

3 Entwicklung der technologischen Grundlagen frequenz-analoger Sensoren mit dem Schwerpunkt Silicium-Mikromechanik

DR. G. FLIK, DR. F. LÄRMER

ROBERT BOSCH GMBH, POSTFACH 10 60 50, 7000 STUTTGART 10

3.1 Einleitung

Konventionelle Sensoren geben ein analoges Signal wie Spannung, Strom, elektrischer Widerstand, Kapazität usw. aus, dessen Wert von dem einer Meßgröße abhängt. Vor der elektronischen Weiterverarbeitung in einem Prozeßrechnersystem müssen diese analogen Ausgangsgrößen einer relativ aufwendigen Digitalisierung (A/D-Wandlung) unterzogen werden.

Frequenzanaloge Sensoren geben dagegen eine Frequenz aus, die von einer Meßgröße abhängt. Veränderungen der Meßgröße äußern sich in entsprechenden Änderungen der Sensorausgangsfrequenz. Diese Frequenzsignale besitzen quasi-digitalen Charakter und können ohne aufwendige Wandlung, durch einfache Zählung (Frequenz- oder Periodendauermessung), direkt digital weiterverarbeitet werden. Darüberhinaus können frequenzmodulierte Signale störsicher auch über größere Distanzen übertragen werden.

Frequenzbestimmendes Element eines frequenzanalogen Sensors ist ein mechanischer Resonator im allgemeinsten Sinn; die Art der Wellenausbreitung im Resonator (Bulk-, Platten- oder Oberflächenwellen) und die Randbedingungen legen seine Eigenmoden fest. Der in einer geeigneten Eigenmode betriebene mechanische Swinger reagiert z.B. auf eingeleitete Kräfte mit einer Verstimmung seiner Resonanzfrequenzen.

Ein einfaches Beispiel eines kraftempfindlichen mechanischen Resonators stellt ein beidseitig eingespannter Biegebalken dar, der zu resonanten Biegeschwingungen angeregt wird: in Analogie zu einer gespannten Saite steigen oder sinken die Eigenfrequenzen mit größer oder kleiner werdender Zugspannung.

Die Ausnutzung mechanischer Resonanzen zur Sensierung einer Meßgröße bietet weitere Vorteile gegenüber analogen Sensorkonzepten. So werden Resonanzfrequenzen und Reso-

nanzfrequenzänderungen bestimmt durch mechanische Kenngrößen des verwendeten Resonatormaterials und nicht durch die Details der elektromechanischen Wandlung. Veränderungen der Wandlerigenschaften (z.B. alterungsbedingte Drift) gehen nicht in das Sensorsignal ein, da nicht Absolutwerte von Spannungs- oder Strompegeln, sondern Frequenzänderungen ausgewertet werden.

Auflösung und Genauigkeit werden wesentlich durch die Auswertezeit bestimmt und können bei geeigneten Resonatoren mit hoher Schwingungsgüte sehr hohe Werte erreichen. Hinzu kommt, daß die Resonatoreigenfrequenzen außerordentlich stark von mechanischen Spannungen abhängen, so daß eine hohe Sensorempfindlichkeit verfügbar ist.

Besondere Vorteile bestehen zusätzlich, wenn es gelingt, solche Sensoren zu miniaturisieren und mit Hilfe mikromechanischer Verfahrenstechnik zu fertigen: Da eine Vielzahl von Sensoren auf einem Substrat gleichzeitig mit relativ einfachen Verfahrensschritten prozessiert werden kann, sind die Prozeßkosten pro Sensor gering. Da die Sensordimensionen bei solchen Prozessen durch Fotomasken definiert werden, läßt sich eine hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit bei der Herstellung erreichen.

Als Ausgangsmaterialien zur Herstellung mikromechanischer frequenzanaloger Sensoren kommen im wesentlichen Quarz oder Silicium in Frage. Beide Materialien besitzen hervorragende mechanische Eigenschaften und sind als einkristalline Materialien weitgehend frei von Alterungerscheinungen, was bei permanent oscillierenden Gebilden von großer Bedeutung ist. Quarz hat darüberhinaus den Vorteil der Piezoelektrizität, so daß Resonatorstrukturen sehr einfach angetrieben werden können. Gewisse Quartzschnitte zeichnen sich durch eine außerordentlich hohe Temperaturstabilität ($10^{-8}/\text{K}$) der Resonanzen aus. Wegen der großen Verbreitung von Quartzschwingern in der Hochfrequenz- und Uhrentechnik sind ausgereifte, kostengünstige Herstellungstechniken im Prinzip verfügbar.

Silicium als Resonatormaterial besitzt ähnlich vorzügliche mechanische Eigenschaften, erlaubt aber zusätzlich die Integration von Halbleiterfunktionen. Erst integrierte Sensoren, bei denen mikromechanische Strukturen und Auswerteelektronik auf einem Chip vereinigt sind, erschließen das volle Kostensenkungspotential der Mikrotechnik.

Da Silicium nicht piezoelektrisch ist, kann ein piezoelektrischer Antrieb von Siliciumresonatoren nur mit Fremdanregung durch additiv abgeschiedene piezoelektrische (Dünn-)Schichten erfolgen. Die Integration solcher Zusatzschichten in die Verfahrensschritte der Silicium-Mikromechanik bzw. Mikroelektronik stellt ein schwerwiegendes technologisches Problem dar.

Alternative Antriebskonzepte wie das elektrothermische, elektromagnetische oder elektrostatische Prinzip kommen zwar ohne zusätzliche Antriebsschichten aus, bringen aber andere Probleme mit sich (hohe Betriebstemperaturen bzw. Erfordernis externer Magneten bzw. extrem hohe Impedanzen).

Im Rahmen des BMFT-Verbundprojekts "Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung frequenzanaloger Sensoren" wurden bei BOSCH die Grundlagen frequenzanaloger Kraft- und Drucksensoren in Silicium mit Fremdanregung durch piezoelektrisches Zinkoxid erarbeitet. Die Integration des piezoelektrischen Materials in mikromechanische Verfahrensabläufe wurde nachgewiesen und geeignete Batch-Prozesse entwickelt, die in der Folge mehrmals verbessert wurden. Damit war es möglich, eine Vielzahl von Demonstratoren herzustellen, zu charakterisieren, optimieren und an die Verbundpartner auszuliefern. Die Integrierbarkeit mit mikroelektronischen Funktionen wurde prinzipiell gezeigt; eine geeignete elektronische Schaltung wurde entwickelt und als Surface Mounted Device (SMD) aufgebaut.

3.2 Piezoelektrisch angetriebene Sensorstrukturen

In diesem Abschnitt werden kurz die zu realisierenden Designs und ihre Sensorfunktion erläutert und dann auf die mit der Herstellung verbundenen Probleme eingegangen.

3.2.1 Frequenzanaloger Drucksensor

In Bild 3.1 ist das Grundprinzip eines einfachen frequenzanalogen Drucksensors in Silicium-Mikromechanik schematisch dargestellt. Der Sensor besteht aus einer dünnen Silicium-Membran, wie sie durch Naßätzen von der Waferrückseite erhalten werden kann. Die Membranvorderseite trägt eine piezoelektrische Zinkoxidschicht, auf der sich eine Metallisierung (elektrische Leiterbahnen bzw. Deckelektroden) und eine geeignete Passivierung befindet. Die Gegenelektrode besteht aus höherdotierten Leitungsbereichen im Silicium unterhalb des Zinkoxids. Zinkoxid, Metallisierung (und Passivierung) werden so strukturiert, daß eine optimale Wandlung einer angelegten elektrischen Spannung in eine mechanische Auslenkung der Membran erzielt werden kann.

Wird eine elektrische Wechselspannung an die piezoelektrische Wandlerschicht angelegt, so wird die Drucksensormembran zu Schwingungen derselben Frequenz angeregt. Entspricht die Antriebsfrequenz einer Resonanz der Membran, so tritt eine um den Gütefaktor der getroffenen Mode überhöhte Resonanzamplitude und eine charakteristische Phasenlage zur Antriebsspannung auf. Dies kann durch eine elektronische Oscillatorschaltung ausgenutzt werden, um die Membran kontinuierlich in einer gewünschten Mode selbsttätig am Schwingen zu halten, d.h. zu entdämpfen.

Wird nun Druck z.B. von unten auf die Membran ausgeübt, wird diese z.B. nach oben ausgelenkt, wobei es zu starken inneren Spannungen in der Membran kommt, die die Eigenfrequenzen entsprechend stark verstimmen. Die Schwingfrequenz der Membran ist also umgekehrt ein empfindliches Maß für den angelegten Druck. Aufgrund der Symmetrie dieses Designs wird nicht ohne weiteres das Druckvorzeichen (Über- oder Unterdruck von einer Seite) erkannt, was sich bei einem Drucksensor aber im allgemeinen nicht störend auswirkt.

Mit der Herstellung dieses Sensors sind folgende Probleme verbunden:

- Aufbringen und Strukturieren des ZnO in einer optimalen Geometrie
- Aufbringen der Metallisierung und Strukturieren, gegebenenfalls Eintreiben der Substratkontakte, ohne das ZnO dabei zu schädigen
- Aufbringen und Strukturieren der Passivierung, ohne das ZnO dabei zu schädigen

Die Reihenfolge hinsichtlich des zweiten und dritten Problempunkts kann modifiziert werden.

Zum ersten Punkt ist anzumerken, daß ZnO praktisch von allen verdünnten Säuren und sogar von Neutralwasser mehr oder weniger stark, von verdünnten Laugen schwächer angegriffen wird. Das Problem bei der Strukturierung ist also nicht die Ätzbarkeit an sich, sondern die Kontrolle der lateralen Unterätzung (Strukturgenauigkeit). Eine optimale Geometrie muß aus Berechnungen der mechanischen Spannungsverteilung auf einer schwach ausgelenkten Membran abgeleitet werden.

Bei der Strukturierung der Metallisierung auf bereits mit ZnO versehenen Wafer muß dafür gesorgt werden, daß der Metallätzprozeß gegenüber ZnO ausreichend selektiv ist (siehe vorstehender Punkt!). Ein eventuell erforderlicher thermischer Eintreibeprozeß der Substratkontakte darf zu keiner Schädigung des ZnO führen.

Die Passivierung der Drucksensorstruktur soll ZnO und Metallisierung vor späteren Umwelt-einflüssen schützen bzw. eine Kontamination von Folgeprozessen durch ZnO verhindern. Da beim Drucksensordesign bei allen Herstellungsschritten eine planare Wafervorderseite bis zuletzt erhalten bleibt und der Naßätzprozeß zur Membranherstellung in heißer, aggressiver Kalilauge ausschließlich von der Waferrückseite erfolgt, werden an die Passivierungseigenschaften keine übermäßig hohen Ansprüche gestellt. Kritischer ist die Neutralitätsforderung an den Schichtabscheideprozeß gegenüber dem eventuell bereits metallisierten ZnO.

3.2.2 Kraftsensor

Bild 3.2 zeigt ein Schema eines frequenzanalogen Kraftsensors. Das Kernstück des Sensors ist ein beidseitig im Siliciumfestland verankerter, dünner Biegebalken, der auf seiner Vorderseite die piezoelektrische Antriebsschicht, die Metallisierung (elektrische Leiterbahnen bzw. Deckelektroden) und die Passivierung trägt. Die Gegenelektrode unter den ZnO-Feldern wird durch höherdotierte Leitungsbereiche im Silicium gebildet. ZnO und Metallisierung sind so strukturiert, daß eine angelegte elektrische Spannung eine maximale Auslenkung des Biegebalkens bewirkt. Zur Stabilisierung bzw. Empfindlichkeitseinstellung dienen beidseitig des Biegebalkens angebrachte, waferdicke Stützstege.

Eine angelegte elektrische Wechselspannung geeigneter Frequenz führt zu einer resonanten Schwingung des beidseitig eingespannten Biegebalkens mit charakteristischer Resonanzamplitude und -phase. Diese Wechselspannung wird dem Schwinger selbsttätig von einer Oscillatorelektronik zugeführt.

Zug- oder Druckkräfte auf den Sensor in Längsrichtung verteilen sich zwischen den seitlichen Stabilisierungsstegen ("Shunts") und dem Resonatorelement, dessen Resonanzfrequenzen dadurch verstimmt werden. Die Schwingungsfrequenz gibt also umgekehrt Aufschluß über die angelegte äußere Kraft.

Zusätzlich zu den bei den Drucksensoren beschriebenen Problempunkten tritt hier ein weiterer Punkt hinzu:

- Freilegen der Biegebalken durch Strukturierung der bereits komplett prozessierten Wafervorderseite (Verlassen der Waferplanität!)

Die Ätzprozesse laufen also nicht mehr ausschließlich auf der Waferrückseite ab, was beim Drucksensor einen relativ einfachen Schutz der Wafervorderseite erlaubt; vielmehr wird jetzt auch die Wafervorderseite unmittelbar einem Ätzmedium ausgesetzt.

Ist die Vorderseitenstrukturierung ein Naßätzprozeß in heißer aggressiver Kalilauge, so werden dadurch extreme Anforderungen an die Beständigkeit der Passivierung gestellt, die ihrerseits unter engen Randbedingungen (minimale ZnO-Schädigung!) aufgebracht werden muß. Ist dies ein Trockenätzprozeß in chemisch reaktiven Plasmen, treten Probleme aufgrund der geringen Maskenselektivität bisher bekannter Plasmaätzprozesse auf.

3.3 Prozeßintegration von piezoelektrischem ZnO

In diesem Abschnitt werden die technologischen Grundlagen behandelt, die eine Einbindung der piezoelektrischen ZnO-Dünnenschicht in einen mikromechanischen Batch-Ablauf ermöglichen.

3.3.1 Passivierung von ZnO

Voraussetzung für den Einsatz von piezoelektrischem ZnO in einer Sensorumgebung ist eine zuverlässige Schutzschicht, die das empfindliche Material dauerhaft vor Umwelteinflüssen oder aggressiven Ätzmedien abschirmt. Die Forderung einer minimalen Schädigung des ZnO bei der Passivierschichtabscheidung schließt Hochtemperaturabscheideprozesse aus. Damit kommen nur Niedertemperatur-Plasmaabscheideprozesse dielektrischer Schichten (PECVD oder Sputterbeschichtung) in Frage.

Gebräuchliche Passivierschichten wurden unter diesen Randbedingungen getestet. Es wurde einmal die Beeinflussung der piezoelektrischen Eigenschaften des ZnO durch den Schichtabscheideprozeß untersucht, zum anderen Schichthaftung und -Beständigkeit in heißer Kalilauge, was ein sehr hartes Beurteilungskriterium darstellt.

Ein spezielles Niedertemperatur-Plasmaoxid kann ohne Schädigung auf ZnO aufgebracht werden, zeigt in heißer Kalilauge aber Pinholes und Ablösungserscheinungen; Plasma-Nitridschich-

ten direkt auf ZnO abgeschieden führen dagegen zum elektrischen Ausfall der elektrischen Isolationseigenschaften. Eine Kombination aus Plasmaoxid und darüber abgeschiedenem Plasmanitrid schädigt ZnO nicht (vgl. Bild 3.3) und erweist sich als über mehrere Stunden in heißer KOH beständig, wobei keine Pinholes oder Ablösungen beobachtet werden. Dieses Schichtsystem wurde daher im folgenden stets zur Passivierung verwendet.

Augeruntersuchungen zeigten darüberhinaus, daß die Oberfläche dieses auf ZnO abgeschiedenen Schichtsystems frei ist von Zn-Verunreinigungen, d.h. eine Kontamination von Folgeprozessen ausgeschlossen ist.

3.3.2 Batch-Prozesse zur Herstellung frequenzanaloger Drucksensoren

Bild 3.4 zeigt einen Herstellungsprozeß für frequenzanaloge Drucksensoren mit Antrieb und Signalabgriff durch piezoelektrisches ZnO. Zunächst wird ein Siliciumwafer einseitig und ganzflächig hochbordotiert. Dies geschieht durch Abscheiden eines Borsilikatglases, einem anschließenden Eintreibeprozeß und zuletzt Entfernen der Feststoffquelle.

Danach werden die Wafer thermisch oxidiert, beidseitig mit einer Nitridpassivierung als Naßätzmaske versehen und diese auf der Waferrückseite photolithographisch strukturiert. Durch einen Naßätzprozeß in heißer KOH werden in den Fenstern der Rückseitenmaskierung tiefe V-Gräben zur (hochdotierten) Wafervorderseite vorangetrieben, so daß dort Membranen mit über die Ätzzeit kontrollierter Dicke entstehen. Die Wafer werden anschließend sorgfältig gereinigt und die Passivierschichten entfernt.

Auf der Wafervorderseite wird durch reaktives Magnetronputtern ganzflächig piezoelektrisches ZnO abgeschieden und photolithographisch strukturiert, so daß auf den Membranen ZnO-Inseln verbleiben. Diese sind gerade so lokalisiert, daß das Vorzeichen der mechanischen Membranspannung im Fall kleiner Auslenkungen unter einem ZnO-Feld jeweils einheitlich ist. Dadurch soll eine optimale Antriebs- und Signalabgriffseffizienz erreicht werden, d.h. eine maximale Wandlung der angelegten elektrischen Feldstärke in Membranauslenkung und umgekehrt. Ausserhalb der eigentlichen Antriebszonen auf der Membran sowie auf dem Silicium "festland" verbleiben noch ZnO-Bereiche zur elektrischen Isolation der Leiterbahnen bzw. Kontaktflächen (Ersatz Feldoxid).

Über das strukturierte ZnO wird wiederum ganzflächig Aluminium abgeschieden und so strukturiert, daß Aluminium nur im Bereich des Substratkontakts und auf den ZnO-Feldern zur Kontaktierung verbleibt.

Über diesen Schichtaufbau kann noch die vorstehend beschriebene Passivierschicht aufgebracht werden, um den Sensor vor Umwelteinflüssen zu schützen. In späteren Prozeßvarianten wurde auch Gebrauch gemacht von dem nachfolgend bei den Kraftsensoren detailliert erläuterten "MIS"-Schichtaufbau, bei dem sich die dielektrische Passivierschichtfolge zwischen ZnO und Aluminiummetallisierung befindet.

Es ist ebenfalls möglich, die Rückseitenätzung der Membranen erst nach kompletter Vorderseitenprozessierung durchzuführen, wobei die Vorderseite dann in einer Ätzdose vor der heißen Kalilauge geschützt werden muß. Dies hat den Vorteil, daß erst am Ende des Prozeßdurchlaufs die relativ bruchgefährdeten Membranen erzeugt werden und keine Kontamination der ZnO- und Plasmabeschichtungsanlagen durch KOH-Rückstände möglich ist. Darüberhinaus ließe sich damit auch ein elektrochemischer pn-Ätzstopp anstelle der Zeitätzung der Membranen verbinden. Auf den Aufwand einer Ätzdose wurde jedoch verzichtet.

3.3.3 Batch-Prozesse zur Herstellung frequenzanaloger Kraftsensoren

In diesem Abschnitt werden Herstellungswege beschrieben, die zu funktionsfähigen Kraftsensormustern führen. Der zuerst verfolgte Schichtaufbau sah eine "klassische" Abfolge von dotierter Siliciumoberfläche, piezoelektrischer ZnO-Schicht, Metallisierungsebene und Passivierungsschicht vor.

Bei einem fortgeschritteneren Aufbau wird zwischen ZnO und Metallisierung eine zusätzliche Isolationsschicht gelegt, so daß die Schichtabfolge einer MIS-Struktur (Metall-Insulator-Semiconductor) entspricht. Diese Sensoren zeigten besonders vorteilhafte Eigenschaften.

3.3.3.1 "Klassischer" Schichtaufbau

Bild 3.5 zeigt einen Herstellungsablauf mit einer Schichtfolge von piezoelektrischem ZnO, Metallisierung und Passivierung auf dem dotierten Siliciumsubstrat, wie sie bei den ersten in diesem Projekt batch-fertigten Siliciumkraftsensoren zum Einsatz kam.

Ein beidseitig polierter Siliciumwafer wird thermisch oxidiert und in einem LPCVD-Prozeß auf beiden Waferseiten mit Nitrid beschichtet. Anschließend werden in einem doppelseitigen Fotolithographieschritt in der Passivierschichtfolge von Vorder- und Rückseite Fenster geöffnet:

In den Fenstern der Vorderseite erfolgt eine p⁺-Dotierung (Ionenimplantation und Eintreiben des Implantats) und anschließende Reoxidation mit Ausbildung eines dicken thermischen Oxids, die Rückseitenfenster definieren die durch Naßätzen zu erzeugenden Membranen. Da die Wafervorderseite in diesem Prozeßstadium ganzflächig durch dickes Oxid bzw. durch Nitrid/Oxid geschützt ist, kann das naßchemische rückseitige Ätzen der Membranen in heißer KOH unmittelbar anschließend und ohne besonderen Schutz der Vorderseite erfolgen.

Es ist auch möglich, in den Vorderseitenfenstern nur ein dünneres thermisches Oxid aufzuwachsen und die KOH-Ätzung erst nach Abschluß der Vorderseitenprozessierung (unmittelbar vor dem Plasmatrenchprozeß) auszuführen. Damit wird eine mögliche Kontamination von Folgeprozessen durch KOH vermieden und die weitere Handhabung der Wafer vereinfacht (reduzierte Bruchgefahr).

Die fertigprozessierte Vorderseite muß dann allerdings während des Ätzens der Waferrückseite durch eine Ätzdose geschützt werden. Der Einsatz einer Ätzdose bedeutet zwar einen höheren technologischen Aufwand, bietet aber die Möglichkeit, auch dünnere Membrandicken (<20 µm) durch elektrochemischen pn-Ätzstopp mit hoher Genauigkeit zu realisieren.

Auf diesen Zusatzaufwand wurde verzichtet, da die angestrebte Membrandicke von 50 µm auch einfacher über eine zeitkontrollierte Ätzung mit hinreichender Genauigkeit hergestellt werden kann. Die lokal dotierten Wafer werden also unmittelbar nach dem Reoxidationsschritt in KOH geätzt. Aufgrund dieser relativ hohen Membrandicke bleibt eine für die Folgeprozesse ausreichende Waferstabilität erhalten.

Nach der Rückseitenätzung in heißer Kalilauge werden die Wafer sorgfältig gereinigt und dann das verbliebene Vorderseitenoxid, das als Feldoxid zur elektrischen Leiterbahn-Isolierung die-

nen soll, strukturiert. Dabei werden zum hochdotierten Silicium Fenster geöffnet für den späteren Substratkontakt und die ZnO-Felder. Anschließend werden ZnO, Metallisierung und Plasmapassivierschicht nacheinander aufgebracht und jeweils strukturiert. Die Maskenebenen von Feldoxidfenstern, piezoelektrischen ZnO-Bereichen, Leiterbahnen, Passivierung und Trenchmaskierung werden mittels vor der Implantation (beim doppelseitigen Photolithographieschritt) in den Wafer eingebrachten Justiermarken exakt zueinander und zu den hochdotierten Siliciumbereichen justiert.

Im letzten Schritt werden in einem Plasmatrenchprozeß aus den Membranen die Biegebalken freigelegt. Dazu wird ein neuartiges Mikrowellen-Hochratenätzverfahren eingesetzt, das anisotropes Silicium-Ätzen mit hoher Maskenselektivität erlaubt, so daß die 50 µm dicken Membranen komplett durchgeätzt werden konnten. Mit diesem Herstellungsprozeß wurden voll funktionsfähige Sensormuster erhalten.

Bild 3.6 zeigt einen komplett prozessierten Wafer mit 23 Sensorstrukturen nach "klassischem" Design; die Strukturen werden durch Schneiden entlang ihrer kurzen Seite vereinzelt. **Bild 3.7** zeigt eine einzelne Kraftsensorstruktur, wobei der Bereich des Resonatorbalkens mit unterschiedlichen Vergrößerungen herausprojiziert ist.

Es wurde auch versucht, anstelle des Plasmaätzprozesses einen (weniger aufwendigen) beidseitigen Naßätzprozeß in heißer KOH einzusetzen, um aus den komplett prozessierten Membranen beidseitig eingespannte Biegebalken freizulegen. Alle diese Versuche scheiterten daran, daß die spezielle Plasmapassivierung zwar einen zuverlässigen Schutz für das ZnO garantiert, jedoch keinesfalls für die Metallisierung. Die Passivierschicht wurde stets auf den Metallflächen aufgebrochen selbst im Fall einer KOH-beständigen Goldmetallisierung. Der Grund für die ungenügende Schichthaftung unter diesen extremen Bedingungen liegt in der Oberflächentopographie von metallischen Schichten (Rauigkeit, "hillocks").

3.3.3.2 "MIS"-Aufbau

Bild 3.8 zeigt einen Batch-Prozeß zur Herstellung von Sensoren, deren Schichtaufbau im Bereich des piezoelektrischen ZnO einer MIS-Struktur (Metall-Insulator-Semiconductor) entspricht.

In einen wie vorstehend mit Oxid und Nitrid versehenen Wafer werden mit Hilfe eines doppelseitigen Lithographieschritts vorderseitig Fenster für eine Dotierung geöffnet, während die rückseitig erzeugten Maskenöffnungen die durch Naßätzen herzustellenden Membranen definieren. In den Vorderseitenfenstern wird lokal eine p^+ -Dotierung eingebracht und die Fenster durch Reoxidation mit dickem thermischen Oxid wieder geschlossen. Unmittelbar anschließend erfolgt die Ätzung der Membranen von der Rückseite in heißer Kalilauge, wobei dieser Ätzschritt analog zum vorstehenden Abschnitt auch am Prozeßende in einer Ätzdose durchgeführt werden kann. Das Vorderseitenoxid dient anschließend als Feldoxid zur Leiterbahnisolation.

