

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

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

**Förderkennzeichen: 13 AS 0118**

**Berichtszeitraum: 1.1.1991 - 30.6.1991**

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

**Projektleiter: Dr. F. Lärmer**  
**Dr. G. Flik**

### Zusammenfassung:

Mit piezoelektrischem ZnO und Aluminiumkontaktmaterial beschichtete Silizium-Biegebalkenstrukturen wurden elektrisch zum Schwingen angeregt und die Resonanzoszillation mit einem optischen Detektionsverfahren (Rodenstock RM 600 ) nachgewiesen.

Identische Sensorstrukturen wurden auch mit hybriden Antriebs- und Aufnehmerelementen (aufgebondete PZT-Keramiken) versehen und resonant erregt, wobei die Resonanzoszillation sowohl optisch als auch über die piezoelektrischen Aufnehmerelemente elektrisch nachgewiesen werden konnte. Die Übertragungsfunktion der so konstruierten Sensoren (Dämpfungsfaktor und Phasengang) wurden mit einem Gain-Phase-Analyzer im Bereich der Grundschiwingung untersucht.

Aus dem Gain-Phase-Verhalten läßt sich eine elektronische Rückkopplungsschaltung ableiten, die für eine kontinuierliche Entdämpfung des resonant schwingenden Sensors sorgt.

Frequenz-Kraftkurven für Zugkräfte in Richtung des schwingenden Stegs sowie für Querkräfte (senkrecht zur Richtung des schwingenden Stegs) konnten so aufgenommen werden.

Frequenzanaloge Drucksensoren auf der Basis dünner Silizium-Membrane mit hybridem (aufgebondete PZT-Keramiken) oder Dünnschichtantrieb (piezoelektrisches ZnO) wurden ebenfalls hergestellt und charakterisiert.

Die Anregung resonanter Schwingungsmoden wurde sowohl optisch (Rodenstock RM 600 sowie Polytec Vibrometer) als auch elektrisch (Impedanzverlauf  $|Z|$ /Phasenverlauf  $\Phi$ ) mit einem Gain-Phase-Analyzer nachgewiesen.

Die Druckabhängigkeit der Resonanzfrequenz wurde für verschiedene Kombinationen von Membrandicke/Dicke der aufgebondeten PZT-Keramik untersucht.

An resonanten Drucksensoren mit ZnO-Dünnschichtantrieb wurden Sensorkennlinien (Resonanzfrequenz als Funktion der Druckbeaufschlagung) für verschiedene Schwingungsmoden ermittelt und der statischen Membranauslenkung gegenübergestellt.

Die Amplitudenverteilung auf der schwingenden Membran wurde für verschiedene Resonanzfrequenzen meßtechnisch erfaßt und mit theoretischen Amplitudenprofilen aus FEM-Berechnungen verglichen. Drei niederfrequente Resonanzen konnten so entsprechenden Schwingungsmoden zugeordnet werden.

Erstmals wurden Drucksensoren im Batch-Prozeß gefertigt. Dabei wurden verbesserte Elektrodenkonfigurationen realisiert, die eine optimale Schwingungsanregung ermöglichen sollen.

Es wurden erste Versuche zur Passivierung von ZnO mit Niedertem-

peratur-Plasmaschichten (Siliziumnitrid und -oxid) durchgeführt. Es zeigte sich, daß der Standard-Nitridprozeß die elektrischen Eigenschaften des Schichtsystems Al/ZnO/Si/Al drastisch verschlechtert; der Standard-Oxidprozeß schneidet dagegen günstiger ab. Eine Schichtfolge bestehend aus Oxid und darüber Nitrid vereint bessere Passiviereigenschaften und Kompatibilität zum ZnO. Auf dieser Schichtfolge basiert ein Prozeßablauf zur Herstellung frequenzanaloger Kraftsensoren, der ebenfalls vorgestellt wird.

### Weiterarbeit

- Prozeßkompatibilität von ZnO mit der Silizium-Mikromechanik
- Optimierung der Passivierschicht(folge)
- Durchführung des kompletten Herstellungsprozeß bis zum fertigen Kraftsensor einschließlich Kontaktierung
- Charakterisierung (einschließlich elektrisches Übertragungsverhalten)
- Optimierung der Sensorauslegung (Redesign der wesentlichen Parameter wie Dimensionen, Schichtdicken, Elektrodenform usw.)
- Trockenätzen von Silizium mit RIE/PIE
- Aufbau- und Verbindungstechnik

## Inhalt

### 1. Kraftsensoren

- 1.1 ZnO-angetriebene Kraftsensoren (Biegebalkenstrukturen)
  - 1.1.1 Optischer Nachweis der piezoelektrisch angeregten Resonanz-Oszillation (Rodenstock RM 600)
- 1.2 Piezokeramischer Antrieb/Aufnehmer
  - 1.2.1 Optischer Nachweis der piezoelektrisch angeregten Resonanz-Oszillation (Rodenstock RM 600)
  - 1.2.2 Bandfilterschaltung von Antrieb- und Aufnehmerelement
  - 1.2.3. Auswertung des elektrischen Signals des piezokeramischen Aufnehmerelements im Resonanzfall
  - 1.2.4 Gain-Phase-Kurven
  - 1.2.5 elektrische Oszillatorschaltung (Rückkopplungsschaltung)
  - 1.2.6 Frequenz-/Kraftkurven für Zugkraft in Stegrichtung
  - 1.2.7 Frequenz-/Kraftkurven für Zugkraft senkrecht zur Stegrichtung

### 2. Drucksensoren

- 2.1 Piezokeramisch angeregte Silizium-Membranen
  - 2.1.1 Impedanz/Phasenkurven und Druckabhängigkeit der Resonanzfrequenz
- 2.2 Mit ZnO angeregte Silizium-Membranen
  - 2.2.1 Frequenzspektrum der schwingenden Membran
  - 2.2.2 Druckabhängigkeit der Eigenfrequenz resonanter Moden (Sensorkennlinien)
  - 2.2.3. Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Membranspannung
  - 2.2.4 Räumliche Amplitudenverteilung und Zuordnung zu berechneten Moden der schwingenden Membran
  - 2.2.5 Optimierung der Elektrodengeometrie und fotolithographische Strukturierung von ZnO und Aluminium-Kontaktmaterial.

3. Prozeßintegration ZnO und Silizium-Mikromechanik.  
Passivierungsproblematik

- 3.1 Elektrische Eigenschaften von ZnO vor der Passivierung
- 3.2 Eigenschaften von ZnO nach Passivierung mit Plasmanitrid
- 3.3 Eigenschaften von ZnO nach Passivierung mit Plasmaoxid
- 3.4 Passivierung mit Schichtfolge Plasmaoxid/-nitrid
- 3.5 Prozeßabfolge zur Herstellung frequenzanaloger Kraftsensoren

## 1. Kraftsensoren

### 1.1 ZnO-angetriebene Kraftsensoren (Biegebalkenstrukturen)

Mikromechanisch gefertigte Siliziumbiegebalkenstrukturen wurden, wie in Abbildung 1 schematisch dargestellt, mit Hilfe zweier Schattenmasken nacheinander mit ZnO und mit Aluminium beschichtet. Die Dicke der ZnO-Schicht beträgt  $5\text{ }\mu\text{m}$ , die der Aluminiummetallisierung ca  $0.5\text{ }\mu\text{m}$ . Die Schattenmasken wurden dahingehend verbessert, daß nur die für die Antriebs- und Aufnehmerfunktion wesentlichen Bereiche der Sensorstruktur mit ZnO bzw. Kontaktmaterial belegt werden. Dadurch sollen unnötige Stromflüsse vermieden und gleichzeitig auch das Übersprechen zwischen Antriebs- und Aufnahmerelement verringert werden.

Die elektrischen Eigenschaften der so hergestellten Antriebs- und Aufnahmerelemente entsprechen im wesentlichen denen der früher präsentierten Sensoren aus dem vorhergehenden Halbjahresbericht, d.h. es treten wieder parasitäre Strompfade auf, vermutlich infolge Metallisierung um die Stegkanten herum. Dies ist ein grundsätzliches Problem der Beschichtung dünner Gebilde durch Schattenmasken, was diese Methode (neben anderen Gründen, wie z.B. komplizierte Justage, fehlende Batchfähigkeit) für eine Realisierung unter Fertigungsbedingungen disqualifiziert.

Eine gewisse Verbesserung der elektrischen Eigenschaften (Faktor 2 - 3 im Schichtwiderstand) läßt sich erreichen, wenn nach der Metallisierung ca 100 - 200 nm Aluminium wieder rückgeätzt werden (alkalische Ätze), wodurch die schädliche Kantenmetallisierung teilweise abgebaut werden kann.

Trotz der offensichtlichen Nachteile des Schattenmaskenverfahrens ist die Qualität dieser Aktuatoren ausreichend, um den Biegebalken zu resonanten Schwingungen anzuregen.

?

#### 1.1.1 Optischer Nachweis der piezoelektrisch angeregten Resonanz-Oszillation (Rodenstock RM 600)

Abbildung 2 zeigt elektrische Anregungsspannung (CH2) und die optisch aufgenommene Schwingungsbewegung der Biegebalkenmitte (CH1) im Resonanzfall. Die Resonanzfrequenz bei diesem Biegebalken mit den Dimensionen  $l \times b \times d = 8 \times 0.8 \times 0.05\text{ mm}$  liegt bei 6.85 kHz. Abbildung 3 zeigt den entsprechenden Sachverhalt für einen Biegebalken mit den Dimensionen  $l \times b \times d = 6 \times 0.2 \times 0.05\text{ mm}$  und einer Resonanzfrequenz von 12.5 kHz.

Die Amplitude der sinusförmigen Anregungswechselspannung beträgt 5 V bzw. 15 V, die resultierende mechanische Auslenkung liegt im  $\mu\text{m}$ -Bereich. Die optische Registrierung der Schwingungsbewegung erfolgt in der Weise, daß der Fokusabstand des Rodenstock RM 600 zunächst bei ruhendem Biegebalken auf dessen Mitte optimal justiert und anschließend bei oszillierendem Balken das Fokusfeh-

lersignal (die Abweichung von der optimalen Fokussierung) ausgewertet wird.

Es wurde auch versucht, die Resonanzoszillation direkt elektrisch nachzuweisen in Form der am Aufnahmerelement auftretenden Piezospannung, die eine Resonanzüberhöhung zeigen muß. Dieser Effekt wurde jedoch überlagert durch störendes Übersprechen vom Antriebs- zum Aufnahmerelement. Dieses Übersprechen muß bei weiteren Sensorkonstruktionen durch folgende Maßnahmen vermieden werden:

- Dotierung der mit ZnO zu beschichtenden Siliziumbereiche, um durch hohe Leitfähigkeit Spannungsabfälle im Substrat zu minimieren
- Verbesserung der elektrischen Isolationswirkung des ZnO und Vermeiden parasitärer Strompfade.

## 1.2 Piezokeramischer Antrieb/Aufnehmer

Eine Alternative zu piezoelektrischen Antriebs- und Aufnahmerelementen in Dünnschichttechnik besteht in einem hybriden Aufbau, wobei PZT-Keramiken an den Rand der schwingenden Stege gebondet werden (Klebe- oder Löttechnik). In Abbildung 4 ist ein solcher hybrider Aufbau veranschaulicht. Es fanden piezokeramische Elemente der Dicke 200  $\mu\text{m}$  (VIBRIT-Fa. Siemens) Verwendung, die mit Cyanacrylat aufgeklebt wurden. Die Piezoelemente greifen etwa 0.5 mm über den Rand des Siliziumfestlands auf die Biegebalken über. Bei diesem Aufbau mit Piezokeramiken ist das Übersprechen von Antriebs- zu Aufnahmerelement sehr gering (besser -80 dB).

### 1.2.1 Optischer Nachweis der piezoelektrisch angeregten Resonanz-Oszillation (Rodenstock RM 600)

Abbildung 5 zeigt elektrische Anregungsspannung (CH2) und dadurch bewirkte mechanische Oszillation der Biegebalkenmitte, aufgenommen als Fokusfehlersignal (CH1) wie vorstehend beschrieben. Die Resonanzfrequenz der Grundmode liegt hier bei 9.1 kHz bei einem Biegebalken mit den Dimensionen  $l \times b \times d = 8 \times 0.4 \times 0.05$  mm; durch die vom Rand etwas auf den Biegebalken übergreifenden Piezoelemente ist jedoch von einer effektiven Biegebalkenlänge von etwa 7 mm auszugehen. Die mechanische Schwingungsamplitude liegt wieder im  $\mu\text{m}$ -Bereich bei einer Anregungsamplitude von nur 200 mV (Teiler 10:1 !).

### 1.2.2 Bandfilterschaltung von Antrieb- und Aufnahmerelement

Abbildung 6 zeigt eine Beschaltung des Sensors, die dem aus der elektronischen Schaltungstechnik bekannten Bandfilter entspricht. Eine elektrische Wechselspannung wird eingangsseitig in das piezoelektrische Antriebselement (z.B. PZT-Keramik oder ZnO-

Dünnschicht) eingespeist und die resultierende Piezospannung am zweiten Aufnehmerelement abgegriffen. Das hinsichtlich der Signaltransmission vom Antrieb zum Aufnehmer frequenzbestimmende Element ist der aus dem beidseitig eingespannten Biegebalken gebildete mechanische Resonator.

#### 1.2.3 Auswertung des elektrischen Signals des piezokeramischen Aufnehmerelements im Resonanzfall

Abbildung 7 zeigt das am Aufnehmer abgegriffene elektrische Signal (CH1) im Fall resonanter elektrischer Anregung (CH2, Resonanzfrequenz 9.1 kHz) am Antrieb. Die elektrischen Signalverläufe sind direkt dargestellt ohne die relative Phasenlage verfälschende Elemente; deutlich zu erkennen ist die 90°-Phasenbeziehung zwischen antreibender Kraft (Anregungsspannung) und Oszillationsbewegung (Piezospannung).

#### 1.2.4 Gain-Phase-Kurven

Abbildung 8 zeigt das Übertragungsverhalten (Übertragungsfunktion in dB, Phasenwinkel in °) vom Antrieb zum Aufnehmer im Bereich der Grundfrequenz. Die Messung erfolgte mit einem Gain-Phase-Analyzer (Hewlett-Packard HP 4194A). Minimum und Maximum der Übertragungsfunktion entsprechen Serien- und Parallelresonanz; der Phasenwinkel liegt jeweils bei ca 90°. Die Halbwertsbreite der Resonanzen (FWHM) liegt bei ca 50 Hz.

univ!

#### 1.2.5 Elektrische Oszillatorschaltung (Rückkopplungsschaltung)

Aus der Übertragungscharakteristik läßt sich eine einfache elektronische Rückkopplungsschaltung ableiten, die den schwingenden Sensor kontinuierlich entdämpft. Die in Abbildung 9 gezeigte Schaltung besteht im wesentlichen aus einem integrierenden Tiefpaß 1. Ordnung, über den die am Aufnehmer abgegriffene Piezospannung geführt wird, und einer Spannungsverstärkerstufe, deren Ausgangsspannung auf den Antrieb rückgekoppelt wird. Der Tiefpaß stellt einerseits die 90°-Phasenbeziehung für die resonante Anregung des Sensors her und soll zum anderen ein Anschwingen auf höheren Moden verhindern.

Die Dimensionierung der Schaltung wurde für den ausgewählten Operationsverstärkertyp vorgenommen und nicht im Hinblick auf eine spätere Integration in Dickschicht- oder Dünnschichttechnik. Vor einer eventuellen Integration muß die Schaltung daher in jedem Fall (beispielsweise hinsichtlich der eingesetzten Kapazitätswerte!) redimensioniert werden.

