-a) oder einem inneren (-i) Feld der gegenüberliegenden Biegebalkenseite aufgezeichnet. Auf diese Weise ergeben sich die vier dargestellten Kurven. Es handelt sich dabei um einen Sensor mit Au/WTi-Metallisierung; für Al-Metallisierung erhält man völlig entsprechende Kennlinien.

### 3 Ergebnisse resonanter Drucksensoren

#### 3.1 Ansteuerung

Abbildung 18 zeigt Aufnahmen eines resonanten Drucksensors mit ZnO-Antriebs- und Aufnehmerbereichen. Zu erkennen sind die Zentralelektrode in Membranmitte und vier pilzförmige Elektroden am Membranrand. Der elektrische Antrieb der Membran zu resonanten Schwingungen erfolgt z.B. an der Zentralelektrode, der Signalabgriff an den Randelektronen. Es können die Piezospaltungen einzelner oder aller Randelektronen ausgewertet werden. Analog kann die Membranszillation auch über die Randelektronen angetrieben und über die Zentralelektrode ausgewertet werden. Die Signaltransmission in der Grundresonanz liegt bei etwa -40 dB. In Abbildung 19 sind entsprechende Gain-Phasekennlinien eines resonanten Drucksensors dargestellt; im Bereich der Grundmode überstreicht die Signaltransmission zwischen Serien- und Parallelresonanz einen Wertebereich von etwa 25 dB.

#### 3.2 Meßergebnisse

Für eine rezonante Drucksensormembran mit den Dimensionen 9.2\*9.2 mm<sup>2</sup> und der Dicke 50 µm, mit einer ZnO-Beschichtung der Dicke 14.5 µm sind in Abbildung 20 Resonanzfrequenz und Auslenkung in Membranmitte über dem rückseitig angelegten Druck aufgetragen. Der Sensorchip wurde hierzu in einen Edelstahlhalter geklebt. Die

Sensorempfindlichkeit beträgt etwa 12 kHz/bar bei einer Grundresonanzfrequenz im Bereich von 8 kHz. Der Gütefaktor der Schwingungsmoden liegt bei  $Q=100$ .

**Abbildung 21** gibt die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz und des effektiven Koppelfaktors von der Sensortemperatur wieder. Man findet experimentell eine Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz von  $-5.5 \text{ Hz/K}$ . Diese wird auch durch eine FEM-Simulationsrechnung (HSI - Hr. Fabula) gut reproduziert.

Es wurde auch das Langzeitverhalten dieses Drucksensors untersucht: Nach 15 Temperaturwechseln um  $\pm 45 \text{ K}$  trat eine Veränderung der Grundresonanzfrequenz von  $< 10 \text{ Hz}$  auf. Nach 100 Lastwechseln beim Differenzdruck um  $\pm 0.5 \text{ bar}$  änderte sich die Grundresonanzfrequenz um  $< 15 \text{ Hz}$ .

### 3.3 Modenselektivität

Durch die Anordnung der Antriebs- und Aufnehmerbereiche werden mechanische Spannungen auf der Membran plaziert bzw. aufgenommen und piezoelektrisch gewandelt, die gewisse Moden begünstigen und andere diskriminieren. So kann bei Anregung durch die Zentralelektrode die 2. Resonanzmode der Sensormembran bei einer Frequenz von 15.25 kHz durch ein optisches Detektionsverfahren (Rodenstock RM600 oder Polytec Vibrometer) nachgewiesen werden. Wird dagegen die piezoelektrische Ausgangsspannung der vier Randeletroden mit dem Gain-Phase-Analyser ausgewertet, ist die Resonanzstruktur der 2. Resonanzmode extrem stark unterdrückt. Wie in **Abbildung 22** veranschaulicht ist, heben sich unterschiedliche mechanische (und damit piezoelektrische) Spannungsvorzeichen im Summensignal der vier Randeletroden gerade auf.

### 3.4 Dämpfungsverhalten

Die Abbildungen 23 und 24 zeigen mit einem Gain-Phase-Analyser aufgenommene Signaltransmissionskennlinien eines Drucksensors, der in einer Druckzelle bei vier verschiedenen Werten des hydrostatischen Drucks betrieben wurde. Mit steigendem Gasdruck in der Druckmeßzelle wird die resonant schwingende Membran zunehmend stärker bedämpft, da das dichtere Umgebungsmedium den Energieabfluß aus der Membran erhöht. Zusätzlich ändern sich auch die Resonatoreigenschaften der Druckzelle selbst. Wie in den Abbildungen zu erkennen ist, spaltet die Grundmode, die bei einem hydrostatischen Druck von 0 bar als eine einzige Struktur zutage tritt, für Drücke von 2 bar, 4 bar bzw. 10 bar auf in 2 bzw. 3 Resonanzstrukturen, wobei sich die Höhe der einzelnen Maxima in Abhängigkeit vom hydrostatischen Druck fortwährend verändert. Insgesamt nimmt die Signalhöhe dabei ab und ist bei 10 bar deutlich reduziert.

### 3.5 Packaging

Eine bewährte Aufbau- und Verbindungstechnik, um Drucksensoren von umgebungsinduzierten mechanischen Spannungen zu entkoppeln, stellt das anodische Bonden dar. Dabei wird Silicium direkt und ohne Einsatz von Klebstoffen oder Lot z.B. auf eine Pyrexplatte gebondet. Der Bondvorgang basiert auf einer feldstärkeinduzierten Ladungstrennung im Pyrexglas bei erhöhter Temperatur und nachfolgender Ausbildung chemischer Silicium-Sauerstoffbindungen. Da Pyrexglas und Silicium ähnliche thermi-

sche Ausdehnungskoeffizienten besitzen, können temperaturinduzierte Spannungseffekte klein gehalten werden.

Problematisch im Zusammenhang mit bereits metallisierten und mit ZnO versehenen Sensoren sind die beim Bondvorgang erforderlichen Temperaturen im Bereich von 400 °C, die zu einer Degradation der elektrischen Eigenschaften des ZnO führen können. Durch eine spezielle Prozeßführung war es jedoch möglich, fertigprozessierte Drucksensorchips ohne Beeinträchtigung ihrer Funktionsfähigkeit anodisch auf eine Pyrexplatte zu bonden (bei T=370 °C in Luft).

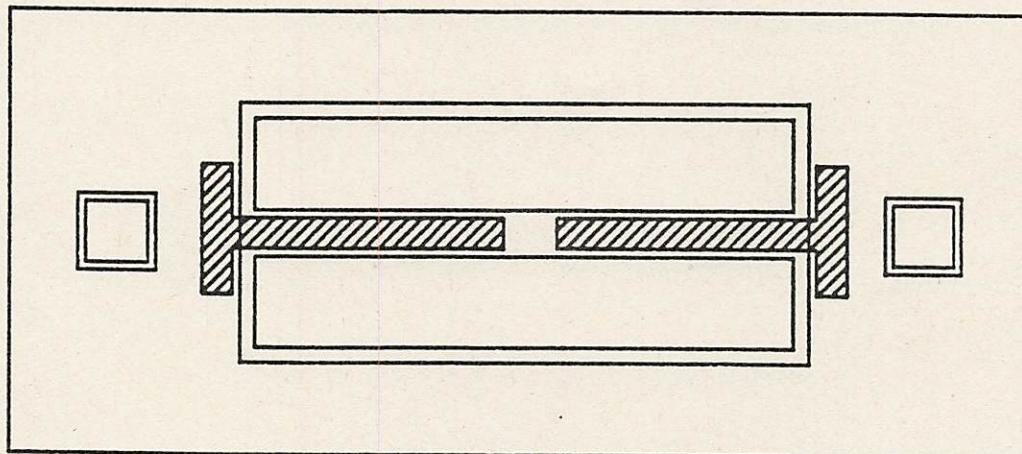
#### 4 Weiterarbeit

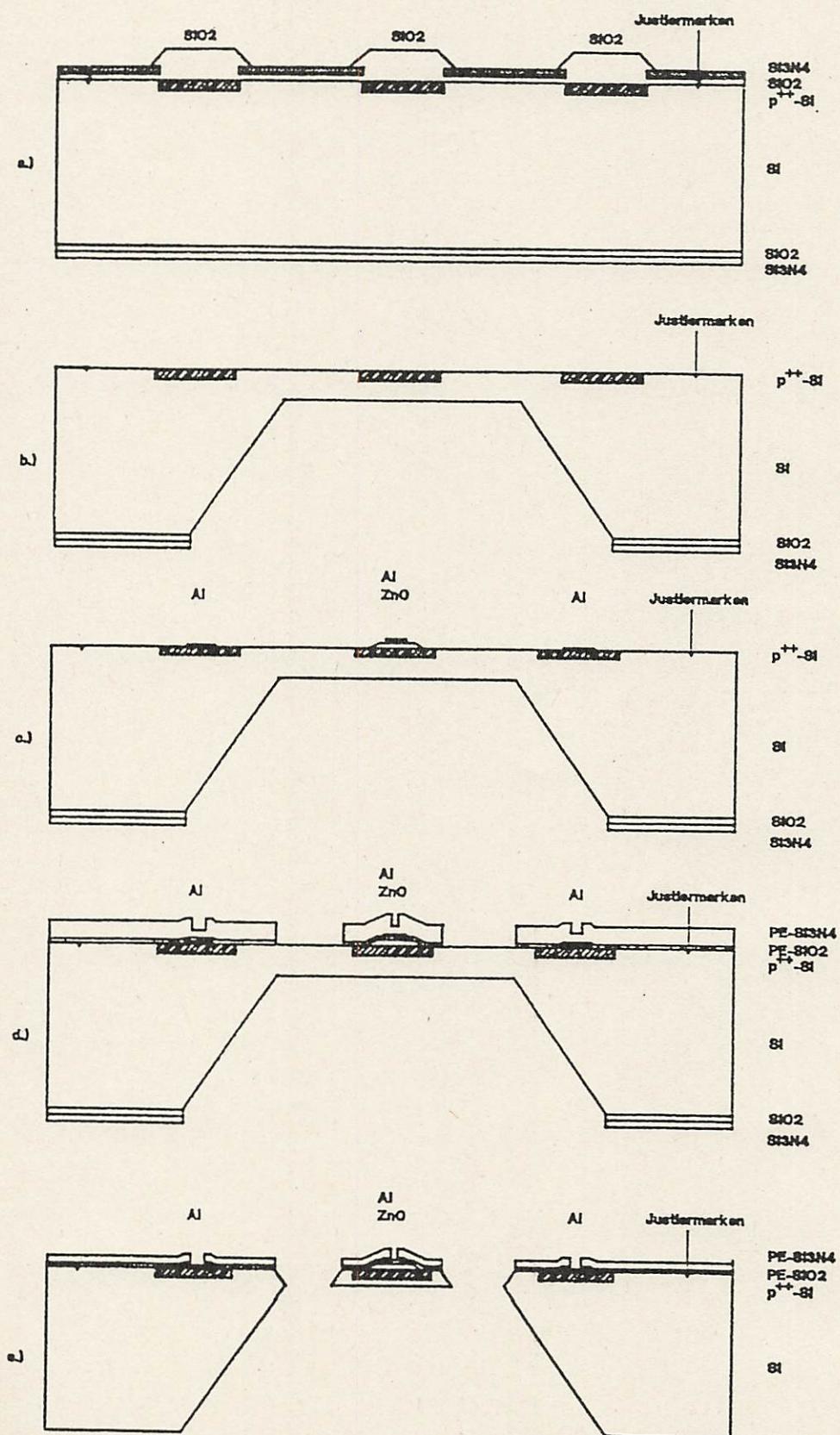
Im letzten Projekthalbjahr sind weitere Verbesserungen im Herstellungsablauf geplant, um die Prozeßsicherheit und -reproduzierbarkeit zu erhöhen. Dies schließt eventuell Modifikationen der Passivierschichtfolge sowie die Erprobung alternativer Naßätzmedien ein. Die aufgetretenen Au-Haftungsschwierigkeiten beim Naßätzverfahren werden beseitigt.