Im folgenden werden nacheinander Fenster im Feldoxid geöffnet für Substratkontakt und piezoelektrische ZnO-Felder, das ZnO ganzflächig abgeschieden und so strukturiert, daß es nur in den dafür vorgesehenen Feldoxidfenstern verbleibt, und darüber die Plasmapassivierschicht abgeschieden. Die Plasmapassivierschicht, die als Isolierung zwischen ZnO und Metallisierung dienen soll, wird in den Substratkontaktfenstern wieder entfernt. Anschließend wird die Metallisierung aufgebracht und strukturiert. Die gegenseitige Justage der Masken von Feldoxidfenstern, ZnO-Feldern, Plasmapassivierschicht (Substratkontaktfenster), Metallisierung und der Plasmatrenchmaske erfolgt anhand von Justierstrukturen, die bei der Definition der hochdotierten Bereiche beim doppelseitigen Photolithographieschritt in den Wafer eingebracht wurden. Im letzten Schritt werden in einem Mikrowellenplasmatrenchprozeß die Biegebalken aus den Membranen freigelegt.

Wird, wie skizziert, eine Aluminiummetallisierung verwendet, sollte diese mit einer weiteren Nitridschicht gegenüber Umwelteinflüssen dauerhaft passiviert werden.

Verwendet man anstelle der angegebenen Aluminiummetallisierung eine KOH-beständige Gold-Metallisierung, kann die Nitridpassivierung der Metallleiterbahnen entfallen und der letzte Herstellungsschritt, das Freilegen von Biegebalken aus der komplett prozessierten Membran, auch durch beidseitiges Naßätzen in heißer KOH erfolgen. Das ZnO ist durch die Plasmapassivierschicht in der heißen KOH ausreichend geschützt, während die ätzresistente Metallisierung auf der Passivierung sitzt und selbst keinen Schutz benötigt. Damit sind die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Schichthaftungsprobleme auf der Metallisierung umgangen. Die Verwendung einer Gold-Metallisierung verbietet sich zwar im Zusammenhang mit einer elektronischen Schaltungsintegration; andererseits ist die Herstellung eines nicht-integrierten Sensors ausschließlich durch Naßätzen anstelle des relativ aufwendigen Plasmaätzprozesses gerade für einen mittelständischen Partner sehr attraktiv. Beide Herstellungsalternativen wurden durchgeführt und führten zu voll funktionsfähigen Sensoren.

3.3.3.3 Elektrodengeometrien

Bei den ersten bei BOSCH hergestellten Sensoren wurden Antriebs- und Aufnehmergeometrien dadurch realisiert, daß auf beiden Seiten des Resonatorbalkens je ein ZnO-Feld um etwa 1/4 der Resonatorlänge in den Balken hineingreift (vgl. Bild 3.2). Eines dieser Felder diente als piezoelektrischer Antrieb, das andere als Signalabgriff zum elektrischen Nachweis der Biegebalkenosillation.

Bei diesem einfachen Elektrodendesign wurde nachteilig zum einen ein relativ starkes elektrisches Übersprechen von den Antriebs- zu den Aufnehmerfeldern beobachtet, zum anderen weist dieses Elektrodendesign nur eine geringe Modenselektivität auf: mechanische Grundschwingung und Oberschwingungen werden ähnlich gut an elektrische Größen gekoppelt. Dies hat einen höheren schaltungstechnischen Aufwand beim Oscillator zur Folge, da die Selektion der "richtigen" Mode, die entdämpft werden soll, über elektronische Bandpaßfilter geschehen muß.

Daher wurde ein verbessertes Elektrodendesign entwickelt, das einmal eine verbesserte Modenselektivität zugunsten der mechanischen Grundschwingung zeigt und das Oberschwingungen diskriminiert, zum anderen auch Konzepte zur Unterdrückung des elektrischen Übersprechens gestattet (Bild 3.9). Bei diesem Design gibt es vier piezoelektrische Felder, von denen sich zwei wie bisher an den Rändern des Resonatorbalkens ("äußere Felder") und zwei in Balkenmitte befinden ("innere Felder"). Die Länge jedes Feldes beträgt etwa 1/4 der Biegebalkenlänge.

Es ist damit möglich, jeweils ein inneres und ein äußeres Feld komplementär elektrisch anzu treiben bzw. das andere Elektrodenpaar durch eine Differenzstufe elektrisch auszulesen, wie dies in Bild 3.10 grob schematisiert ist. Die Skizze deutet einen Aufholverstärker mit Differenzeingängen und komplementären Ausgängen an, wobei die an den Eingängen aufgenommenen Spannungen zweier piezoelektrischer Felder voneinander subtrahiert, die Spannungsdifferenz verstärkt und mit richtiger Phasenlage wieder in zwei piezoelektrische Felder zurückgekoppelt wird. Mit dieser Maximalvariante einer Rückkopplungsschaltung wird einmal Modenselektivität erreicht: nur die Mode(n), deren mechanische Spannungsverteilung gerade unter den piezoelektrischen Feldern jeweils einheitliches Spannungsvorzeichen besitzt, wird optimal entdämpft. Dies trifft bei der gewählten Elektrodengeometrie z.B. für den Grundton zu.

Zum anderen soll eine Verminderung des elektrischen Übersprechens von den Antriebs- zu den Aufnehmerfeldern erreicht werden: Durch den komplementären Antrieb treten jeweils entgegengesetzt gerichtete Substratströme auf, die sich annähernd kompensieren sollen, wodurch Spannungsabfälle im Substrat vermieden werden. Andererseits soll auch die Differenzstufe für eine Elimination des beiden Aufnehmerfeldern gemeinsamen Übersprechpegels sorgen.

Die Wirksamkeit jeder der angegebenen Maßnahmen wird untersucht und an ihrem schaltungstechnischen Aufwand gemessen.

3.4 Ergebnisse frequenzanaloger Sensoren

3.4.1 Frequenzanaloge Drucksensoren

3.4.1.1 Sensordesign und Lage der Resonanzen

In Bild 3.11 sind UBM-Profil und photographische Aufnahme einer frequenzanalogen Drucksensormembran mit strukturiertem ZnO und Metallisierung gezeigt; der Sensor im unteren Bild wurde in einen Edelstahlhalter eingeklebt, der Meßdruck von unten eingeleitet. Man erkennt auf der Membranoberfläche die Struktur der Antriebselektroden, unter denen sich das piezoelektrische ZnO befindet. Die innere Zentralelektrode sowie die vier äußeren, pilzförmigen Elektroden können jeweils einzeln oder kombiniert angetrieben bzw. ausgelesen werden.

Bild 3.12 zeigt das mit einem Polytec Vibrometer optisch ermittelte Schwingungsspektrum einer solchen Sensormembran; aufgetragen ist hier die Geschwindigkeit der Membranmitte über der Anregungsfrequenz. Man erkennt mehrere Resonanzen über einen Frequenzbereich von 5 - 105 kHz.

Eine mit dem Polytec Vibrometer durch Abscannen der Membranoberfläche ermittelte Amplitudenverteilung über der Membran zeigt Bild 3.13 für die 48 kHz-Mode; Bild 3.14 gibt das Ergebnis einer entsprechenden FEM-Simulationsrechnung wieder, die die Zuordnung dieser Resonanz zum 6. Eigenmode erlaubt.

Bild 3.15 zeigt, daß durch geeignete Beschaltung der Abtastgeometrie auch eine modenselektive Auslesung der Membran möglich ist. Im oberen Bild ist eine GainPhase-Kurve zu erkennen, wobei zwei gegenüberliegende Randelektroden als Aufnehmer parallel geschaltet sind. Der Membranantrieb erfolgt durch die Mittelelektrode. Zum Vergleich ist mit einer optischen Nachweismethode die Membranschwingung als Funktion der Anregungsfrequenz im unteren Bild aufgetragen. Es fällt auf, daß eine im optisch ermittelten Spektrum zu erkennende Mode bei 15.25 kHz im elektrisch ermittelten Spektrum fehlt. Der Grund dafür ist in **Bild 3.16** anhand einer FEM-berechneten Amplitudenverteilung erläutert: die gegenüberliegenden Aufnehmerelektroden stehen bei dieser Mode gerade unter entgegengesetzten gleichen mechanischen Spannungen, so daß sich die generierten Piezospannungen aufheben.

Bild 3.17 zeigt den Zusammenhang zwischen abgegriffener Piezospnung und Antriebsspannung im Membrangrundmode für zwei verschiedene Elektrodenkombinationen. Aus Spannungsverhältnissen dieser Art kann beispielsweise der piezomechanische Kopplungsfaktor k_{eff}^2 wie angegeben bestimmt werden.

In **Bild 3.18** ist eine Si-Zunge mit einer MIS-Struktur von ZnO, plasmaabgeschiedenem Dielektrikum und Al-Metallisierung skizziert; an dieser Struktur konnte erstmals ein deutlicher Resonanzeffekt im Impedanz-/Phasenverlauf (**Bild 3.19**) nachgewiesen werden. Damit besteht eventuell die Möglichkeit einer Schwingungsentdämpfung durch eine Impedanz-kontrollierte Oscillatorschaltung, die das Impedanzminimum oder -maximum ausnutzt entsprechend einem Serien- oder Parallelresonanzoscillator in Analogie zur Quartztechnik.

Bild 3.20 gibt den effektiven Kopplungsfaktor als Funktion des Dickenverhältnisses von Siliciummembran und ZnO wieder. Eingetragen sind berechnete Werte einer FEM-Simulation mit Literaturdaten für ZnO sowie Meßwerte für verschiedene ZnO-Schichtspannungsparameter. Es fällt auf, daß die experimentell bestimmten k_{eff} -Werte die aus Literaturdaten berechneten teilweise weit übertreffen.

In **Bild 3.21** sind nochmals experimentell ermittelte k_{eff} -Daten im Klein- und Großsignalfall mit einem Literaturwert (Landolt-Börnstein) verglichen: Im sensortypischen Kleinsignalfall wird der Literaturwert um bis zu einen Faktor 1.5 übertroffen.

Das Verhältnis von experimentell ermitteltem d_{31} und dem Literaturwert ist in **Bild 3.22** als Funktion der Sputterrate mit dem Scharparameter Abscheidetemperatur aufgetragen; gerade bei sehr hohen Sputterraten wird der Literaturwert weit übertroffen.

Bild 3.23 zeigt die Membrandurchbiegung infolge der mechanischen Eigenspannung des unter verschiedenen Abscheidebedingungen aufgebrachten ZnO: im oberen Bild ist ein deutliches "Ausbuckeln" der Membran zu erkennen, während die Membran im unteren Bild plan bleibt, die kritische "Buckling Load" durch die ZnO-Schichtspannung dort also nicht überschritten wird.

3.4.1.2 Druckabhängigkeit der Resonanzfrequenzen

Die Bilder 3.24 und 3.25 zeigen Auslenkung und Frequenzverlauf der 10 kHz-Mode einer vorgespannten Membran als Funktion des angelegten Differenzdrucks (Knackfrosch-Effekt bei Überschreiten einer kritischen Querbelastung). Die Resonanzfrequenz der 10 kHz-Mode erniedrigt sich zunächst mit zunehmendem Druck und steigt nach dem Durchknacken der Membran wieder an.

In den Bildern 3.26 und 3.27 sind GainPhase-Kurven und Auslenkungs-/Resonanzfrequenzverlauf einer 8.6 kHz-Mode als Funktion des Differenzdrucks an der Membran aufgetragen. Bemerkenswert ist das Fehlen einer Hysterese bei Druckzu- und -wiederabnahme.

3.4.1.3 Aufbau- und Verbindungstechnik

Die Resonanzfrequenz eines aufgeklebten und eines anodisch gebondeten Sensors ist in Bild 3.28 über der Zahl der Lastwechsel aufgetragen. Während der geklebte Sensor einen Kriech-Effekt zeigt und seine Resonanzfrequenz erst nach etwa 50 Lastwechseln stabil erscheint, tritt beim anodisch gebondeten Sensor kein eindeutig nachweisbarer Kriecheffekt auf, einer der bekannten Vorzüge dieser Verbindungstechnik ohne Klebematerialien.

3.4.1.4 Temperaturkompensation

In Bild 3.29 sind Mechanismen aufgeführt, die zu einer Temperaturbeeinflussung von Drucksensoren führen: allgemein gilt, daß von außen über das Packaging eingebrachte Spannungen

das Verhalten jedes Sensors beeinflussen. Speziell bei resonanten Sensoren hängen die Modenfrequenzen stark und nichtlinear von der Resonatorgestalt, z.B. vom Krümmungszustand ab; eine lineare Temperaturabhängigkeit wird über frequenzbestimmende Materialparameter (Dichte, Steifigkeit) induziert. Da unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten, wie sie zwischen verschiedenen Materialien (z.B. ZnO-Schicht, Passivierung, Metallisierung, Si, Gehäusung, ...) bestehen, zu großen temperatur-abhängigen Spannungen führen, hat auch das Layout der ZnO-Antriebsfelder und der Elektrodengeometrie, d.h. die Plazierung der Spannung auf der Membranoberfläche, Einfluß auf das Temperaturverhalten des Sensors.

Die Bilder 3.30 und 3.31 zeigen für eine ebene und eine "gebuckelte" Membran den Temperaturverlauf einer Resonanzfrequenz. In Bild 3.31 ist zusätzlich eine mit Finite-Elemente-Methoden berechnete Vergleichskurve eingetragen. Es fällt auf, daß der Temperaturlauf der ebenen und der gebuckelten Membran gerade entgegengesetztes Vorzeichen aufweist, was einen Ansatz zur Temperaturkompensation bietet. In Bild 3.32 werden zwei verschiedene Elektrodenlayouts unter diesem Gesichtspunkt miteinander verglichen. Man erkennt, daß durch geeignete Elektrodenstrukturierung eine weitgehende Temperaturkompensation des Sensors möglich ist, indem temperaturinduzierte (Schicht-)Spannungen so auf der Membran verteilt werden, daß ihr Einfluß auf die Resonanzfrequenz minimal ist.

In Bild 3.33 ist die Nullpunktsdrift als Funktion der Anzahl der Temperaturwechsel ($\Delta T = 50K$) aufgetragen; es handelt sich um eine statistische Schwankung, eine systematische Drift ist nicht eindeutig auszumachen.

3.4.2 Frequenzanaloge Kraftsensoren

3.4.2.1 Elektrische Eigenschaften

Bild 3.34 zeigt eine GainPhase-Kurve, wie sie an einem Kraftsensor mit "klassischem" Schichtaufbau mit dem GainPhase-Analysator HP4194A der Firma Hewlett-Packard gemessen wurde. Dazu wird der Sensor an einem äußeren bzw. einem inneren Antriebsfeld mit einer Wechselspannung konstanter Amplitude und variabler Frequenz angeregt und die Piezospannung an einem äußeren Aufnehmerfeld nach Amplitude und Phase als Funktion der Antriebsfrequenz analysiert (Kurven a-a bzw. i-a). Die Signalüberhöhung im Bereich der mechanischen

Grundresonanz beträgt etwa 15 dB im Übertragungsverhalten. Der Meßeffekt ist ausreichend, um den Sensor mit einer elektronischen Oscillatorschaltung, wie sie im nächsten Kapitel beschrieben wird, kontinuierlich zu entdämpfen.

Bild 3.35 zeigt GainPhase-Kurven eines Sensors mit einem Schichtaufbau, der dem MIS-Design entspricht. Die gemessenen Signalüberhöhungen im Bereich der mechanischen Resonanzen liegen über denen des klassischen Schichtaufbaus (>20 dB im Bereich der Grundresonanz). Es wird ein äußeres Feld ausgelesen und das gegenüberliegende äußere (Bild 3.35a.) piezoelektrische Feld angetrieben. Bei einem Antrieb des inneren anstelle des äußeren Feldes kehren sich die Vorzeichen der Resonanzeffekte in der Transmissionskurve um, d.h. aus einer Signalüberhöhung im Resonanzbereich wird ein Unterschwingen und umgekehrt. Werden äußeres und inneres Feld komplementär angetrieben (Bild 3.35b.), erhöht sich die Resonanzamplitude um etwa 6 dB und es tritt eine Reduktion des durch parasitäres Übersprechen hervorgerufenen elektrischen Untergrunds ein. Die Erhöhung der Resonanzamplitude wird erklärt durch eine um etwa einen Faktor 2 verbesserte Antriebseffizienz, indem statt einem jetzt zwei Felder mit entgegengesetzter Phasenlage angetrieben werden. Die Reduktion des elektrischen Untergrunds kommt daher, daß sich die für das elektrische Übersprechsignal mitverantwortlichen Substratströme von entgegengesetztem Vorzeichen annähernd kompensieren. So entsprechen Transmissions- und Phasenverlauf in Bild 3.35b. annähernd dem theoretisch zu erwartenden Verhalten eines mechanischen Schwingers. Ein entsprechendes Ergebnis ergibt sich bei Ausleistung des inneren Aufnehmerfelds.

Bild 3.36 zeigt bei angetriebenem äußeren piezoelektrischen Feld die am gegenüberliegenden äußeren (Bild 3.36a.) bzw. am gegenüberliegenden inneren (Bild 3.36b.) Aufnehmerfeld erhaltenen Transmissionsfunktionen. Man erkennt ein inverses Verhalten der beiden Meßkurven zueinander.

Wird nun die elektrische Differenz der am gegenüberliegenden inneren bzw. äußeren Feld aufgenommenen Signalspannungen gebildet (Bild 3.36c.), wird wieder eine Zunahme des Transmissionsmaximums im Resonanzbereich um etwa 6 dB sowie eine Reduktion des elektrischen Übersprechens beobachtet. Die Erhöhung des Transmissionsmaximums entsteht durch Addition der gemessenen Absolutbeträge der Einzelfeldspannungen in der Differenzstufe aufgrund deren entgegengesetzter Phasen (ca Faktor 2). Die Untergrundreduktion führt daher, daß bei der elektrischen Differenzbildung die beiden Aufnehmerfeldern gemeinsamen Übersprechpegel unterdrückt werden.

In Bild 3.37 sind beide Maßnahmen, komplementärer Antrieb und Differenzauslesung, kombiniert worden. Bild 3.37a. zeigt den Fall komplementärer Anregung von äußerem und innerem Feld und Auslesung eines äußeren Felds, Bild 3.37b. die Auslesung eines inneren Felds, während Bild 3.37c. die Differenzspannung von äußerem und innerem Feld bei komplementärem Antrieb wiedergibt. Die resultierende Differenzkurve unterscheidet sich in ihrer Gestalt nicht mehr wesentlich von den mit komplementärem Antrieb erhaltenen Einzelkurven. Der Maximalwert der Resonanztransmission hat aufgrund der betragsmäßigen Addition der Signalspannungen der Einzelfelder wieder um etwa 6 dB zugenommen. Die Untergrundverhältnisse liegen ähnlich wie bei den Einzelkurven.

Als Ergebnis ist festzuhalten, daß sowohl durch komplementären Antrieb als auch durch Differenzauswertung der Sensorfelder eine weitgehende Unterdrückung des parasitären elektrischen Übersprechens vom Antrieb zum Aufnehmer erreicht werden kann. Die Kombination beider Methoden bringt dann keine erkennbaren Verbesserungen mehr, wenn bereits als Ergebnis der Einzelmaßnahme ein sehr geringes Übersprechen erreicht ist, wie dies bei dem Beispielsensor der Fall war. Zieht man den schaltungstechnischen Aufwand mit in die Bewertung ein, besitzt der komplementäre Antrieb klare Vorteile gegenüber einer Differenzauswertung:

Eine zusätzliche invertierte Antriebsspannung ist sehr leicht zu gewinnen bzw. steht Operationsverstärker-intern in den Treiberstufen sowieso zur Verfügung; bei einer Sensorintegration sind invertierte und nicht-invertierte OP-Ausgangspegel leicht zugänglich, bei einer diskreten Sensorbeschaltung sind geeignete OP-Typen mit komplementären Ausgängen marktgängig.

Dagegen ist eine Differenzspannungsauswertung bei den benötigten hohen Eingangsimpedanzen mit einem erheblichen schaltungstechnischen Zusatzaufwand verbunden, da ein Instrumentationsverstärker aus im Prinzip drei Operationsverstärkern realisiert werden muß.

3.4.2.2 Modenselektivität

Neben der Unterdrückung des schädlichen parasitären Übersprechens eignet sich das verbesserte Antriebs- und Aufnehmerkonzept mit vier piezoelektrischen Feldern auch für eine modenselektive Entdämpfung ausgewählter Eigenresonanzen.

Bild 3.38 zeigt GainPhasekurven für einen dualen Sensorantrieb, wobei ein äußeres und ein benachbartes inneres piezoelektrisches Feld komplementär elektrisch angesteuert wurden. Der

Signalabgriff erfolgte am gegenüberliegenden äußeren Aufnehmerfeld. Bemerkenswert ist die relativ hohe Intensität der ersten Oberwelle gegenüber der Grundwellenintensität. Bei dieser Antriebsart wird der 1. Oberton nicht nennenswert unterdrückt, da sein Knoten gerade zwischen den inneren Antriebsfeldern liegt, von denen nur eines angetrieben wird.

Im unteren Bild ist dagegen der entsprechende Kurvenverlauf dargestellt, wenn die beiden inneren Felder bei komplementärem Antrieb parallel geschaltet werden. Die Auslesung erfolgt wieder am noch freien äußeren Feld. Man erkennt, daß bei der Frequenz des 1. Obertons praktisch keine Signalamplitude mehr auftritt. Bei dieser Antriebsart wird der 1. Oberton stark diskriminiert, da sein Schwingungsknoten gerade zwischen den gleichsinnig angesteuerten inneren Piezofeldern liegt.

Das höhere Übersprechen für diesen Fall röhrt daher, daß einmal ein größerer Flächenunterschied zwischen den komplementär angesteuerten Feldern besteht verglichen mit der vorherigen Situation und die Elimination der gegensinnigen Substratströme unvollständig bleibt. Ein wesentlicher Grund ist aber auch die für diesen Antriebsfall sehr ungünstige Leiterbahnhührung, da die Anschlußbahn des einen inneren Antriebsfelds unmittelbar am Aufnehmerfeld vorbeiführt, was zu einer starken elektrischen Verkopplung führt (Vgl. Bild 3.10).

Bild 3.39 zeigt einen Kennlinienverlauf, wie er bei komplementärem Antrieb der beiden Innenfelder erhalten wird. Ausgelesen wird wieder ein äußeres Feld. Man erkennt eine vergleichsweise geringe Intensität der Grundmode, während der 1. Oberton deutlich stärker in der Gain-Kurve erscheint und die Grundtonintensität übertrifft. Durch diese Antriebsart wird über die piezoelektrischen Felder eine Spannungsverteilung in den schwingenden Biegebalken induziert, die der Oberschwingung entspricht. Die Grundmode wird dagegen schlecht angeregt, da diese keinen Schwingungsknoten zwischen den beiden inneren Antriebsfeldern (Vorzeichenumkehr der mechanischen Spannung) aufweist.

Auch hier hat das Übersprechsignal deutlich zugenommen, obwohl die komplementär angetriebenen Flächen identisch sind und sich die Substratströme daher annähernd kompensieren sollten. Der Grund für das vergrößerte Übersprechsignal liegt wieder maßgeblich in der für diesen Antriebsfall sehr ungünstigen Leiterbahnhührung, da die zum inneren Antriebsfeld führende Leiterbahn jeweils unmittelbar am äußeren Aufnehmerfeld vorbei geht. Dies gibt wieder Anlaß zu einem ausgeprägten elektrischen Überkoppeln.

3.4.2.3 Kraftempfindlichkeit

In Bild 3.40 sind GainPhase-Kurven eines in einen Bizerba-Hebellenker (Bild 3.41) applizierten Kraftsensors unbelastet, unter 1 kg und unter 15 kg Last dargestellt; die Kraftuntersetzung des Hebellenkers auf den Sensor ist 5:1. Es ergibt sich eine Verschiebung der Grundresonanzfrequenz von 28.5 kHz unbelastet auf etwa 33.9 kHz unter 15 kg Last.

Im Lastwechselbetrieb mit einem Gewicht von 1 kg wurde eine statistische Nullpunktschwankung von ± 11 Hz gefunden, was mit einem Fließen des zur Sensormontage benutzten Epoxyklebers unter Last erklärt werden kann.

Bild 3.42 zeigt die Kraft-/Frequenzkennlinie dieses Sensoraufbaus. Aufgetragen ist die Sensorresonanzfrequenz als Funktion des auf den Hebellenker aufgelegten Gewichts. Man erkennt einen sehr gut linearen Verlauf der Kennlinie. Eine Hysterese wird über diesen Lastbereich nicht beobachtet.

3.5 Geregelte Oscillatorschaltung

Bild 3.43 zeigt eine verbesserte elektronische Schaltung zur Sensorentdämpfung, die zunächst als SMD aufgebaut wurde, prinzipiell aber auch mit einem Minimum an zusätzlicher externer Beschaltung integrierbar ist. Die Schaltung arbeitet dank einer aktiven Regelung nicht in Sättigung, sondern mit stabilisierter, über einen weiten Bereich frei wählbaren Ausgangsamplitude, wobei auch lastabhängige Änderungen der Resonanzüberhöhung in der GainPhase-Charakteristik des Sensors ausgeglichen werden.

Der eigentliche Rückkopplungskreis besteht aus einem aktiv geregelten Aufholverstärker und einem einstellbaren Phasenschieber, die Regelstufe wird gebildet aus linearer Gleichrichtung (Elimination der Diodenflußspannung) und anschließendem Tiefpaßfilter. Das Stellelement selbst, auf das die Regelstufe wirkt, ist ein MOS-FET vom Anreicherungstyp im Gegenkopplungspfad des Aufholverstärkers. Die Verwendung eines Anreicherungstypen erhöht zwar den schaltungstechnischen Aufwand, jedoch sind bei der CMOS-Integration keine Verarmungstypen verfügbar.

Die Steilheit des so realisierten Proportionalreglers ist ausreichend für eine präzise Stabilisierung der Sensoramplitude. In der Praxis lassen sich die Sensoren mit einer Oscillatortausspannung von nur 100 mV stabil betreiben, so daß die elektrische Belastung des ZnO-Antriebsfelds sehr klein und die Schwingung im linearen Bereich bleibt.