#### 1.2.6 Frequenz-/Kraftkurven für Zugkraft in Stegrichtung

Der beschriebene Sensor wurde mit einer Zugkraft von 0 - 7 N beaufschlagt und die Änderung der (Parallel-)Resonanzfrequenz als Funktion der Zugkraft registriert. Die Zugkraft wurde mit Hilfe



von breiten Bändern in die Strukturen eingekoppelt.

Abbildung 10 zeigt eine so erhaltene Sensorkennlinie. Die Resonanzfrequenz steigt annähernd linear an vom Ausgangswert 9.1 kHz bis zu 12.1 kHz bei 7 N Zugbelastung, d.h. um mehr als 30 %. Es wurde im Rahmen der Meßgenauigkeit bei dieser Methode keine Hysterese der Kennlinie beobachtet.

#### 1.2.7 Frequenz-/Kraftkurven für Zugkraft senkrecht zur Stegrichtung (Querkraft)

Betreibt man den Sensor auf einem geradzahligen Schwingungsmode, der in der Mitte des Biegebalkens einen Knoten aufweist, so besteht auch die Möglichkeit der Krafteinkopplung in Biegebalkenmitte.

In Abbildung 11 ist diese Möglichkeit der Krafteinkopplung schematisch dargestellt. Sie erfolgt im Experiment durch einen dünnen Draht, der in Biegebalkenmitte fixiert wird.

Abbildung 12 zeigt eine so erhaltene Sensorkennlinie (Resonanzfrequenz der ersten Oberschwingung als Funktion der Querkraft). Die Resonanzfrequenz erhöht sich von etwa 21 kHz auf 27.5 kHz bzw. 25 kHz für eine Querkraft von -50 mN bzw. +50 mN. Die Kurve weist eine ausgeprägte Nichtlinearität und Asymmetrie auf. Die Asymmetrie rührt möglicherweise daher, daß zur Umkehr der Zugrichtung der dünne Zugdraht neu gebondet werden muß, wobei eventuell nicht mehr die gleiche Bondposition getroffen wird.

Die Empfindlichkeit gegenüber Querkraften erklärt sich dadurch, daß eine effiziente Umsetzung in Zugspannung im Steg erfolgt. In einer Arbeit von F.R. Blom ("Resonant Silicon Beam Force Sensor", ISBN 90-9003023-9) wird folgender Zusammenhang zwischen äußerer Querkraft  $F$  und im Steg erzeugter Zugkraft  $N$  gegeben:

$$\text{Lastfaktor: } B = Fl^3/2EI d, \quad I = bd^3/12$$

$$\text{Modenparameter: } \Gamma^2 = Nl^2/EI$$

Zwischen  $B$  und  $\Gamma$  gilt:

$$\Gamma^7(1+\cosh\Gamma) - 6B^2(2\Gamma-3\sinh\Gamma+\Gamma\cosh\Gamma) = 0 \quad (!)$$

Beispiel:  $F = 10 \text{ mN}$ ,  $l \times b \times d = 8 \times 0.4 \times 0.05 \text{ mm}$

$$\Rightarrow B \approx 72$$

$$\Rightarrow \Gamma \approx 5$$

$$\Rightarrow N = \Gamma^2 EI / l^2 \approx 280 \text{ mN} = 28 \cdot F$$

Daraus resultiert eine Querkraftempfindlichkeit von ca. 1.6 kHz/10 mN, was mit der Messung in etwa konsistent ist.

Die beschriebene Umsetzung der Kräfte ist auch bei den nachfolgend behandelten frequenzanalogen Drucksensoren von ausschlag-

gebender Bedeutung.

## 2. Drucksensoren

### 2.1 Piezokeramisch angeregte Silizium-Membranen

Abbildung 13 zeigt einen hybriden Aufbau als resonanten Drucksensor bestehend aus einer dünnen Silizium-Membran (20  $\mu\text{m}$  bzw. 200  $\mu\text{m}$ ) und einer PZT-Keramik (VIBRIT-Fa. Siemens) der Dicke 200  $\mu\text{m}$ .

Die Membran wurde in Silizium-Mikromechanik gefertigt; die Piezokeramik wurde anschließend aufgeklebt (Cyanacrylat) oder aufgelötet.

Der Nachweis der piezoelektrisch angeregten Resonanzoszillationen der Membran erfolgte optisch (Rodenstock RM 600) oder elektrisch durch Impedanzmessung (Gain-Phase-Analyzer).

#### 2.1.1 Impedanz/Phasenkurven und Druckabhängigkeit der Resonanzfrequenz

Abbildung 14 zeigt den Verlauf der Impedanz  $|Z|$  und der Phasendrehung  $\Phi$  der auf die 200  $\mu\text{m}$  dicke Membran gebondeten Piezokeramik für eine Druckbeaufschlagung von 0 bar und 2 bar.

Die  $|Z|$ -Kurve zeigt im Bereich der mechanischen Grundschiwingung der Membran ein ausgeprägtes Minimum und Maximum für Serien- und Parallelresonanz. Die Grundfrequenz liegt bei druckfreier Membran bei 24.275 kHz (Parallelresonanz) und erhöht sich bei einer Druckbeaufschlagung von 2 bar auf 24.525 kHz. Die Empfindlichkeit läßt sich damit zu 0.125 kHz/bar abschätzen. Der Berstdruck liegt oberhalb von 4 bar.

Analog ist in Abbildung 15 das Verhalten der 20  $\mu\text{m}$  dicken Membran wiedergegeben. Die Grundfrequenz bei druckfreier Membran von 11.805 kHz (Parallelresonanz) erhöht sich bei einer Druckbeaufschlagung von 0.5 bar auf 12.475 kHz, was einer Empfindlichkeit von ca 1.4 kHz/bar entspricht. Der Berstdruck dieser Anordnung lag im Experiment bei  $> 1$  bar.

### 2.2 Mit ZnO angeregte Silizium-Membranen

In Abbildung 16 ist eine mit piezoelektrischem ZnO-Antrieb versehene Membran als frequenzanaloger Drucksensor schematisch dargestellt.

Die Beschichtung mit ZnO sowie die Metallisierung mit Aluminium erfolgte zunächst durch Schattenmasken. Inzwischen wurde ein Batch-Prozeß entwickelt, bei dem 100 mm-Wafer ganzflächig mit ZnO und Aluminium beschichtet und anschließend photolithographisch strukturiert werden (vgl. 2.2.5, alkalische Naßätze für Aluminium, saure Naßätze für ZnO)

Wie die Skizze andeutet, ist die Membran infolge von Druckspannungen in der ZnO-Schicht ausgeknickt (buckling).

Abbildung 17 zeigt Aufnahmen des realisierten Drucksensoraufbaus mit gefrästen Edelstahlrahmen, in die die vereinzelt Siliziumsensoren gasdicht eingeklebt werden. Die Druckeinleitung erfolgt durch eine Öffnung in der Rahmenunterseite, die elektrische Kontaktierung durch Bonddrähte von oben.

### 2.2.1 Frequenzspektrum der schwingenden Membran

Abbildung 18 zeigt die Geschwindigkeitsamplitude der Oszillation in der Mitte einer 20  $\mu\text{m}$  dicken und mit 5  $\mu\text{m}$  ZnO beschichteten Membran aufgetragen über der Anregungsfrequenz. Die Messung erfolgte optisch mit einem Vibrometer der Fa. Polytec.

Zur Bewertung der Güte des Schwingers wurde die Mode bei 14 kHz repräsentativ herausgegriffen und mit hoher Auflösung vermessen; der erhaltene spektrale Verlauf ist in Abbildung 19 wiedergegeben. Aus der spektralen Breite ergibt sich ein Gütefaktor von etwa 400 (Anregungsamplitude 4.2 V).

### 2.2.2 Druckabhängigkeit der Eigenfrequenz resonanter Moden (Sensorkennlinien)

In Abbildung 20 sind die Kennlinien der Resonanzfrequenz als Funktion der Druckbeaufschlagung des Sensors für vier verschiedene Moden (Grundmode bei 7.5 kHz, 10 kHz-, 14 kHz-, 18 kHz-Mode) aufgetragen.

Bei allen Moden erfolgt zunächst eine Abnahme der Eigenfrequenz bis zu einem bestimmten Druckwert, bei dem die Membrandurchbiegung infolge Kompensation der ZnO-Schichtspannung durch den äußeren Druck gerade in die andere stabile ausgeknickte Lage umschlägt ("Knackfroscheffekt"). Mit weiterer Druckerhöhung wächst die Frequenz wieder deutlich an. Es ergibt sich eine Empfindlichkeit von ca. 70 kHz/bar bzw. 8 kHz/N.

Für die 10 kHz-Mode ist diese Abhängigkeit der Resonanzfrequenz nochmals in Abbildung 21 dargestellt. Bei Reduzierung des angelegten Drucks vom Maximalwert bis herab zum "Knackpunkt" ergibt sich eine im Rahmen der Meßgenauigkeit hysteresefreie Abnahme der Resonanzfrequenz.

In Abbildung 22 wird den Frequenzdaten die statische Auslenkung der Membranmitte als Funktion der Druckbeaufschlagung gegenübergestellt. Der erwähnte "Knackfroscheffekt" ist deutlich in einem Auslenkungssprung beim kritischen Druck zu erkennen.

### 2.2.3 Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von Schichtspannungen

In Abbildung 23 sind die wesentlichen Formeln zusammengefaßt, die

aus einem analytischen Modell der allseitig eingespannten Membran die Abhängigkeit ihrer Resonanzfrequenz(en) von Membranspannungen beschreiben.

Daraus läßt sich einerseits die Frequenzverstimmung aufgrund von intrinsischen Schichtspannungen ermitteln; andererseits ist darin auch die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von einer externen Druckbeaufschlagung enthalten (Vgl. weiter z.B. Rourke, "Formulas for Stress and Strain").

#### 2.2.4 Räumliche Amplitudenverteilung und Zuordnung zu berechneten Moden der schwingenden Membran

Am Hahn-Schickard-Institut wurden FEM-Berechnungen der Eigenmoden der ZnO/Si-Membran durchgeführt. Abbildung 24, 25 und 26 zeigen berechnete Amplitudenprofile der Grundmode sowie zweier weiterer Moden, die aufgrund ihrer errechneten Eigenfrequenzen mit der im Experiment gefundenen 14 kHz-Mode bzw. 18 kHz-Mode identifiziert werden können.

Um diese Identifikation experimentell zu untermauern, wurde die Resonanzamplitude bei Anregung der Membran mit 14 kHz bzw. mit 18 kHz über die Membranoberfläche hinweg räumlich analysiert (Polytec-Vibrometer). Abbildung 27 zeigt das Amplitudenprofil bei Anregung mit 14 kHz, Abbildung 28 mit 18 kHz. Die gemessenen Profilverläufe entlang dem in Abbildung 25 und 26 eingetragenen Weg entsprechen gut den berechneten Amplitudenverhältnissen.

#### 2.2.5 Optimierung der Elektrodengeometrie und fotolithographische Strukturierung von ZnO und Aluminium-Kontaktmaterial.

Am Hahn-Schickard-Institut wurden Berechnungen zur Spannungsverteilung auf schwingenden Membranen durchgeführt, aus denen verbesserte Elektrodengeometrien für einen optimalen Schwingungsantrieb abgeleitet werden konnten.

Die piezoelektrische ZnO-Schicht und das Aluminiumkontaktmaterial wurden nacheinander durch Photolithographie- und Naßätzverfahren entsprechend strukturiert. Abbildung 29 zeigt das 3D - Profil einer so strukturierten Schichtfolge auf einer dünnen Silizium-Membran. Damit wird im Rahmen dieses Projekts erstmals eine batch-prozessierte Drucksensormembran vorgestellt.

Der zentrale und die vier äußeren Leitungsbereiche können gegenphasig (d.h. mit unterschiedlicher Polarität) elektrisch angesteuert werden, um im Rand- und im Zentralbereich entgegengesetzte Schichtspannungen zu erzeugen (z.B. Druckspannung im Zentrum und gleichzeitig Zugspannung am Membranrand).

Abbildung 29a zeigt das Schwingungsspektrum bei Anregung der Zentralelektrode.

### 3. Prozeßintegration ZnO und Silizium-Mikromechanik, Passivierungsproblematik

Der Schlüssel zu einer breiten Anwendung von piezoelektrischem ZnO liegt in der Lösung des Passivierungsproblems. Zum einen muß ZnO vor Umwelteinflüssen, z.B. Feuchtigkeit zuverlässig geschützt werden, zum anderen müssen nachfolgende Prozesse vor einer Kontamination mit ZnO bewahrt werden.

Von der Passivierung ist Beständigkeit gegenüber den in der Silizium-Mikromechanik üblichen aggressiven Naßätzmedien (z.B. heiße Kalilauge) oder auch Plasmaätzgasen (Fluor- oder Chlorchemie) zu fordern.

Die vorteilhaften elektrischen Eigenschaften des ZnO sollen durch den Passivierungsprozeß nicht wesentlich verschlechtert werden.

#### 3.1 Elektrische Eigenschaften von ZnO vor der Passivierung

Abbildung 30 zeigt die Strom-Spannungskennlinie einer 5 µm dicken ZnO-Schicht abgeschieden auf p-Silizium (5-20 Ohm·cm) mit Aluminiumkontakten auf ZnO und Silizium. Die Kennlinie weist eine ausgeprägte Diodencharakteristik auf, wobei die im Sperrbereich auftretenden Ströme bis zu Sperrspannungen von 50 V in der Größenordnung von  $10^{-8}$  A liegen.

#### 3.2 Eigenschaften von ZnO nach Passivierung mit Plasmanitrid

Siliziumnitridschichten besitzen eine sehr gute Resistenz gegenüber aggressiven Chemikalien und fungieren gleichzeitig als Diffusionssperre, die auch ein Ausdiffundieren von Zink verhindert.

Die höchste Resistenz besitzen im Hochtemperaturprozeß (1100 °C) abgeschiedene LPCVD-Nitridschichten, die jedoch wegen der Temperaturempfindlichkeit von (metallisiertem) ZnO nicht in Frage kommen.

In Plasmaprozessen lassen sich bereits bei relativ niedrigen Substrattemperaturen (100° - 400° C) qualitativ hochwertige Nitridschichten (und Oxidschichten) abscheiden, die ebenfalls ausreichende Resistenz aufweisen.

Abbildung 31 zeigt die Strom-Spannungskennlinie der zuvor beschriebenen ZnO-Probe nach Niedertemperatur-Plasmabeschichtung mit 200 nm Plasmanitrid ( $\text{SiH}_4/\text{NH}_3$ -Prozeß bei 100°C).

Der vorteilhaft hohe elektrische Widerstand des ZnO ist durch diese Behandlung völlig verlorengegangen. Der gemessene Restwiderstand entspricht dem Widerstand zwischen zwei Aluminiumkontakten auf dem Siliziumsubstrat (ohne ZnO), so daß von einem annähernden Schichtkurzschluß ausgegangen werden muß. Der Standard-Plasmanitridprozeß eignet sich also nicht zur Passivierung von metallisiertem ZnO.

### 3.3 Eigenschaften von ZnO nach Passivierung mit Plasmaoxid

In Abbildung 32 ist die Strom-Spannungskennlinie der beschriebenen ZnO-Probe nach der Beschichtung mit  $1\text{ }\mu\text{m}$  Plasmaoxid ( $\text{SiH}_4/\text{O}_2$ - bzw.  $\text{SiH}_4/\text{N}_2\text{O}$ - Prozeß bei  $100^\circ\text{C}$ ) dargestellt.