Die Charakterisierung der mit modenselektiven, verbesserten Anregungsgeometrien ausgestatteten Biegebalkenresonatoren ist abzuschließen und die angestrebten Vorteile sind zu verifizieren. Die Oszillatorelektronik wird an die neuen Sensoren entsprechend angepaßt. Die elektronische Rückkopplungsschaltung wird ferner um eine Amplitudenregelung erweitert, um den bisher praktizierten Sättigungsbetrieb zu vermeiden.

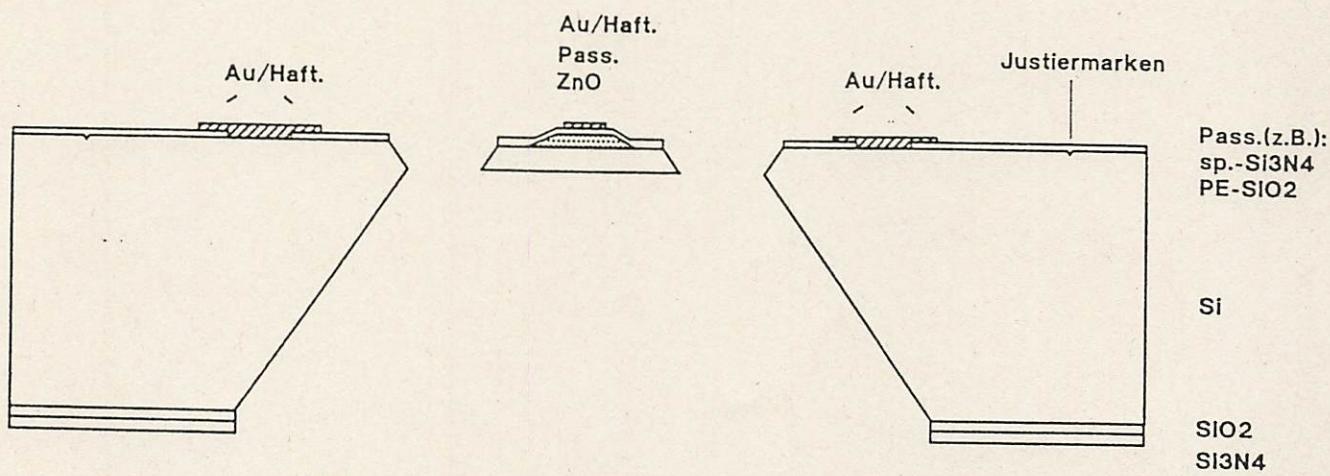
Dem Verbundpartner Bizerba werden weiter Sensormuster zur Verfügung gestellt zur Applikation in geeigneten Lenkerformen für Waagen. Bizerba wird bei der Aufbau- und Verbindungstechnik unterstützt; insbesondere sind die Probleme hinsichtlich Überlast- und Schockfestigkeit noch zu lösen. Bis Projektende soll ein Demonstrator einer Waage mit frequenzanalogem Kraftaufnehmer gemeinsam realisiert werden.

ZWD-Dr. Lärmer  
6905 *Lärmer*

**Querschnitt und Draufsicht**



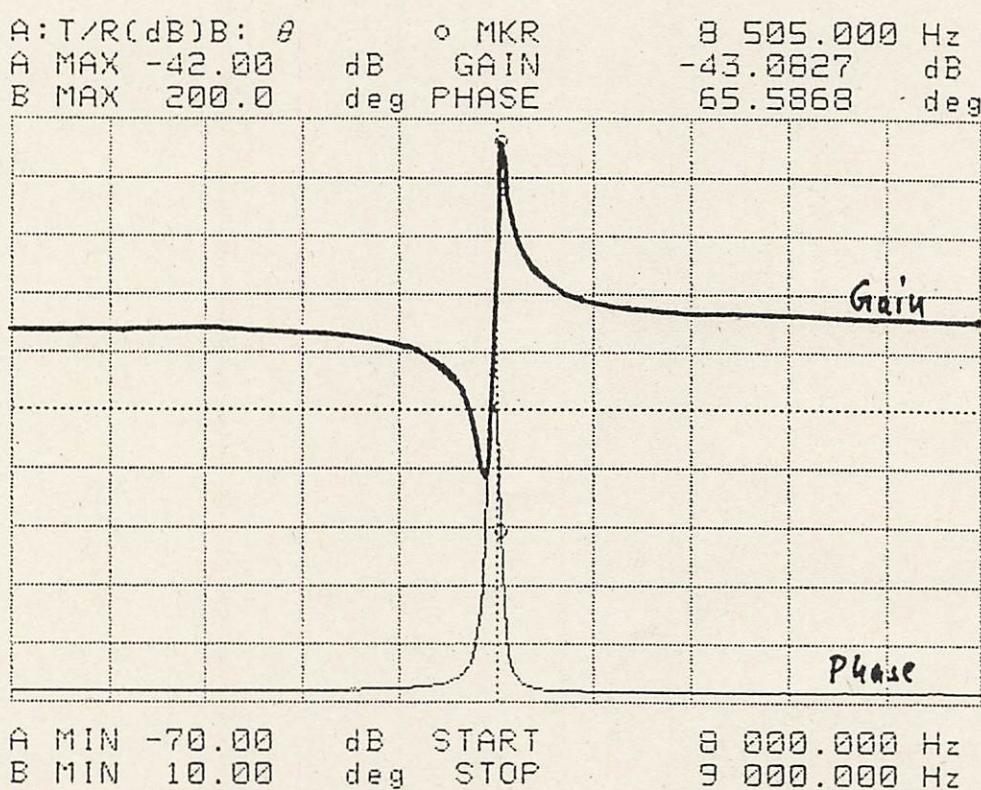
A55.2



**BOSCH****ZWD****Gain-Phasekurven****06.92**

Alle Rechte bei NORDENT BOSCH GMHII, auch für den Fall von Schutzrechtsanmeldungen jeder Veröffentlichung, wie Kopier- und Weiterabrechte, bei uns.

Inv 15219-5



ZnO\_149: "klassisches" Elektrodendesign  
FAS4\_5 mit Au/WTi auf SiN/SiO<sub>2</sub>-Passivierschichtfolge über ZnO auf p<sup>++</sup>-Silicium