Zusammenfassung

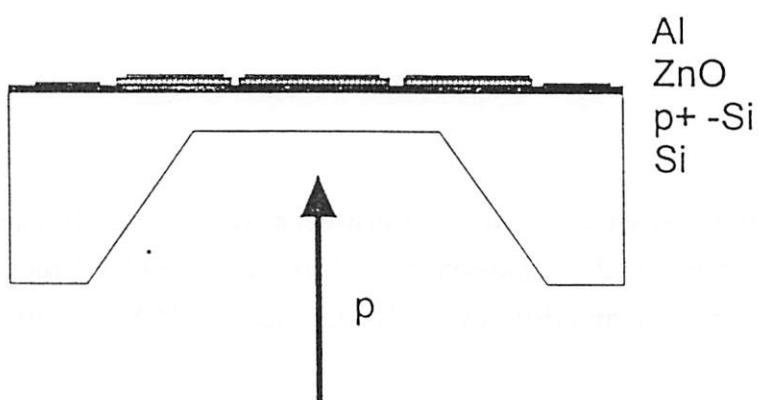
Im zurückliegenden Berichtszeitraum wurde die Prozeßentwicklung zur Herstellung frequenzanaloger Sensoren weitgehend abgeschlossen; zwei Prozeßvarianten für Druck- und Kraftsensoren sind standardmäßig durchführbar, wobei das sogenannte "MIS"-Design besonders vorteilhaft erscheint.

Die Schichtentwicklung für piezoelektrisches ZnO wurde fortgeführt und dieses Material weiter verbessert. Schichtstruktur, Piezoelektrizität und piezomechanische Kopplung wurden charakterisiert. Mit verbesserten ZnO-Schichten konnte erstmals ein deutlicher Resonanzeffekt im Impedanzverlauf eines Schwingers festgestellt werden.

Resonante Drucksensoren auf der Basis piezoelektrisch zum Schwingen erregter Siliciummembranen wurden als Funktion von Druck, Lastwechseln, Packaging, Temperatur und Temperaturwechseln untersucht. Dabei gefundene Kriecheffekte konnten durch anodisches Bonden der Drucksensorchips auf Pyrexglas weitgehend beseitigt werden. Erste Ansätze zur Temperaturkompensation ZnO-getriebener Sensoren wurden erarbeitet.

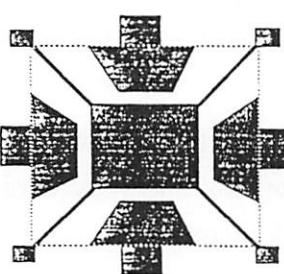
Eine Vielzahl funktionsfähiger batch-gefertigter Kraftsensoren konnte an den Verbundpartner Bizerba Werke Balingen abgegeben werden, wo eine Waage mit frequenzanalogem Kraftaufnehmer als Demonstrator realisiert werden konnte.

Eine integrierbare Elektronik zur Sensorentdämpfung mit Amplitudenstabilisierung wurde entwickelt und als SMD aufgebaut; entsprechende Schaltungsvorschläge wurden auch dem Verbundpartner Bizerba übergeben.

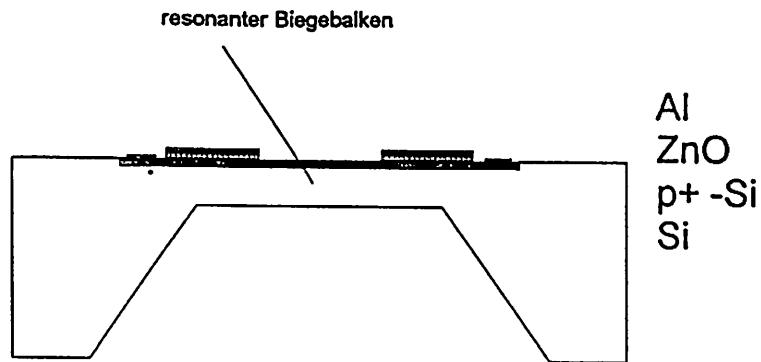


Al
ZnO
p+ -Si
Si

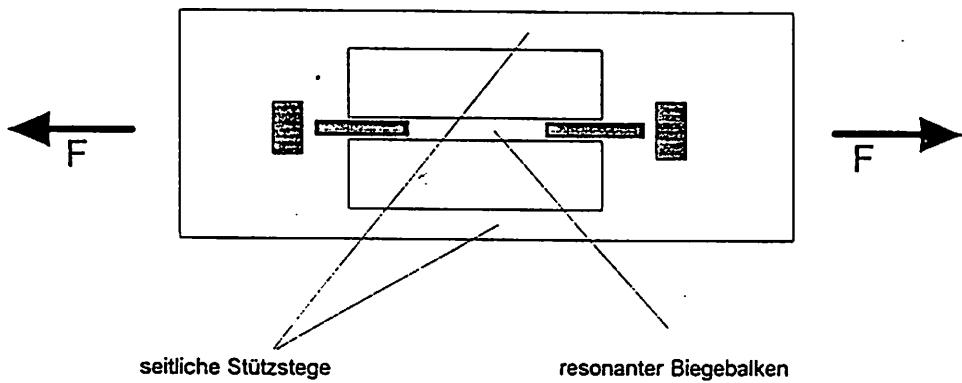
Frequenzanaloger Drucksensor im Querschnitt



Frequenzanaloger Drucksensor in Aufsicht



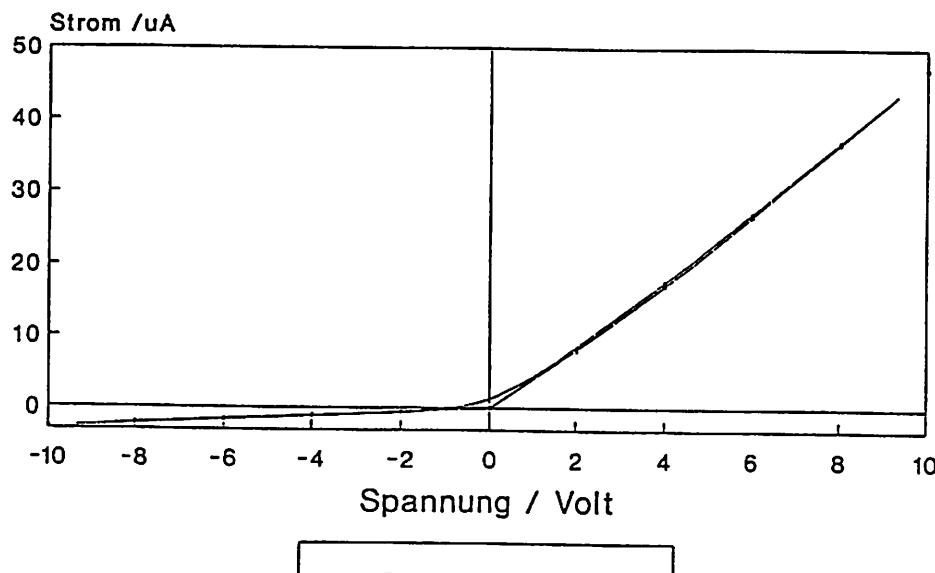
Frequenzanaloger Kraftsensor im Querschnitt



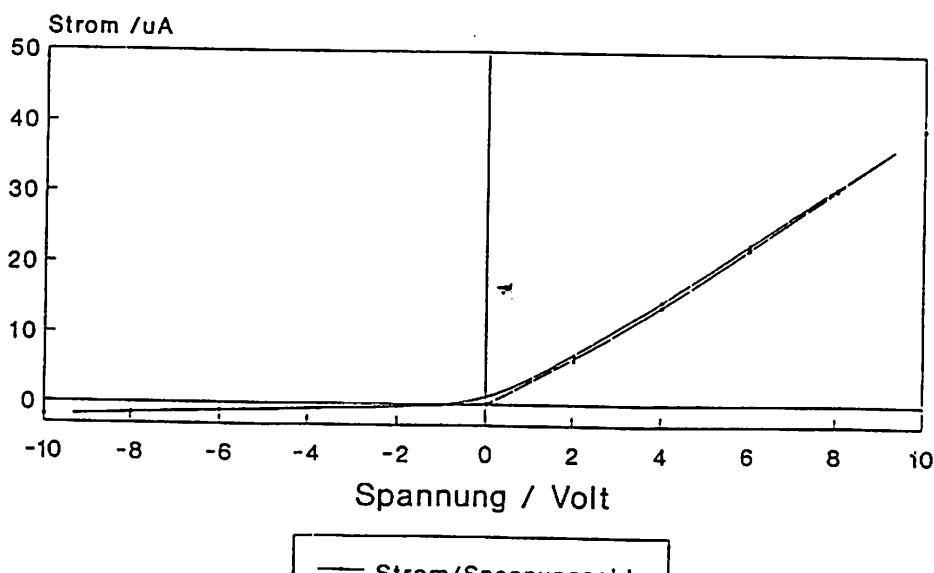
Frequenzanaloger Kraftsensor von oben



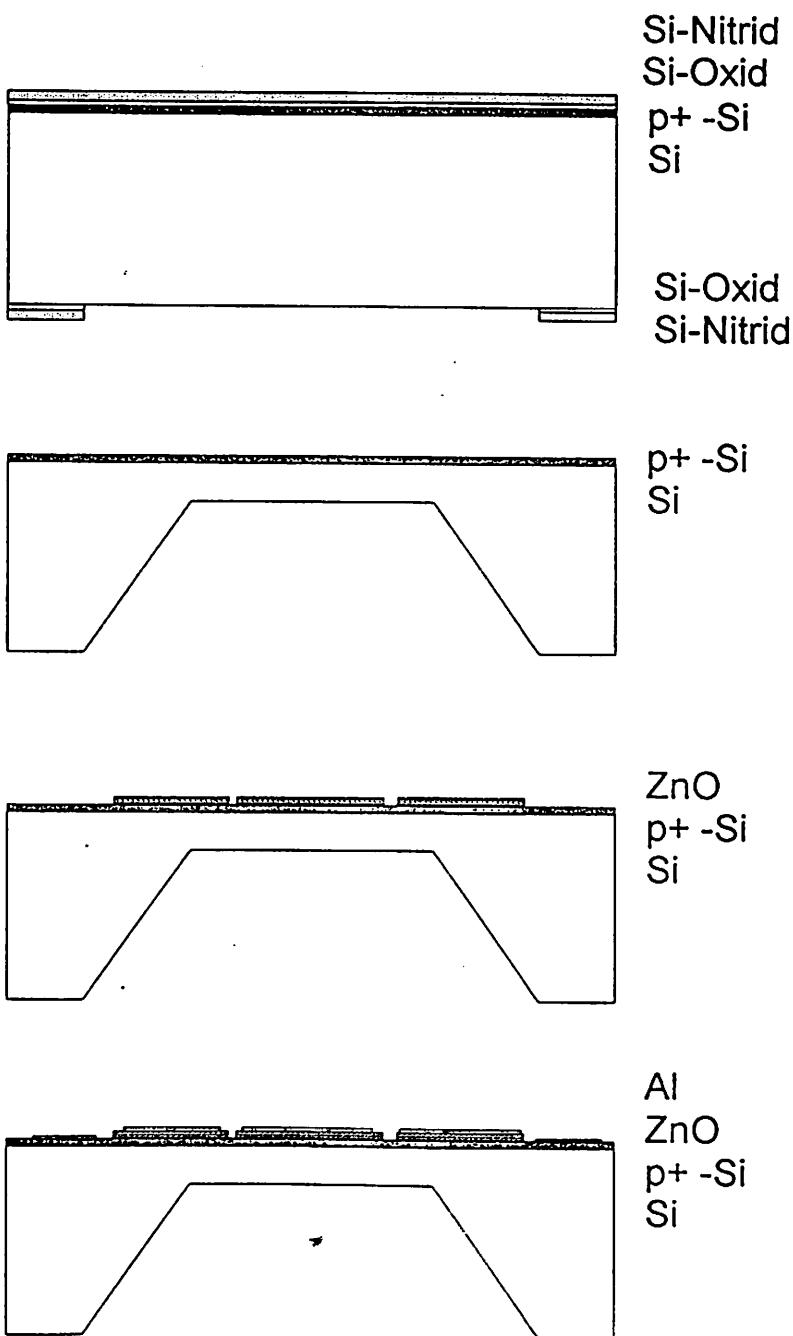
ZnO 084 unbeschichtet
Al/Si-Kontakt(0) gg. Al/ZnO-Kontakt (4)



ZnO 084 beschichtet
Al/Si-Kontakt(0) gg. Al/ZnO-Kontakt (4)



150 nm SiO₂ + 350 nm Si₃N₄



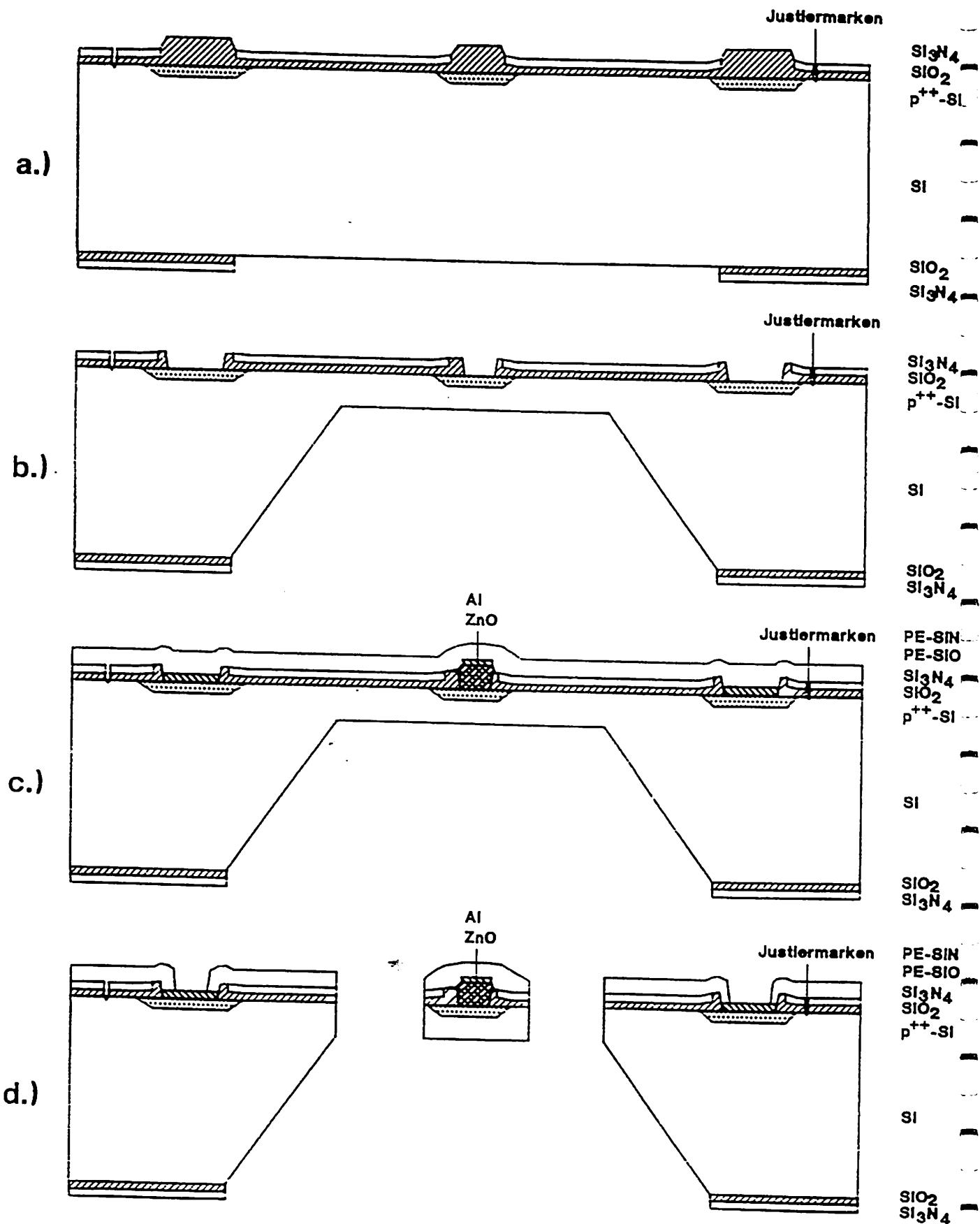
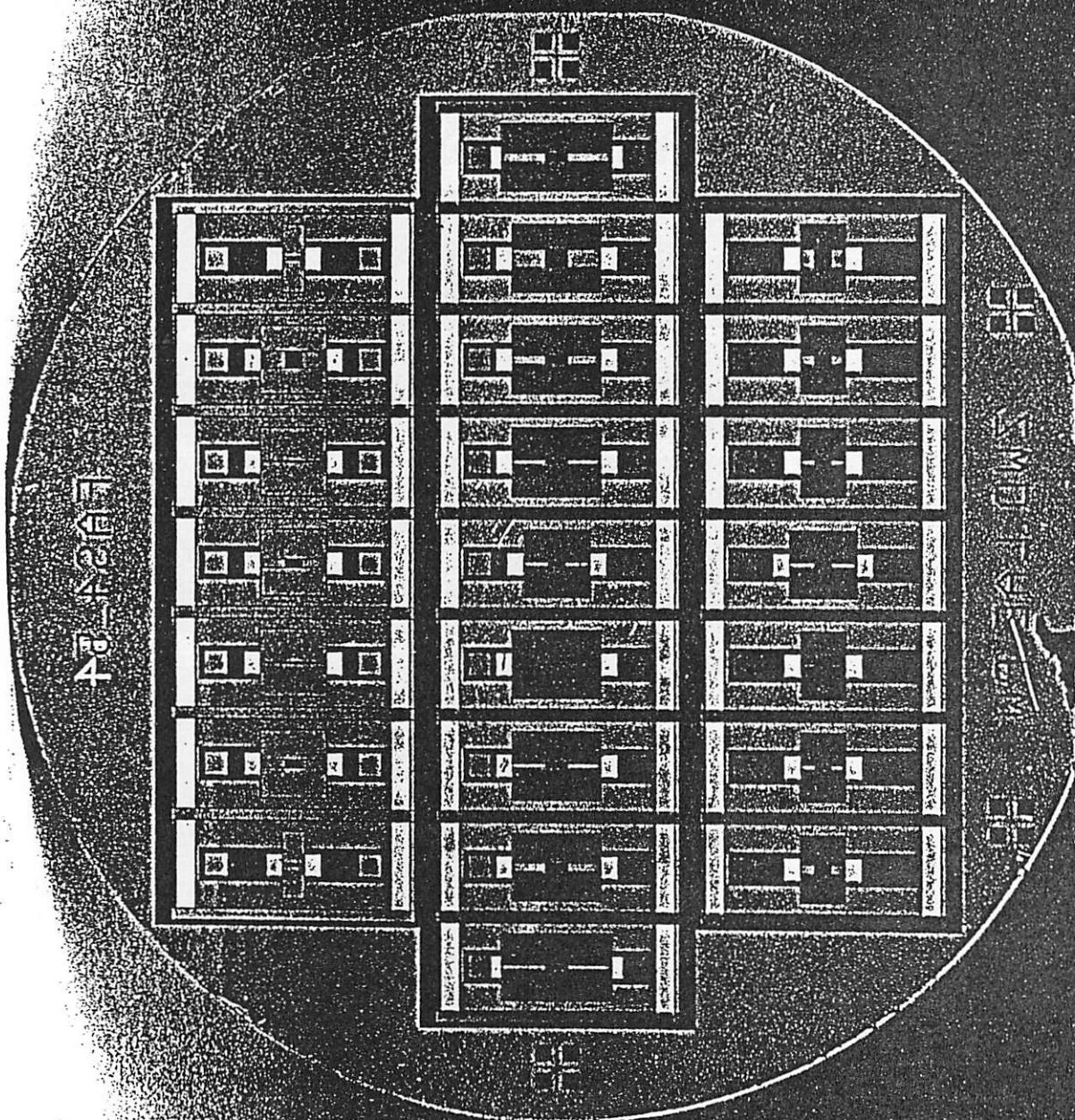


Bild 3.5

Bild 3.6



47-4207



Frequenzanaloge Kraftsensorstrukturen

Resonante Biegebalken, 50 µm dick, mit piezoelektrischem Antrieb/Abgriff, aus Membran freigeätzt