Während sich die elektrischen Eigenschaften im Durchlaßbereich nicht wesentlich verändert haben, ist die Sperreigenschaft vollständig verlorengegangen. Die Schichtstruktur verhält sich also wie ein Ohmscher Widerstand.

Für den Einsatz als Sensorantrieb ist das so degradierte ZnO immer noch gut geeignet; eine Verbesserung läßt sich möglicherweise durch Variation der Plasmaparameter und der Reaktionsgase erreichen.

### 3.4 Passivierung mit Schichtfolge Plasmaoxid/-nitrid

Plasmaoxidbeschichtetes ZnO bleibt zwar für Sensoranwendungen tauglich, das Plasmaoxid selbst besitzt jedoch keine ausreichende Resistenz gegenüber den Naßätzmedien der Mikromechanik.

Aus diesem Grund wurde eine Schichtfolge von Plasmaoxid und dem wesentlich beständigeren Plasmanitrid untersucht.

Abbildung 33 zeigt die Strom-/Spannungscharakteristik der beschriebenen ZnO-Probe nach Beschichtung mit  $2\text{ }\mu\text{m}$  Plasmaoxid und darüber  $200\text{ nm}$  Plasmanitrid ( $100^\circ\text{C}$ ). Die elektrischen Eigenschaften haben sich gegenüber der nur mit Plasmaoxid beschichteten Probe nicht signifikant verändert.

### 3.5 Prozeßabfolge zur Herstellung frequenzanaloger Kraftsensoren

Abbildung 34 und 35 zeigen eine Prozeßabfolge zur Fertigung frequenzanaloger Kraftsensoren, die von einer ZnO-Passivierung mit einer Schichtfolge aus Plasmaoxid und -nitrid ausgeht. Einzelne Prozeßschritte können auch in ihrer Reihenfolge vertauscht werden, z.B. Bordotierung und erster Naßätzschritt; die Naßätzung in heisser KOH kann möglicherweise auch ganz zuletzt, d.h. nach Aufbringen, Strukturieren, Metallisieren und Passivieren des ZnO erfolgen.

Prozesse dieser Art werden derzeit im Rahmen des Projekts untersucht, um zu einem optimalen Herstellungsweg zu gelangen.

## Querschnitt und Draufsicht

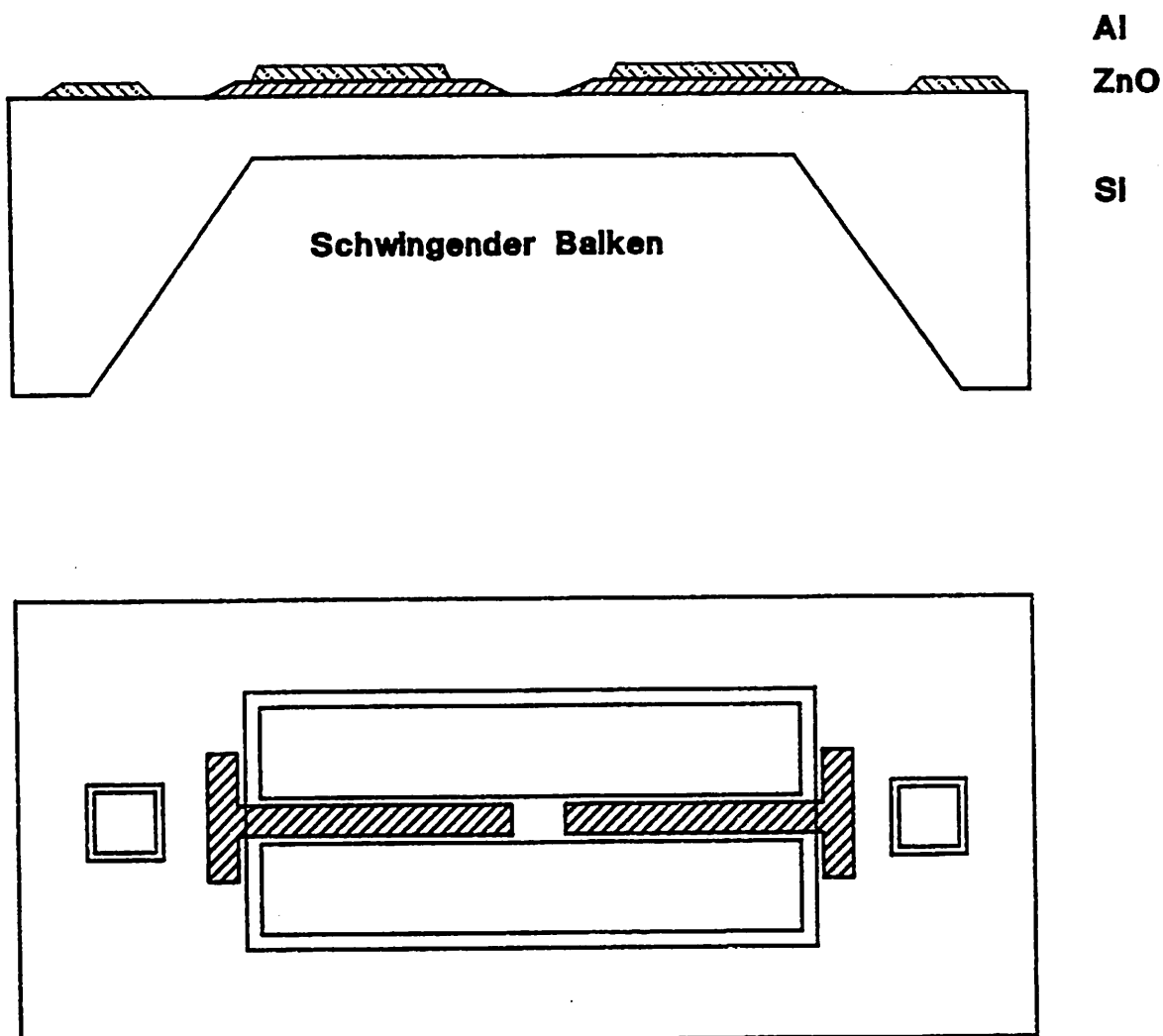


Abbildung 1

**CH2: elektrische Anregung resonant 6.85 kHz**

**CH1: optische Abtastung RM600 Biegebalkenmitte**

**(lxbxd = 8 x 0.8 x 0.05 mm )**

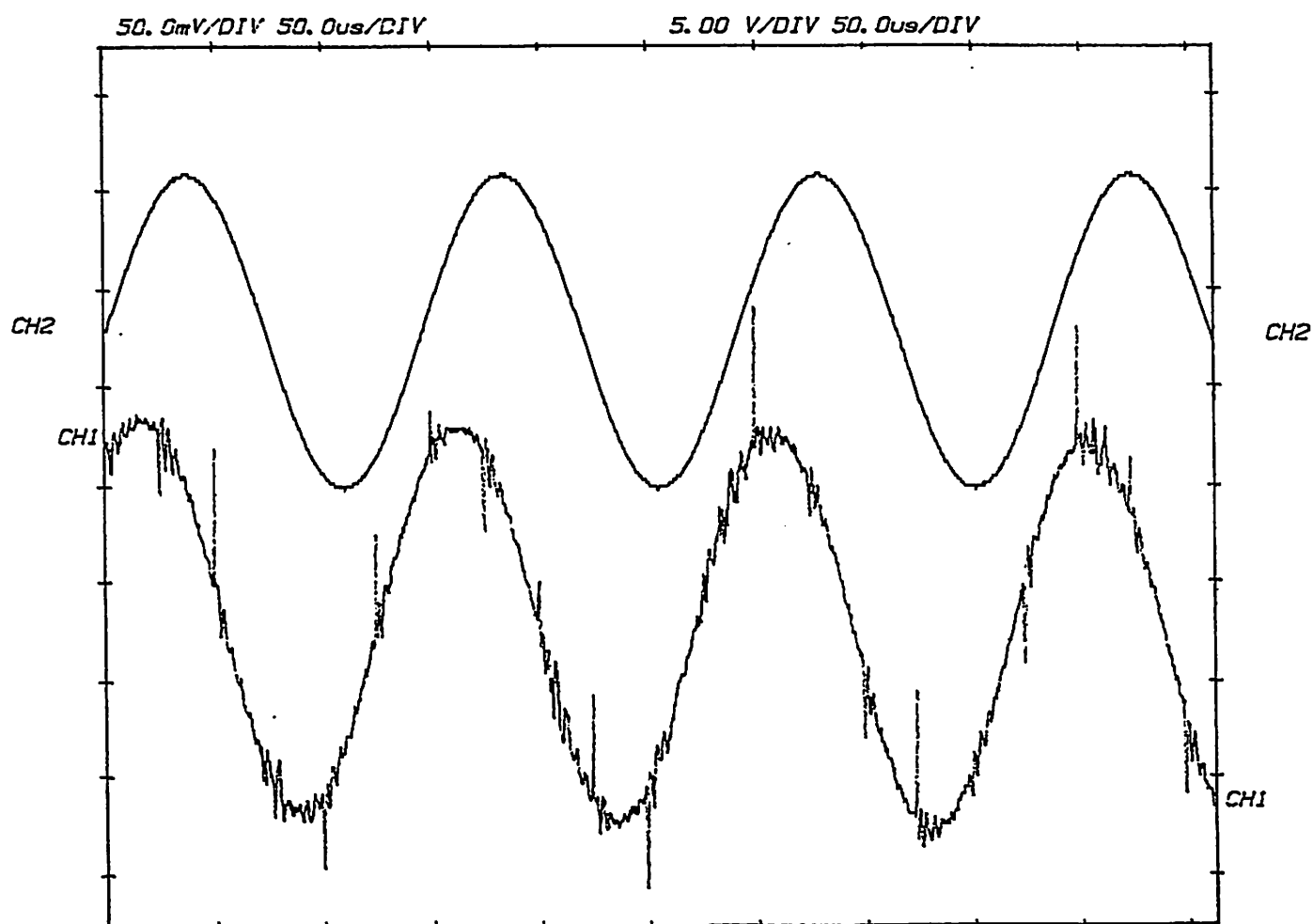


Abbildung 2



**CH2: elektrische Anregung resonant 12.5 kHz**  
**CH1: optische Abtastung RM600 Biegebalkenmitte**  
**(lxbxd = 6 x 0.2 x 0.05 mm)**

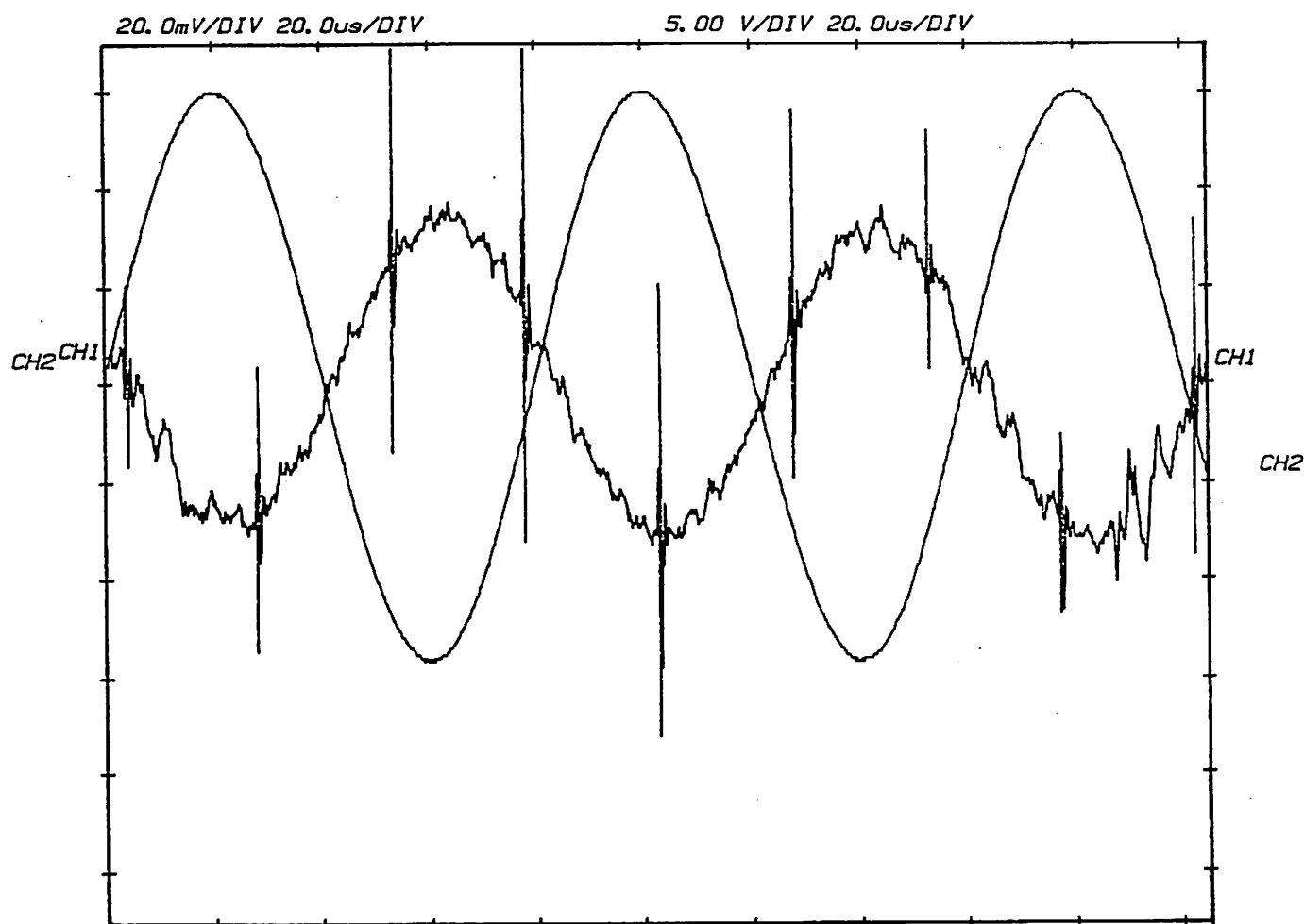
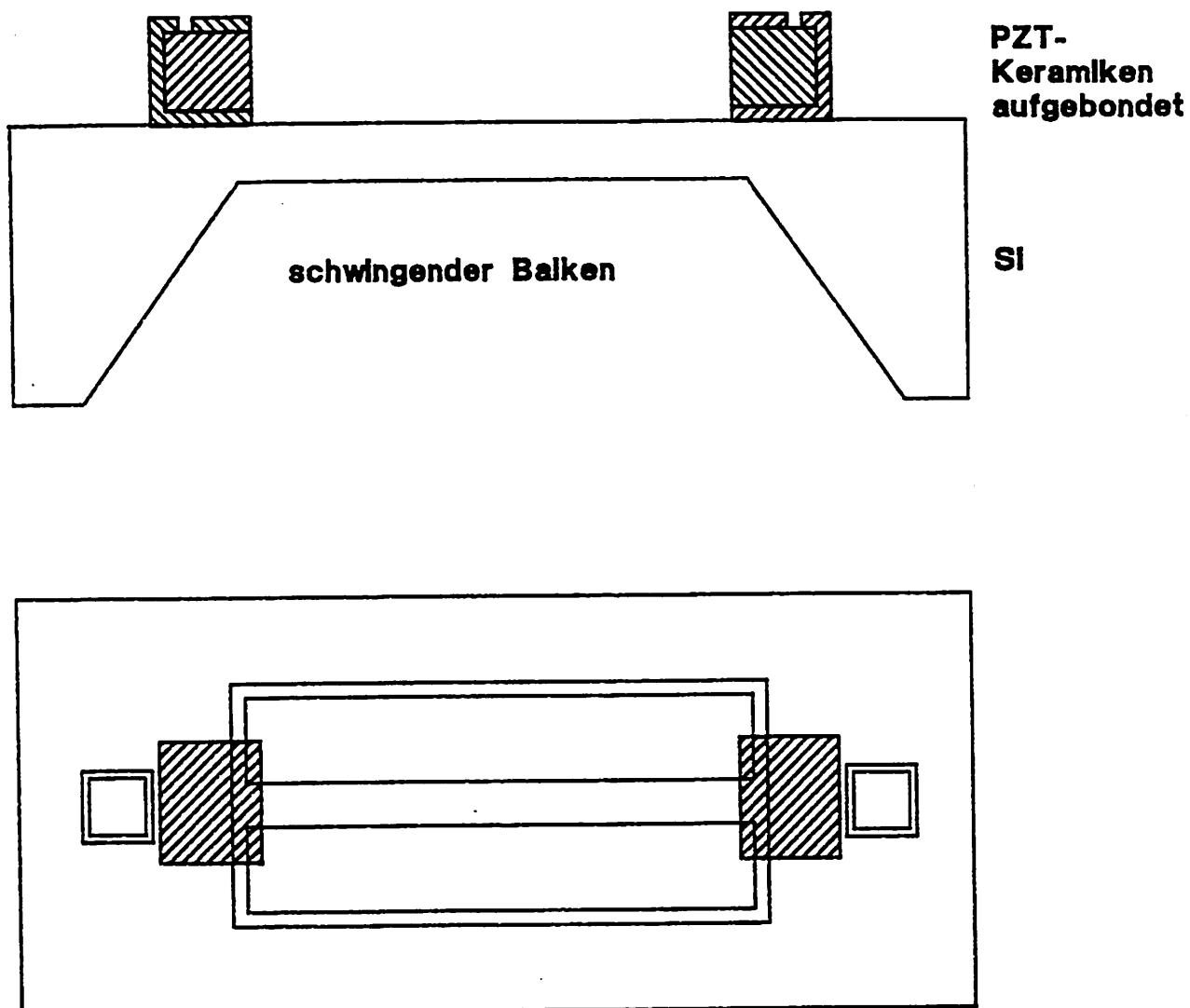