A66.4

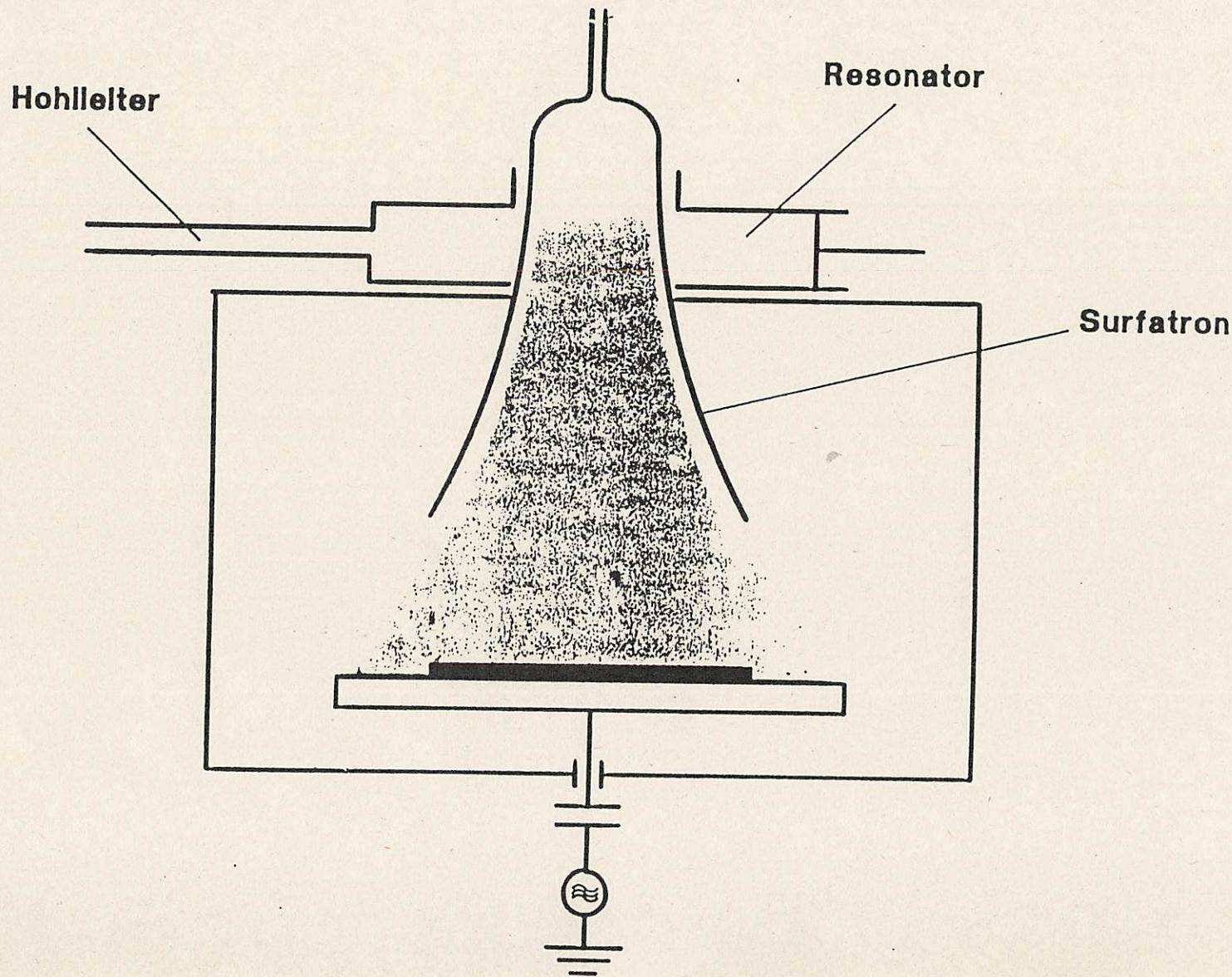
**BOSCH**



ZWD

## Propagation Ion Etching (PIE)

Tag

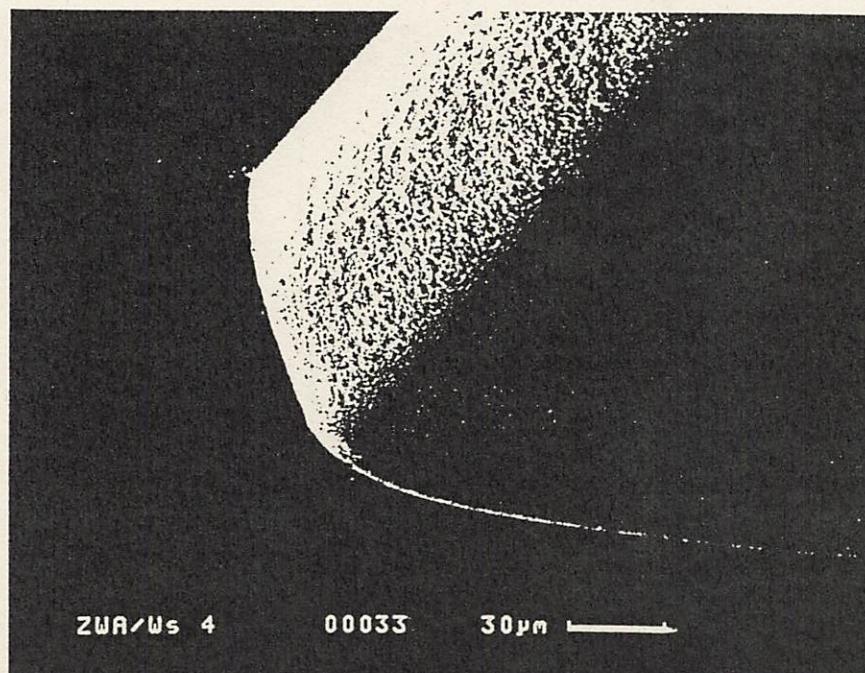
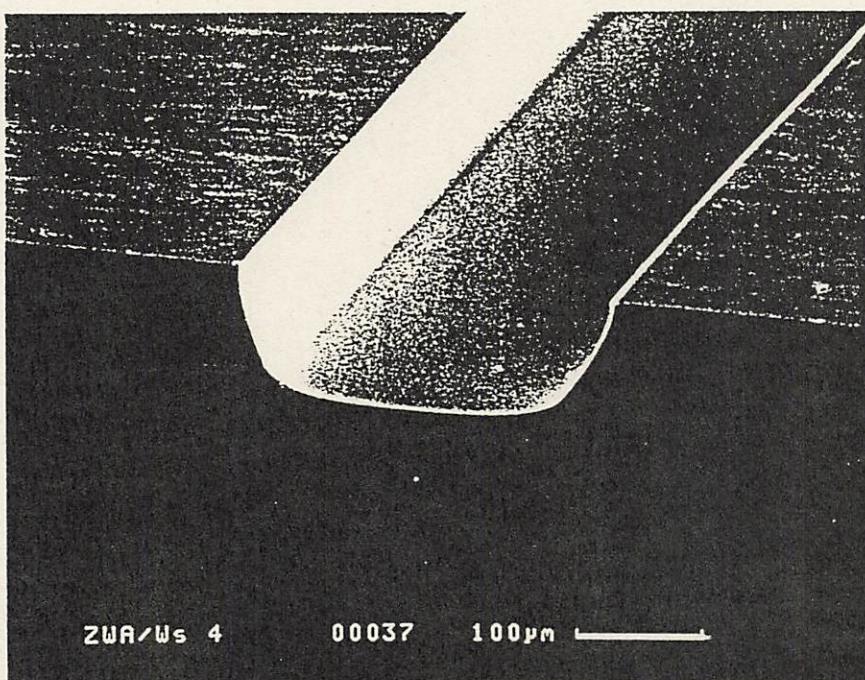


PIE-Hochratenätzen von Silicium (Photolackmaske, entfernt)

Ätzrate: 6  $\mu\text{m}/\text{min}$

Anisotropie: 0.5

Maskenselektivität: 100 - 300:1 (!)



**BOSCH**



## PIE-HOCHRATENÄTZEN VON SILICIUM

Alle Rechte bei ROBERT BOSCH GMBH, auch für den Fall v.c., Schutzrechtsanmeldungen. Jede Verfügungsbefreiung, wie Kopier- und Fertigaberechtl. bei uns.

BVE 15239-5

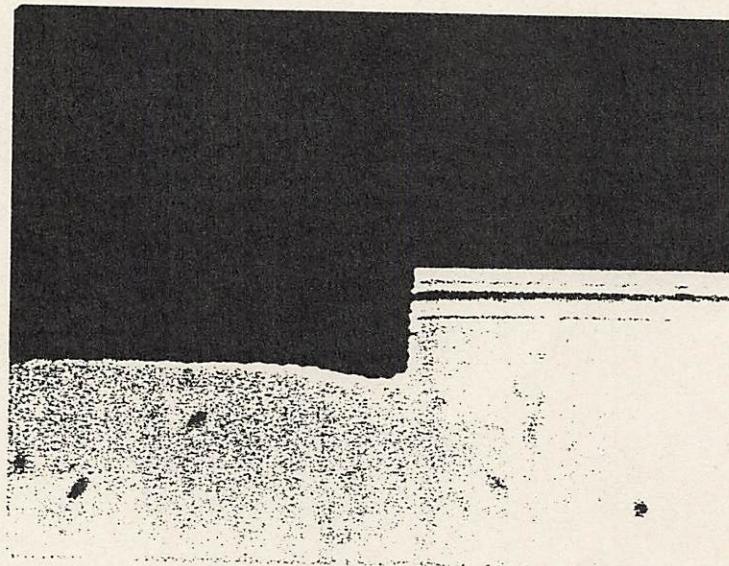
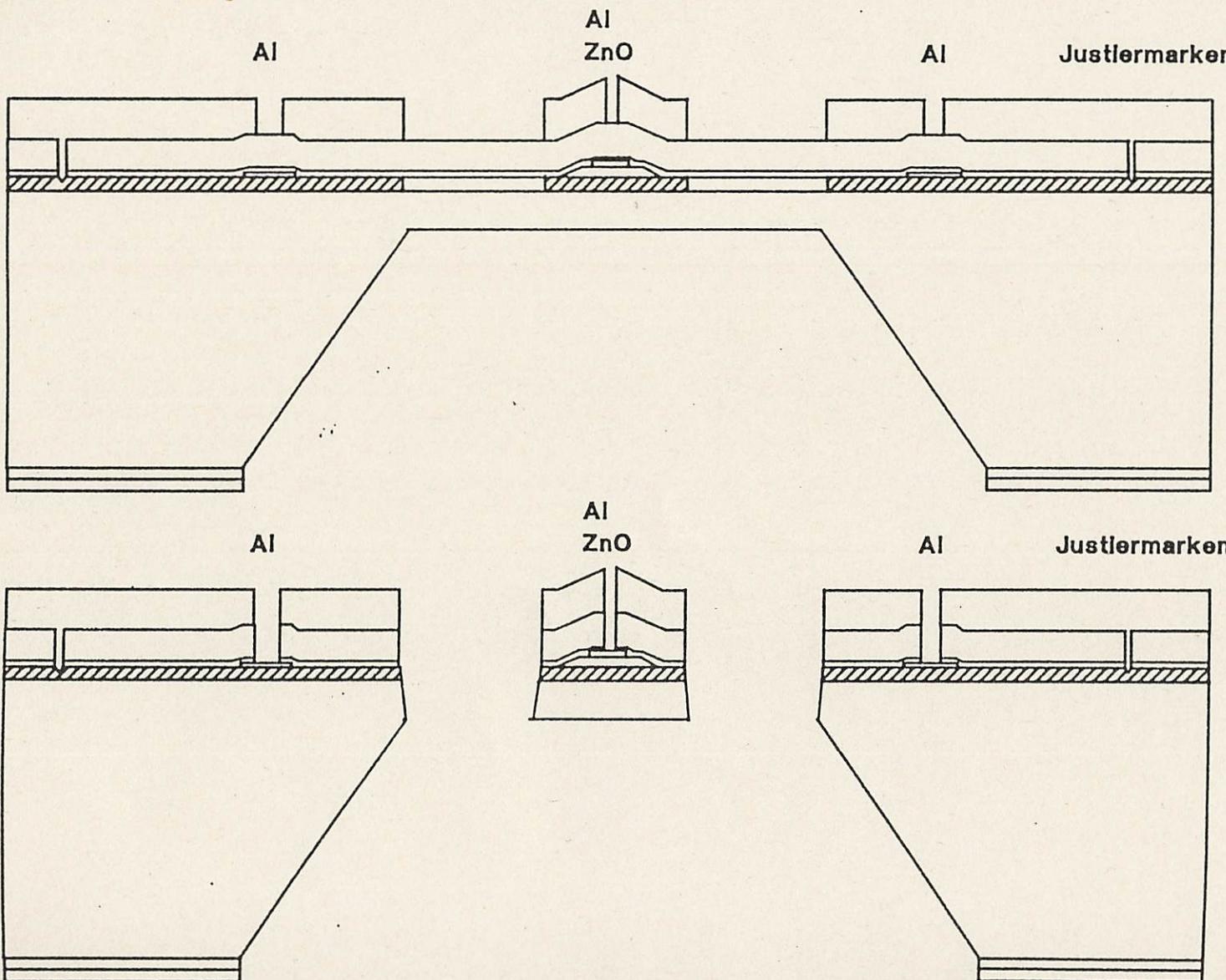


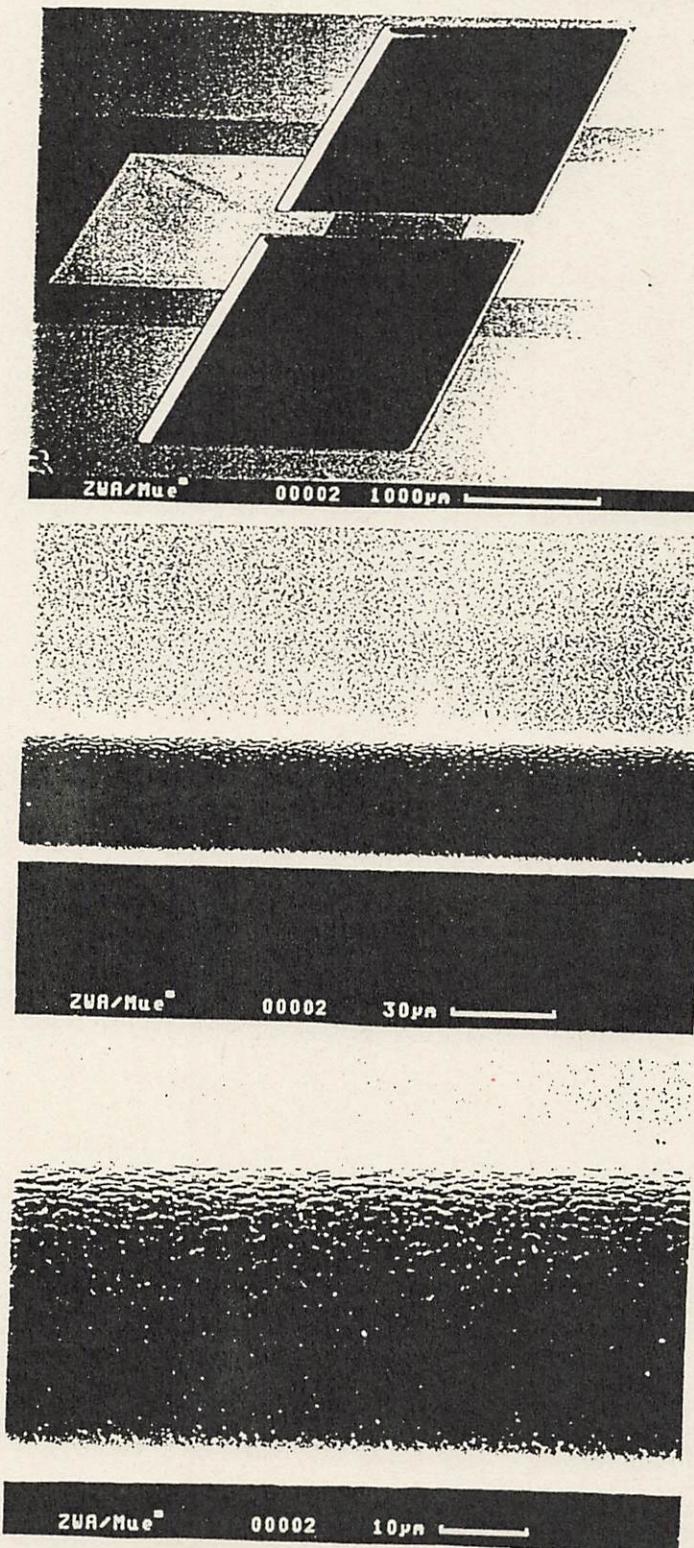
Abb. 7.