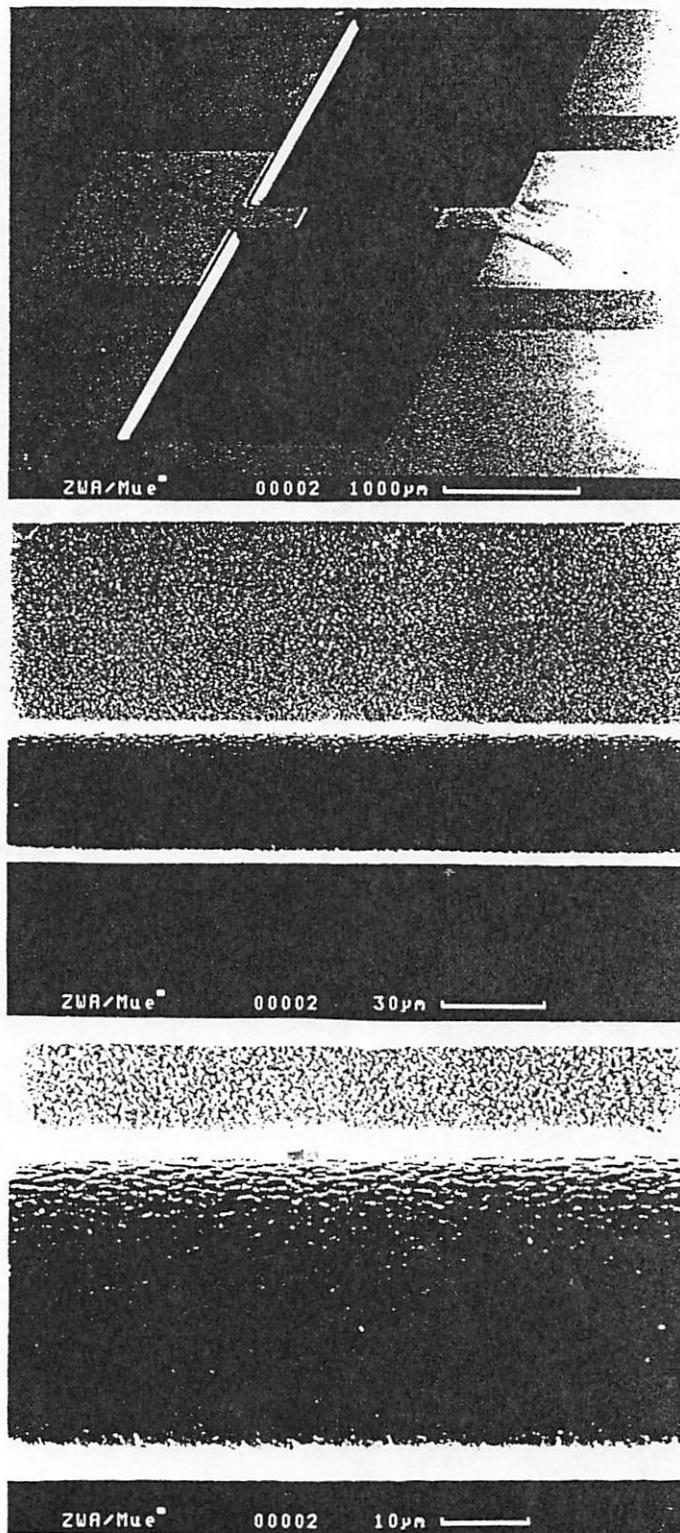


Bild 3.7

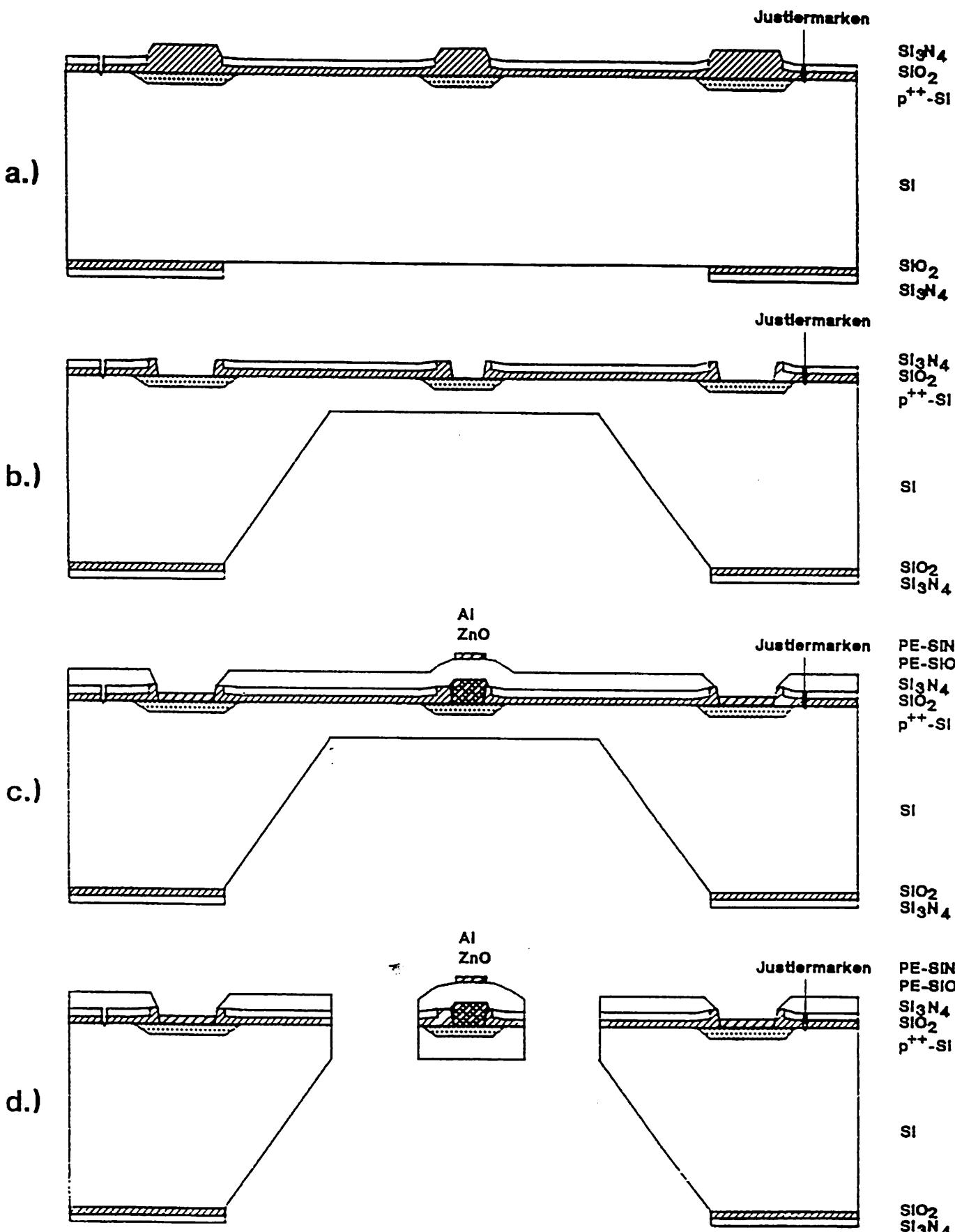
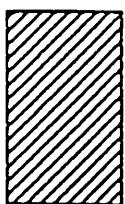
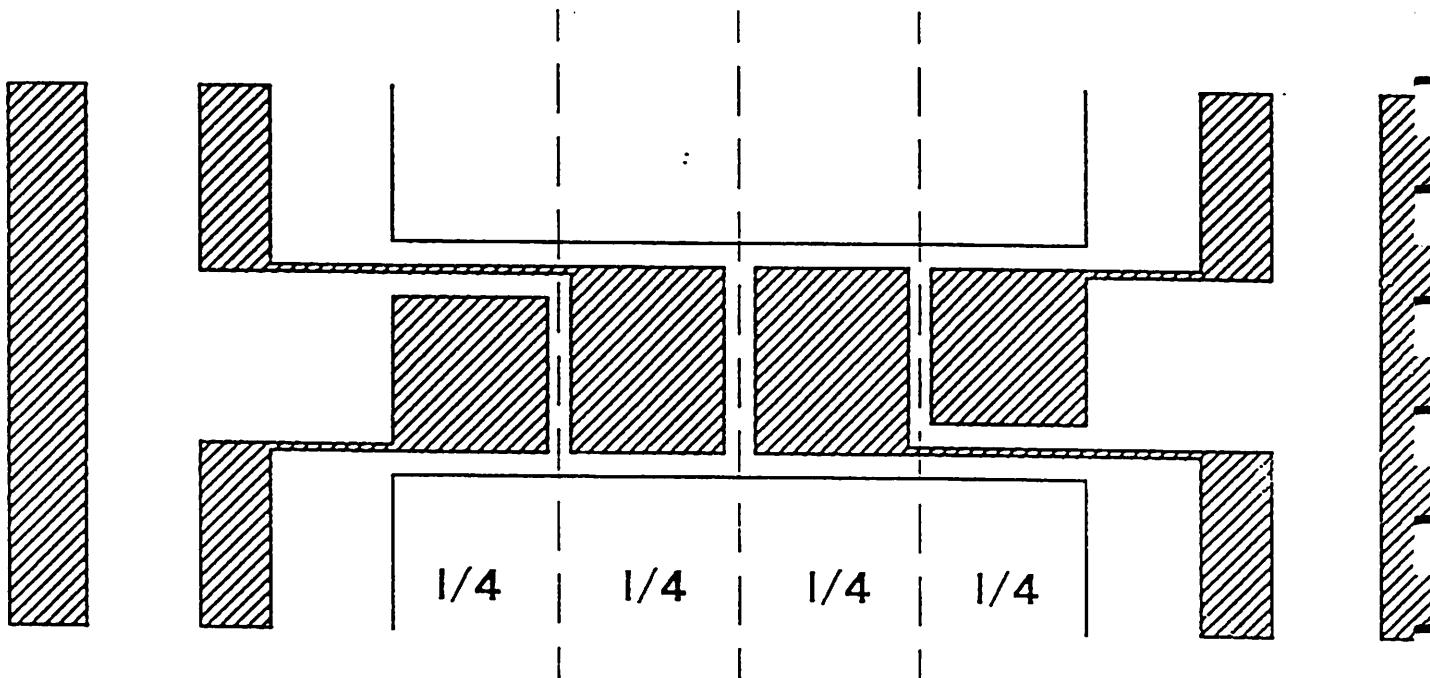


Bild 3.8



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

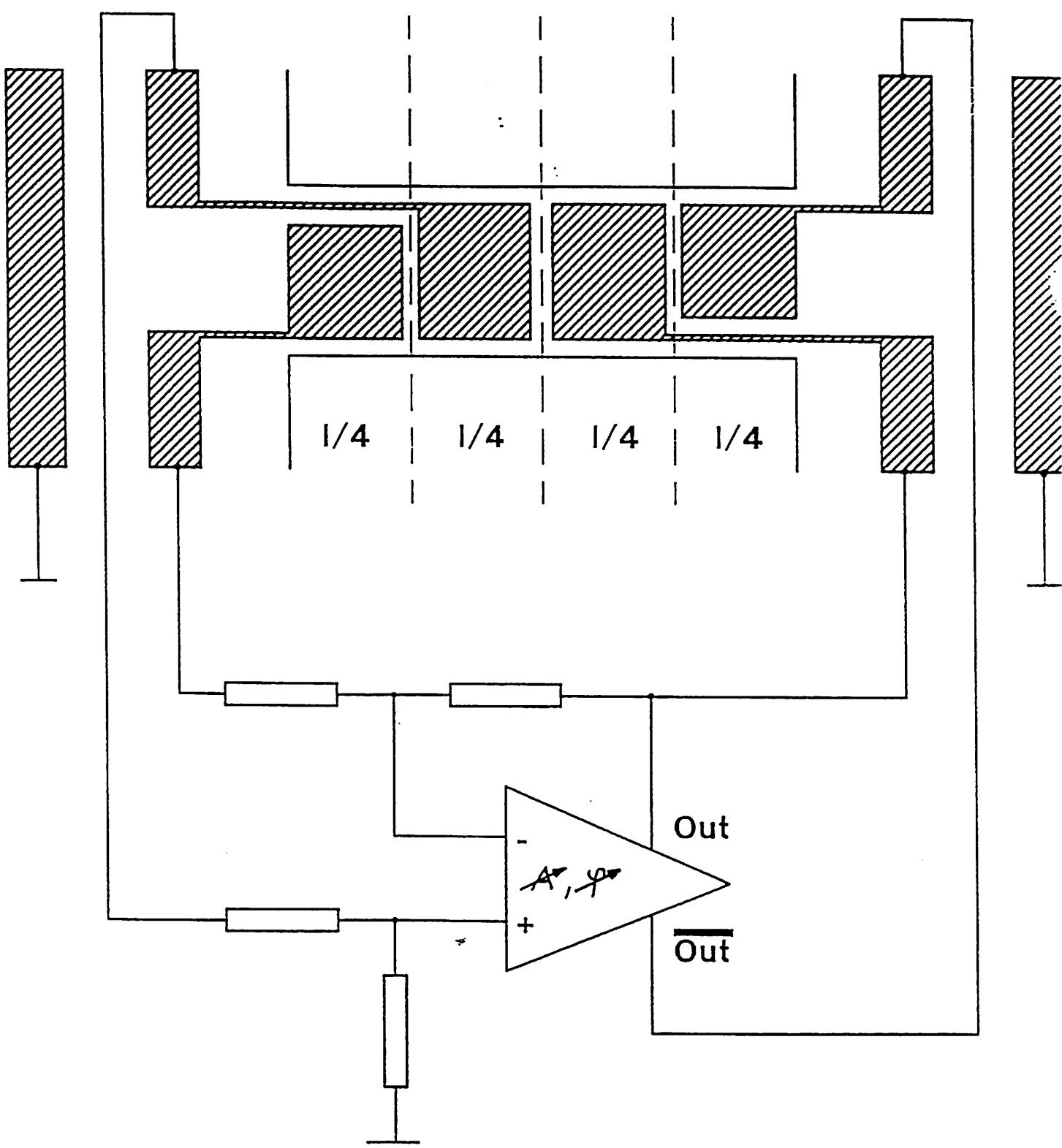


Bild 3.10

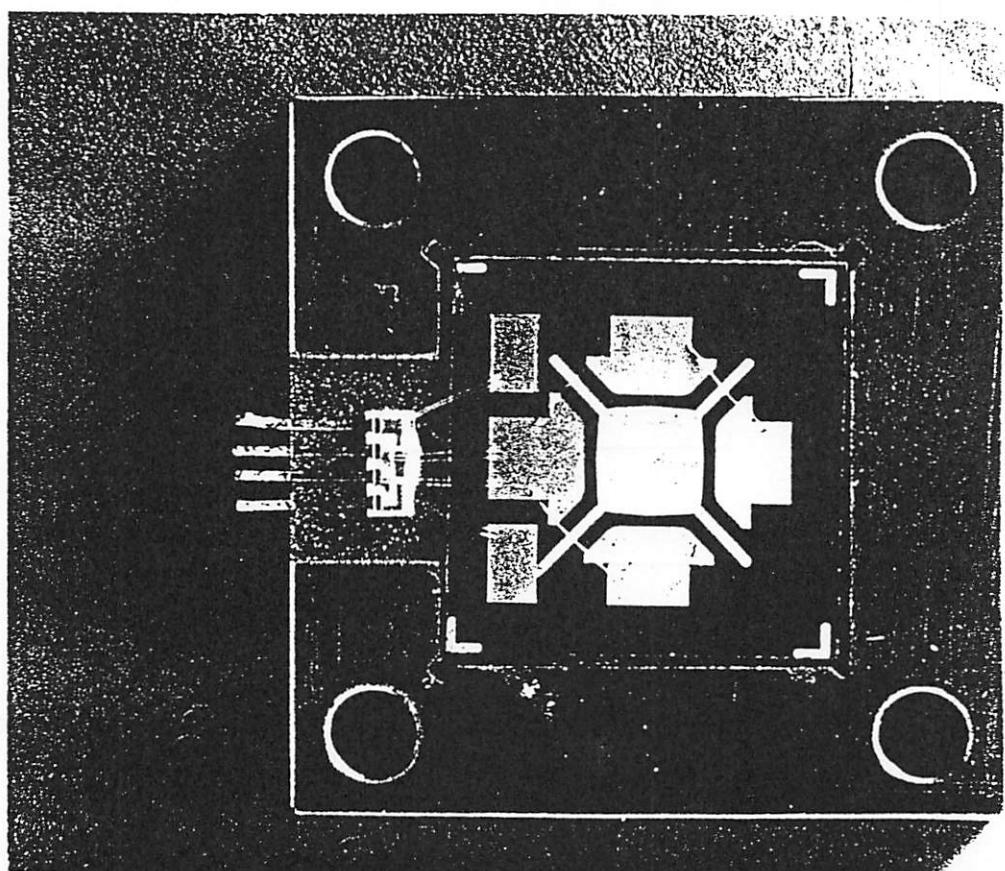
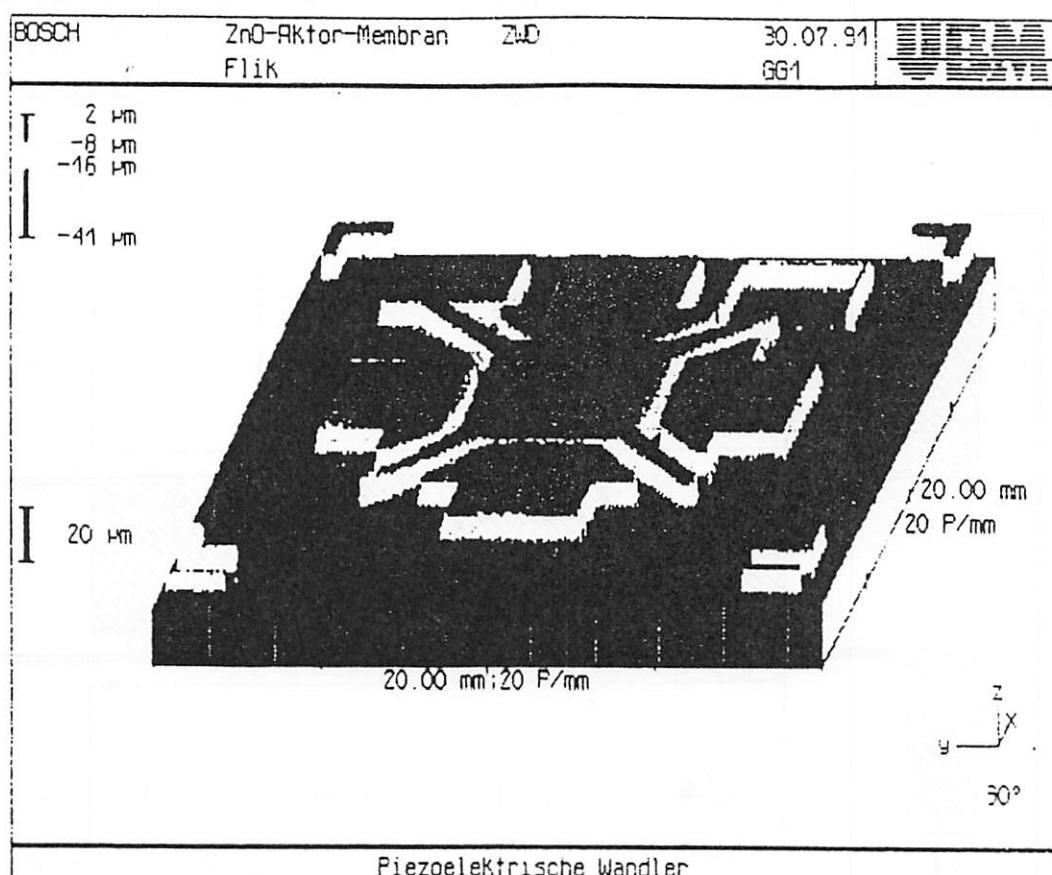


Bild 3.11

BOSCH

ZWD

Frequenzspektrum ZnO/Si-Membran
 $d(\text{Si}) = 50\mu\text{m}$ $d(\text{ZnO}) = 11\mu\text{m}$ August 91
Ta0

Range: 0 dBm

Res BW: 580 Hz

VBW: Off

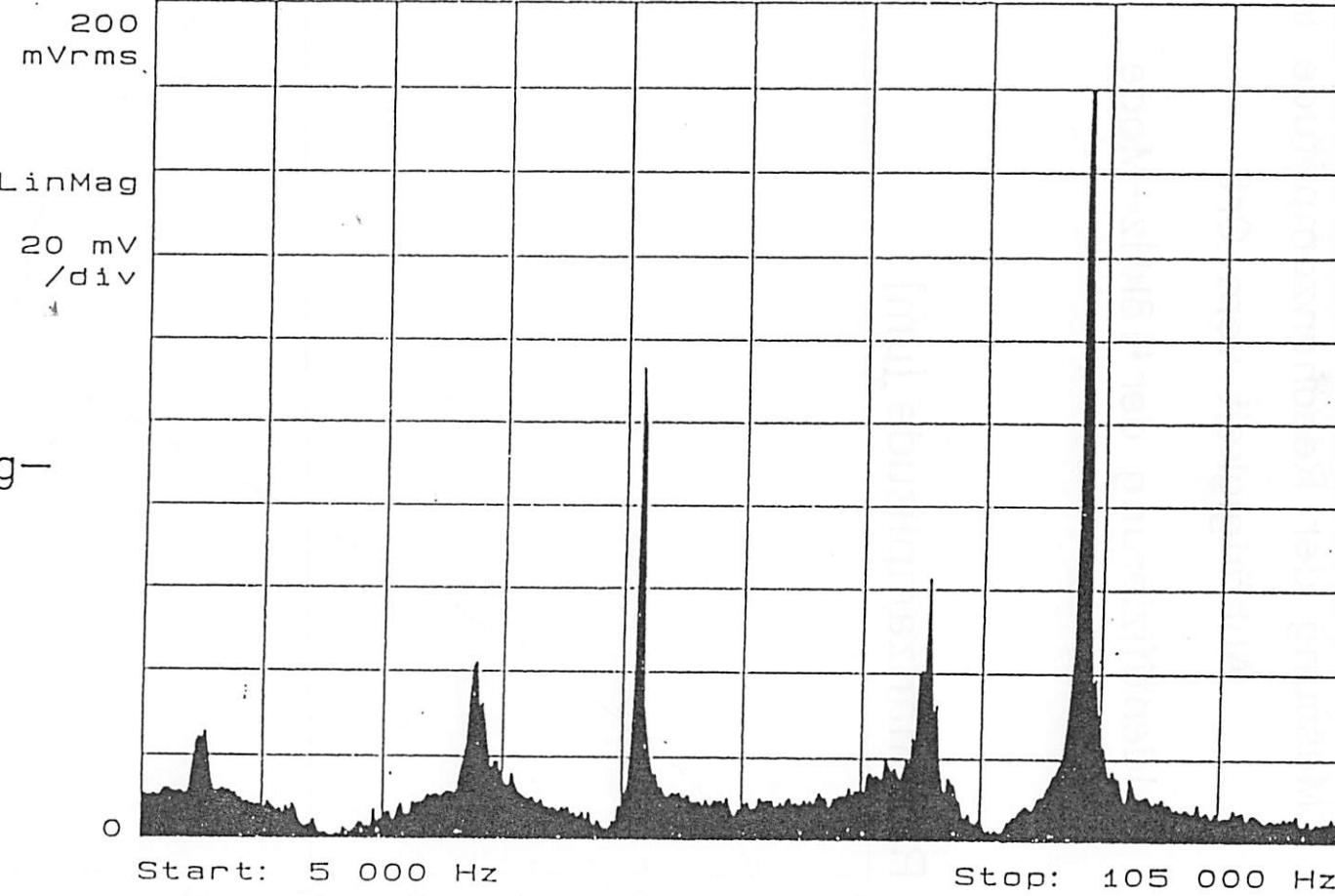
23-Apr-2000 10: 23

Swp Time: 40.14 Sec

A: SWEPT SPECTRUM

Mkr

83 500 Hz 180.10 mVrms



Messung der Resonanzamplitude in
Abhängigkeit vom Ort
Identifizierung der 48kHz–Mode

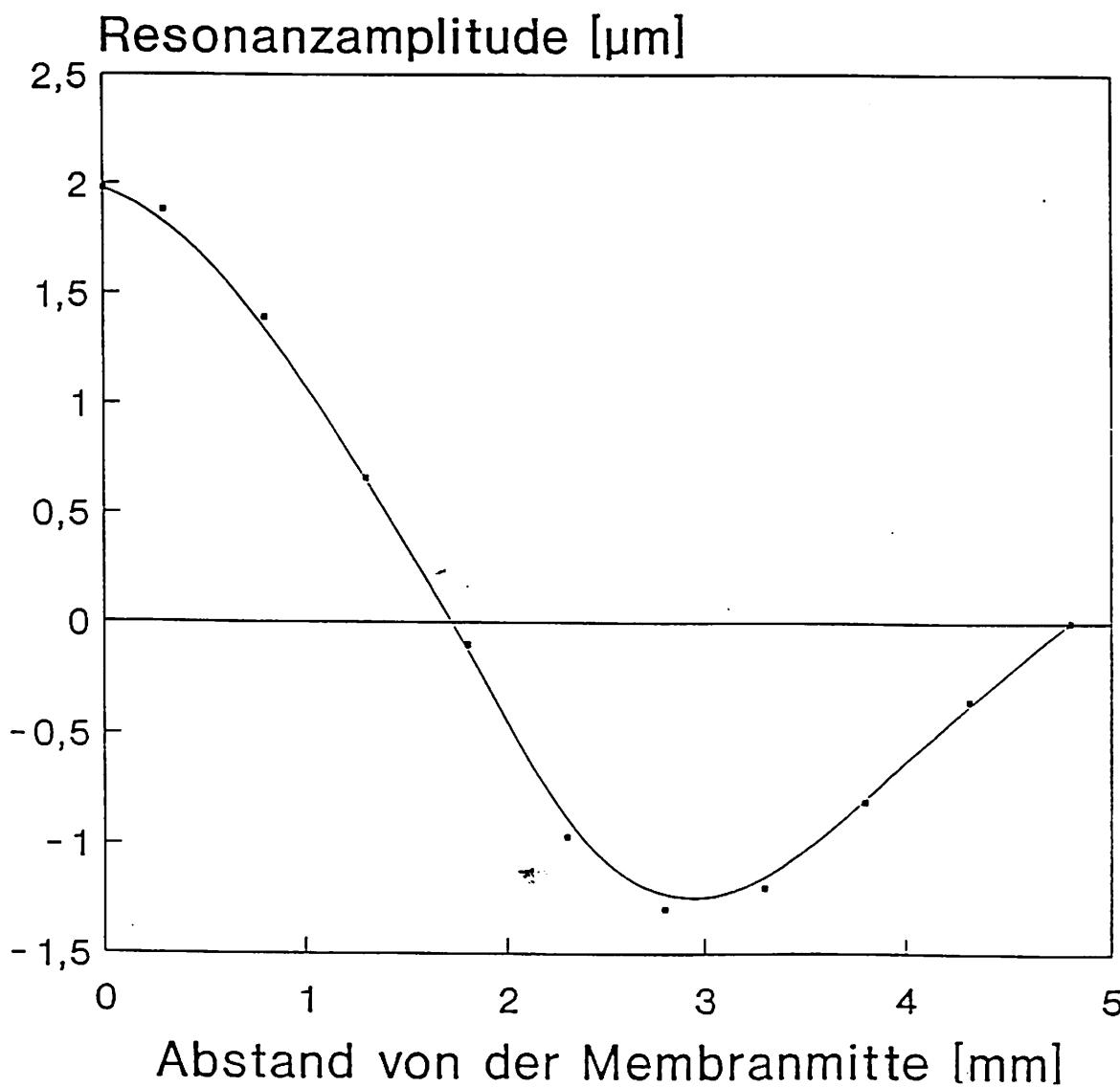
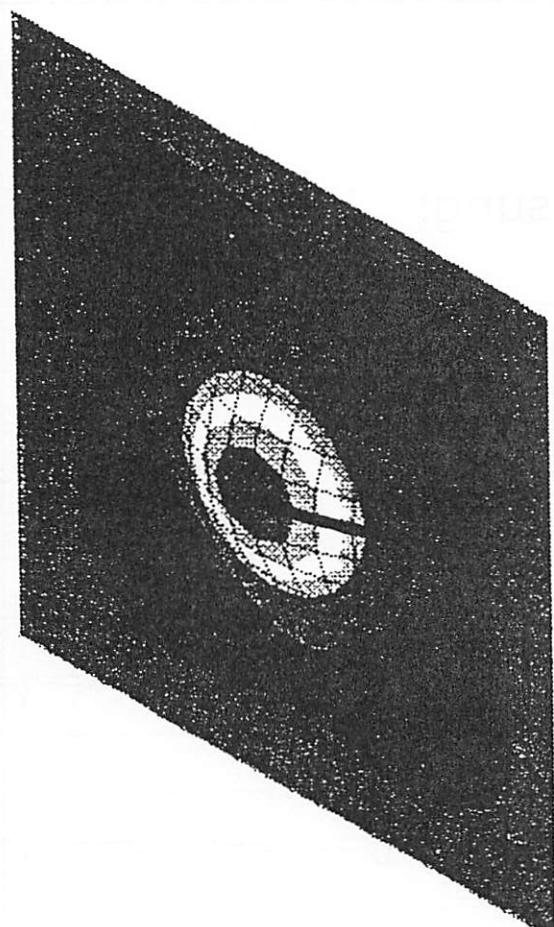


Bild 3.13

ANSYS 4.4
UNIV VERSION
MAY 24 1991
17:52:20
POST1 STRESS
STEP=1
ITER=6
FREQ=15833
UZ
D GLOBAL
DMX =1
SMN =-0.593472
SMX =1

XU =1
YU =1
ZU =1
DIST=6.197
XF =4.6
YF =4.6
-0.593472
-0.41642
-0.239367
-0.062315
0.114738
0.29179
0.468843
0.645895
0.822948
1



6. Schwingungsmodus

Gain–Phase–Messung:

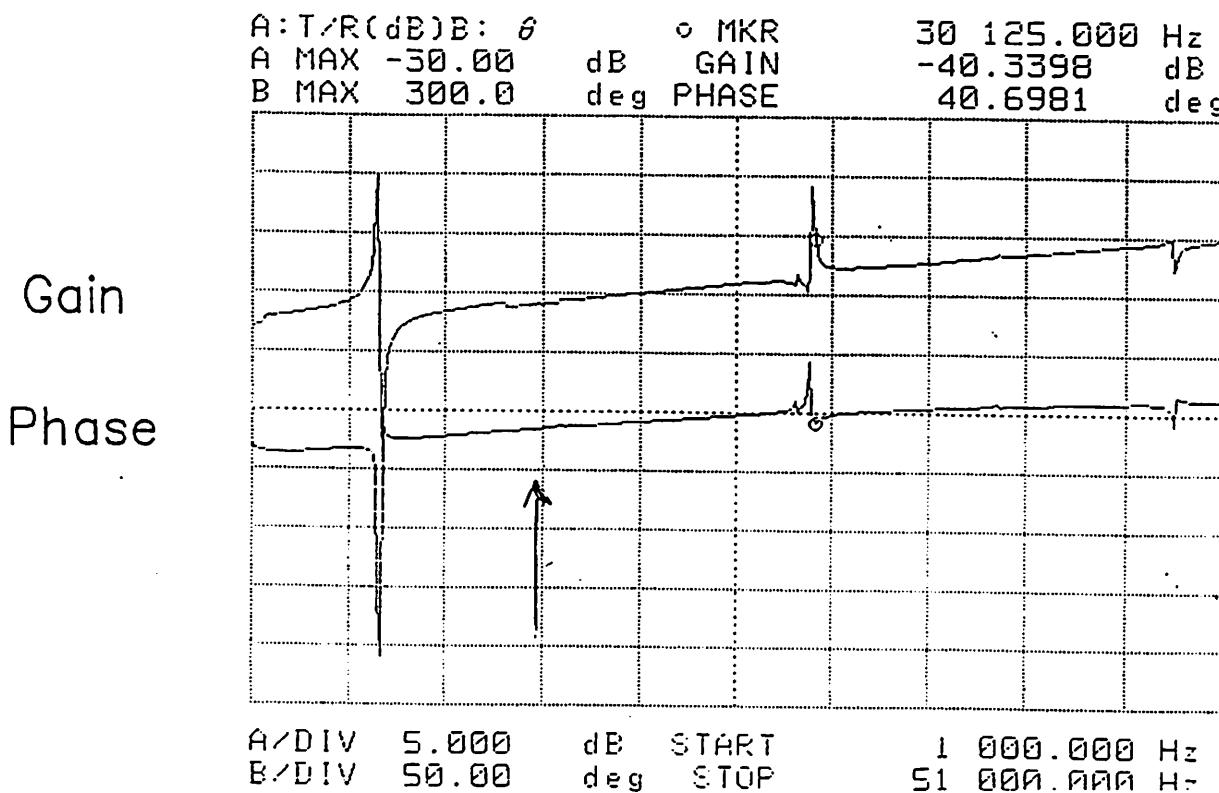


Bild 3.15

Interferometer:

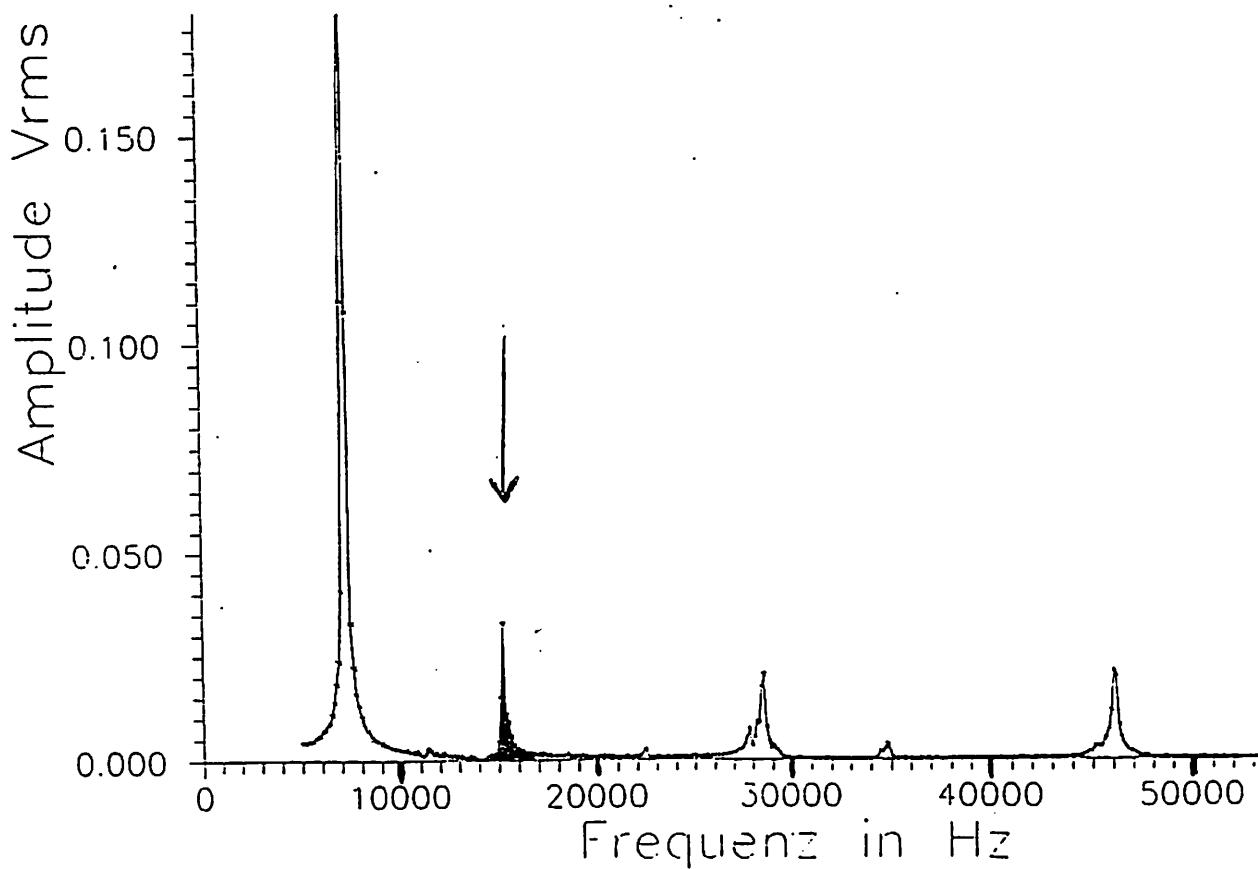
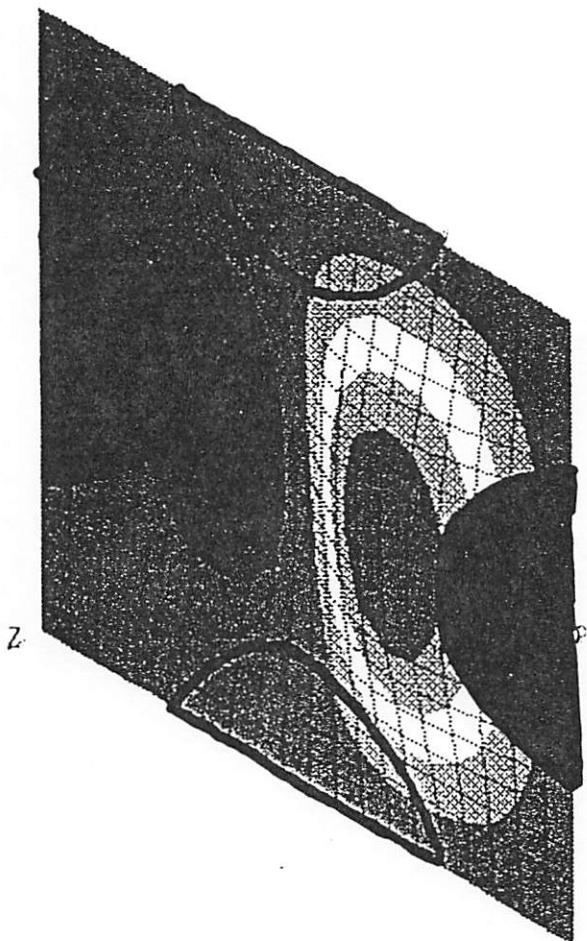


Bild 3.15

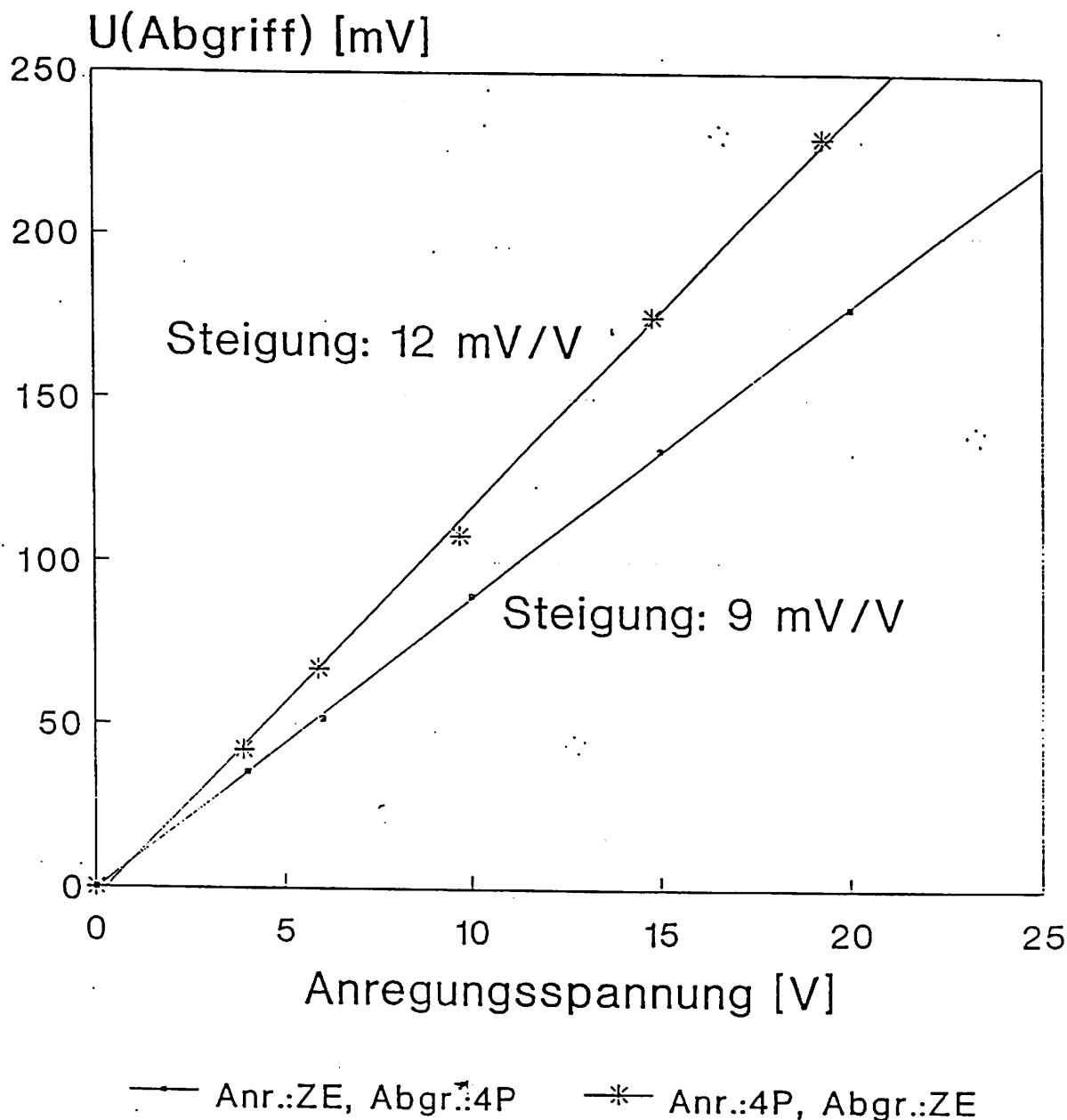
ANSYS 4.4
UNIV VERSION
MAY 24 1991
16:58:09
POST1 STRESS
STEP=1
ITER=2
FREQ=8791
UZ
D GLOBAL
DMX =1
SMN =-0.999999
SMX =1

XU =1
YU =1
ZU =1
DIST=6.197
XF =4.6
YF =4.6
-0.999999
-0.777777
-0.555555
-0.333333
-0.111111
0.111111
0.333334
0.555556
0.777778
1



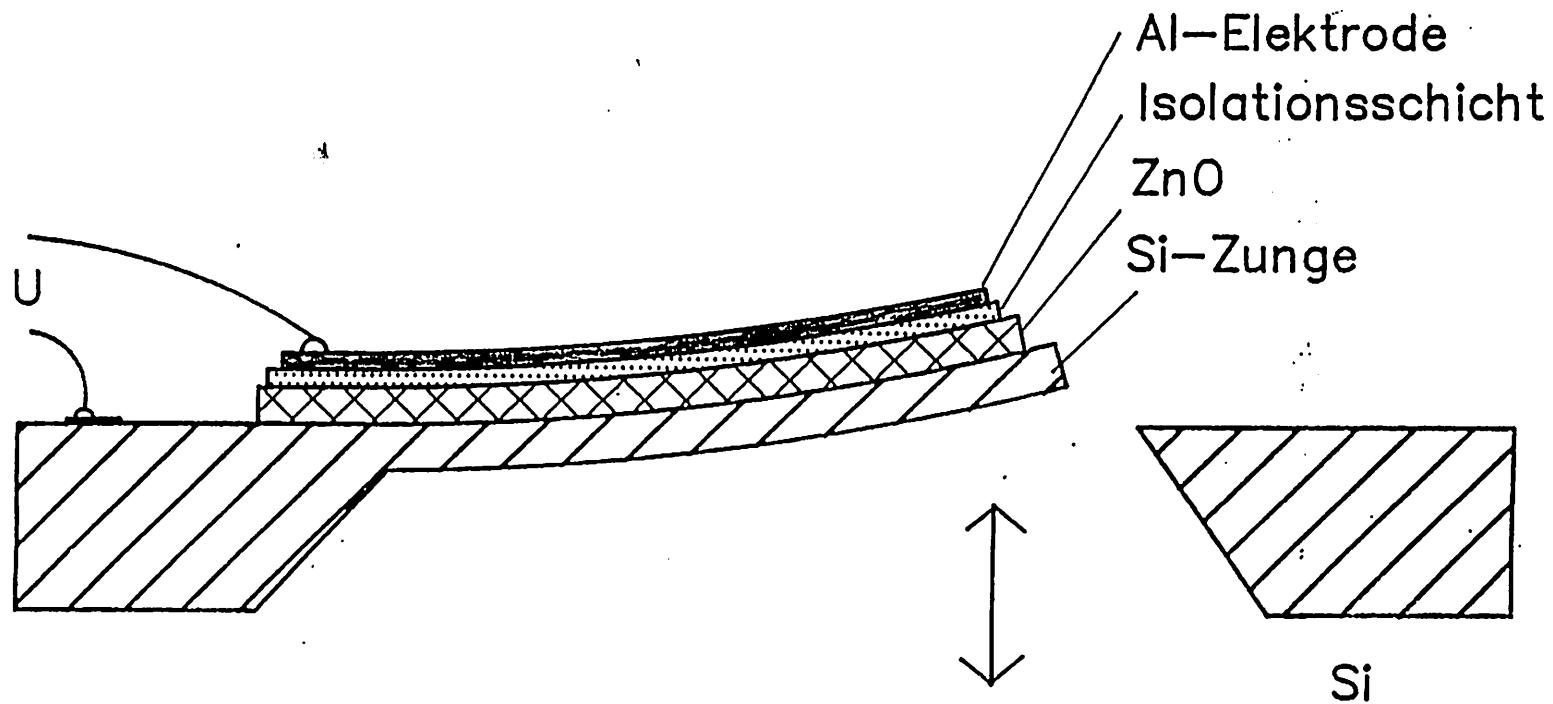
2. Schwingungsmodus

Spannungsamplitude am Aufnehmer in Abh.
von der Amplitude der Anregungsspannung



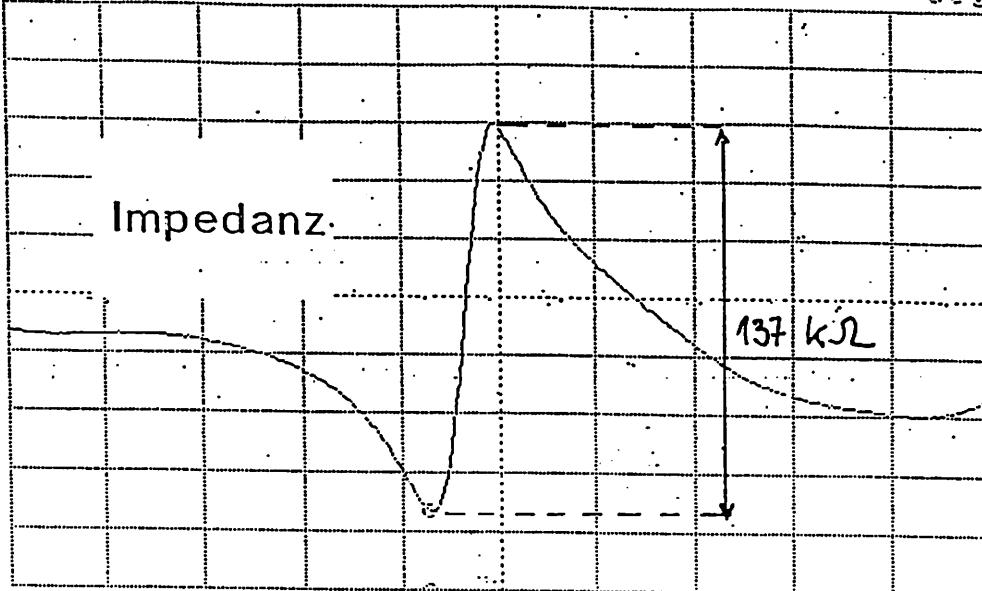
$$U_{\text{Abgr.}} = k_{\text{eff}}^2 \cdot \sqrt{\left(A_{\text{Anr.}} / A_{\text{Abgr.}} \right)} \cdot U_{\text{Anr.}}$$

Biegezunge



Resonanznachweis mittels Impedanz-Messung

A: IZI B: θ MKR 3 418.250 Hz
A MAX 340.0 K Ω MAG 167.125 K Ω
B MAX -35.00 deg PHASE deg



A/DIV 20.00 K Ω CENTER 3 440.000 Hz
B/DIV 5.000 deg SPAN 300.000 Hz
SPAN = 300.000 Hz

Bild 3.19

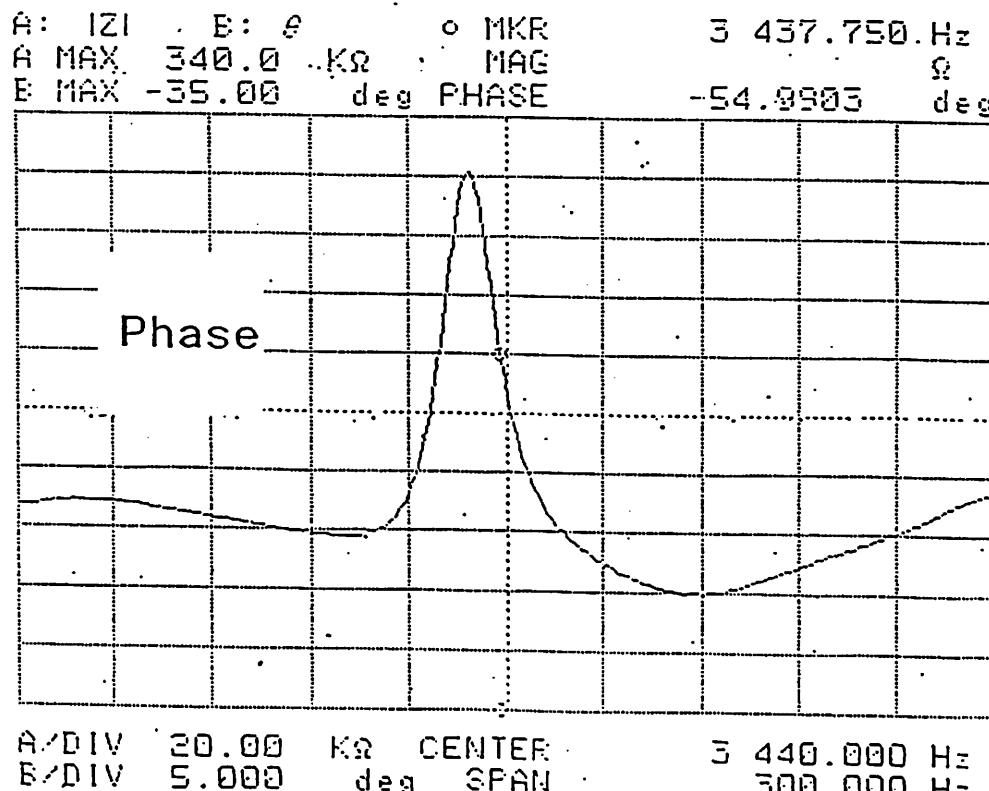


Bild 3.19

Elektromechanische Kopplungsfaktoren
in Abh. von den relativen Materialdicken
ZnO/Si-Membranen, strukturiert

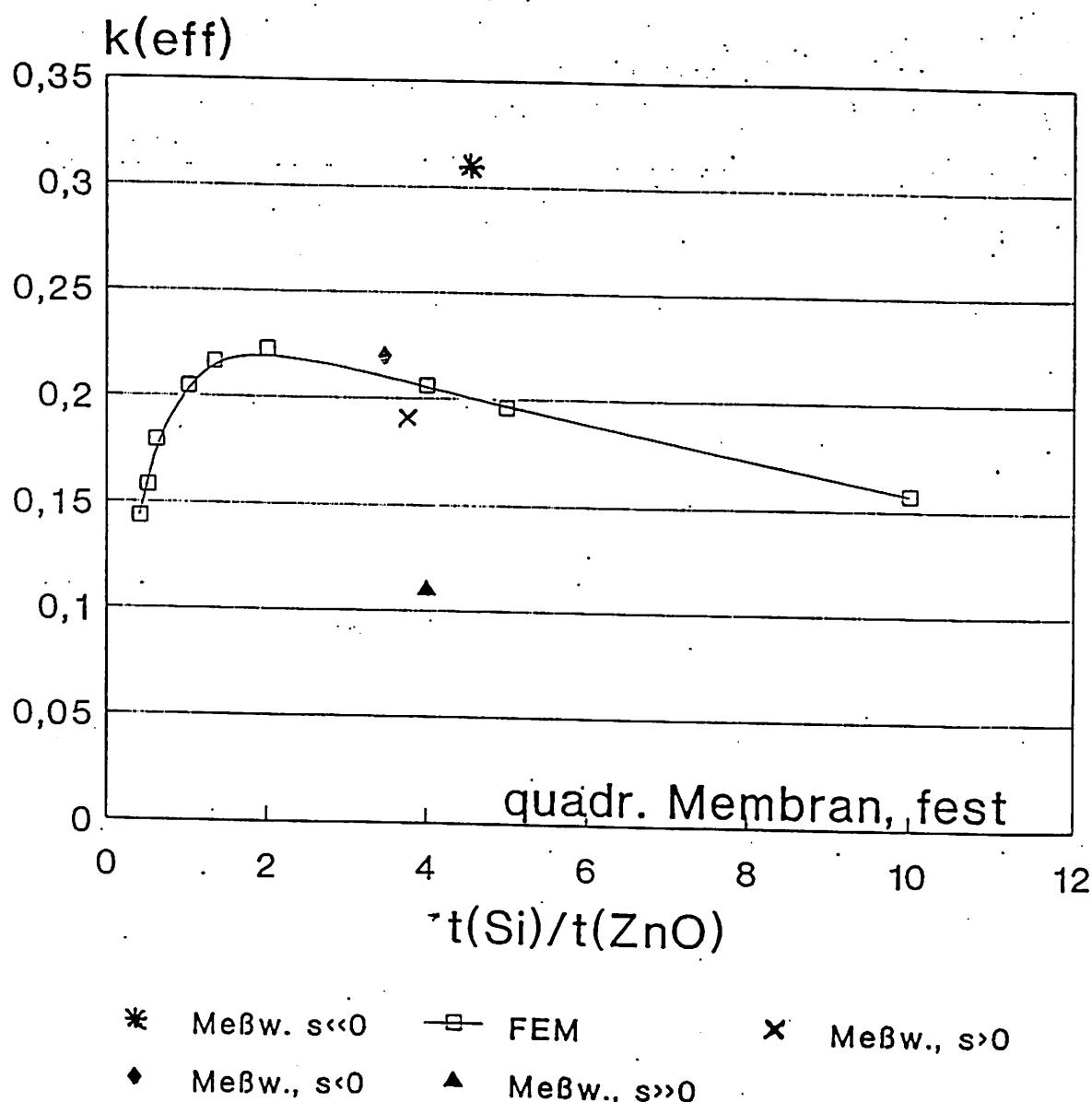
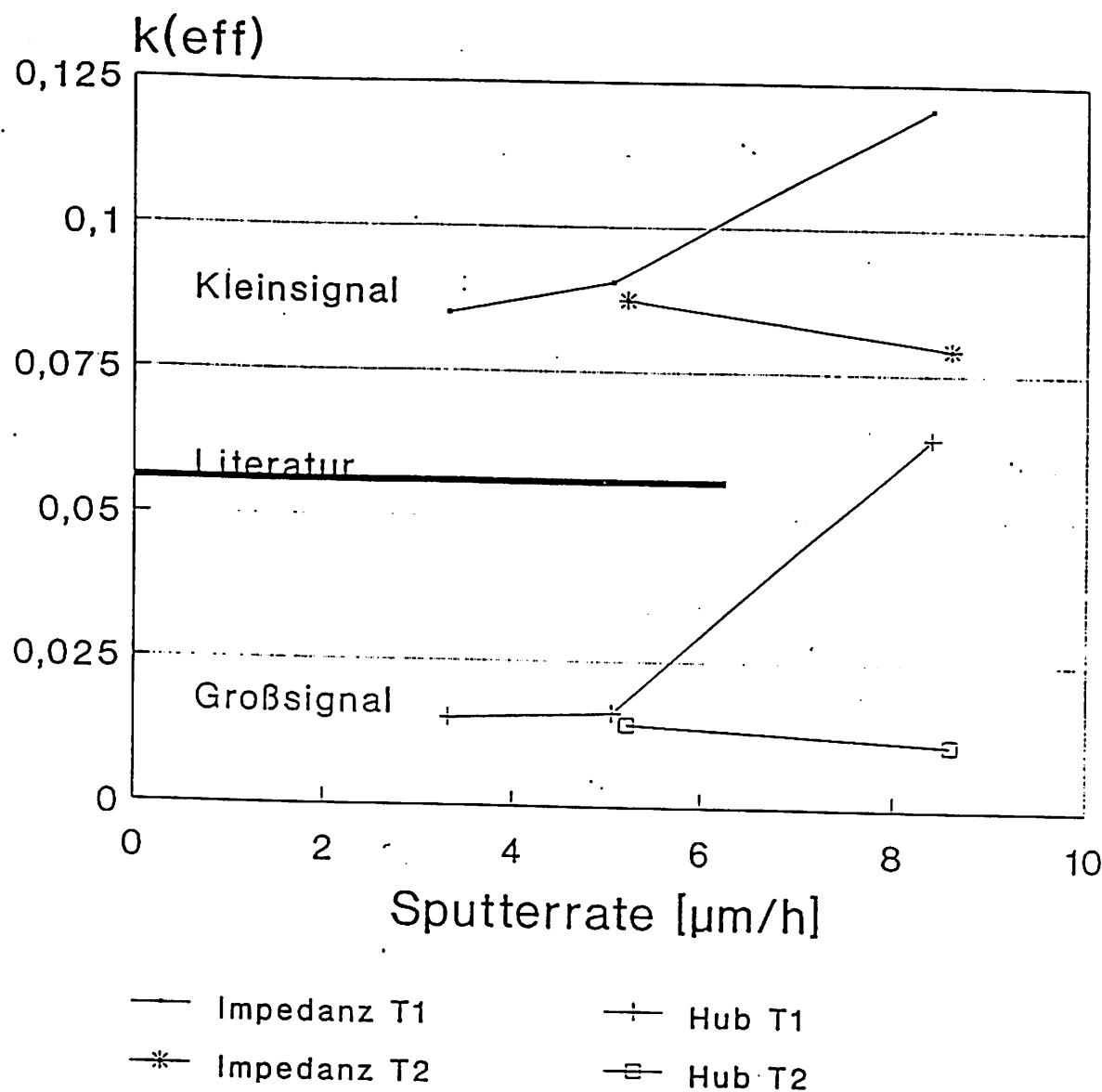