Abbildung 3

**Querschnitt und Draufsicht**Abbildung 4

**CH2: elektrische Anregung resonant 9.1 kHz**  
**CH1: optische Abtastung RM600 Biegebalkenmitte**  
**(lxbxd = 8 x 0.4 x 0.05 mm)**

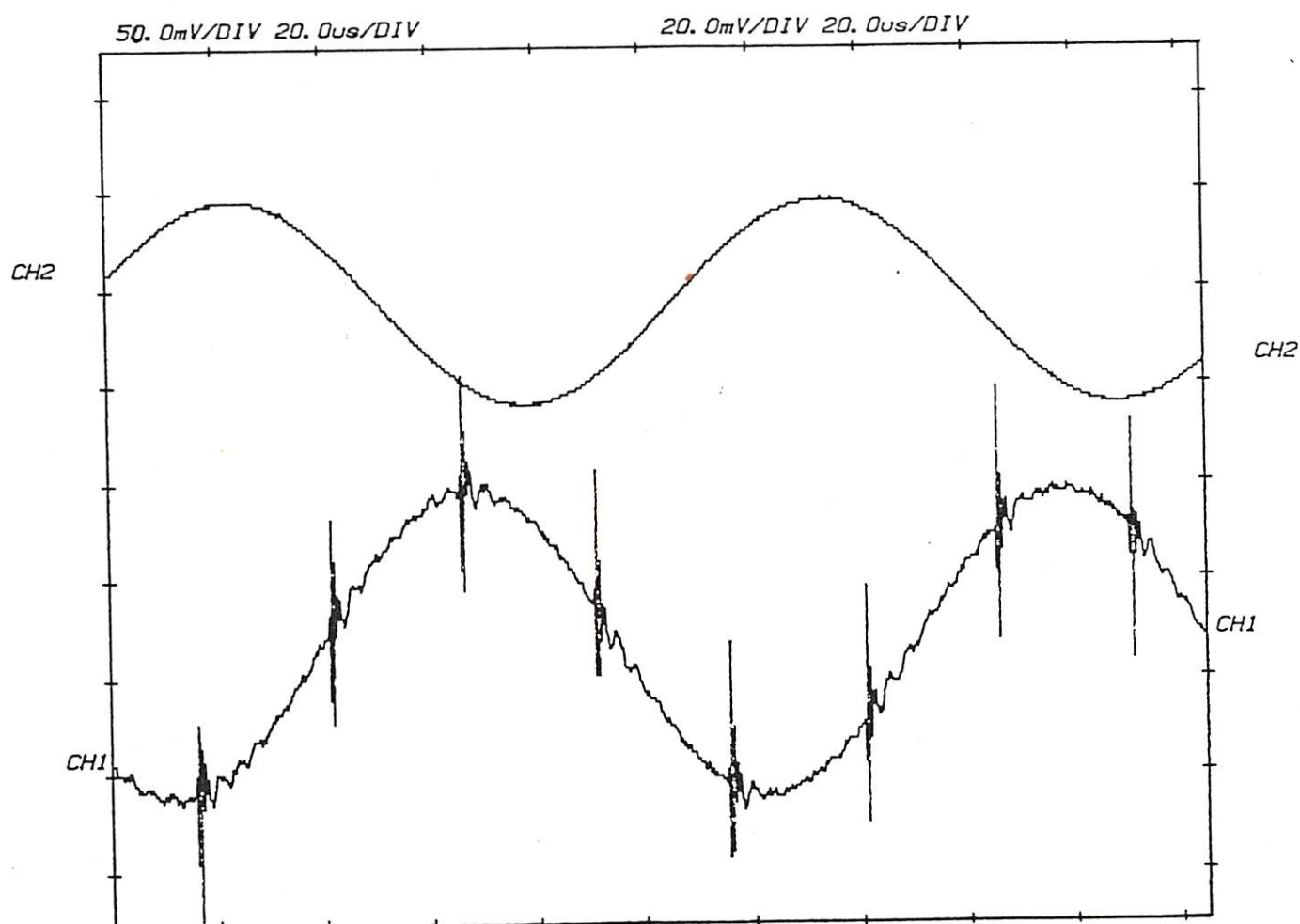
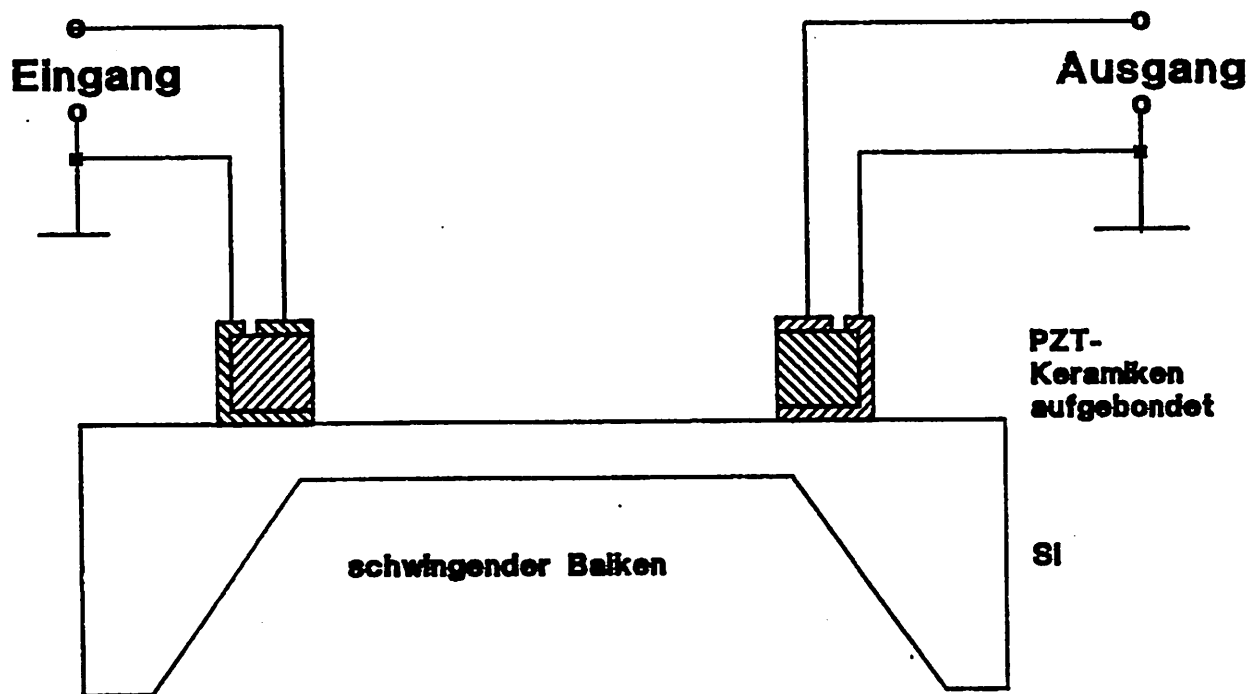