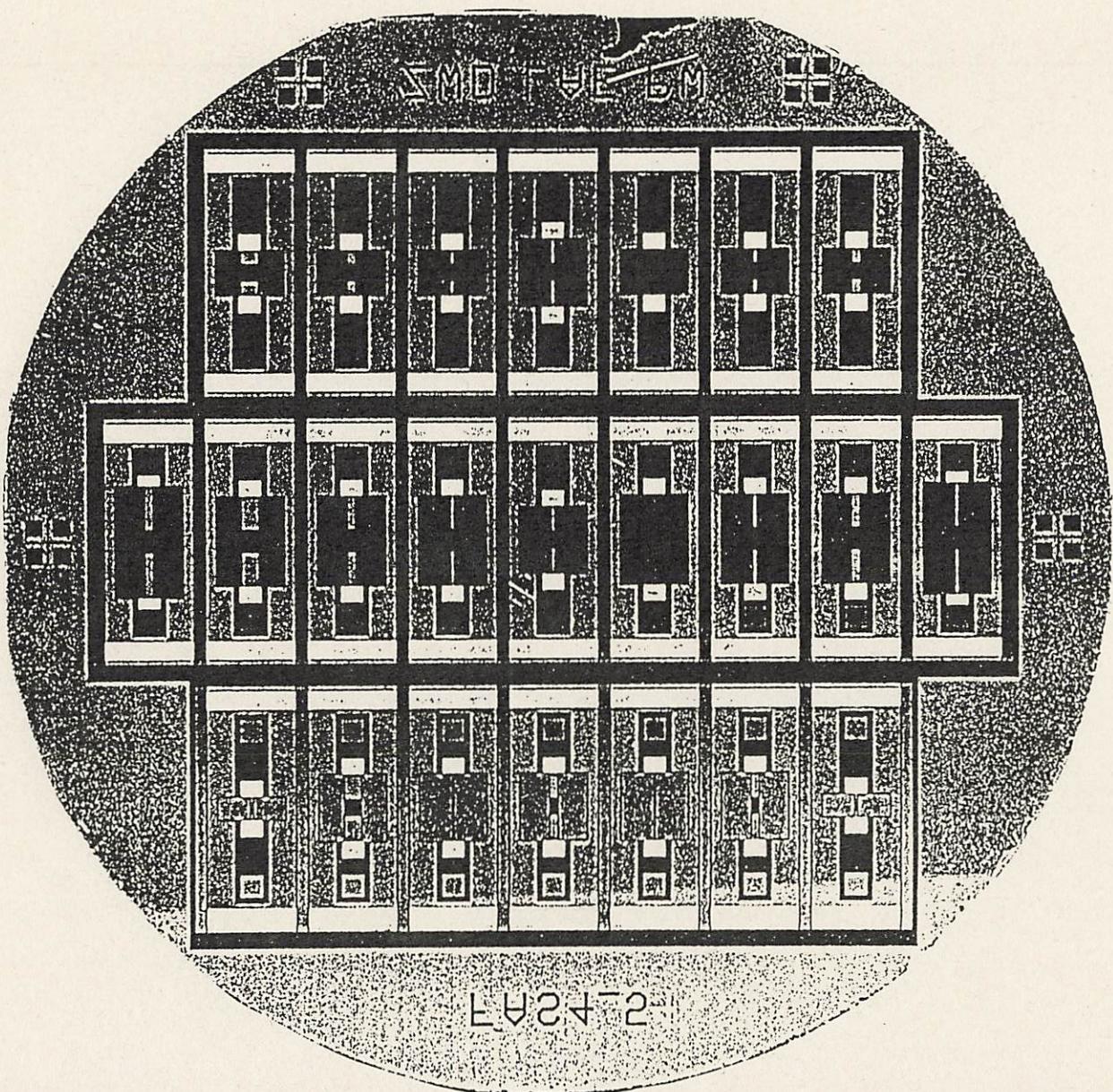




## Frequenzanaloge Kraftsensorstrukturen

Resonante Biegebalken, 50  $\mu\text{m}$  dick, mit piezoelektrischem Antrieb/Abgriff, aus Membran freigeätzt

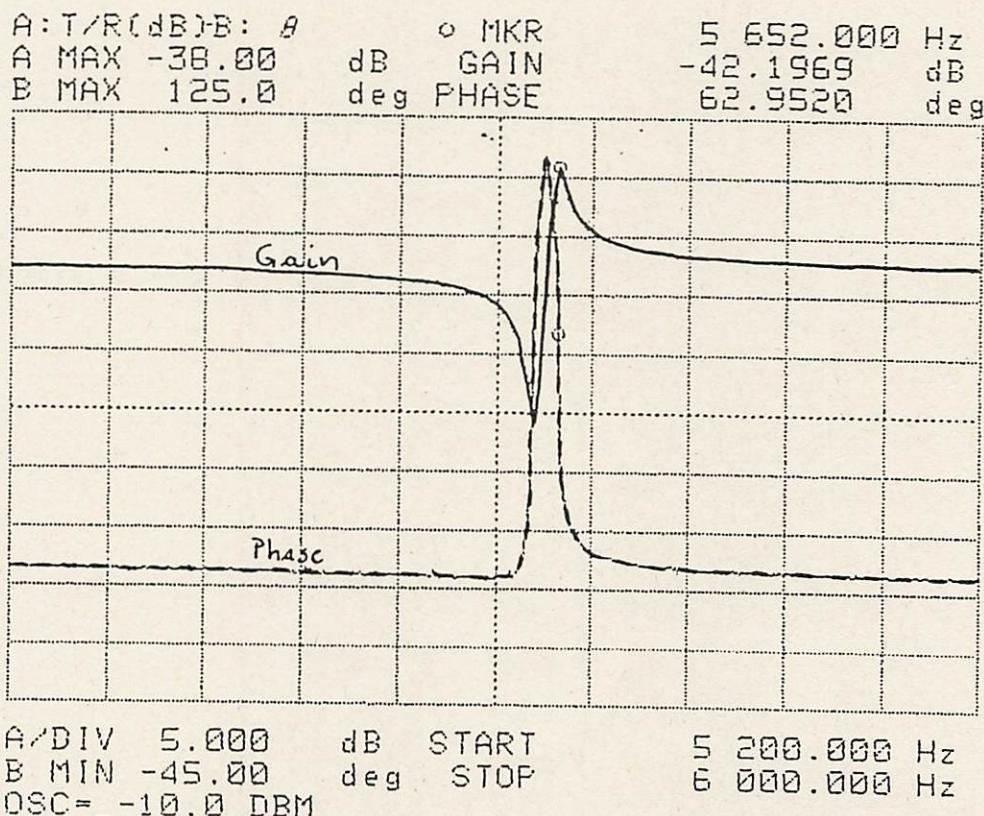




**BOSCH**

## Frequenz-/Phasenkurve (ZnO 150)

Alle Rechte bei ROBERT BOSCH GmbH, auch für den Fall von Schutzrechtsanmeldungen. Jede Verfügbungsbefugnis, wie Kopier- u. Wiedergaberecht, bei uns.



$$l = 6 \text{ mm} \quad b = 0.2 \text{ mm} \quad d = 0.05 \text{ mm}$$

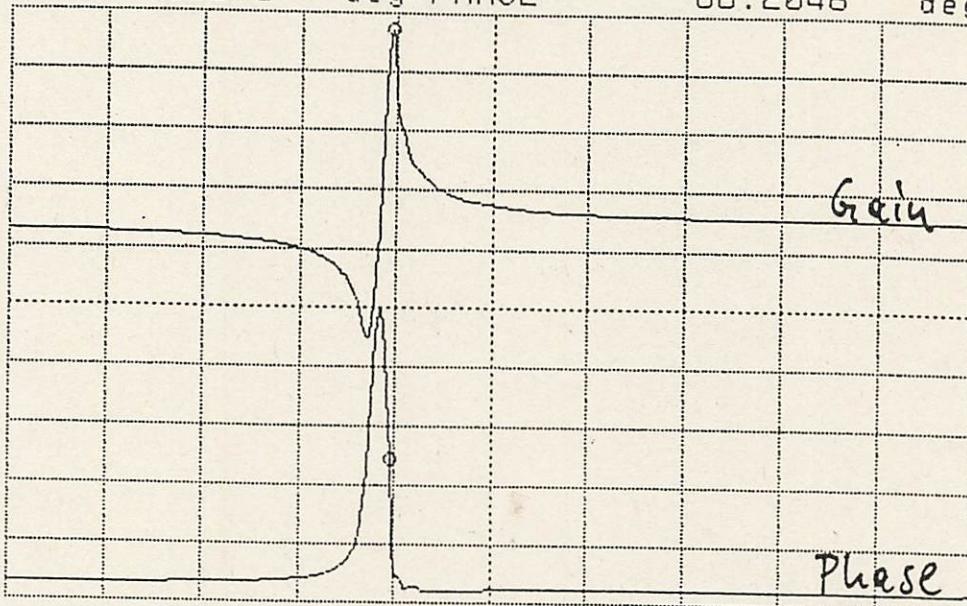
**BOSCH**

ZWD

Bizerba - Hebelrenker  
Kraftunterstützung 5:1

07/92

A:T/R(dB)B: θ      ° MKR      21 975.000 Hz  
 A MAX -30.00 dB      GAIN      -31.4561 dB  
 B MAX 300.0 deg      PHASE      88.2046 deg

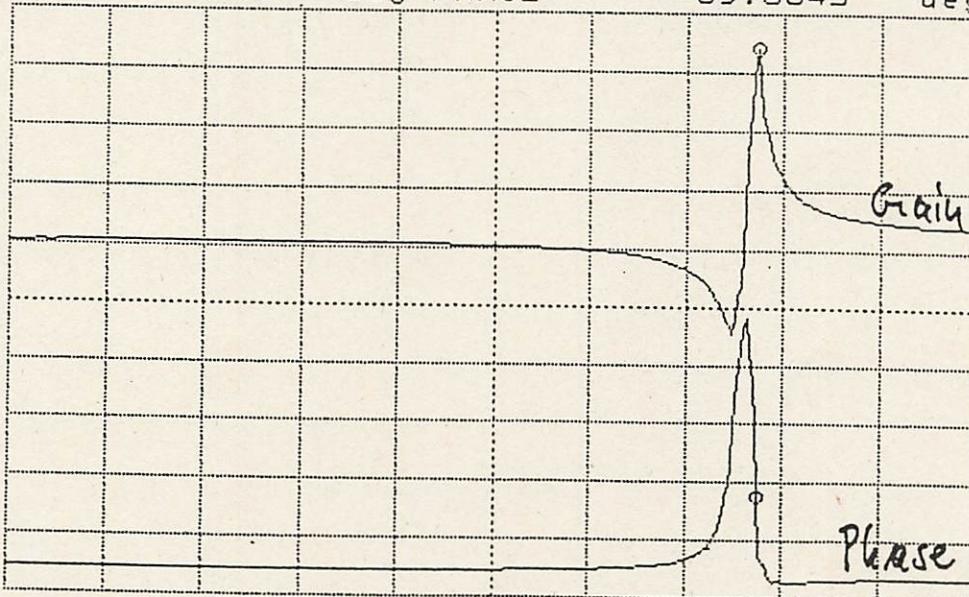


un-  
belastet

A/DIV 5.000 dB START 20 000.000 Hz  
 B MIN 20.00 deg STOP 25 000.000 Hz  
 BMIN = -2.00000E+01

A:T/R(dB)B: θ      ° MKR      23 875.000 Hz  
 A MAX -30.00 dB      GAIN      -32.9815 dB  
 B MAX 300.0 deg      PHASE      69.3845 deg