Abb. 21 Meßwerte für unterschiedliche Schichtspannungen

Effektive Kopplungsparameter von
ZnO/Si-Biegezungen
 $b = 5\text{ mm}$, $l = 7\text{ mm}$, $d(\text{Si}) = 124\text{ }\mu\text{m}$



Vergleich von Groß- und Kleinsignal
messungen

Reaktives Magnetronputtern von ZnO
Einfluß von Substrattemp. und Sputter-
rate auf piezoelektr. Konstante d31

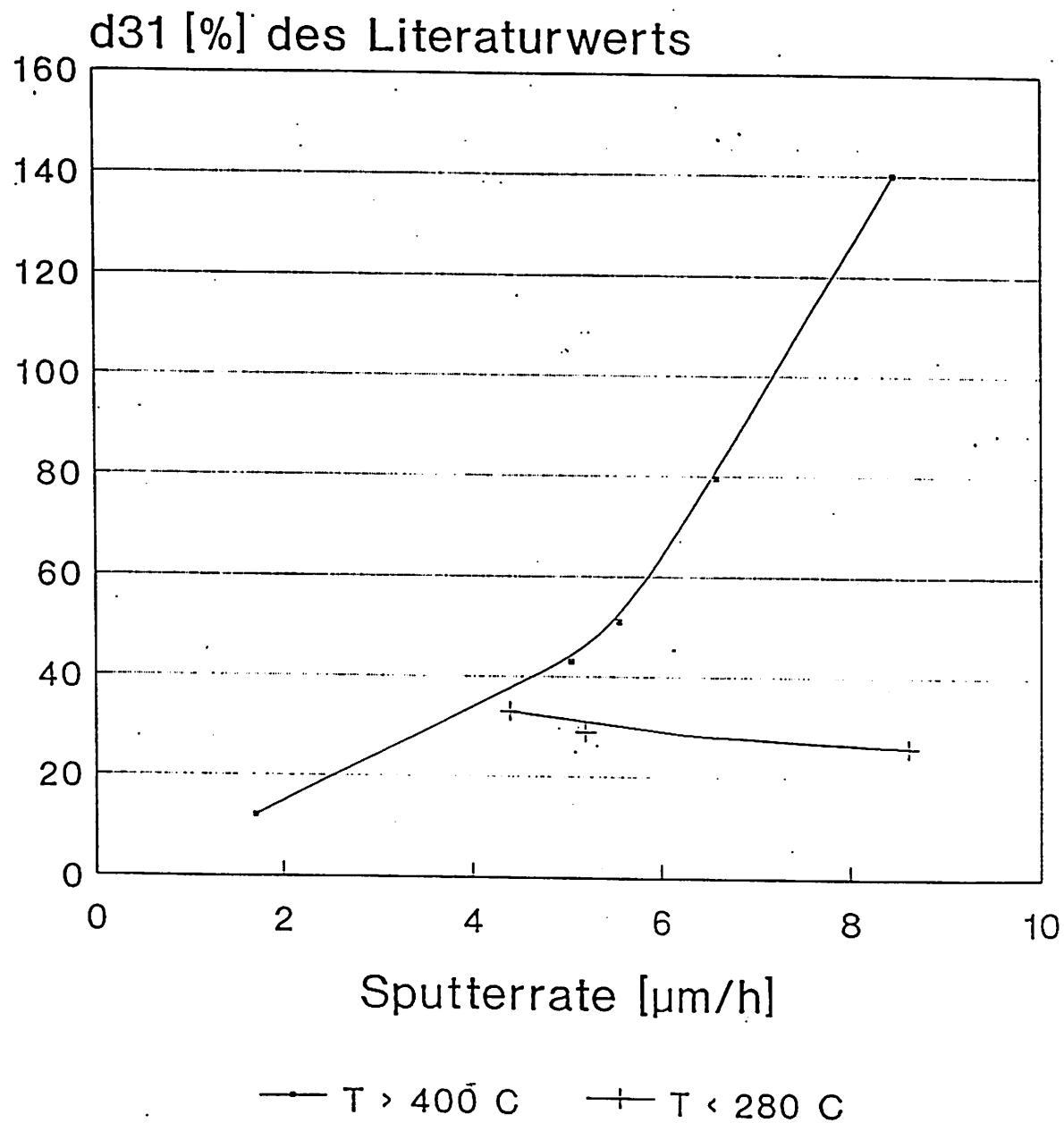


Bild 3.22

$d(\text{Si}) = 50 \mu\text{m}$
 $d(\text{ZnO}) = 12 \mu\text{m}$
nur O_2
 $p = 2 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$
 $T = 280^\circ\text{C}$

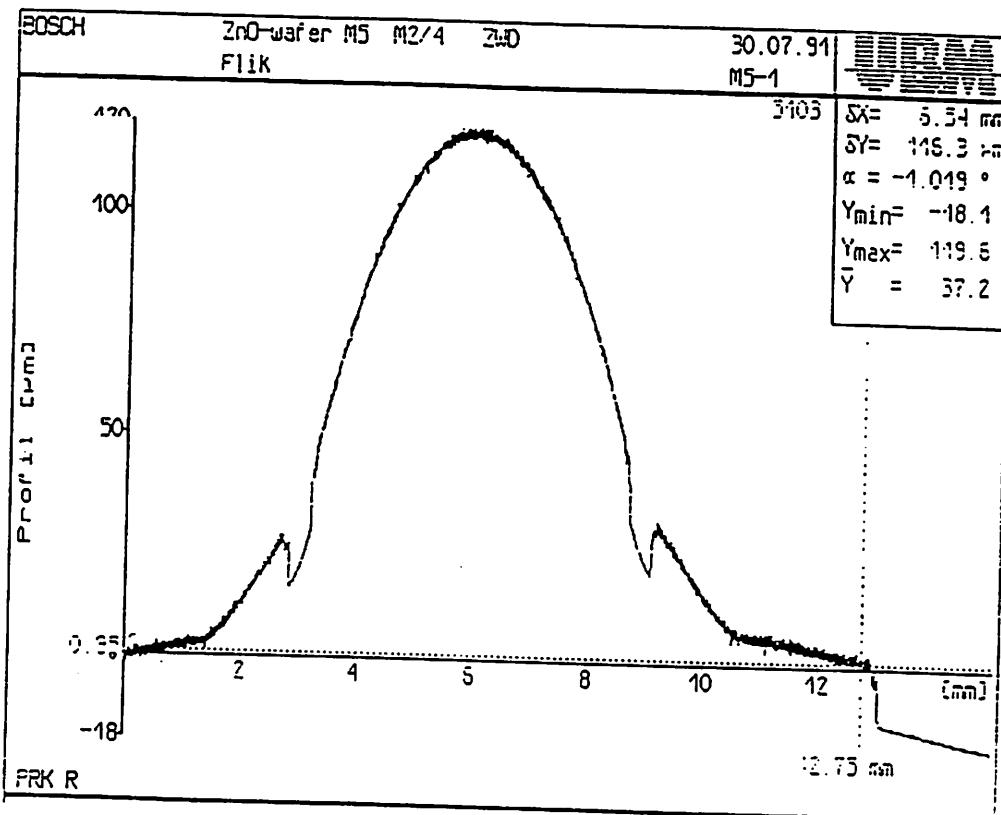


Bild 3.23

$d(\text{Si}) = 50 \mu\text{m}$
 $d(\text{ZnO}) = 12 \mu\text{m}$
 $\text{Ar} : \text{O}_2 = 1 : 1$
 $p = 1 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$
 $T = 290^\circ\text{C}$

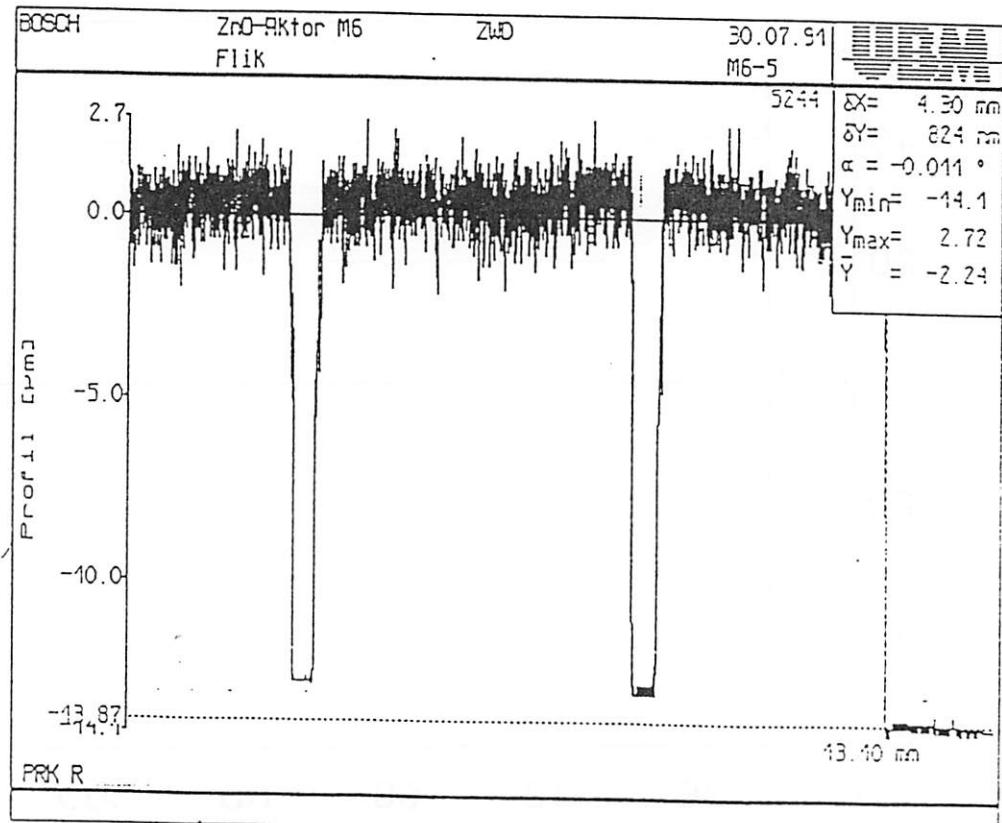
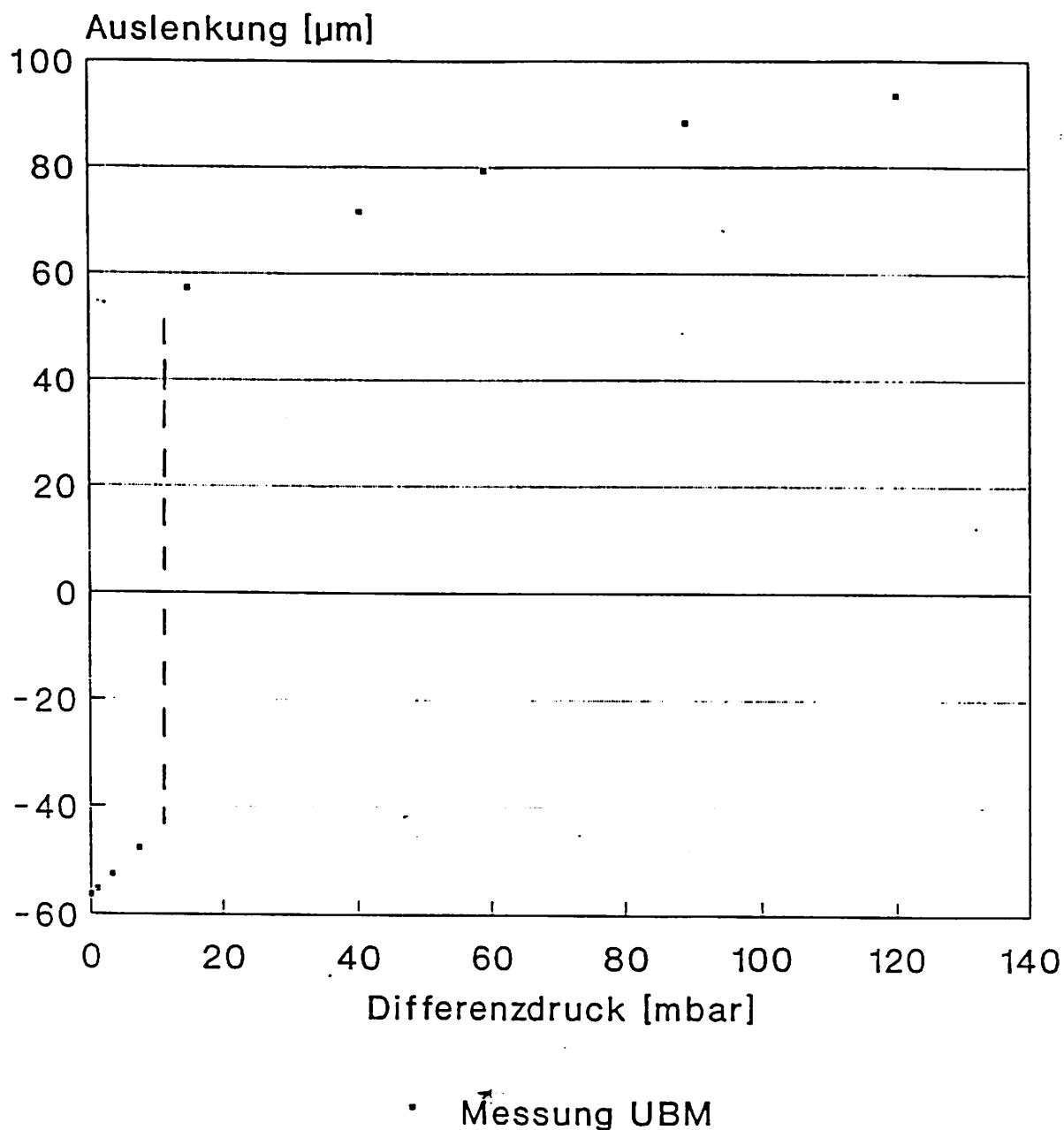


Bild 3.23



"Knackfrosch"

Bild 3.24

Resonanter Drucksensor

Druckabh. d. Resonanzfrequenz

10 kHz-Mode

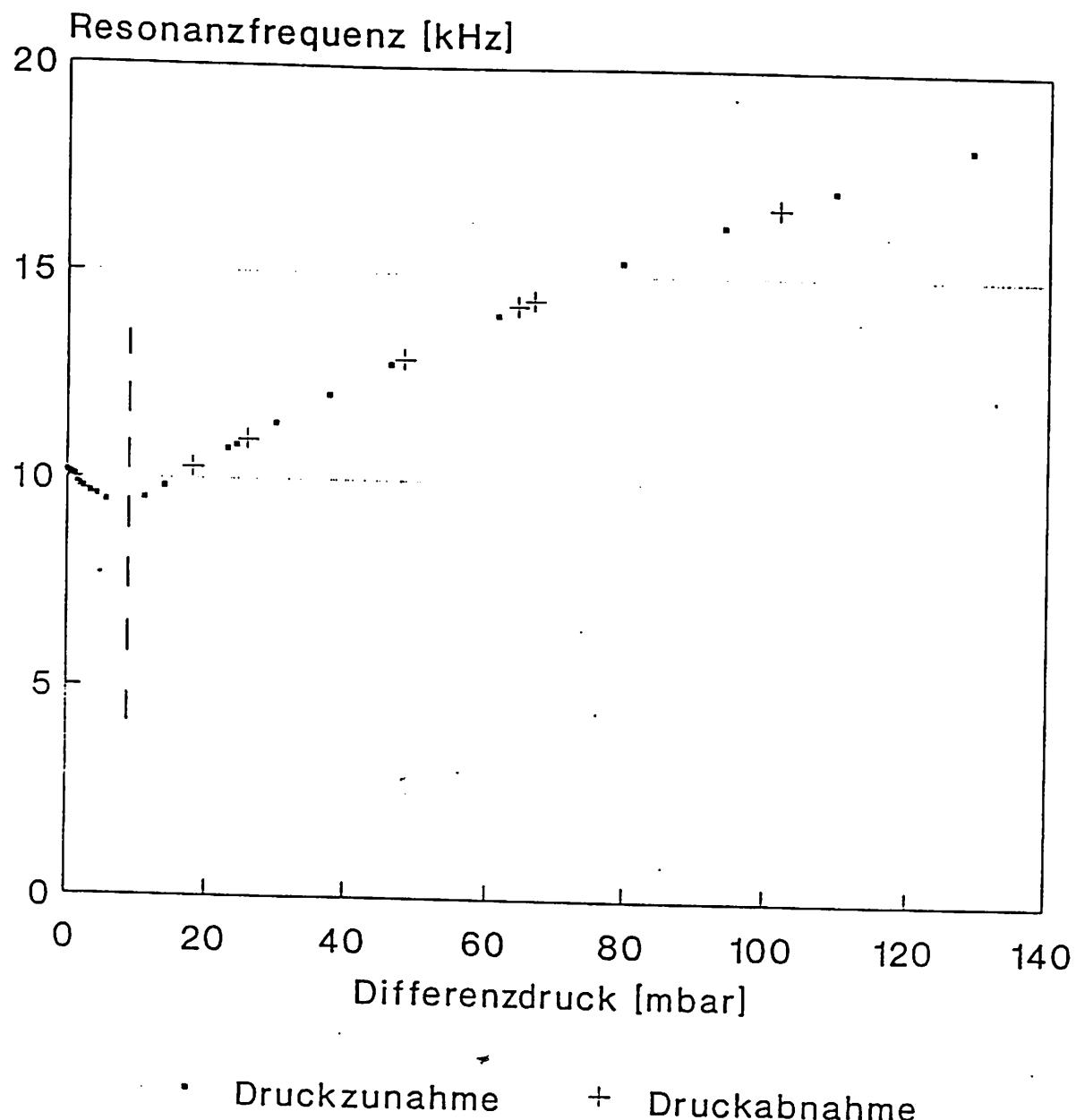


Bild 3.25

Frequenzverschiebung durch Differenzdruck, Medium:Luft

Anr.: ZE

Abgr.: 4P

p = 0 bar

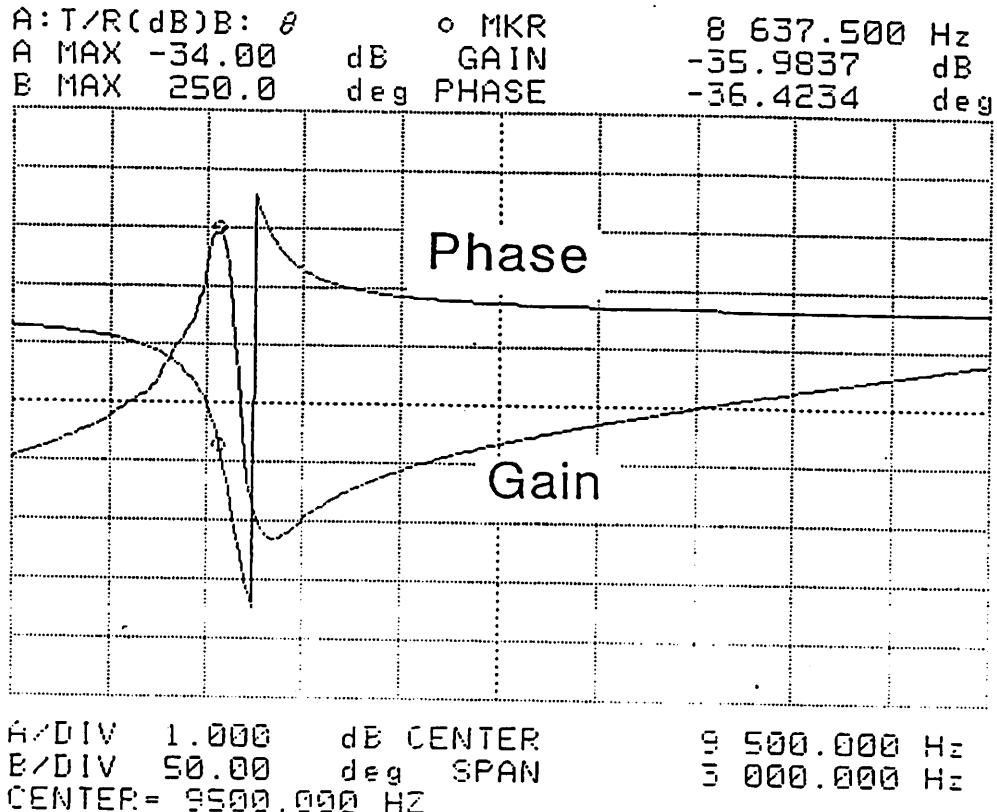


Bild 3.26

Frequenzverschiebung durch Differenzdruck, Medium:Luft

$p = 0.13 \text{ bar}$

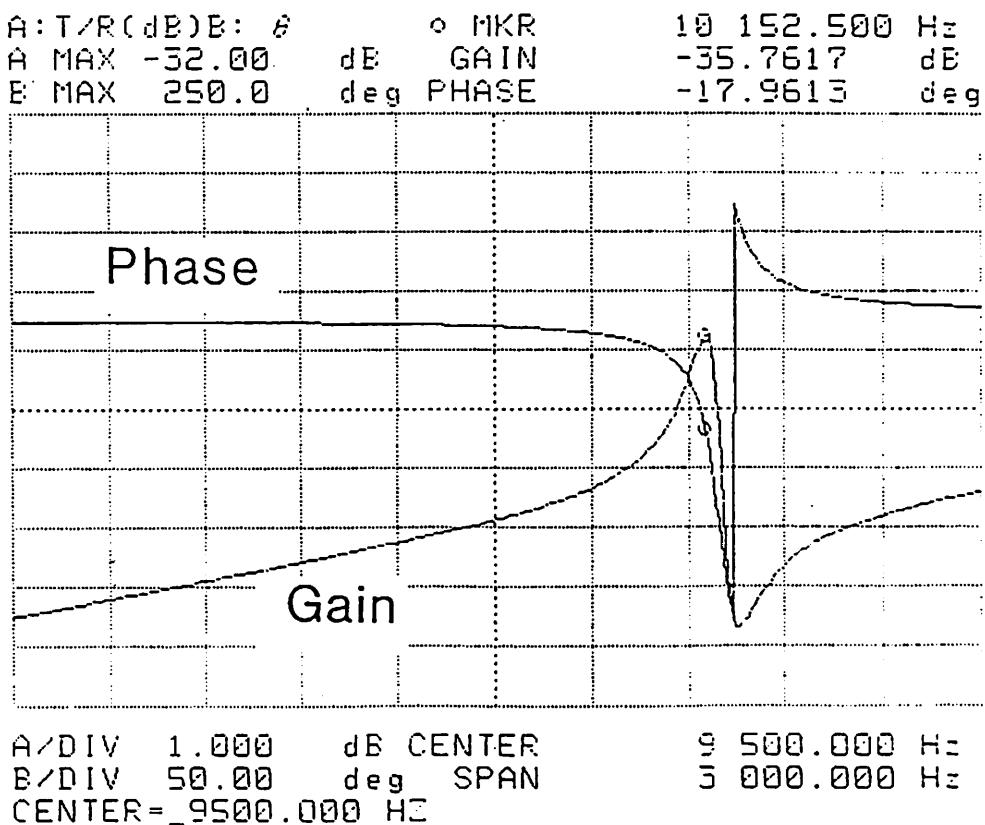
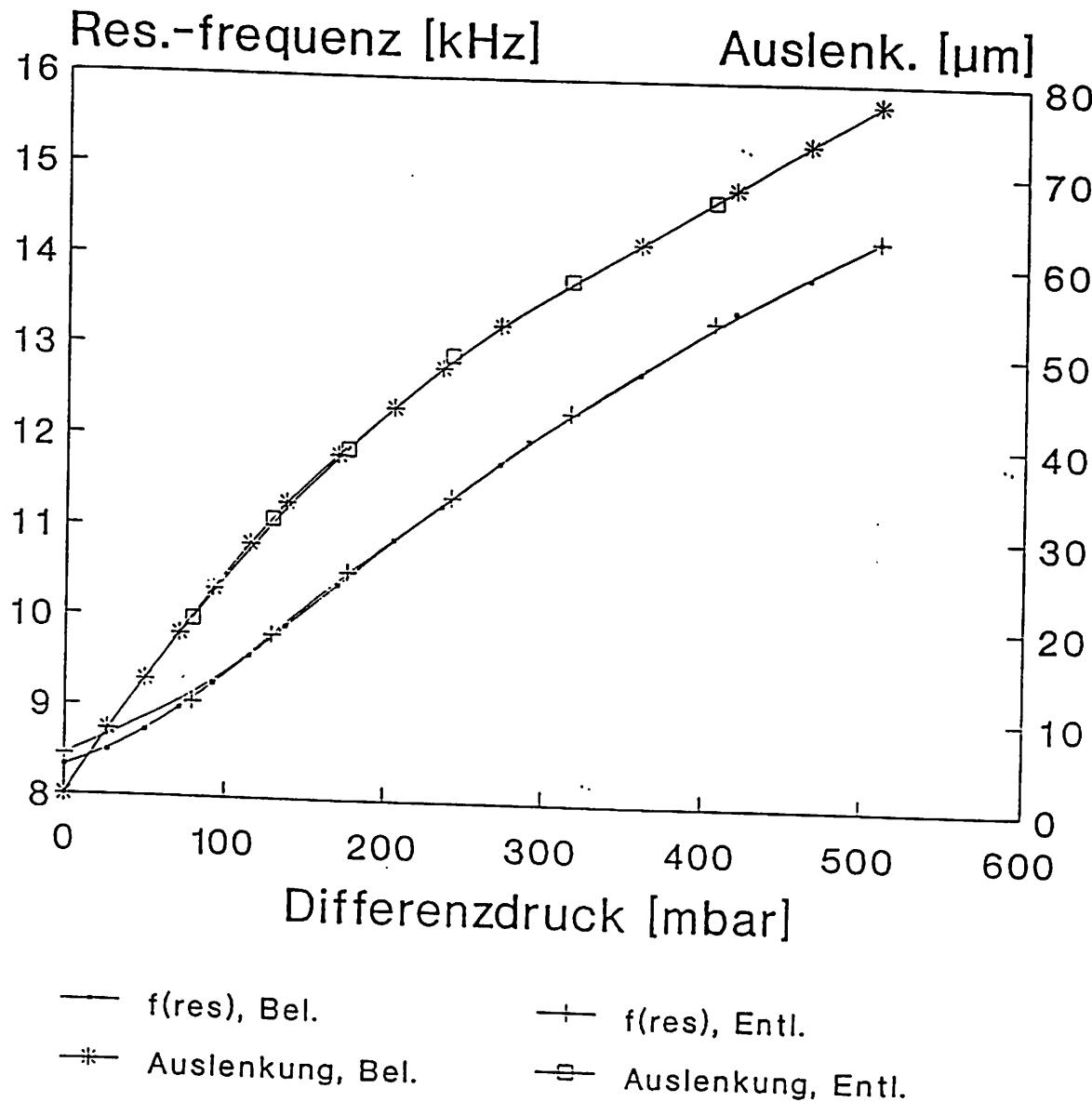