Abbildung 5



=

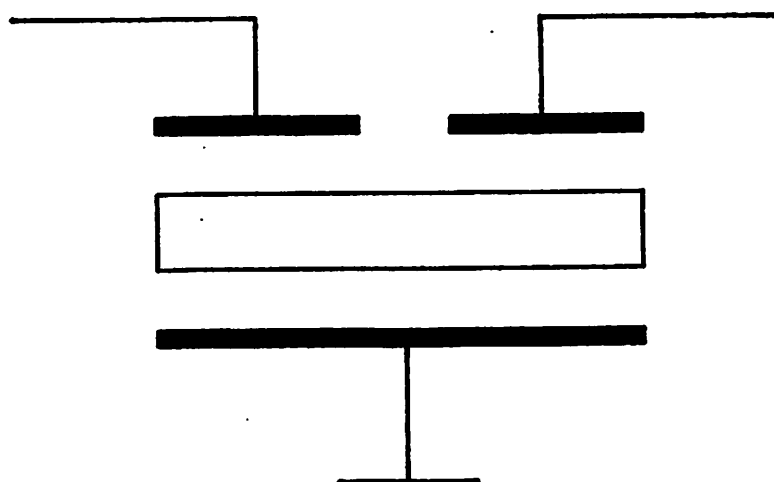


Abbildung 6

**CH2: elektrische Anregung resonant (1. Piezoker.) 9.1 kHz**

**CH1: elektrischer Signalabgriff (2. Piezokeramik)**

**(lxbxd = 8 x 0.4 x 0.05 mm)**

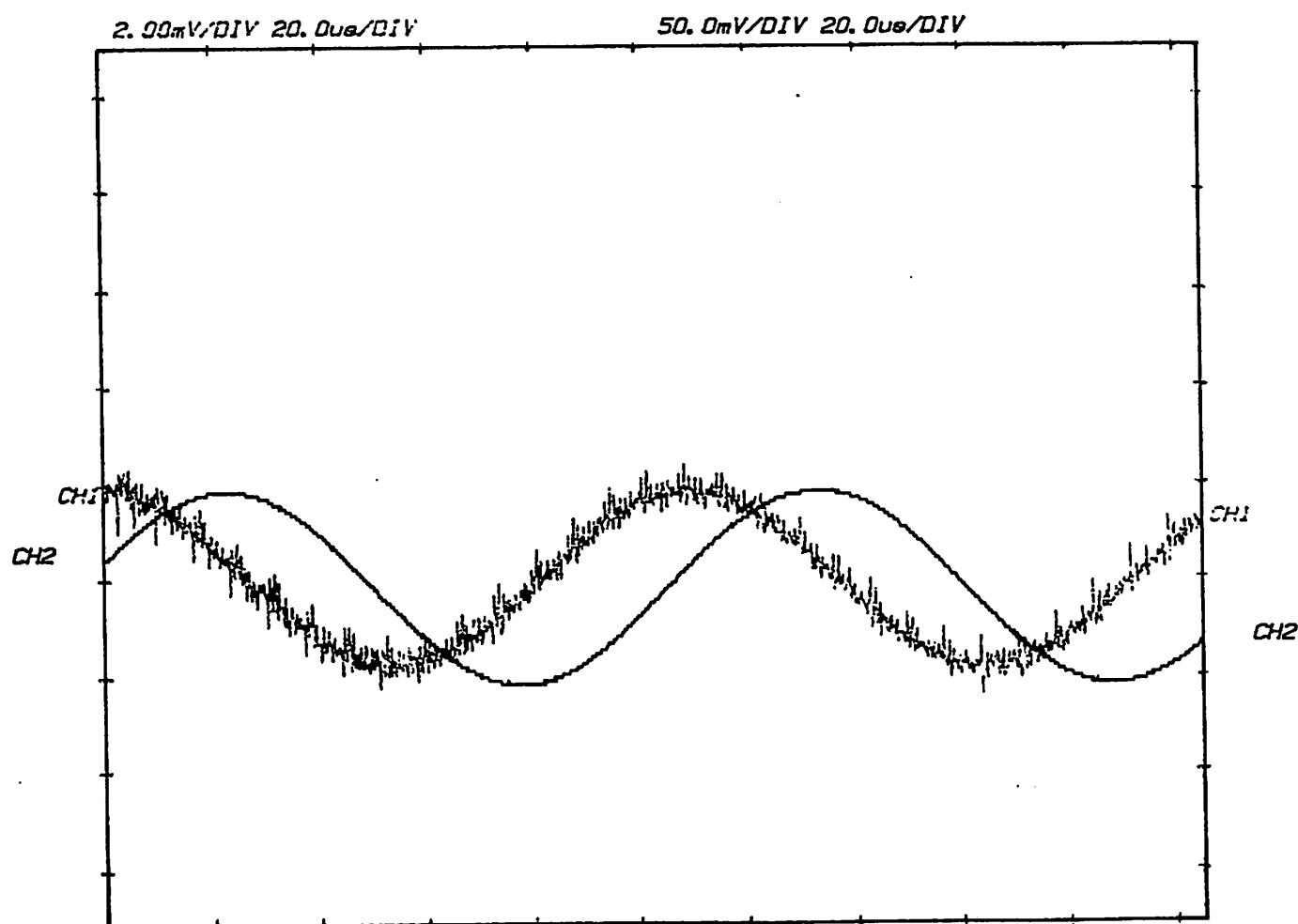


Abbildung 7

FAS 2-3/1 Nr. 6 PZT

lxbxd = 8 x 0.4 x 0.05 mm

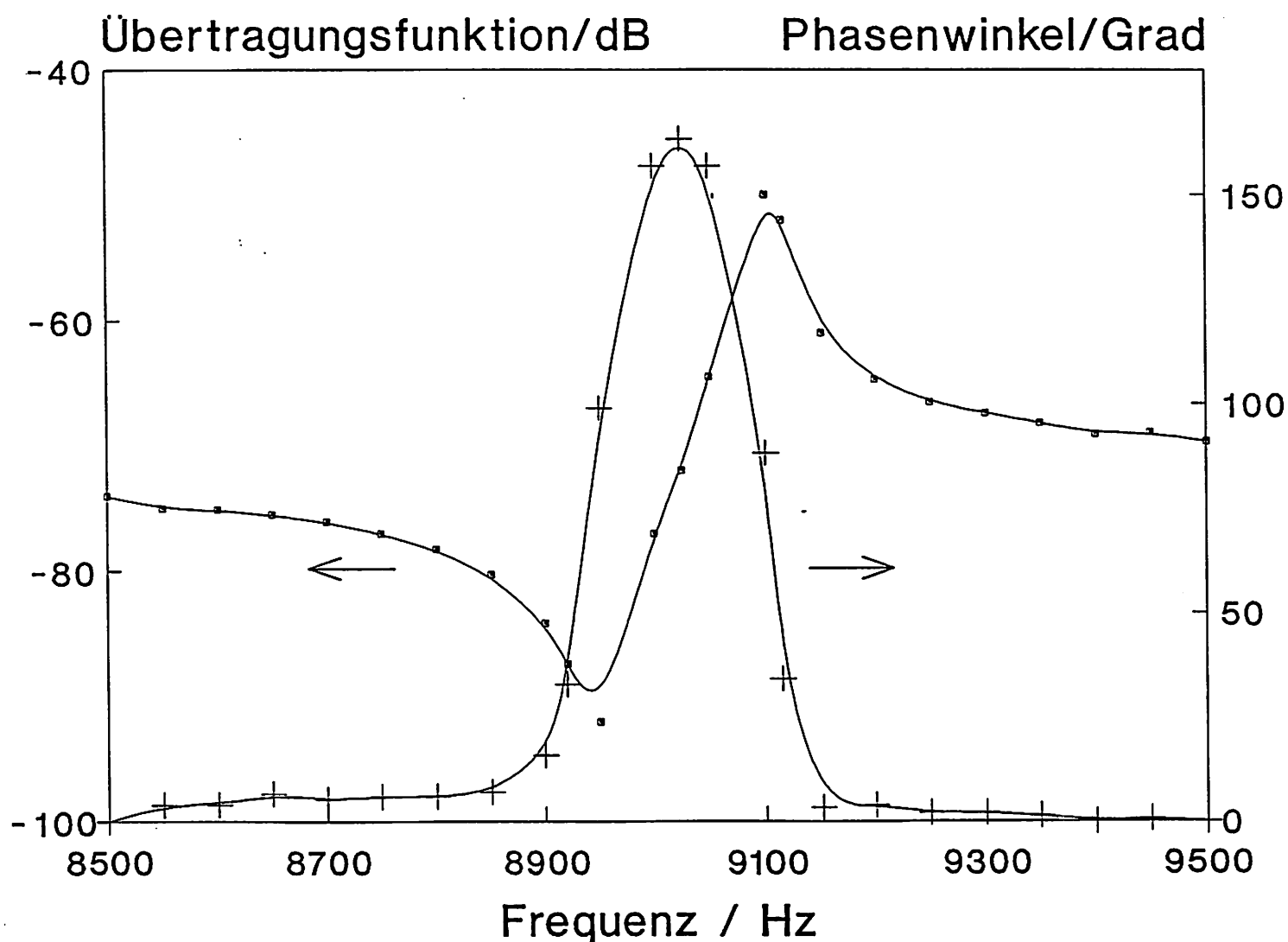


Abbildung 8

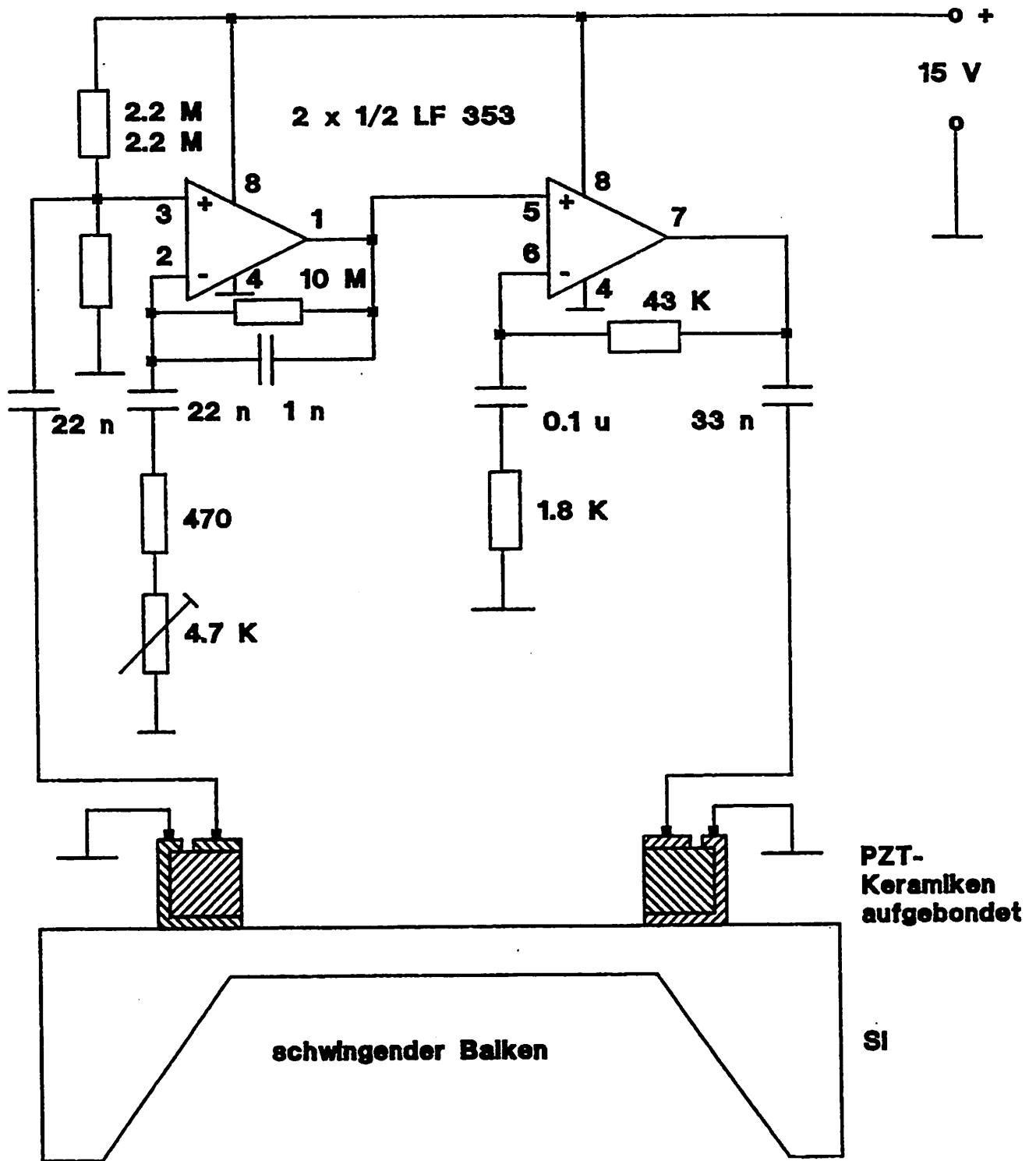
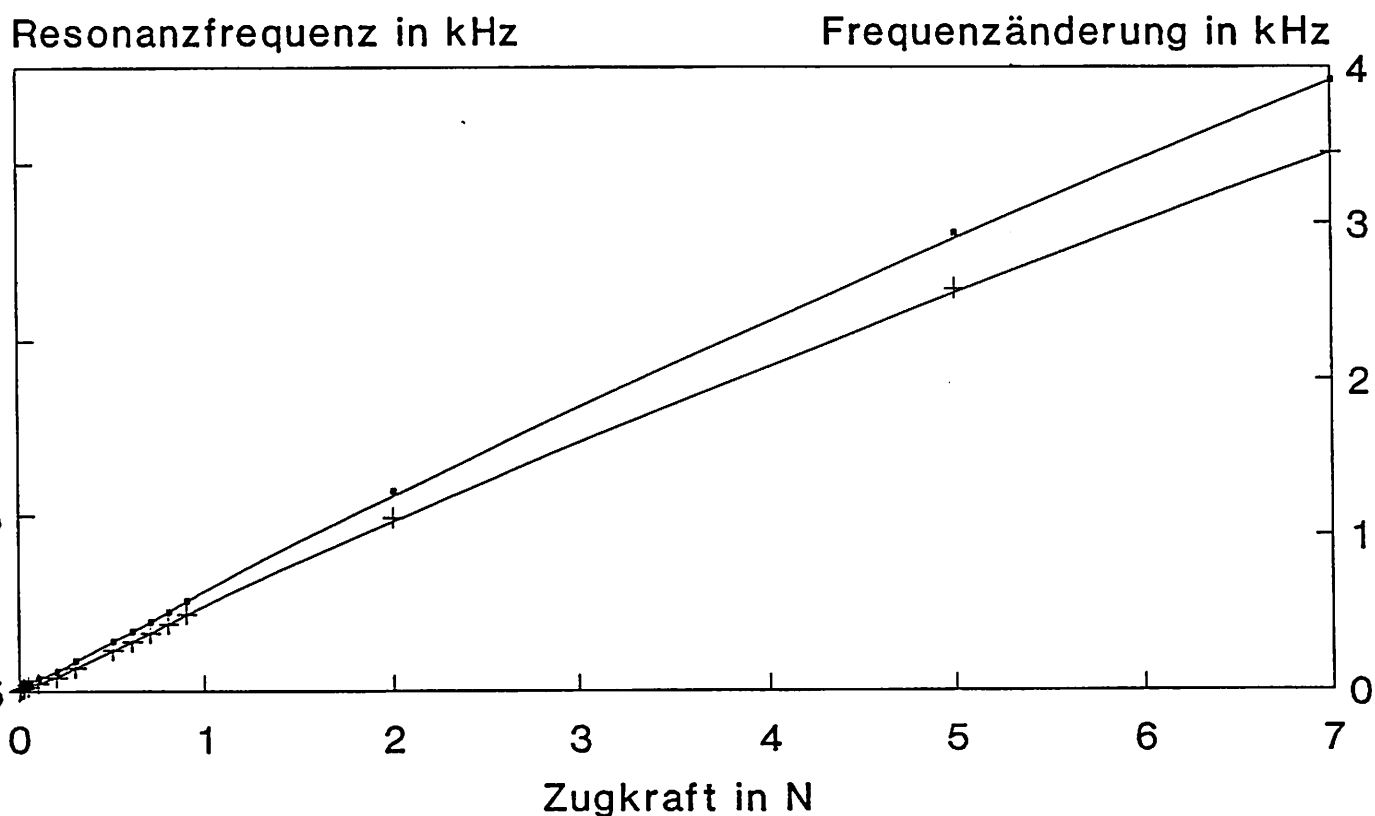