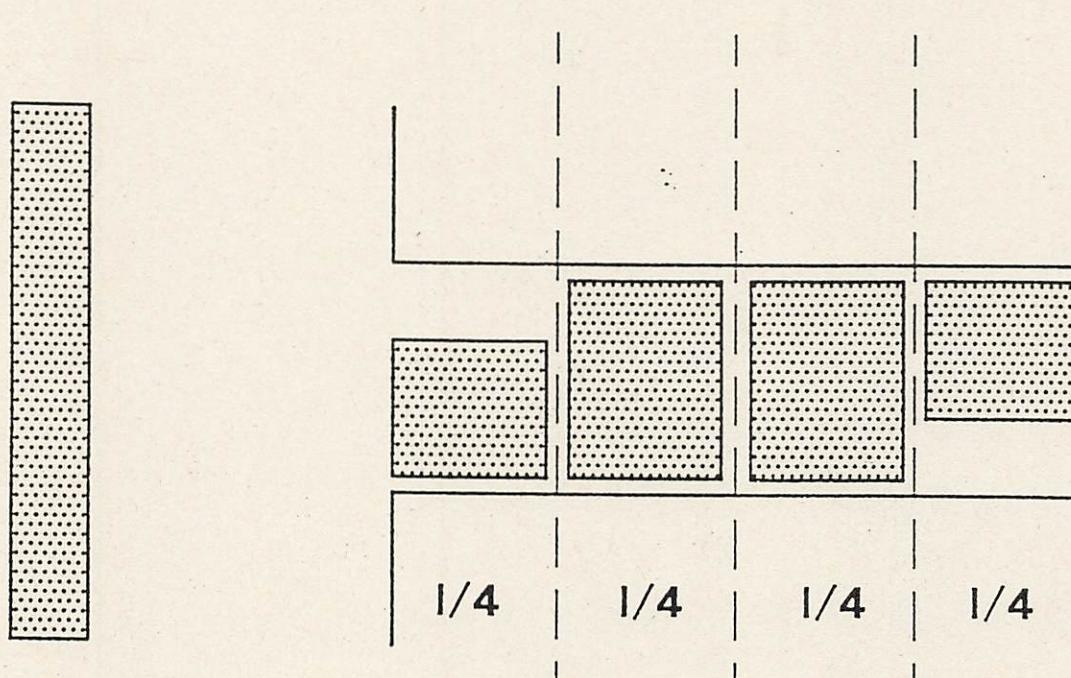
mit  
1kg  
Last



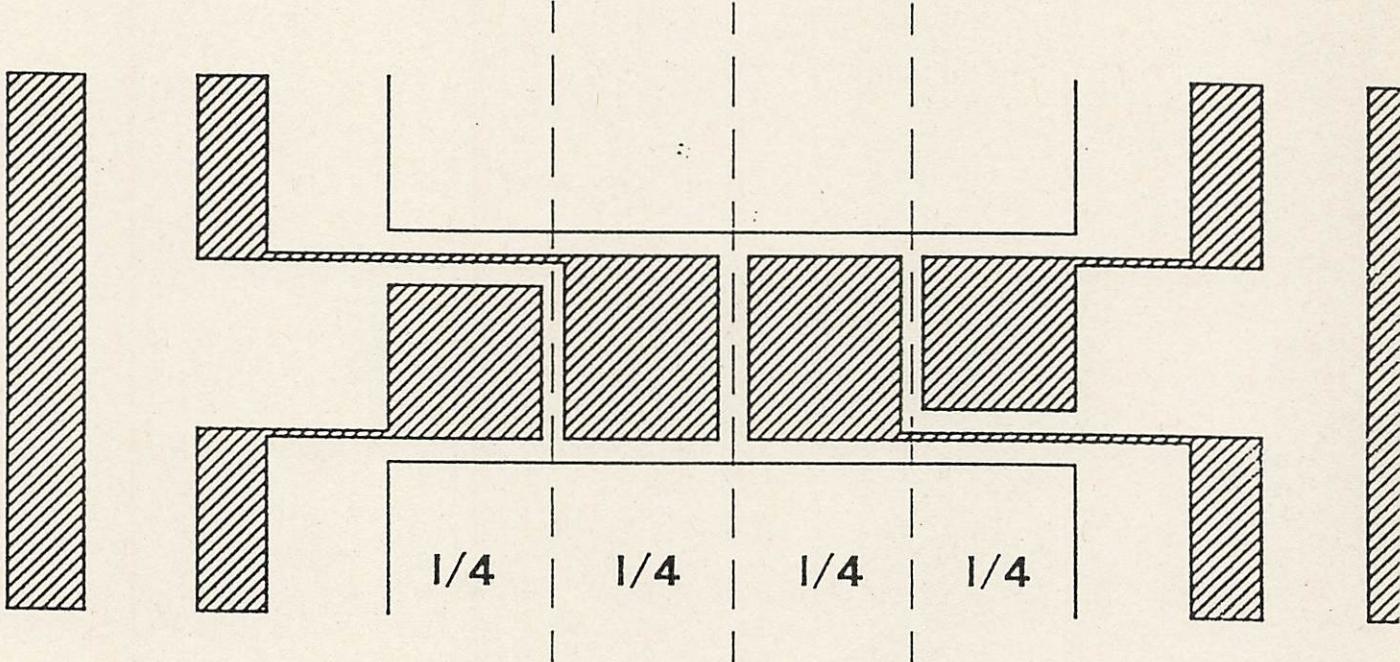
A/DIV 5.000 dB START 20 000.000 Hz  
 B MIN 20.00 deg STOP 25 000.000 Hz  
 BMIN = -2.00000E+01

Zn 0-148      50 μ Biegeballen, l = 4mm  
 b = 800 μ

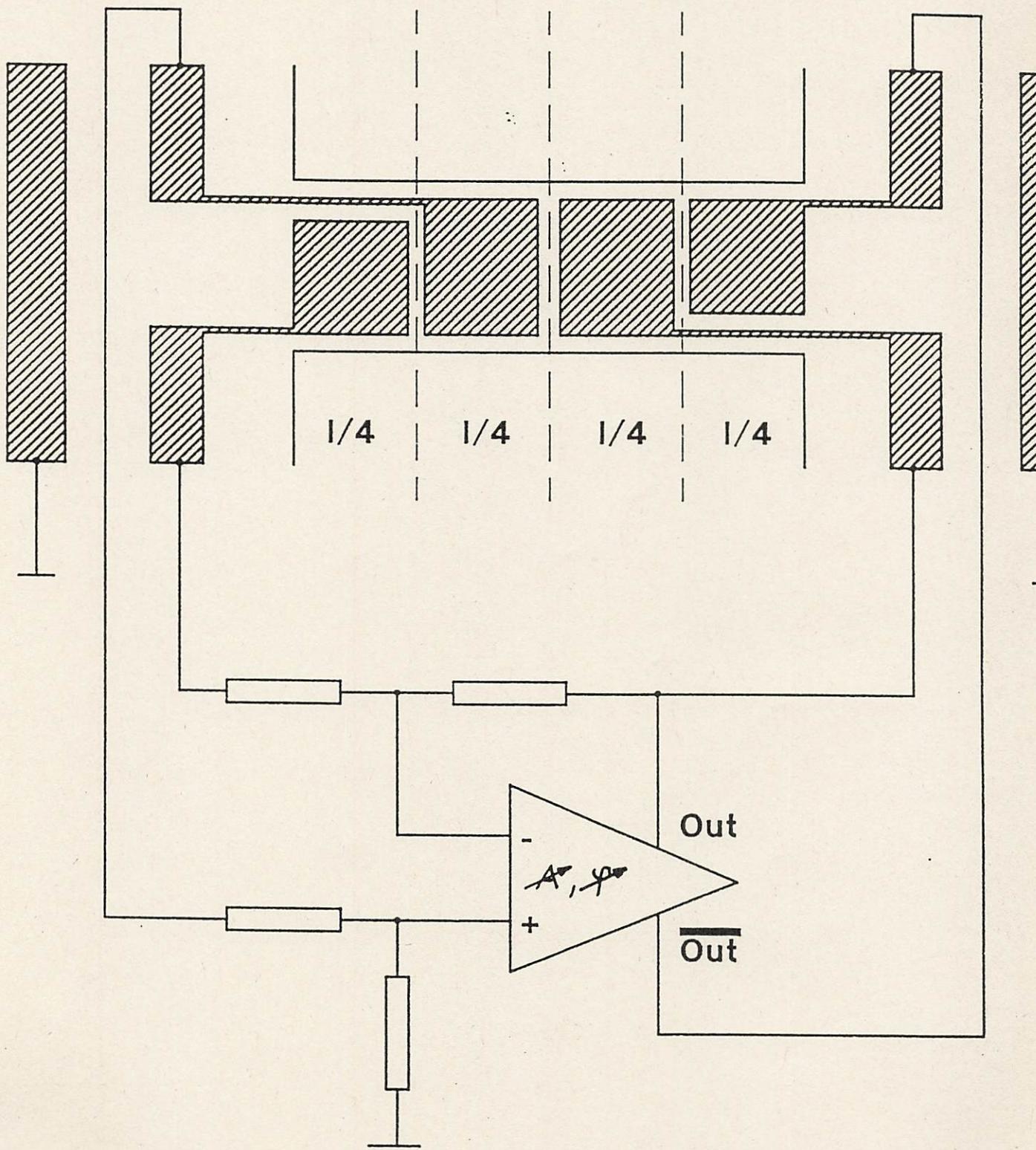
AGG.12



**SiO<sub>2</sub>-Isolationsschicht in den bezeichneten Flächen  
bis zum Silicium durchätzen**



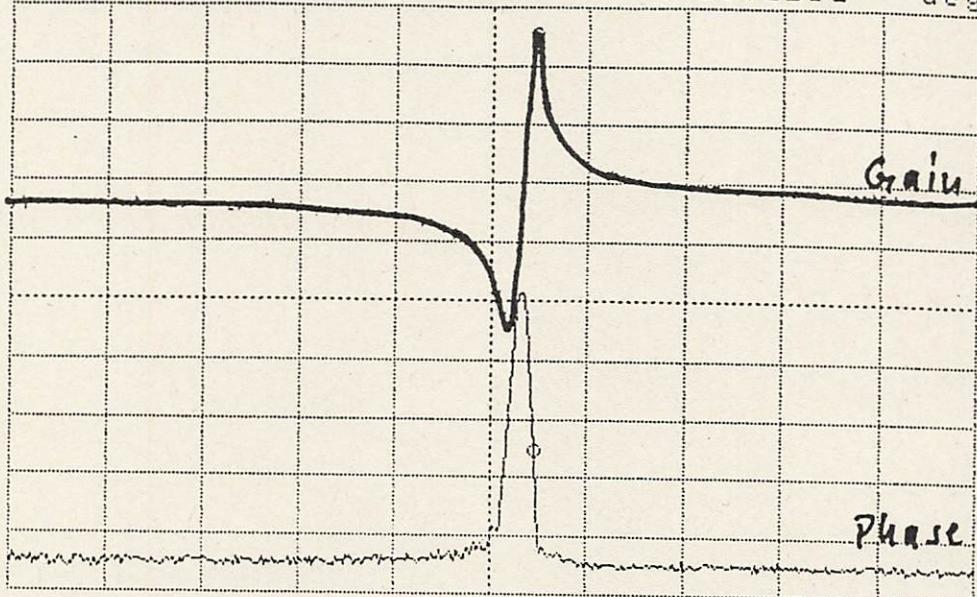
Aluminiumflächen (ZnO-Kontakte, Leiterbahnen,  
Si-Kontakte, Kontaktflächen )



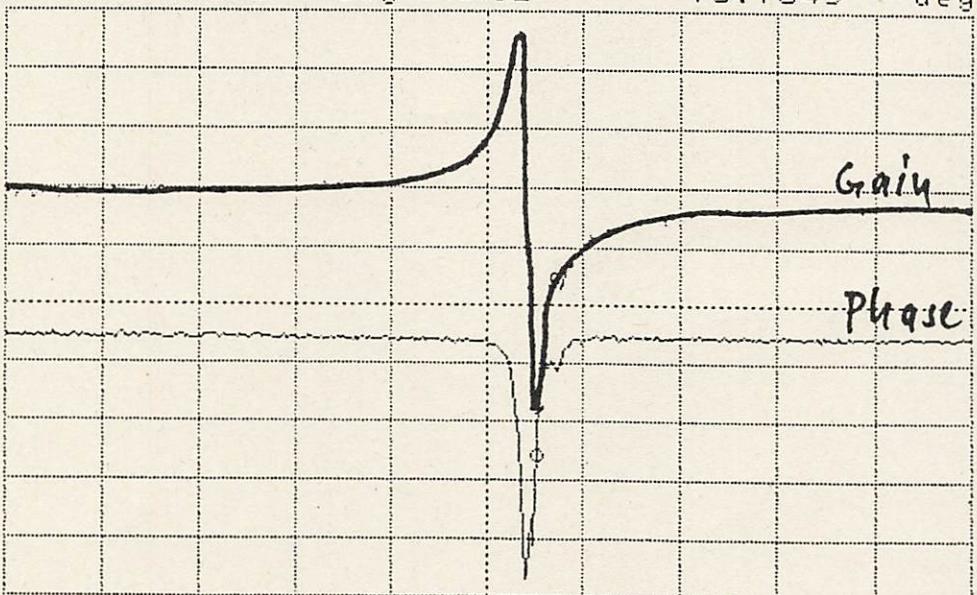
**BOSCH****ZWD****Gain-Phasekurven**

06.92

A:T/R(dB)B: θ ° MKR      A MAX -33.00 dB GAIN -35.0983 dB  
 B MAX 250.0 deg PHASE 61.0518 deg