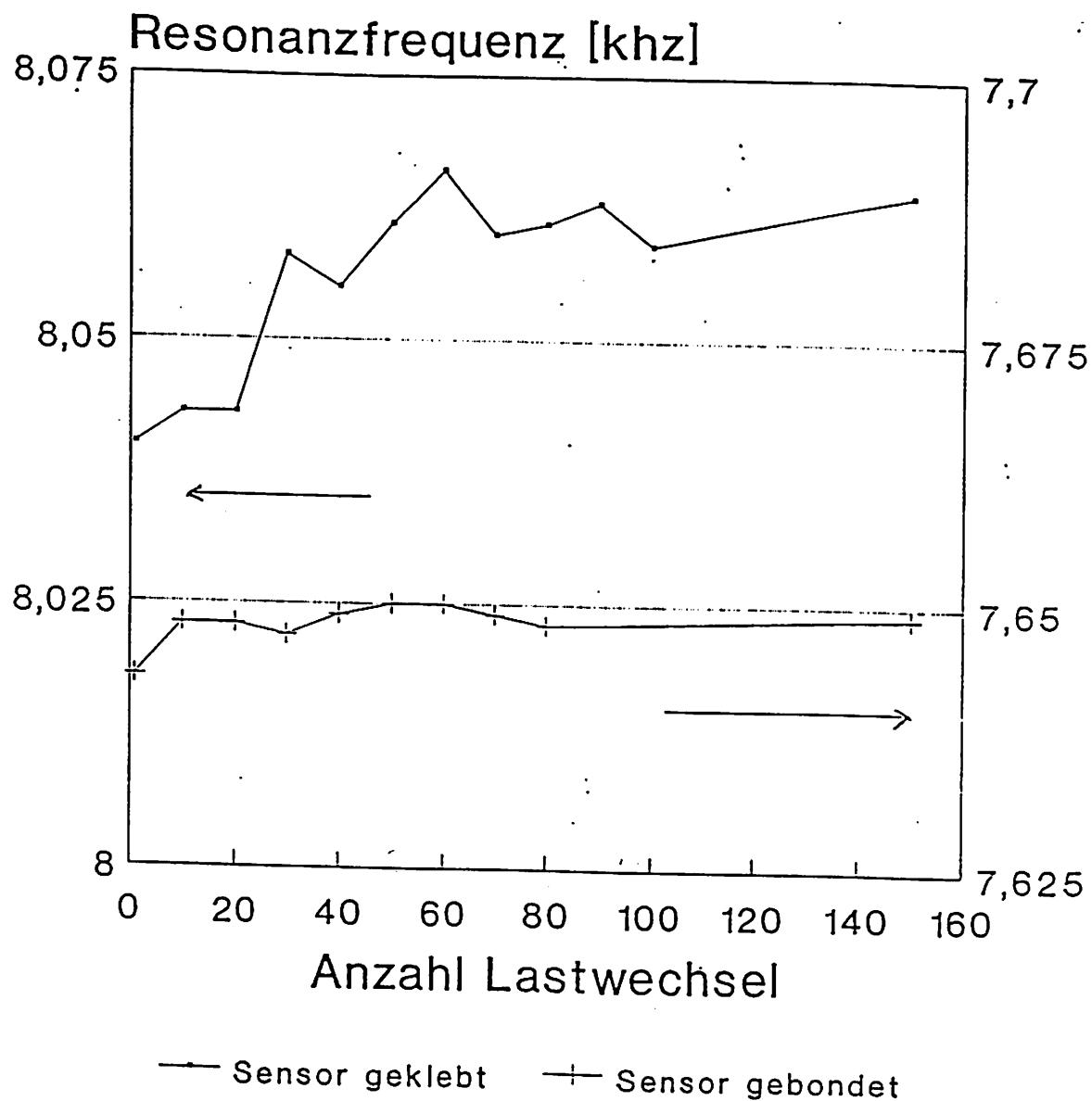
Bild 3.26

Resonanter Drucksensor M7 2/3
 Resonanzfrequenz und Auslenkung in
 Abh. vom Differenzdruck



Empfindlichkeit: 12 kHz/bar
 Berstdruck: 2.6 bar

Resonanter Drucksensor
Nullpunktabweichung nach Last-
wechseln bei halbem Berstdruck



M7 2/3 $d(\text{ZnO})=11\mu\text{m}$ $d(\text{Si})=50\mu\text{m}$
M7 3/3 w.o.



Temperatureinflüsse bei Drucksensoren

- Materialeigenschaften
 - Elastizitätsmoduli
 - Ausdehnungskoeffizienten

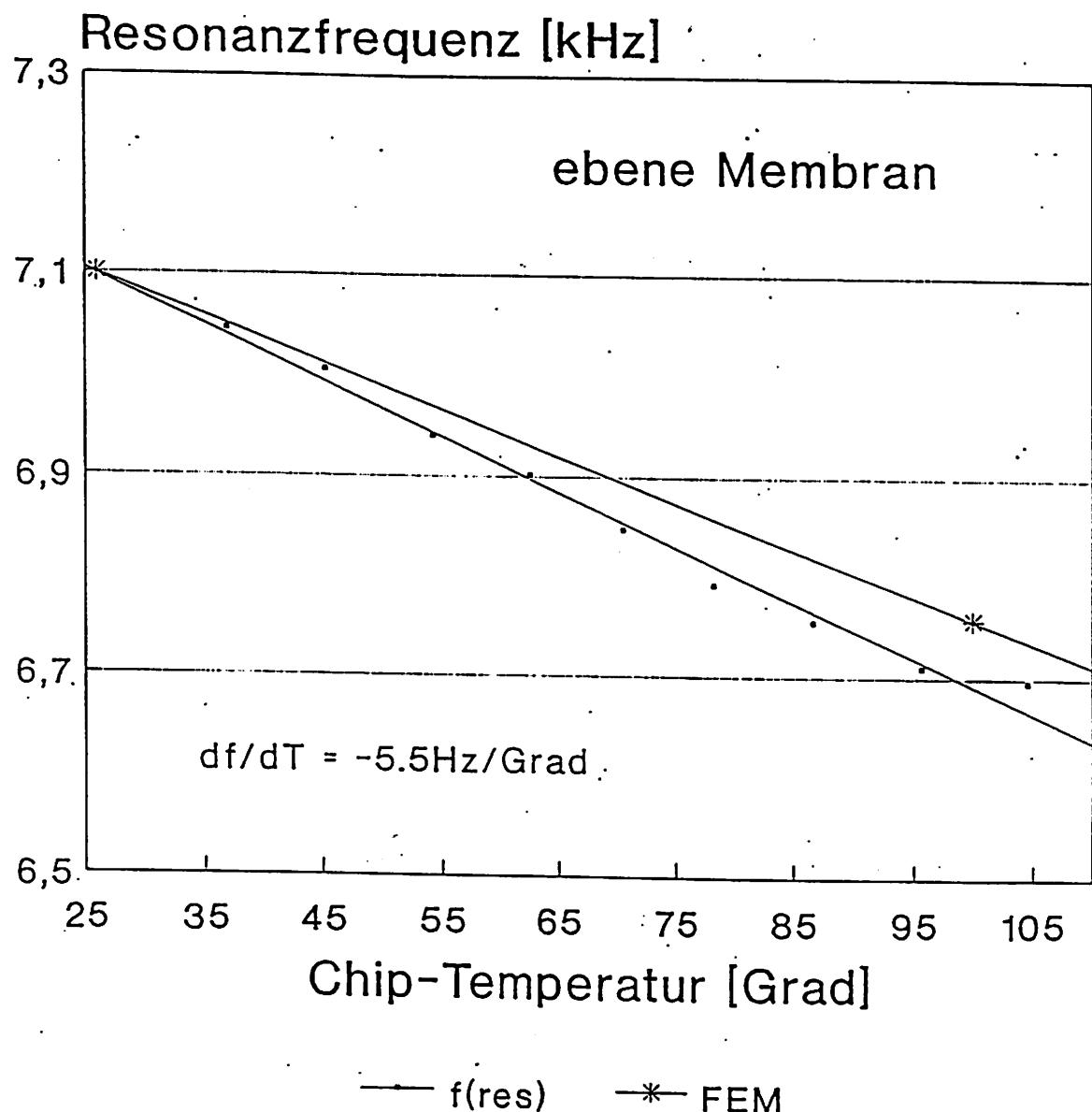
$$f(\text{res}) = - \text{const.} * T$$

- Membranform (Krümmungszustand)

$$f(\text{res}) = \text{const}' * T^2$$

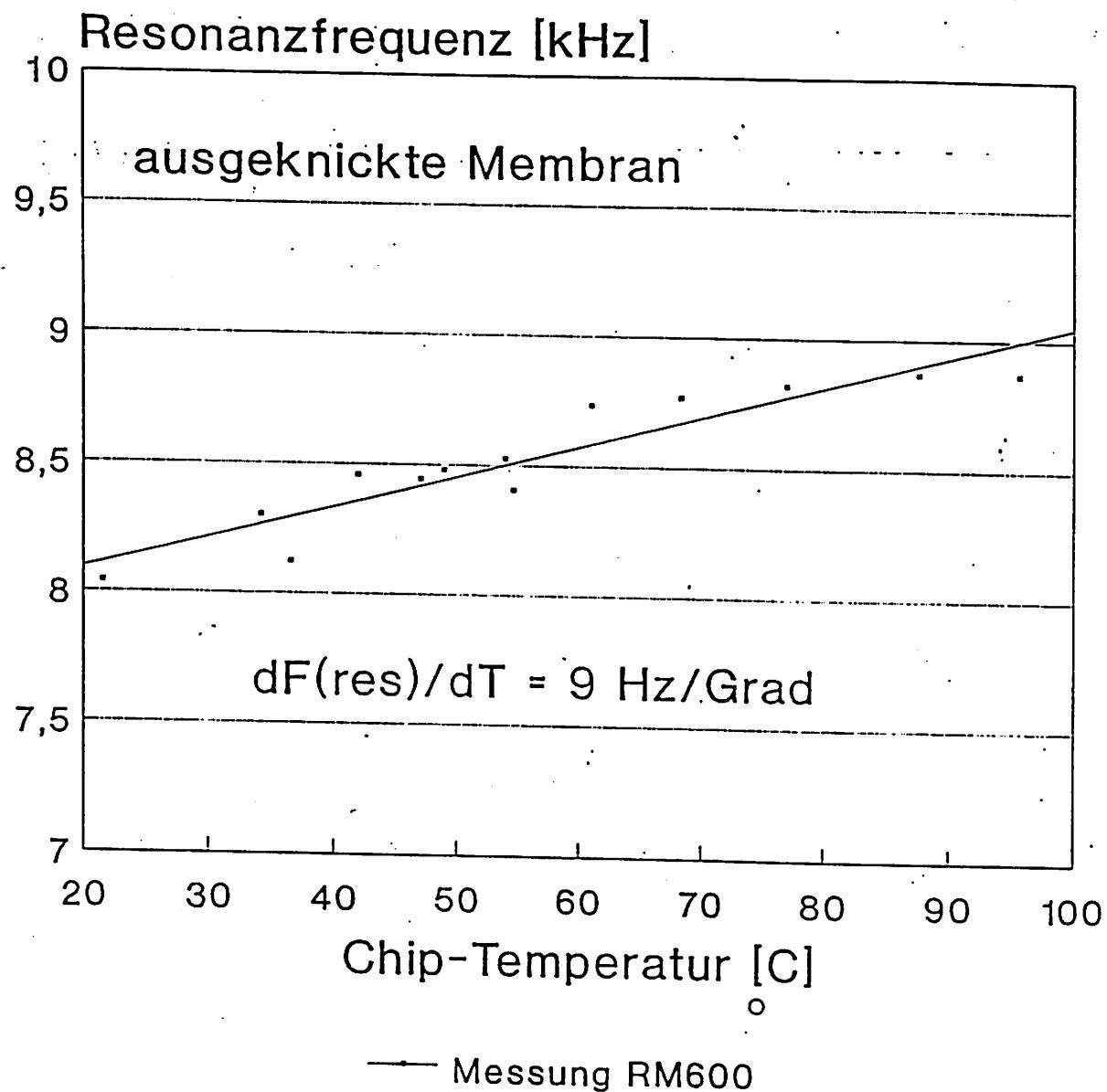
- Elektroden - Layout
- Packaging

Resonanter Drucksensor M7 2/3
Serienresonanzfrequenz
in Abhängigkeit von der Temperatur



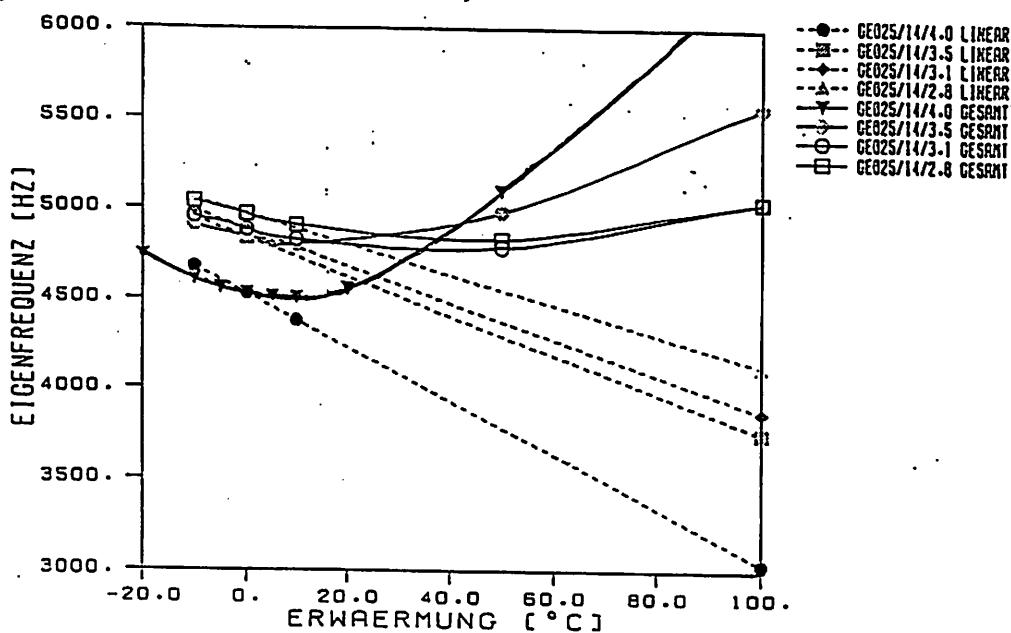
Si/ZnO-Chip, vereinzelt
HP 4194, Hotchuck

Resonanter Drucksensor Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz

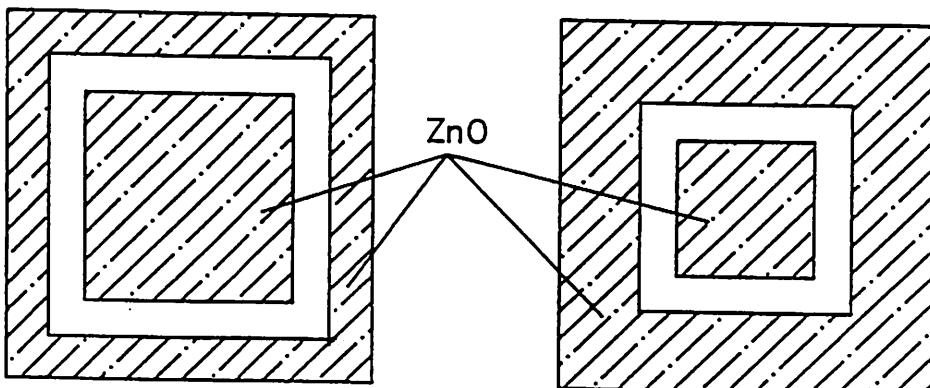


Si/ZnO-Chip, vereinzelt
 $d(\text{Si})= 50\mu\text{m}, d(\text{ZnO})= 11 \mu\text{m}$ M11 1/1

Einfluß des Elektroden-Layouts auf das Temperaturverhalten der Resonanzfrequenz



idealisiertes Layout:



stark temperaturabhängig

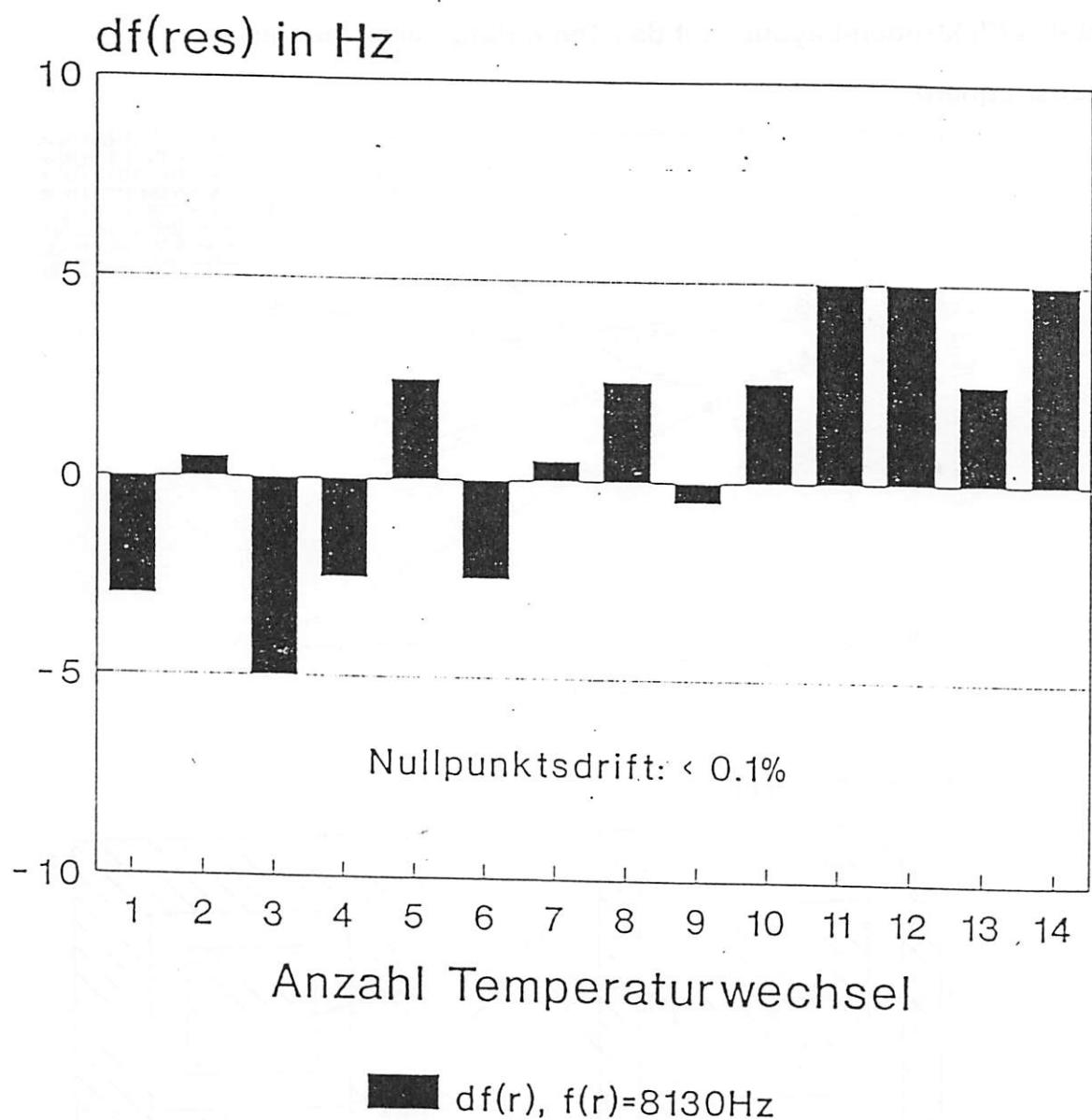


schwach temperaturabhängig



Bild 3.32

Resonanter Drucksensor M7 3/2
Verhalten bei Temperaturwechseln
zwischen 45 C und 95 C



HP 4194, Hotchuck
Si/ZnO-Chip, vereinzelt

- BOSCH

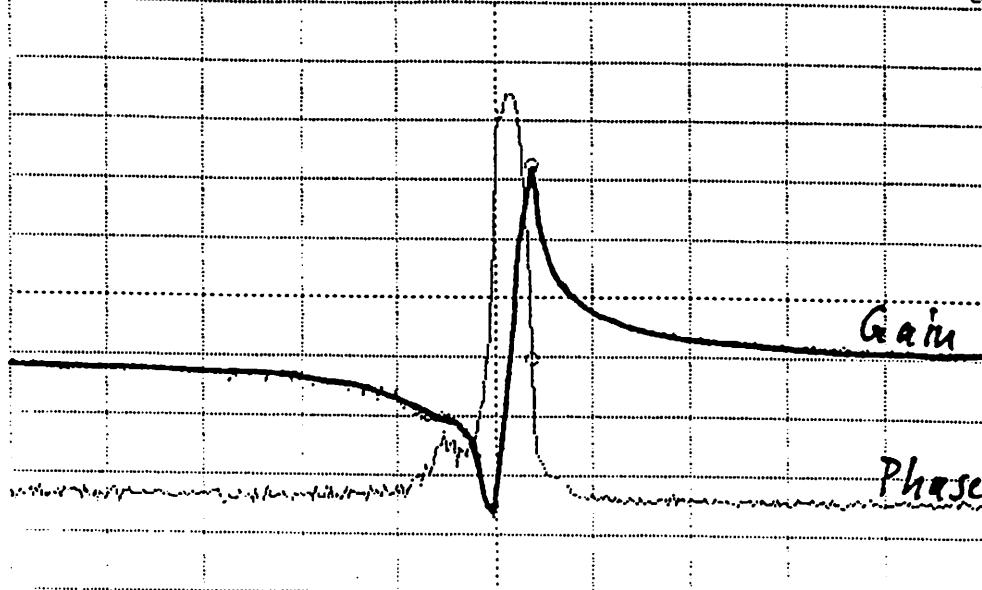


ZWD

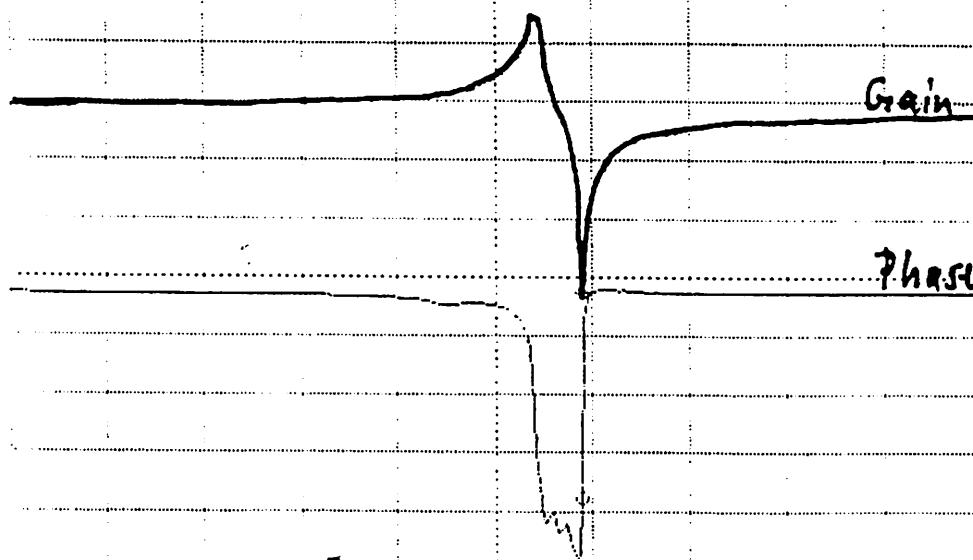
Gain-Phasenkurven

06.92

A : T/R(dB)B: 8
A MAX -20.00 dB GAIN 3 806.250 Hz
B MAX 180.0 deg PHASE -53.8580 dB
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: 8 ° MKR 3 885.000 Hz
A MAX -50.00 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

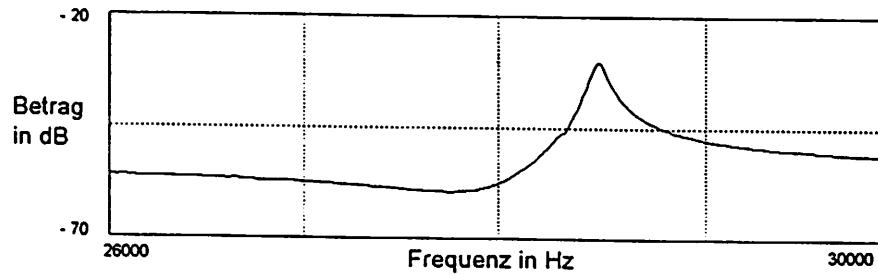


Bild 3.35a.)