Abbildung 9

**FAS 2-3/1 Nr. 6 mit zwei PZT-Keramiken**  
**Resonanzfrequenz i. A. von der Zugkraft**



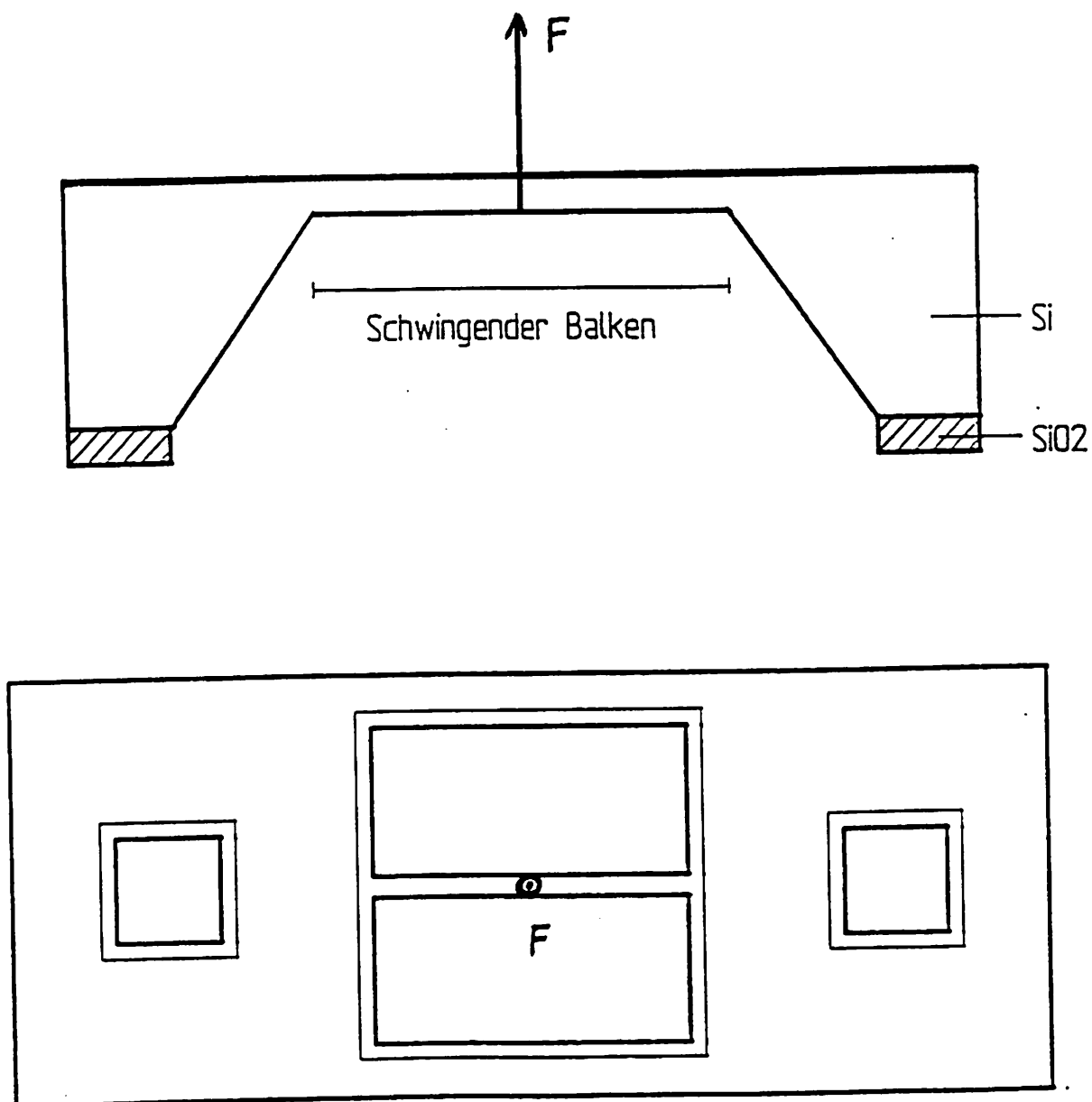
FAS2-3/1 Nr. 6 PZT

—•— Resonanzfrequenz kHz    —+— Frequenzänderung kHz

Abbildung 10



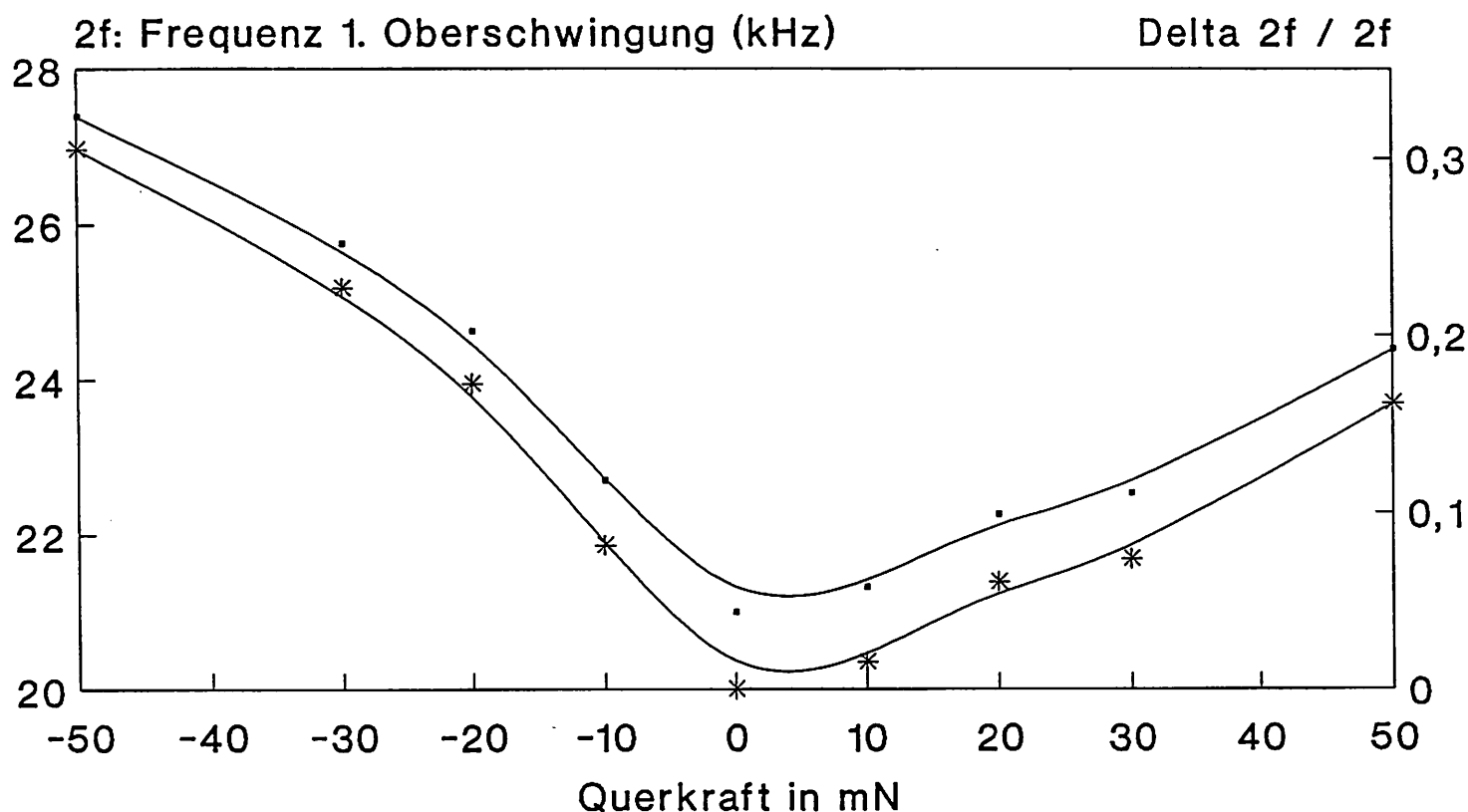
Querschnitt und Draufsicht



$F \perp$  Biegebalken

Abbildung 11

FAS 2-3/1 Nr. 6 mit zwei PZT-Keramiken  
Frequenzänderung i. A. von der Querkraft



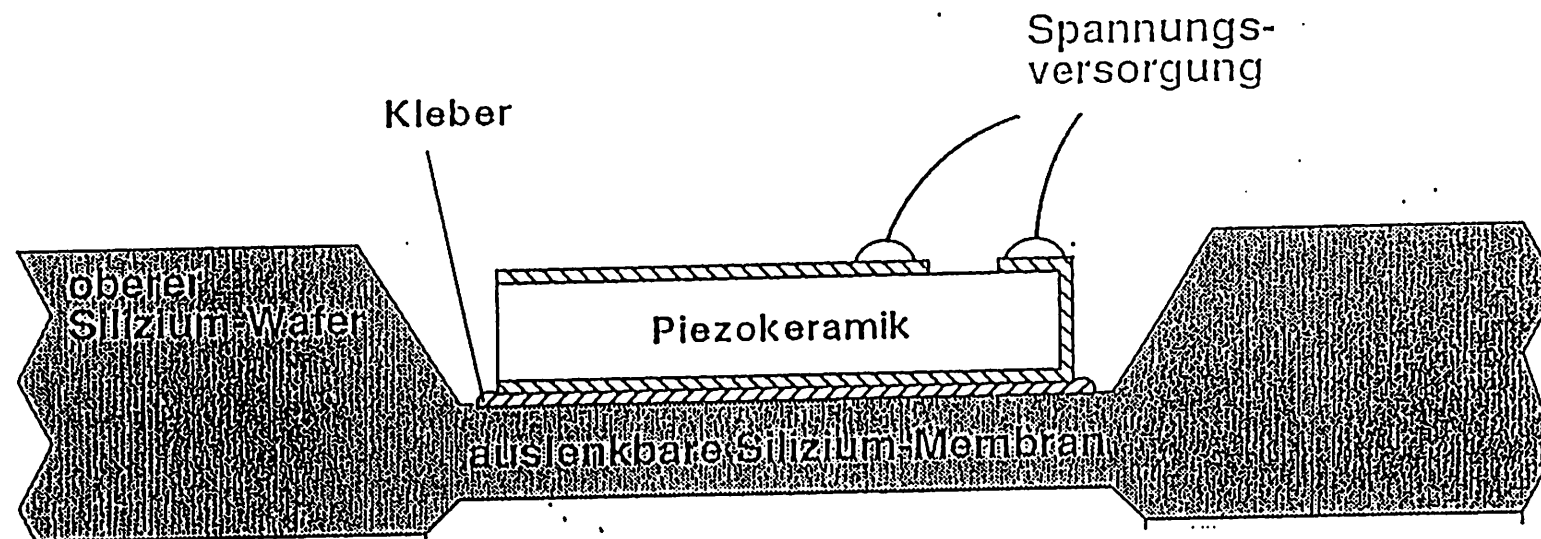
FAS2-3/1 Nr. 6 PZT

—•— 2f in kHz    —\*— Delta 2f / 2f

1. Oberschwingung 20,989 kHz (kraftfrei)

Abbildung 12

Abbildung 13



Si-Membran: 9,2mm x 9,2mm

Piezokeramik: 10mm x 10mm

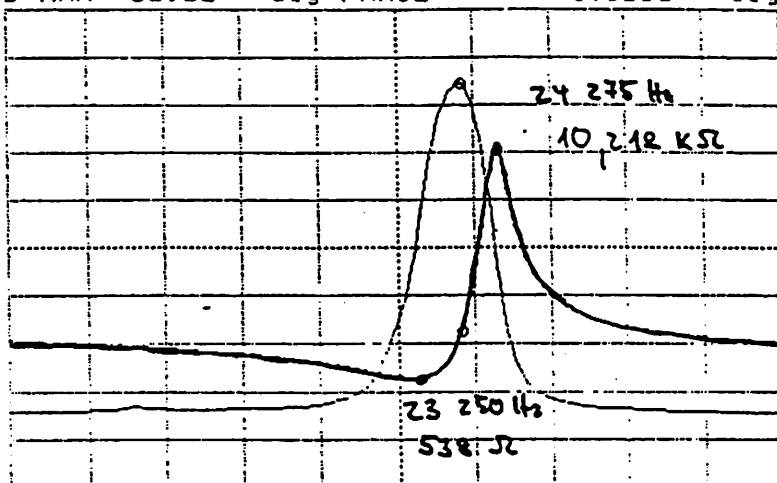
A)  $d(\text{Si}) = 200\mu\text{m}$   
 $d(\text{Ker}) = 200\mu\text{m}$ B)  $d(\text{Si}) = 20\mu\text{m}$   
 $d(\text{Ker}) = 200\mu\text{m}$ Messmethoden: 1.) Impedanz und Phase  
Anregung  $U = 1\text{Vpp}$   
2.) optisch  
Anregung  $U = 25\text{Vpp}$

$\Delta p = 0\text{bar}$

— Phase

— Imp.

A: |Z| B:  $\theta$  MKR 23 825.000 Hz  
A MAX 16.00 K $\Omega$  MAG 2.48433 K $\Omega$   
B MAX 80.00 deg PHASE 48.9598 deg



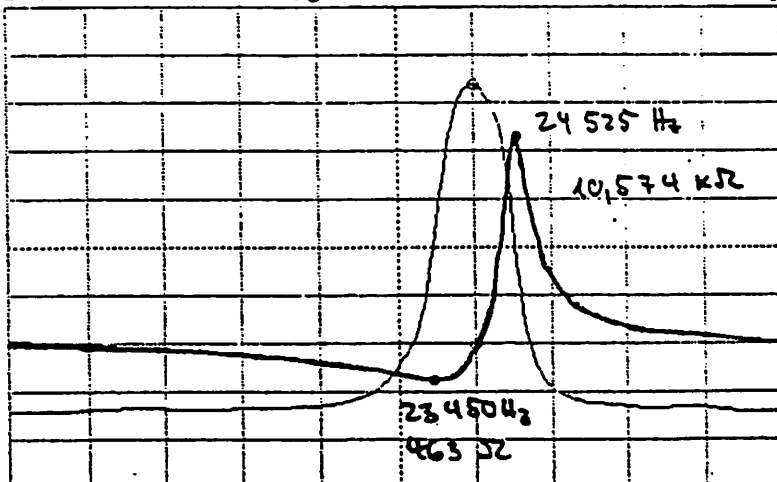
A/DIV 2.000 K $\Omega$  CENTER 23 000.000 Hz  
B/DIV 20.00 deg SPAN 10 000.000 Hz

$\Delta p = 2\text{bar}$

— Phase

— Imp.

A: |Z| B:  $\theta$  MKR 24 000.000 Hz  
A MAX 16.00 K $\Omega$  MAG 1.93172 K $\Omega$   
B MAX 80.00 deg PHASE 47.5743 deg



A/DIV 2.000 K $\Omega$  CENTER 23 000.000 Hz  
B/DIV 20.00 deg SPAN 10 000.000 Hz

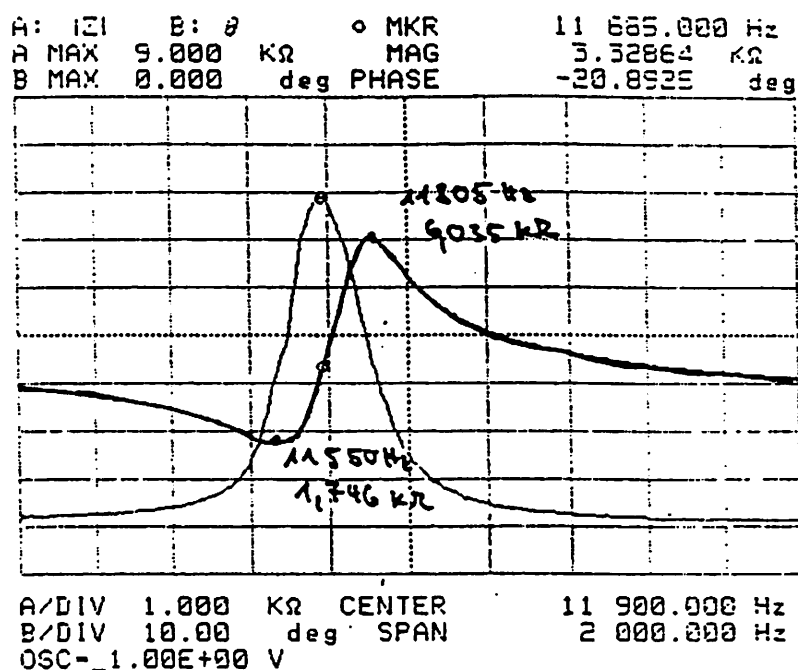
$$\frac{\Delta f(\text{res})}{\Delta p} = 0.125 \frac{\text{kHz}}{\text{bar}}$$

Berstdruck  $\geq 4\text{bar}$

$\Delta p = 0 \text{ bar}$

— Phase

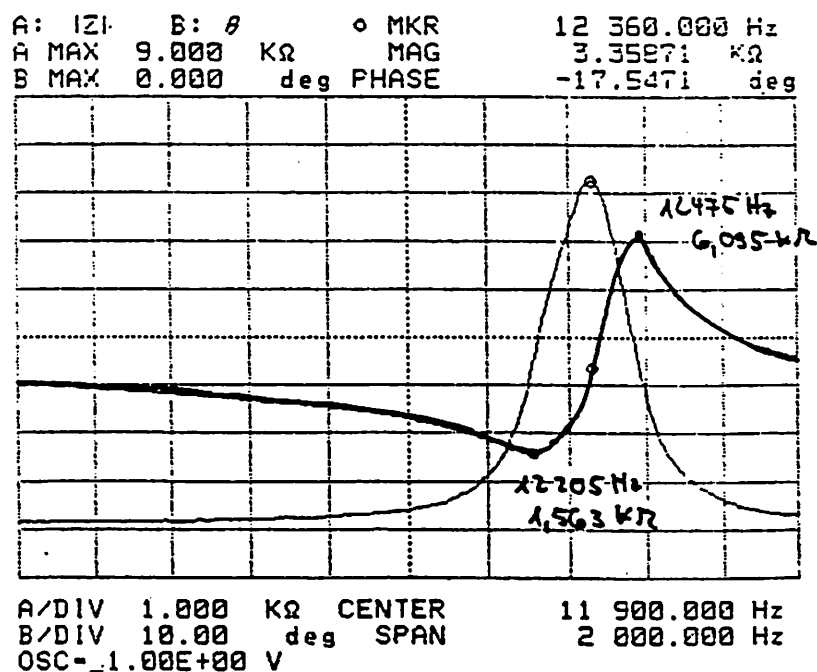
— Imp.



$\Delta p = 0.5 \text{ bar}$

— Phase

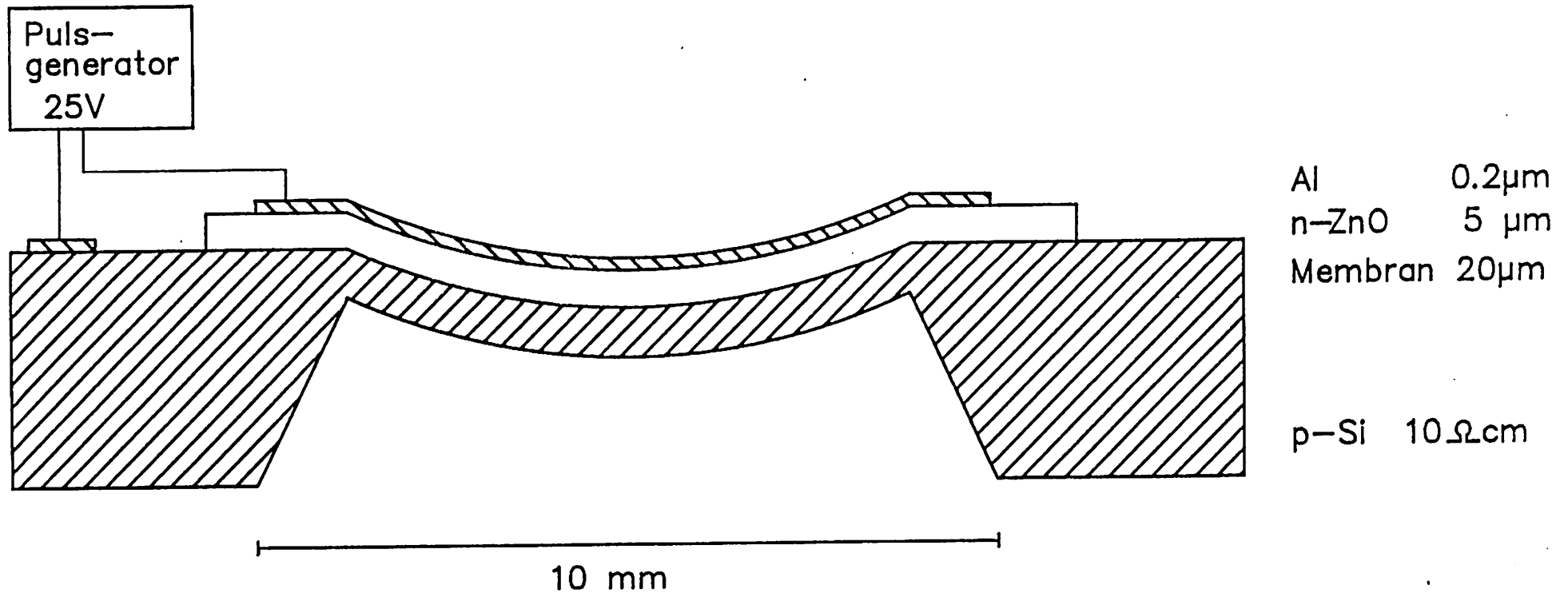
— Imp.