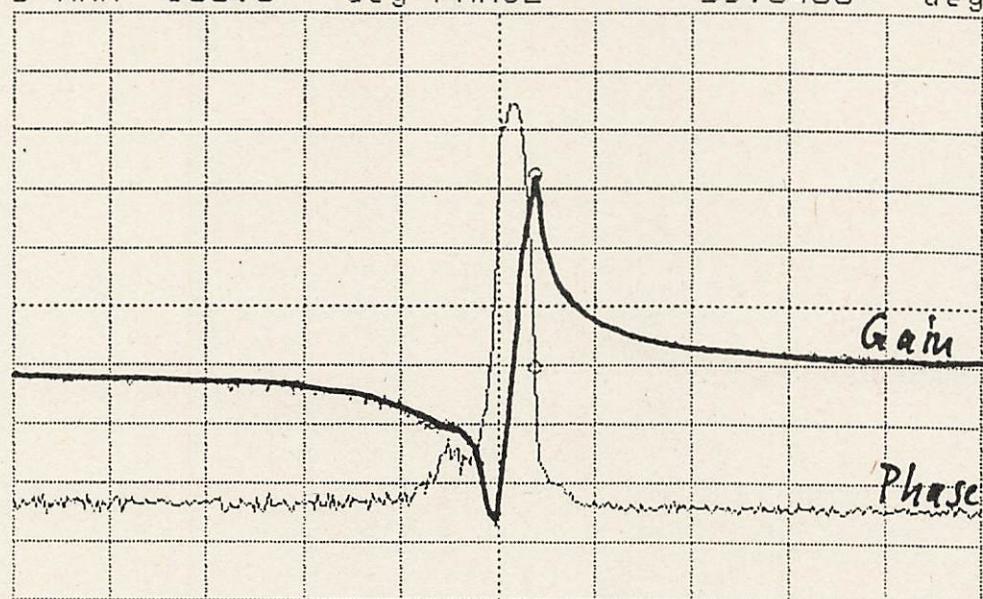
i-i A MIN -80.00 dB START 3 000.000 Hz  
 B MIN 0.000 deg STOP 4 500.000 Hz  
 A:T/R(dB)B: θ ° MKR      A MAX -33.00 dB GAIN -64.8411 dB  
 B MAX 250.0 deg PHASE -76.7649 deg



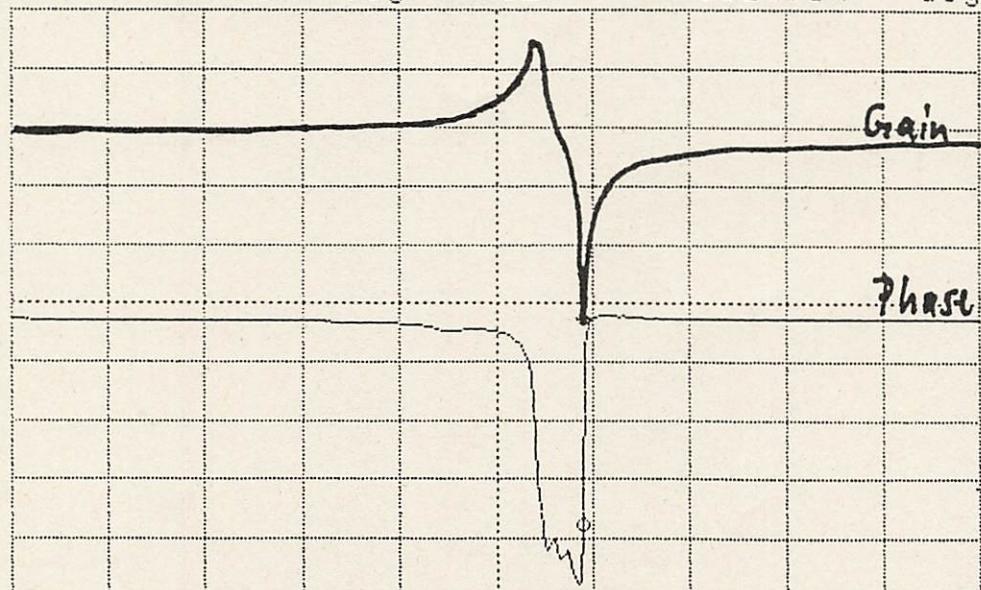
a-i A MIN -80.00 dB START 3 000.000 Hz  
 B MIN -180.0 deg STOP 4 500.000 Hz

ZnO\_156: Modenselektive Anregungs- und Abtastgeometrie (Au-Elektroden), PIE-geätzt, ZnO auf p++-Si ohne Passivierung (3/4)

A:T/R(dB)B:  $\theta$  ° MKR      3 806.250 Hz  
 A MAX -20.00 dB GAIN      -33.8580 dB  
 B MAX 180.0 deg PHASE      59.0460 deg

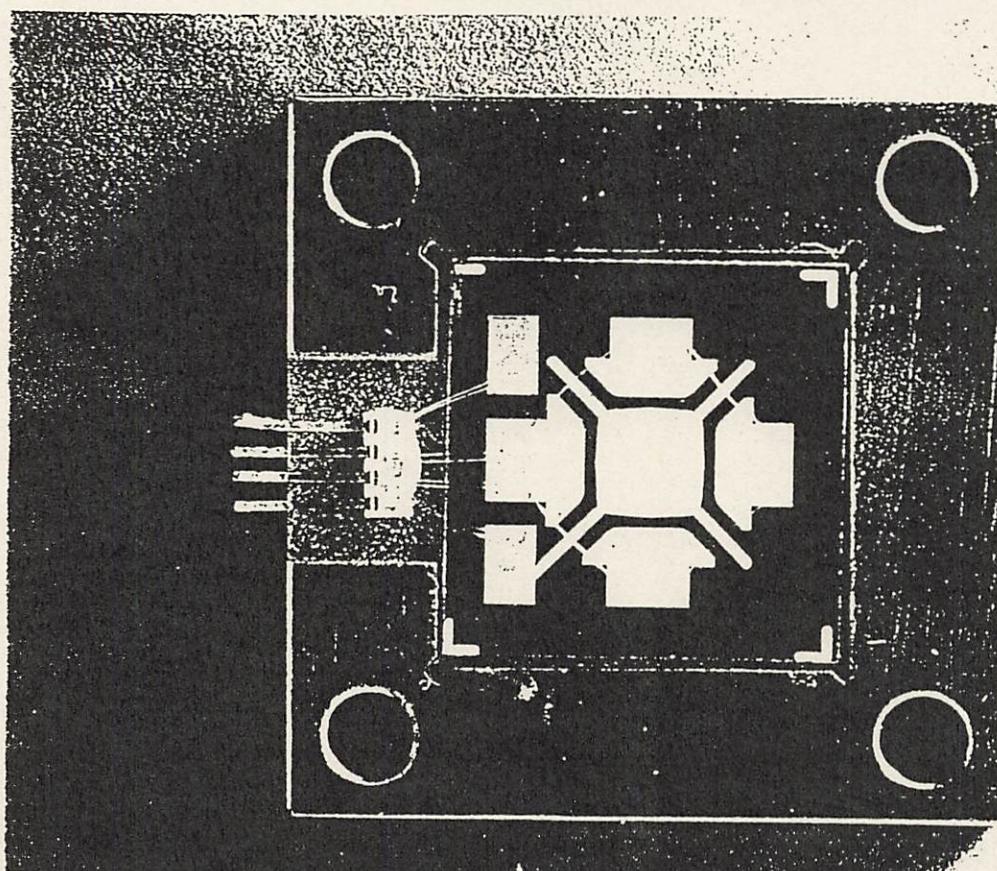
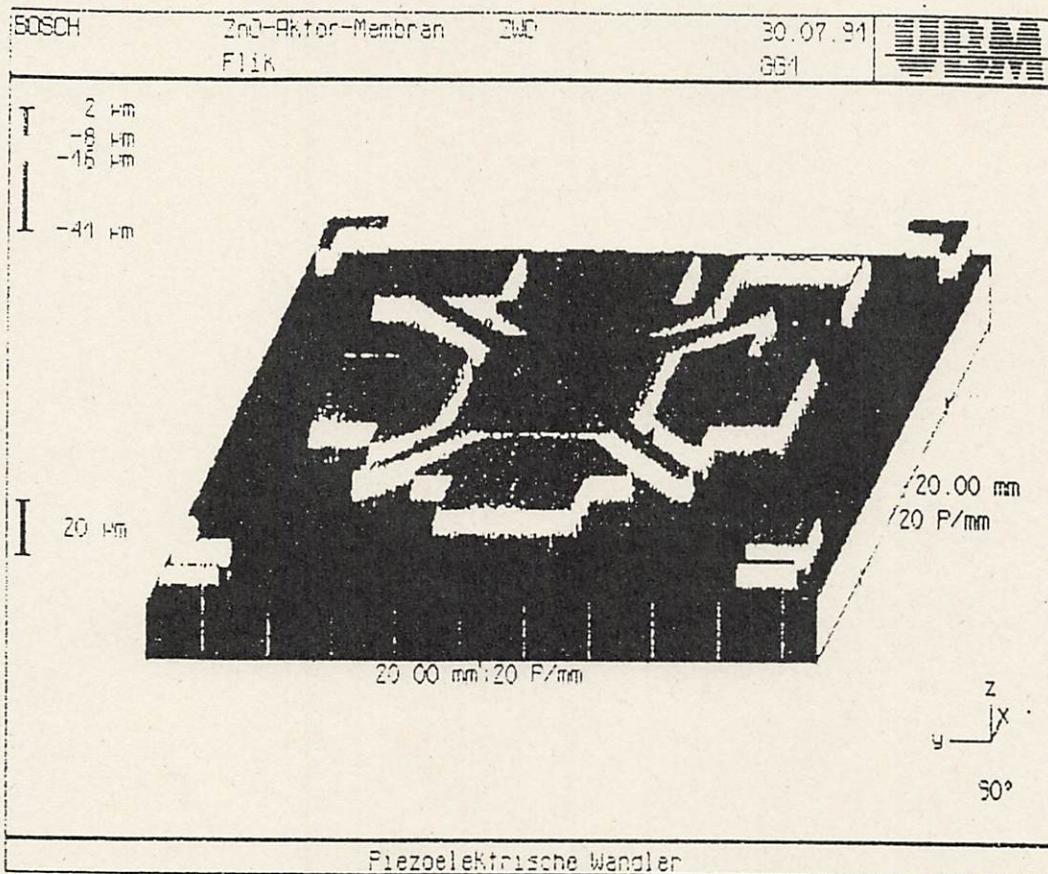


a-a A/DIV 5.000 dB START 3 000.000 Hz  
 B/DIV 20.00 deg STOP 4 500.000 Hz  
 A:T/R(dB)B:  $\theta$  ° MKR 3 885.000 Hz  
 A MAX -30.00 dB GAIN -82.7770 dB  
 B MAX 200.0 deg PHASE -106.714 deg