Gain-Kurve: Antrieb äußeres Piezofeld, Auslesung äußeres Piezofeld

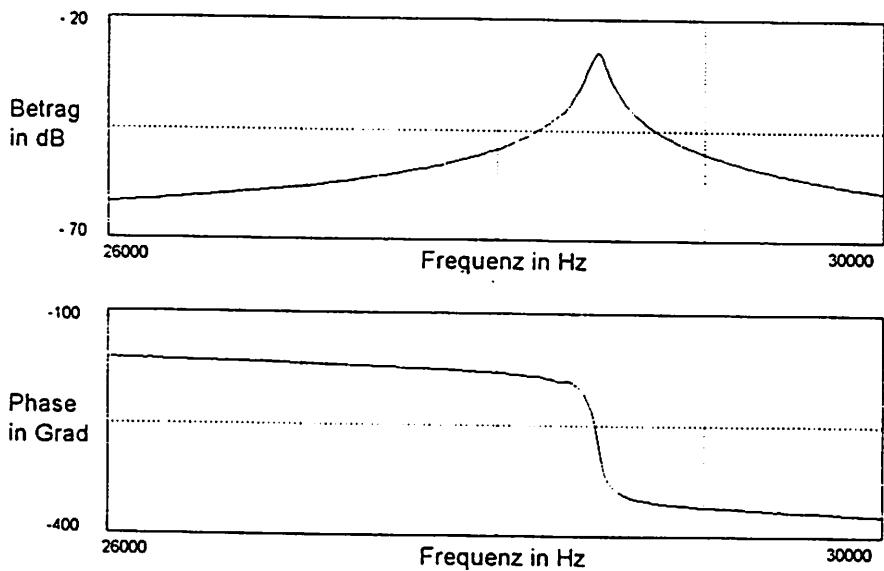


Bild 3.35b.)

Gain-Phase-Kurven komplementärer Antrieb äußeres und inneres Piezofeld,
Auslesung äußeres Piezofeld

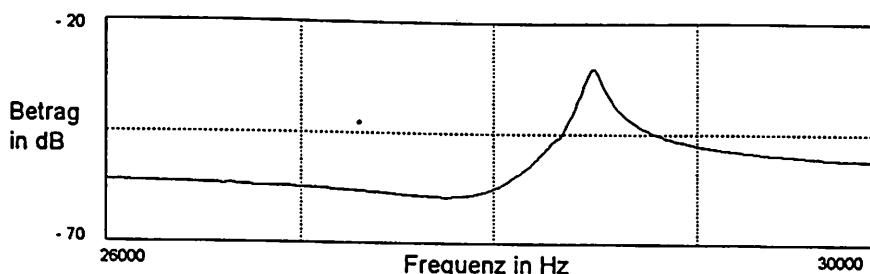


Bild 3.36a.)

Gain-Kurve: Antrieb äußeres Piezofeld, Auslesung äußeres Piezofeld

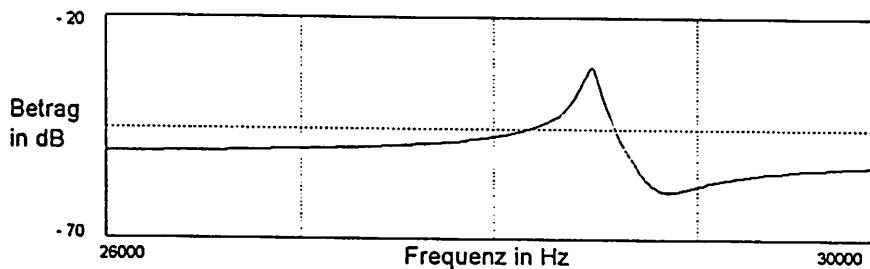


Bild 3.36b.)

Gain-Kurve: Antrieb äußeres Piezofeld, Auslesung inneres Piezofeld

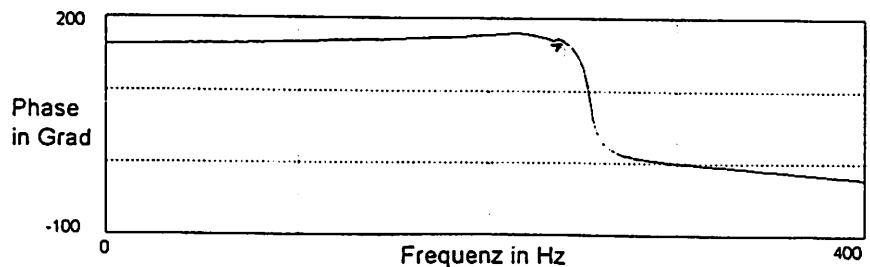
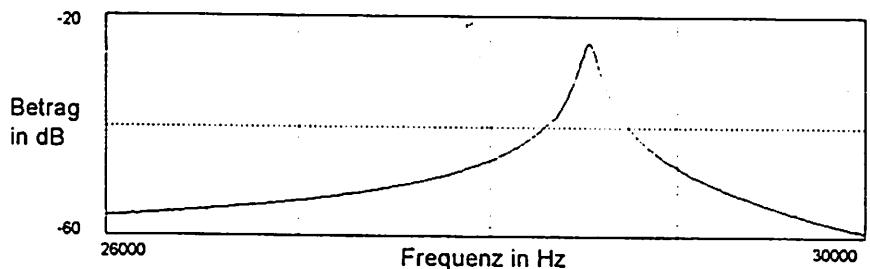
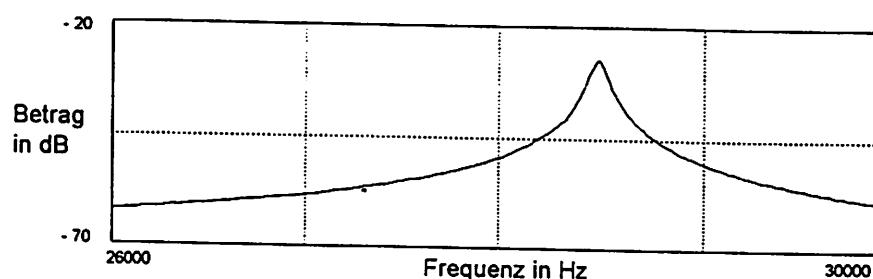
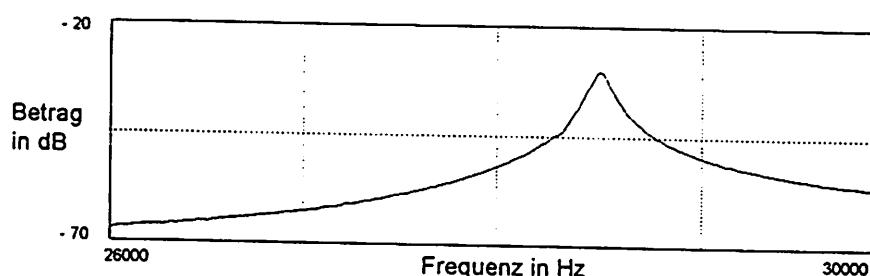


Bild 3.36c.)

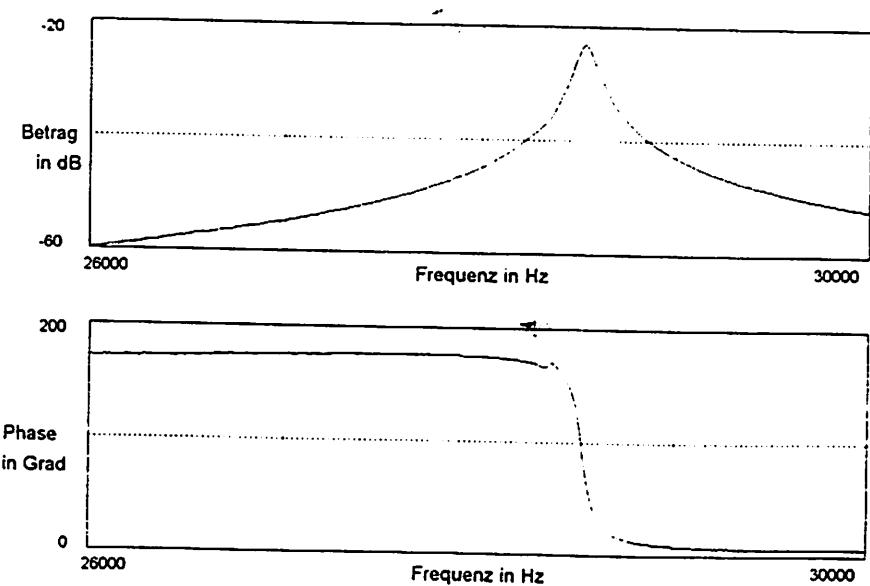
Gain-Phase-Kurven: Antrieb äußeres Piezofeld,
Differenzauswertung äußeres und inneres Piezofeld

**Bild 3.37a.)**

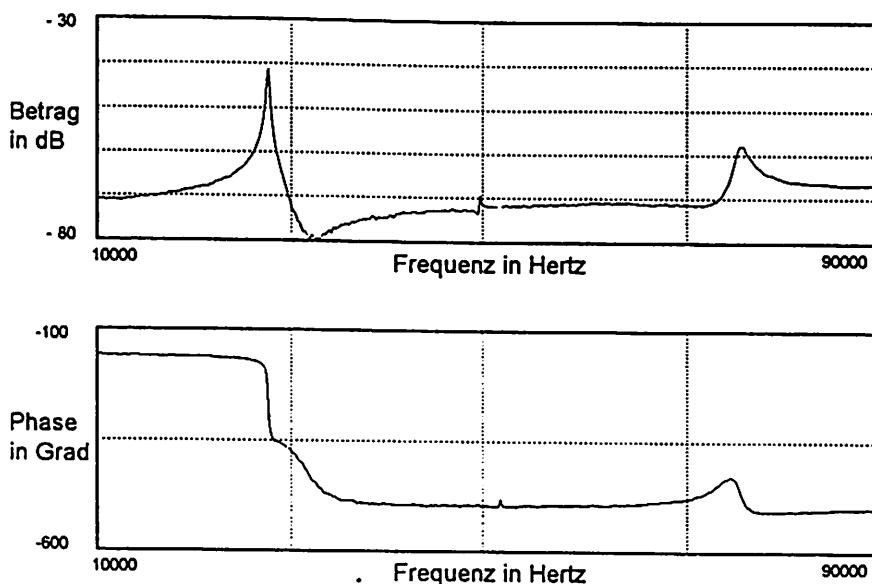
Gain-Kurve: Komplementärer Antrieb, Auslesung äußeres Piezofeld

**Bild 3.37b.)**

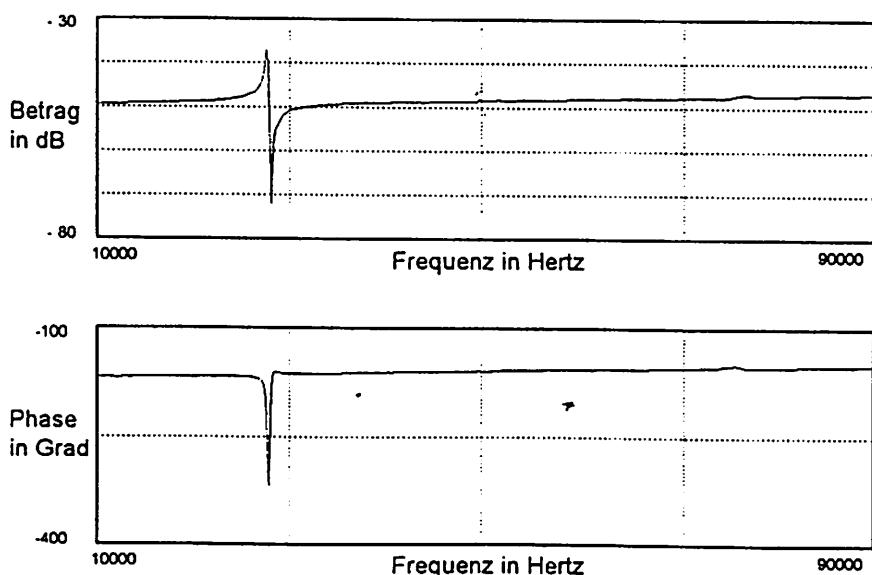
Gain-Kurve: Komplementärer Antrieb, Auslesung inneres Piezofeld

**Bild 3.37c.)**

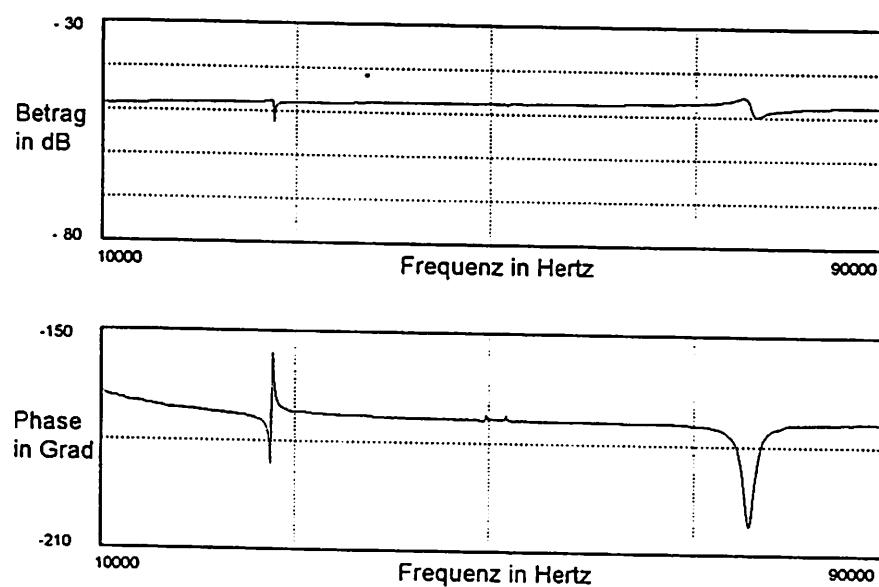
Komplementärer Antrieb, Differenzauswertung äußeres und inneres Piezofeld

**Bild 3.38a.)**

komplementärer Antrieb, Auslesung äußerer Piezofeld

**Bild 3.38b.)**

Komplementärer Antrieb (Innenfelder verbunden), Auslesung äußerer Feld

**Bild 3.39**

Komplementärer Antrieb Innenfelder (selektiver Antrieb der ersten Oberwelle), Auslesung äußereres Piezofeld

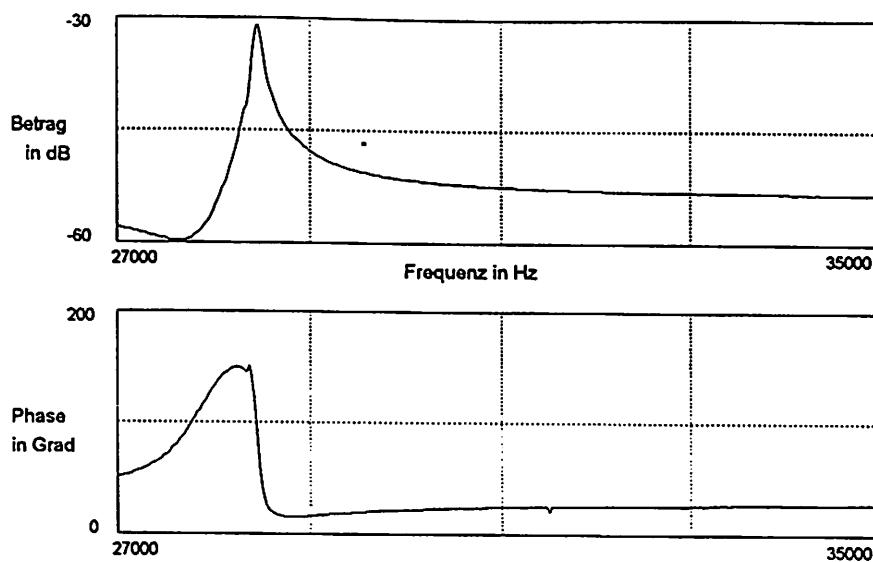


Bild 3.40a.) unbelasteter Sensor

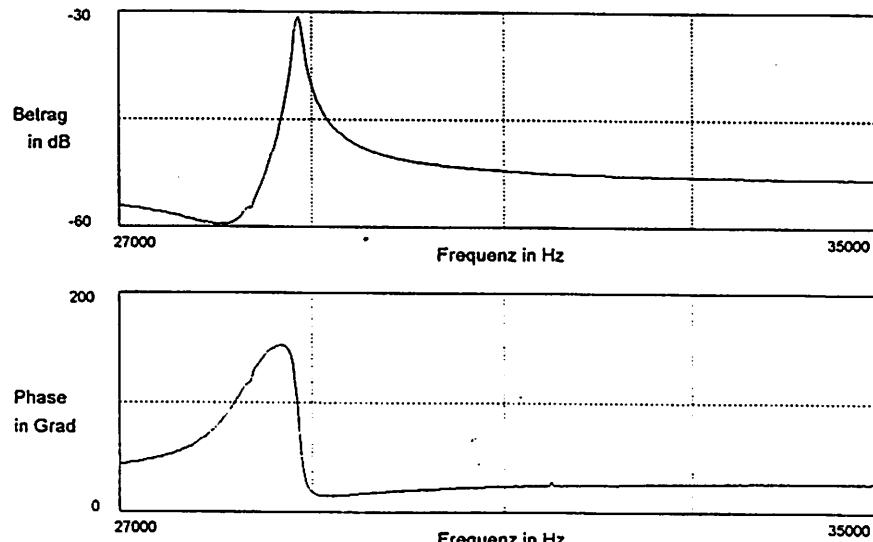


Bild 3.40b.) mit 1 kg belasteter Sensor

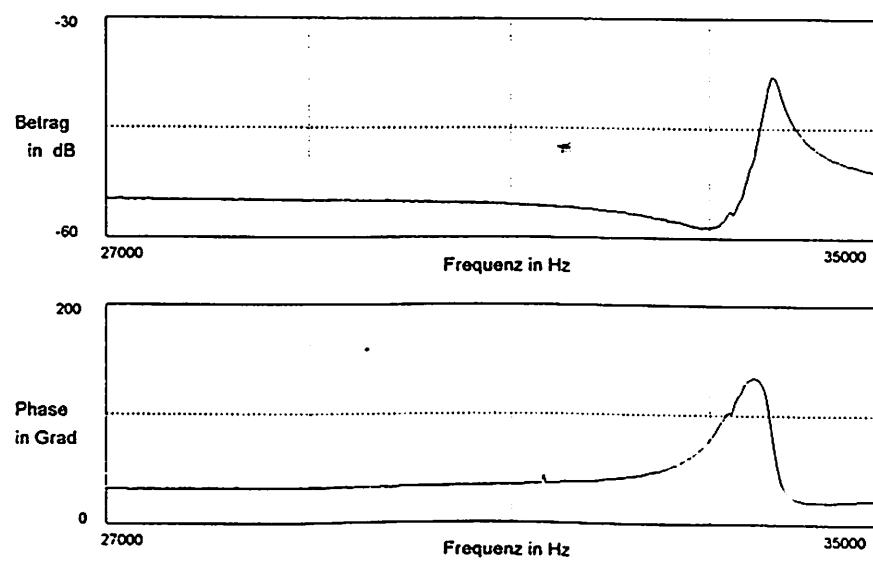


Bild 3.40c.) mit 15 kg belasteter Sensor

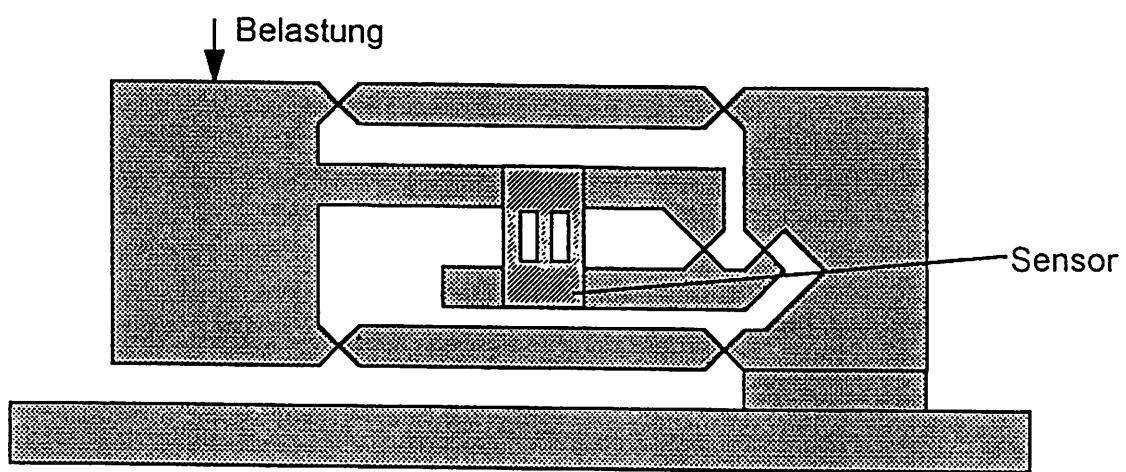


Bild 3.41

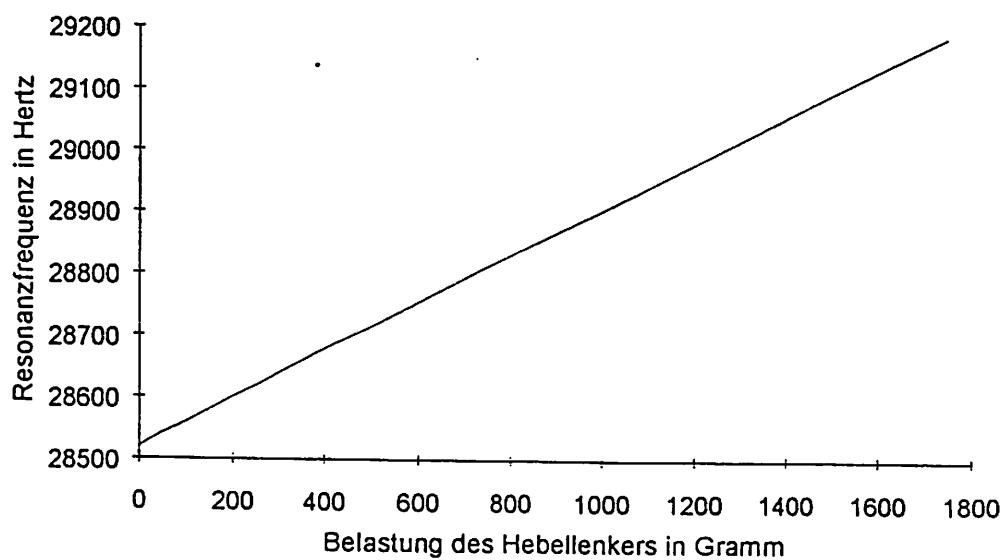


Bild 3.42
Resonanzfrequenz als Funktion der Hebellenkerlast

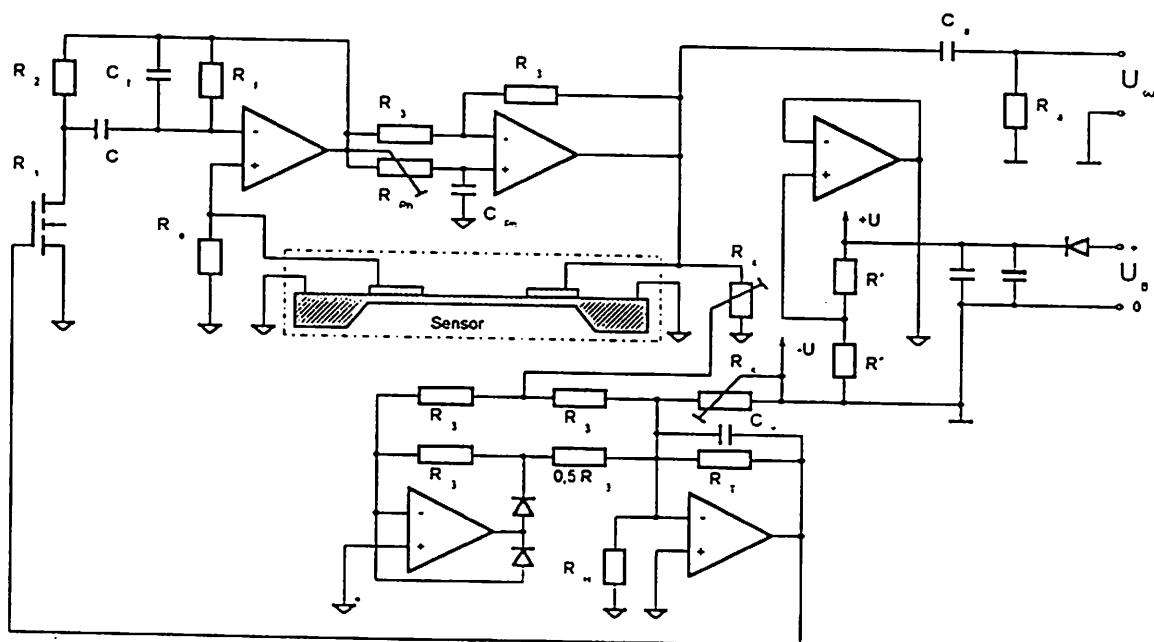


Bild 3.43

Rückkopplungsschaltung zur Sensordämpfung:
geregelter Aufholverstärker, Phasenschieber, P-Regler mit Vollweggleichrichtung