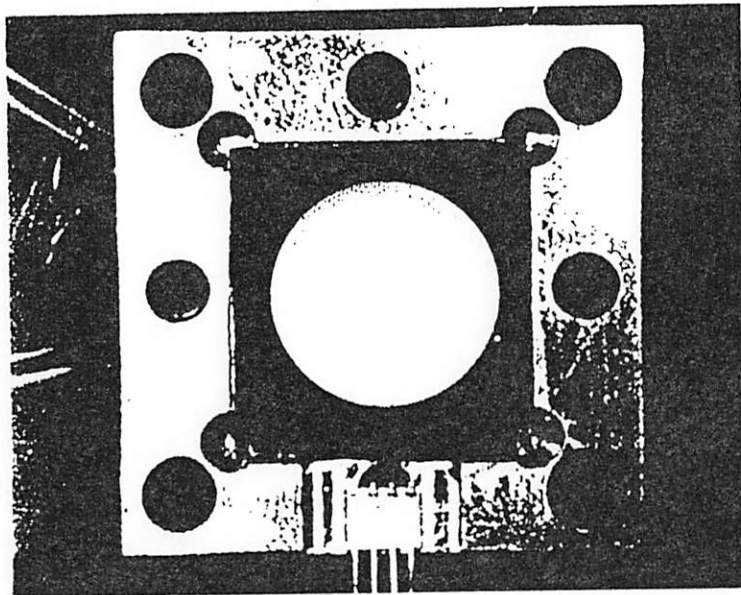
$$\frac{\Delta f(\text{res})}{\Delta p} = 1.4 \frac{\text{kHz}}{\text{bar}}$$

Berstdruck > 1bar

Abbildung 16



Ausknicken der Membran:  $\sigma > \sigma_{krit} \approx 0.1 \text{ GPa}$



$d(\text{Si})) = 20 \mu\text{m}$   
 $d(\text{ZnO}) = 5 \mu\text{m}$



$d(\text{Si}) = 98 \mu\text{m}$   
 $d(\text{ZnO}) = 5 \mu\text{m}$

Schattenmasken für ZnO und Al-Elektroden

**BOSCH**



ZWD

Frequenzspektrum ZnO/Si-Membran  
 $d(\text{Si}) = 20\mu\text{m}$   $d(\text{ZnO}) = 5\mu\text{m}$

August 91

Tag

Abbildung 18

Range: 0 dBm

Res BW: 150 Hz

VBW: Off

23-Apr-2000 8:26

Swp Time: 30.11 Sec

A: SWEPT SPECTRUM

Mkr

7 700 Hz

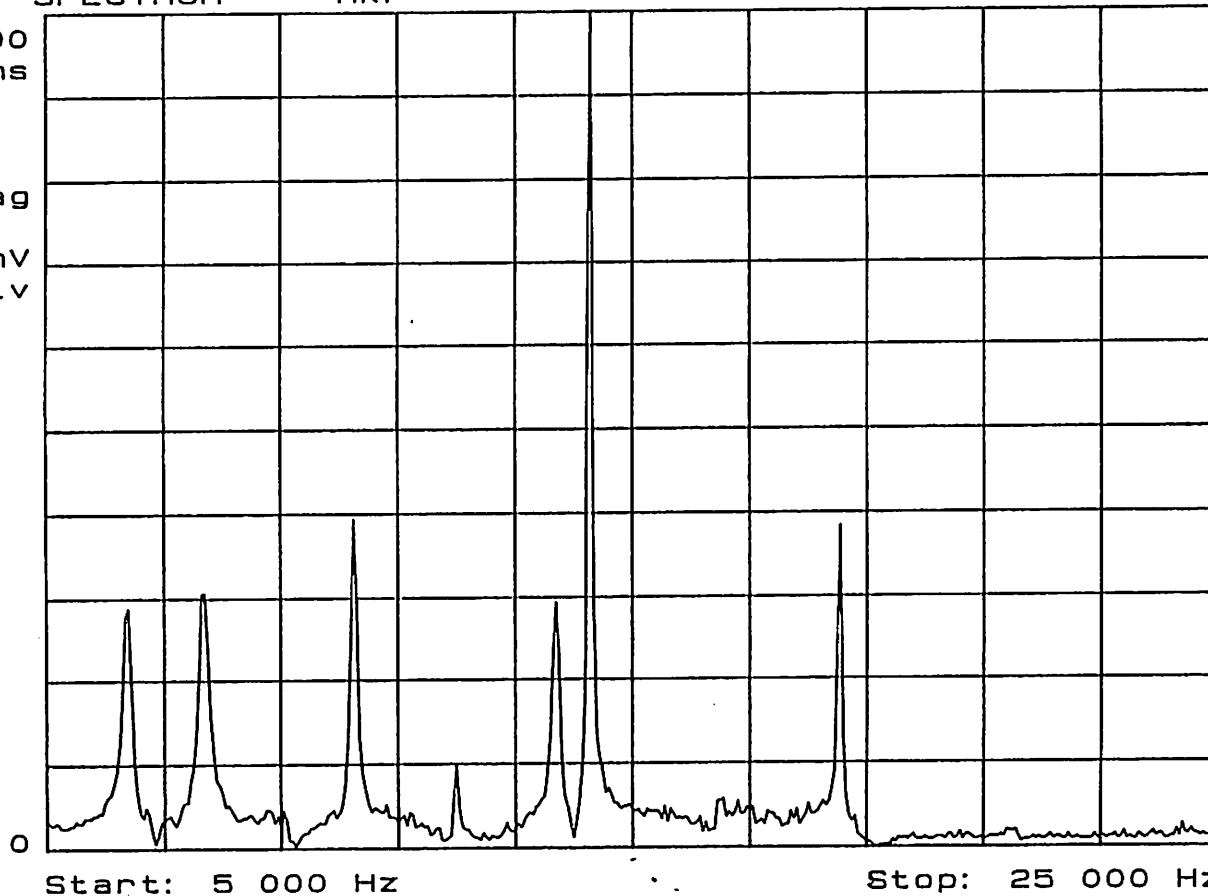
61.71 mVrms

200  
mVrms

LinMag

20 mV  
/div

Geschwindig-  
keit der  
Membran  
(Mitte)



Anregungsfrequenz

Polytec Vibrometer



**BOSCH**

ZWD

ZnO/Si-Membran  $d(\text{Si}) = 20\mu\text{m}$   $d(\text{ZnO}) = 5\mu\text{m}$   
14kHz-Mode

August 91  
Tag

Abbildung 19

Range: 0 dBm

23-Apr-2000 8:39

Res BW: 4.5 Hz

VBW: Off

Swp Time: 32.77 Sec

A: SWEPT SPECTRUM

Mkr

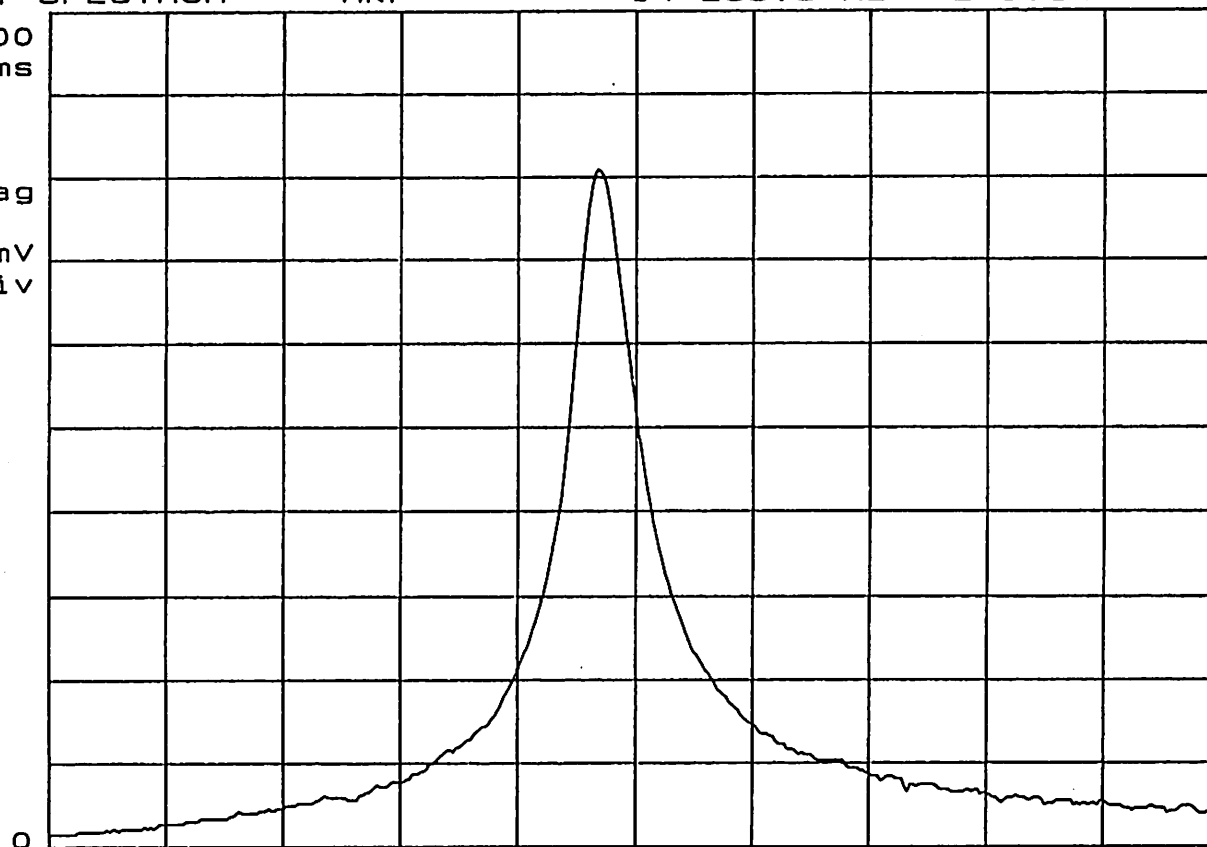
14 283.8 Hz 243.14 mVrms

300  
mVrms

LinMag

30 mV  
/div

Geschwindig-  
keit der  
Membran  
(Mitte)