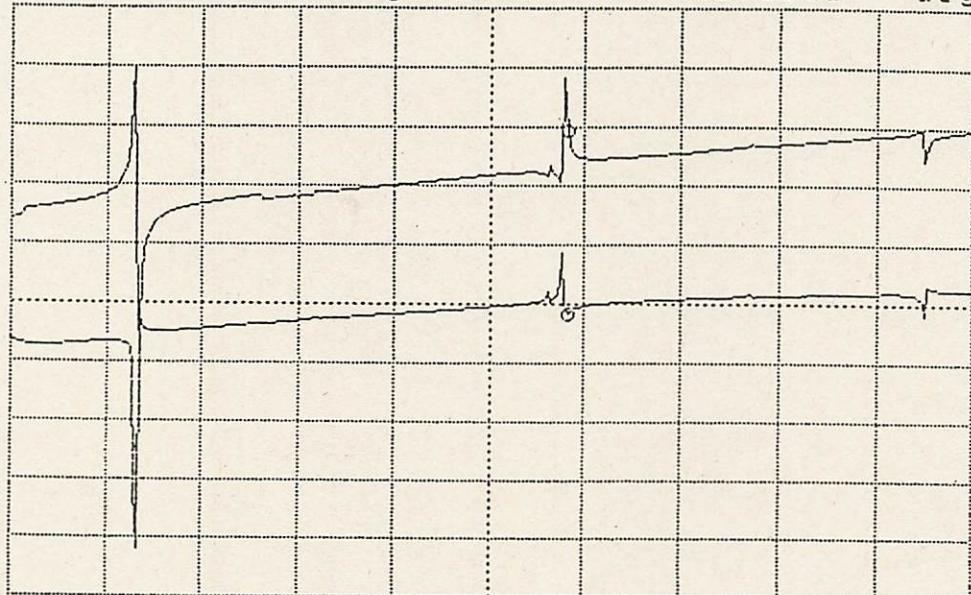
i-a A/DIV 10.00 dB START 3 000.000 Hz  
 B MIN -150.0 deg STOP 4 500.000 Hz

ZnO\_156: Modenselektive Anregungs- und Abtastgeometrie (Au-Elektroden), PIE-geätzt, ZnO auf p++-Si ohne Passivierung (3/4)



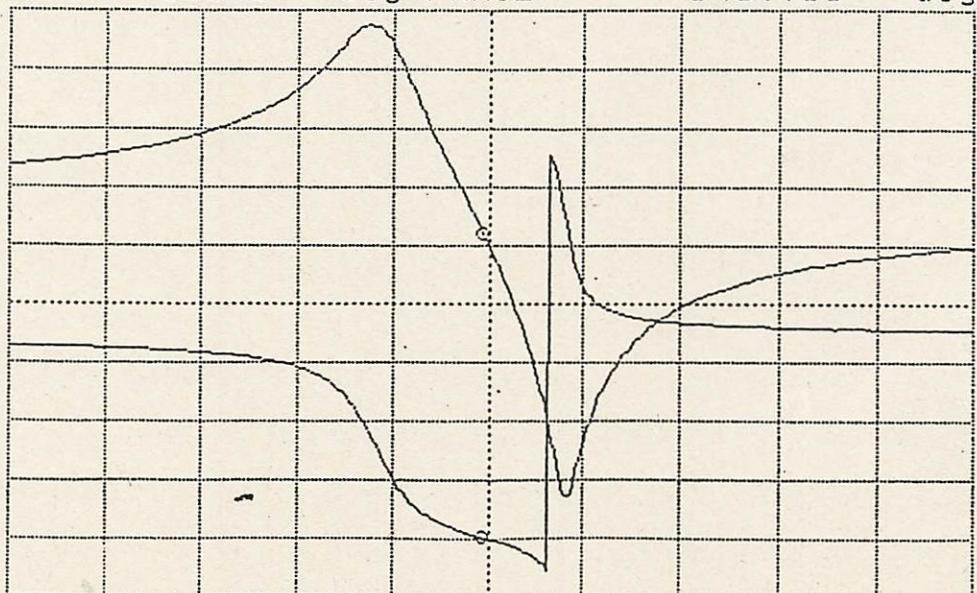
# Resonanter Drucksensor M7 2/4 Gain-Phase-Messungen am HP 4194

A:T/R(dB) B:  $\theta$  ° MKR      A MAX -30.00 dB GAIN 30 125.000 Hz  
A MAX -30.00 dB deg PHASE -40.3398 dB  
B MAX 300.0 deg 40.6981 deg



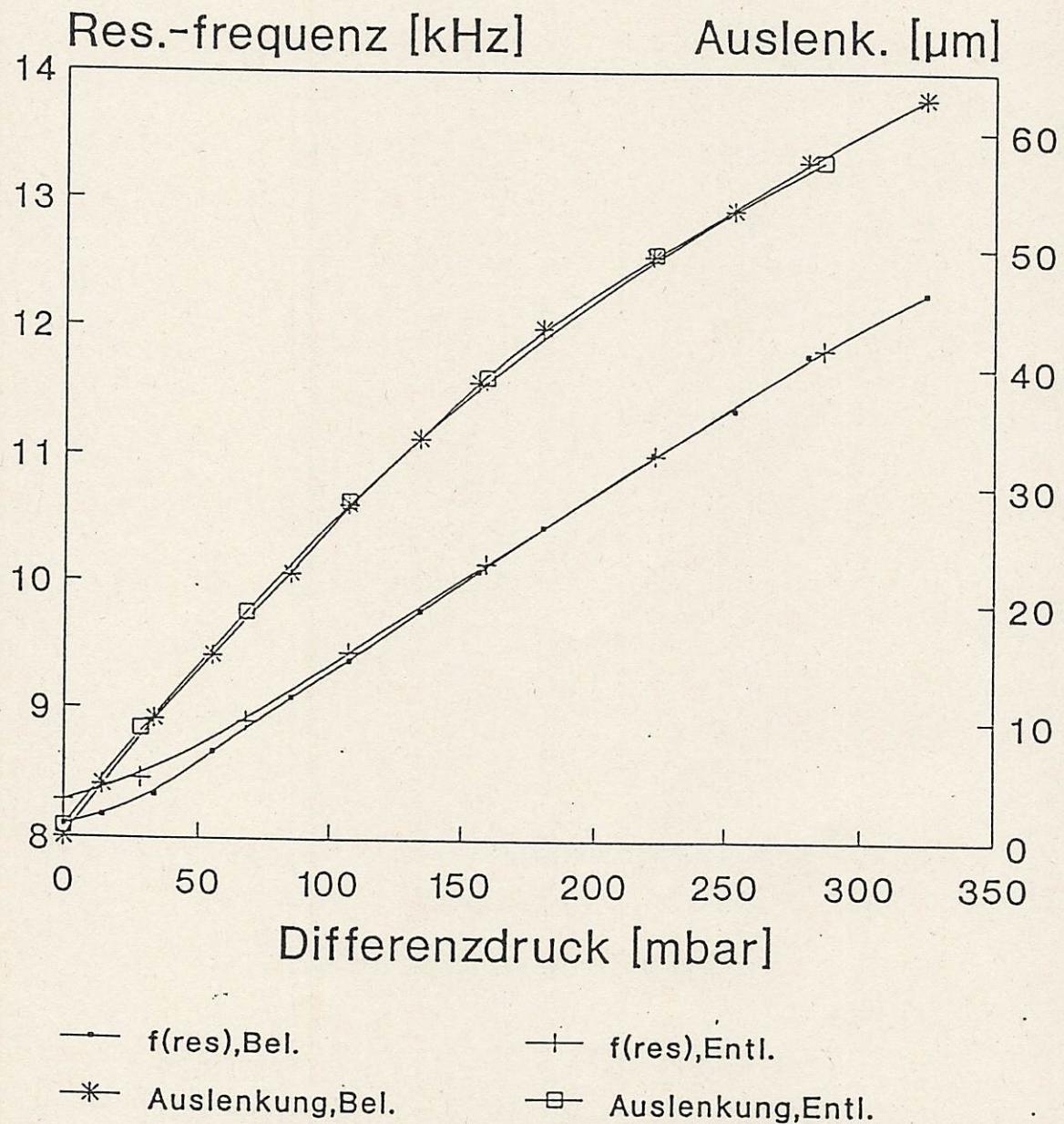
A/DIV 5.000 dB START 1 000.000 Hz  
B/DIV 50.00 deg STOP 51 000.000 Hz  
STOP=\_51000.000 Hz

A:T/R(dB) B:  $\theta$  ° MKR      A MAX -30.00 dB GAIN 7 592.500 Hz  
A MAX -30.00 dB deg PHASE -48.9510 dB  
B MAX 300.0 deg -148.711 deg



A/DIV 5.000 dB CENTER 7 600.000 Hz  
B/DIV 50.00 deg SPAN .1 000.000 Hz  
CENTER=\_7600.000 Hz

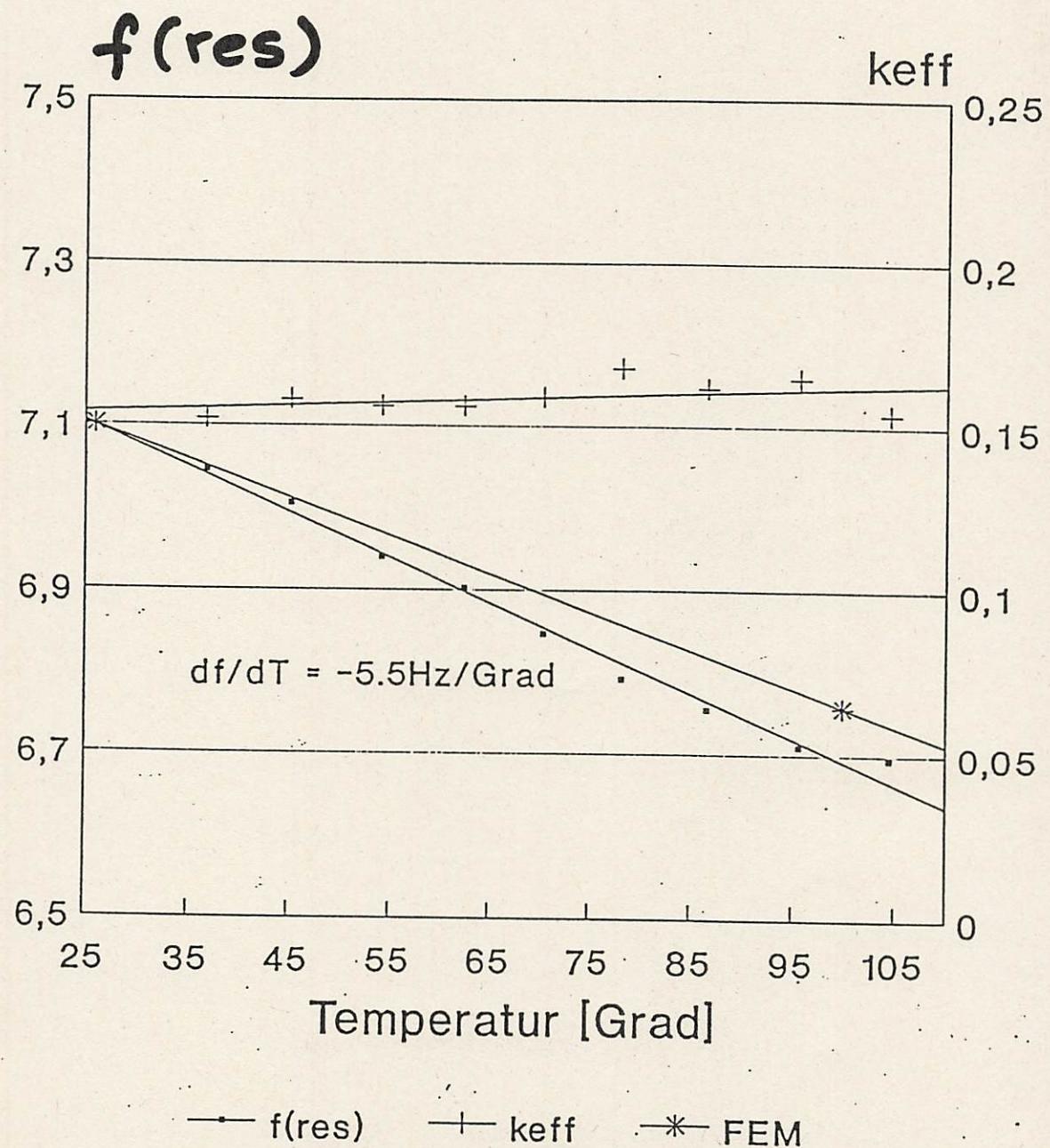
Resonanter Drucksensor M7 2/3  
Resonanzfrequenz in Abhängigkeit vom  
Differenzdruck



HP 4194 und RM600

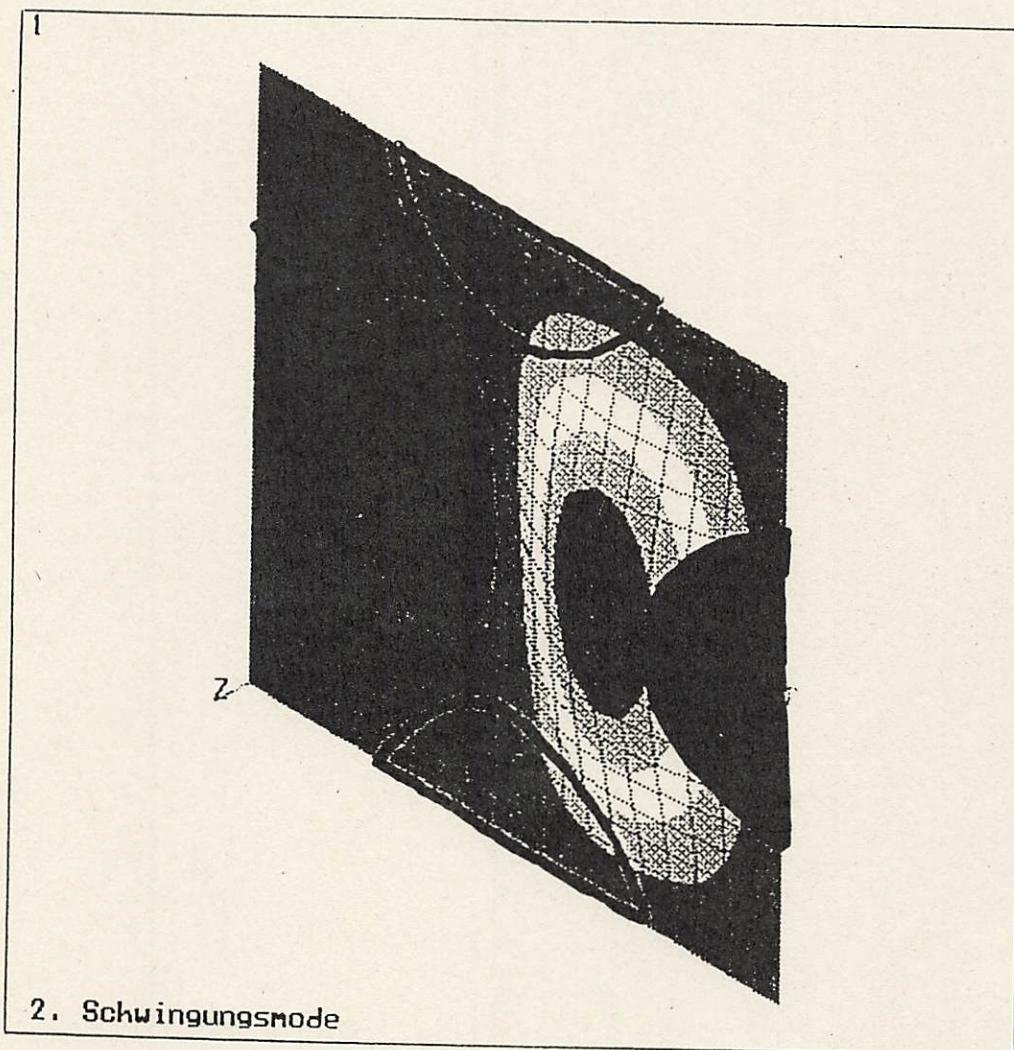
Abb. 2.0

Resonanter Drucksensor M7 2/3  
Serienresonanzfreq. u. eff. Koppelfaktor  
in Abhängigkeit von der Temperatur



HP 4194, Hotchuck

# Modus Selektivität

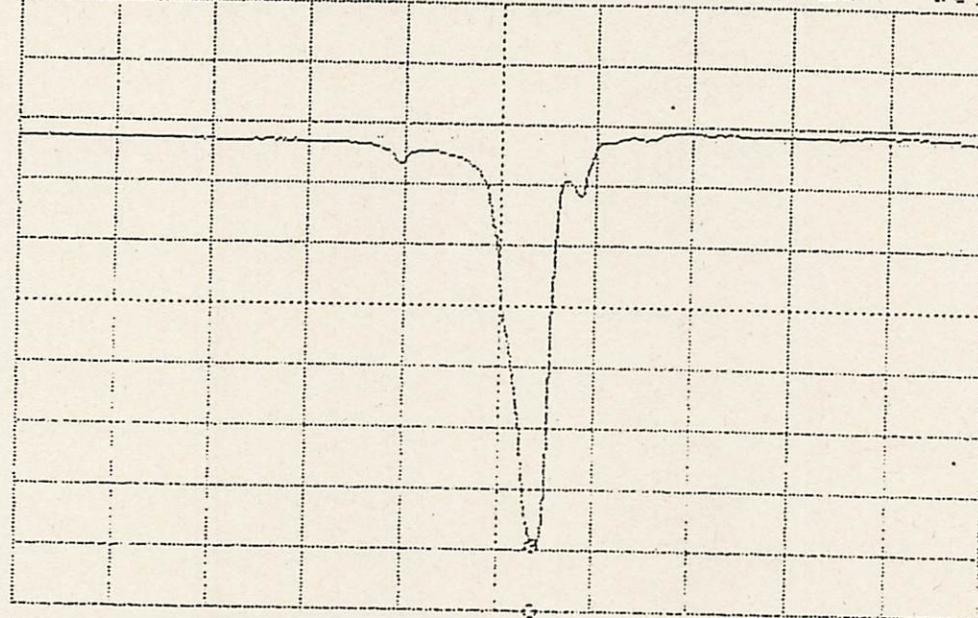


15.25 kHz - Mode

Abb. 22

Resonante ZnO/Si-Membran M7 3/2  
 Aufspaltung der Grundmode bei  
 hydrostatischer Belastung mit Luft

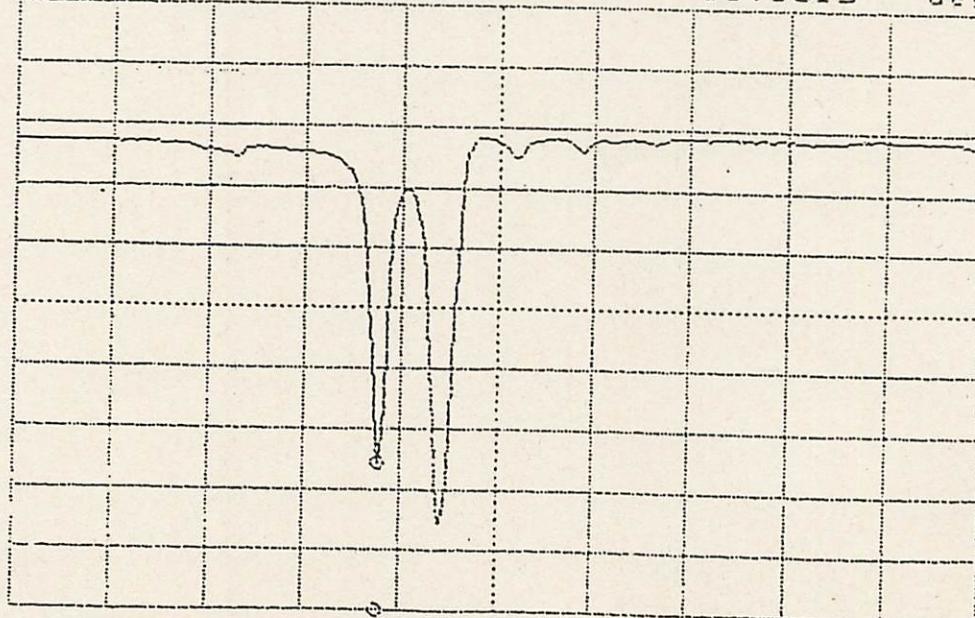
A:T/R(dB) B: θ ° MKR  
 A MAX -36.00 dB GAIN  
 B MAX 60.00 deg PHASE -118.426 dB deg



$p = 0 \text{ bar}$

A/DIV 3.500 dB CENTER 6 400.000 Hz  
 B/DIV 20.00 deg SPAN 3 000.000 Hz  
 AMAX=-3.60000E+01

A:T/R(dB) B: θ ° MKR  
 A MAX -36.00 dB GAIN  
 B MAX 60.00 deg PHASE -91.1815 dB deg



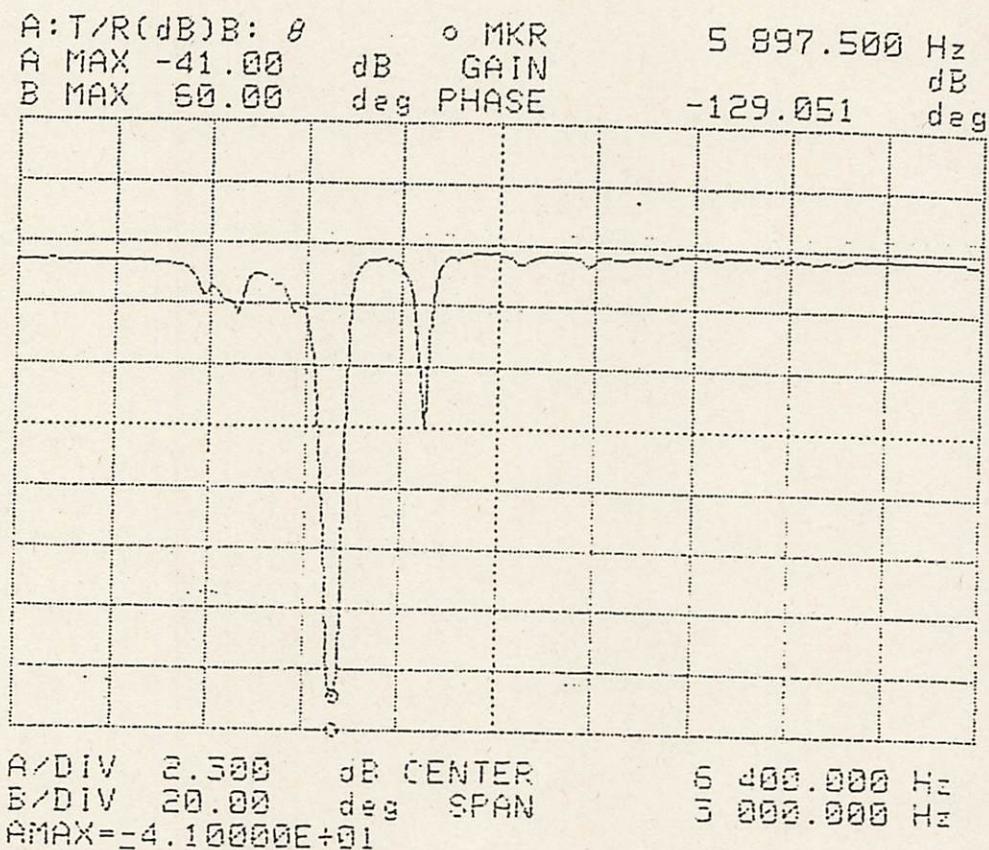
$p = 2 \text{ bar}$

A/DIV 3.500 dB CENTER 6 400.000 Hz  
 B/DIV 20.00 deg SPAN 3 000.000 Hz  
 AMAX=-3.60000E+01

166.23

Resonante ZnO/Si-Membran M7 3/2  
Aufspaltung der Grundmode bei  
hydrostatischer Belastung mit Luft

p = 4 bar



p = 10 bar