Center: 14 300 Hz

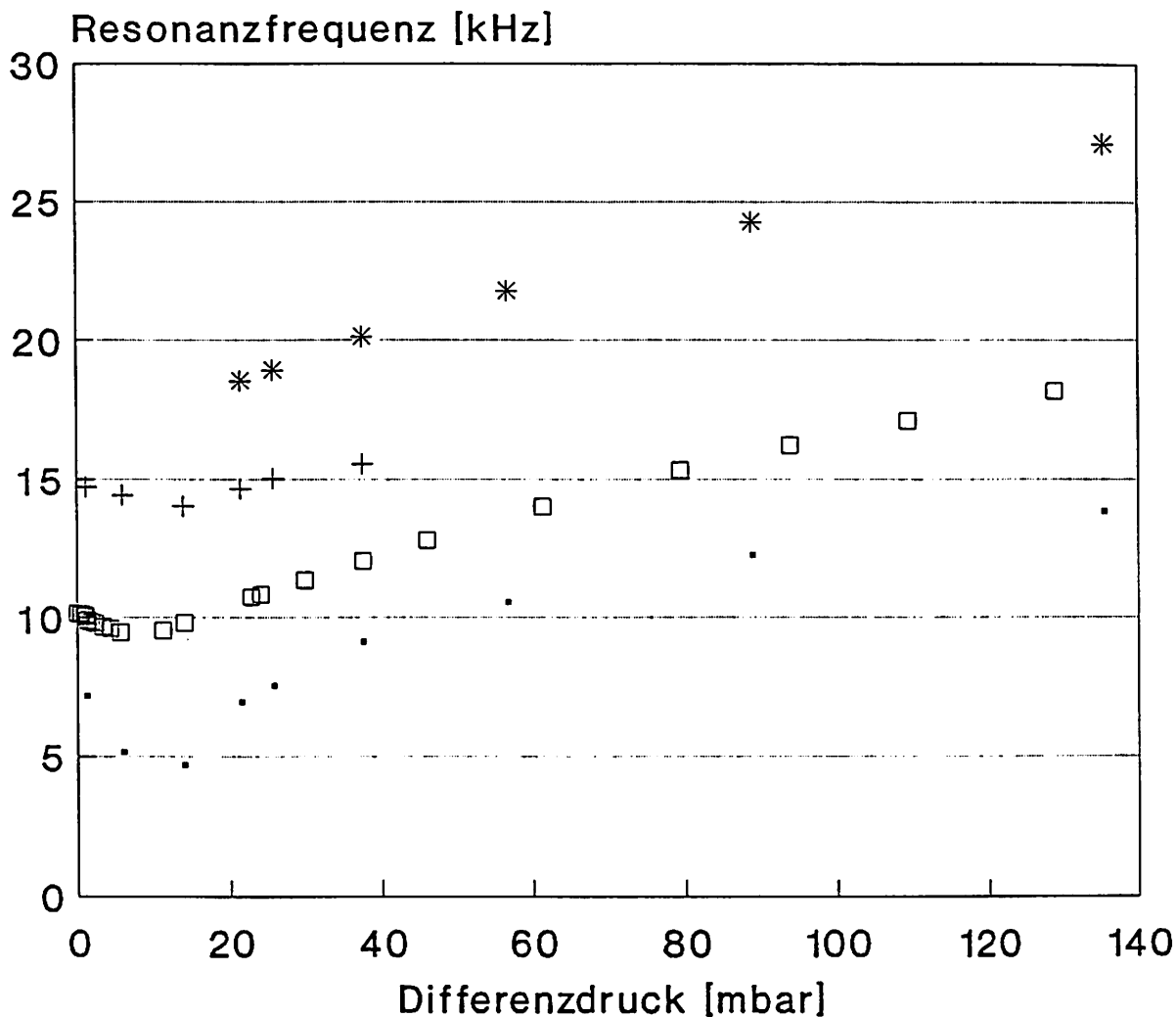
Span: 500 Hz

Anregungsfrequenz

 $Q = 400$ Resonanzamplitude:  $6\mu\text{m}$ bei  $U = 10\text{ Vpp}$ 

Polytec Vibrometer

Druckabhängigkeit der Resonanzfrequenz für  
verschiedene Schwingungsmoden



• Grundmode

+ 14 kHz-Mode

\* 18 kHz-Mode

□ 10 kHz-Mode



$$\frac{\Delta f(\text{res})}{\Delta p} = 70 \frac{\text{kHz}}{\text{bar}}$$

$$\frac{\Delta f(\text{res})}{\Delta F} = 8 \frac{\text{kHz}}{\text{N}}$$

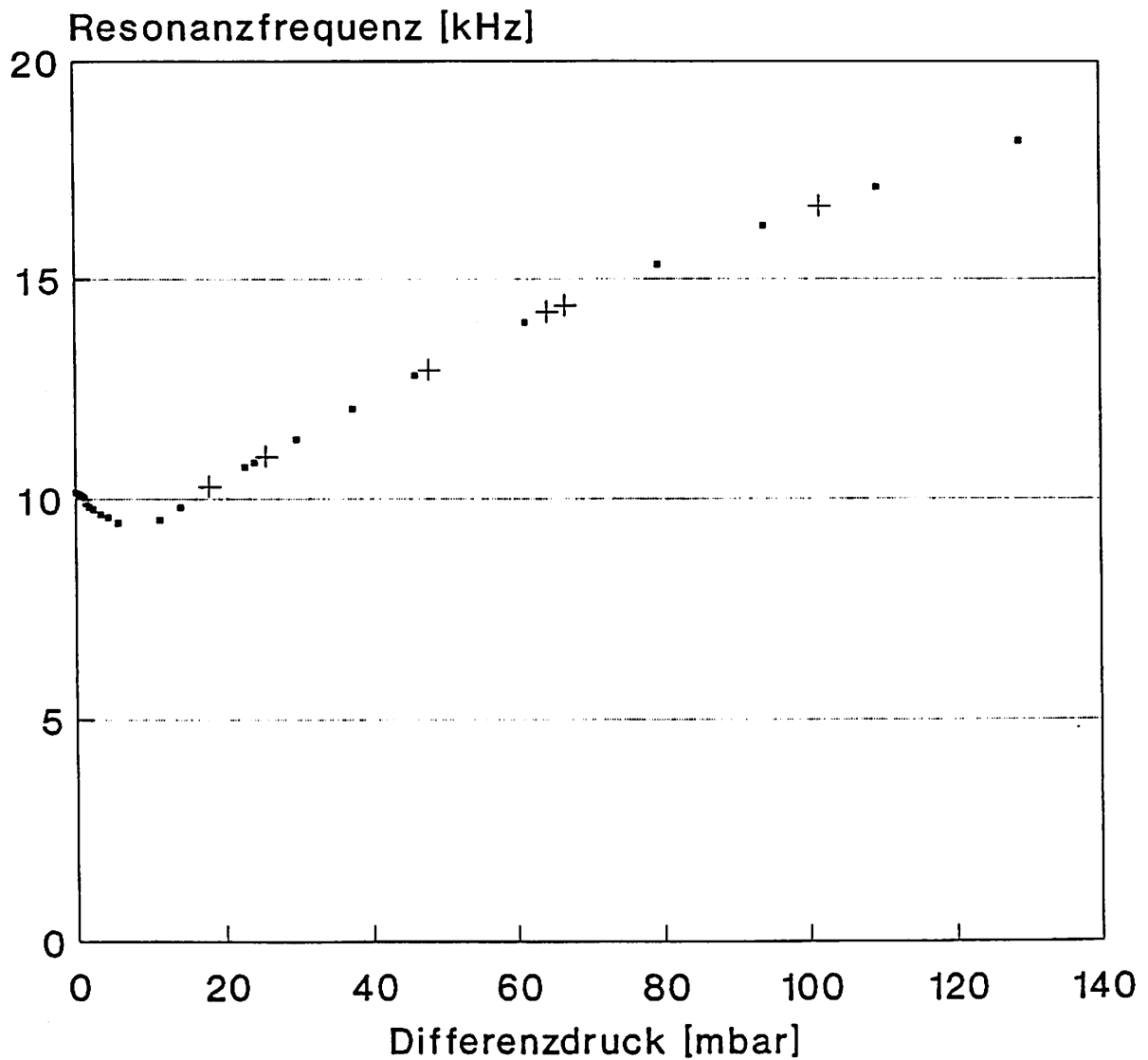


Berstdruck: 150 mbar

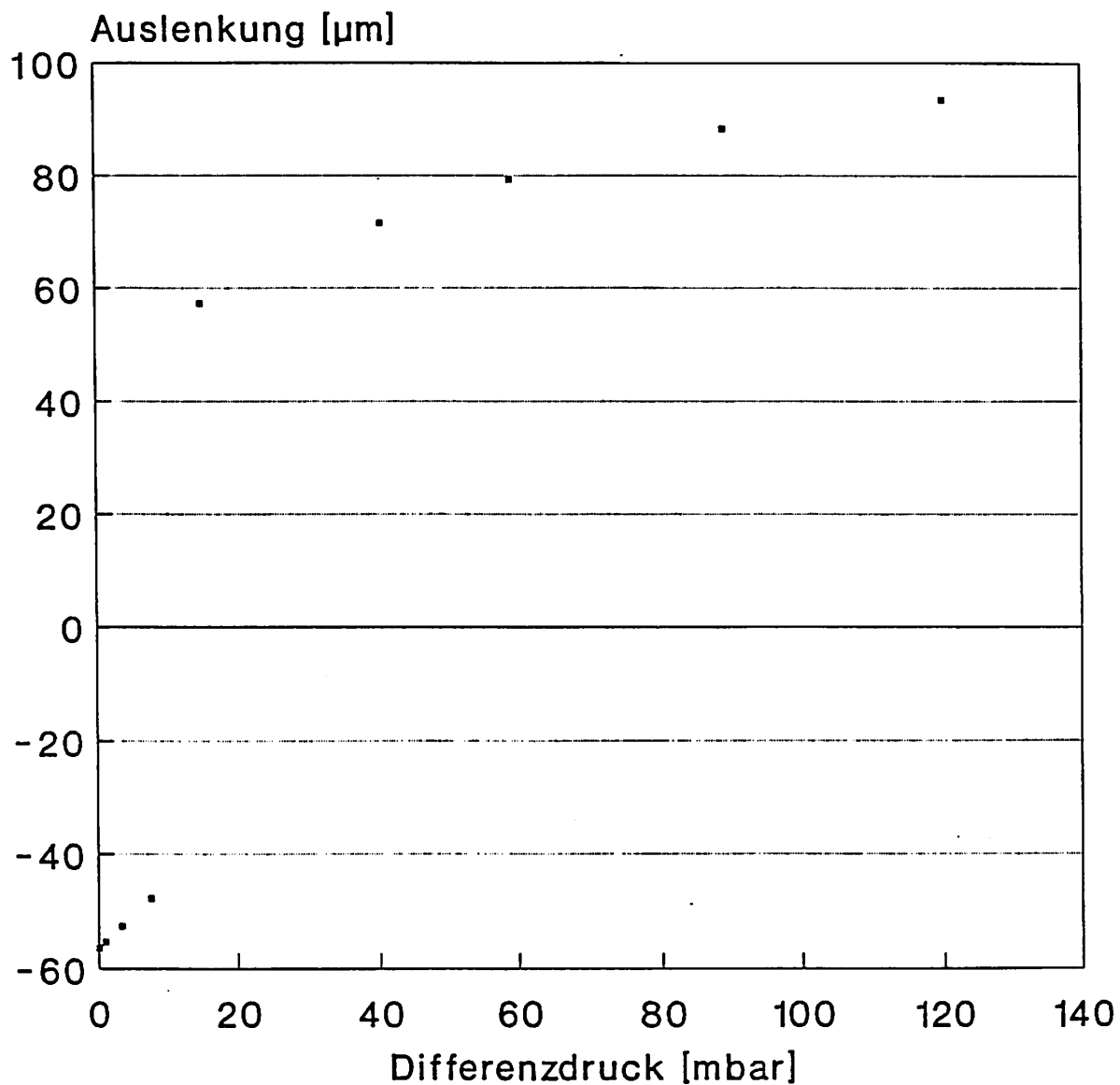
# Resonanter Drucksensor

Druckabh. d. Resonanzfrequenz

10 kHz-Mode



• Druckzunahme      + Druckabnahme



"Knackfrosch"

Resonanzfrequenz  $f(\text{res})$  in Abhängigkeit von der Membranspannung  $\sigma$

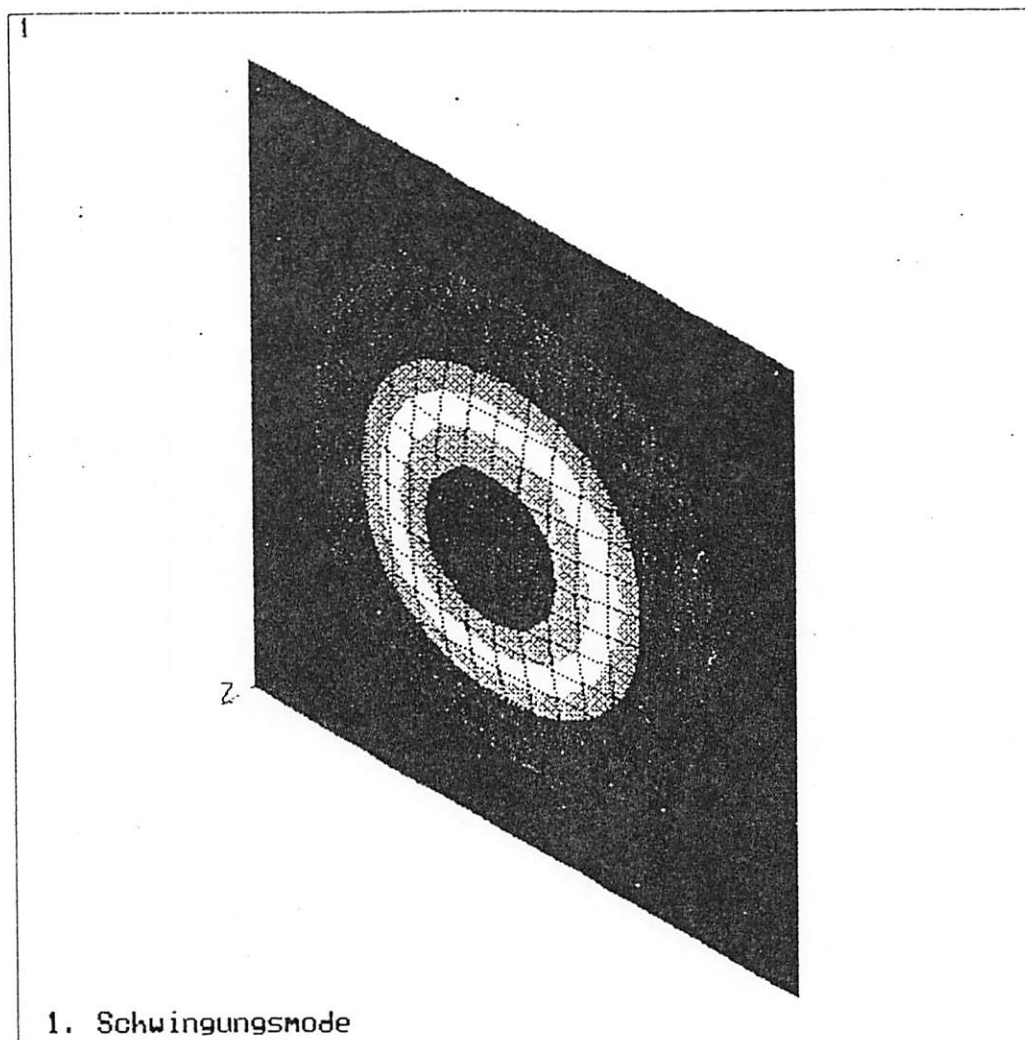
$$f(\text{res}) = f(0) \sqrt{1 + 0.22 \frac{\sigma}{\hat{E}} \frac{l^2}{d^2}}$$

$$f(0) = 1.654 \sqrt{\left(\frac{\hat{E}}{\rho}\right) \frac{d}{l^2}}$$

$$\hat{E} = E / (1 - \nu^2)$$

$$\sigma = \left| \sigma(\text{ZnO}) + \sigma(p) \right|$$

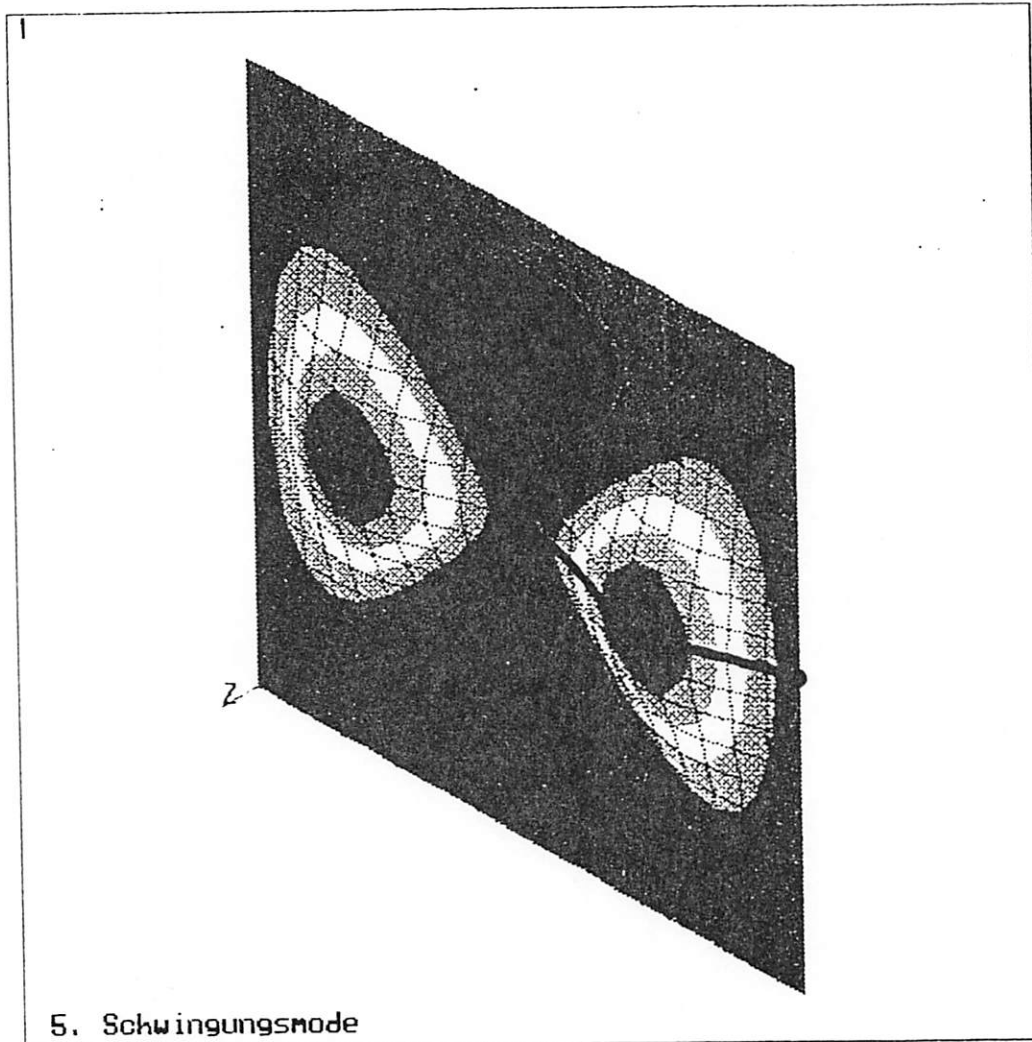
Quellen: DA Bouwstra  
Timoshenko



ANSYS 4.4  
UNIV VERSION  
MAY 24 1991  
15:58:12  
POST1 STRESS  
STEP=1  
ITER=1  
FREQ=4313  
UZ  
D GLOBAL  
DMX =1  
SMX =1  
  
XU =1  
YU =1  
ZU =1  
DIST=6.197  
XF =4.6  
YF =4.6  
0  
0.111111  
0.222222  
0.333333  
0.444444  
0.555556  
0.666667  
0.777778  
0.888889  
1

Grundmode

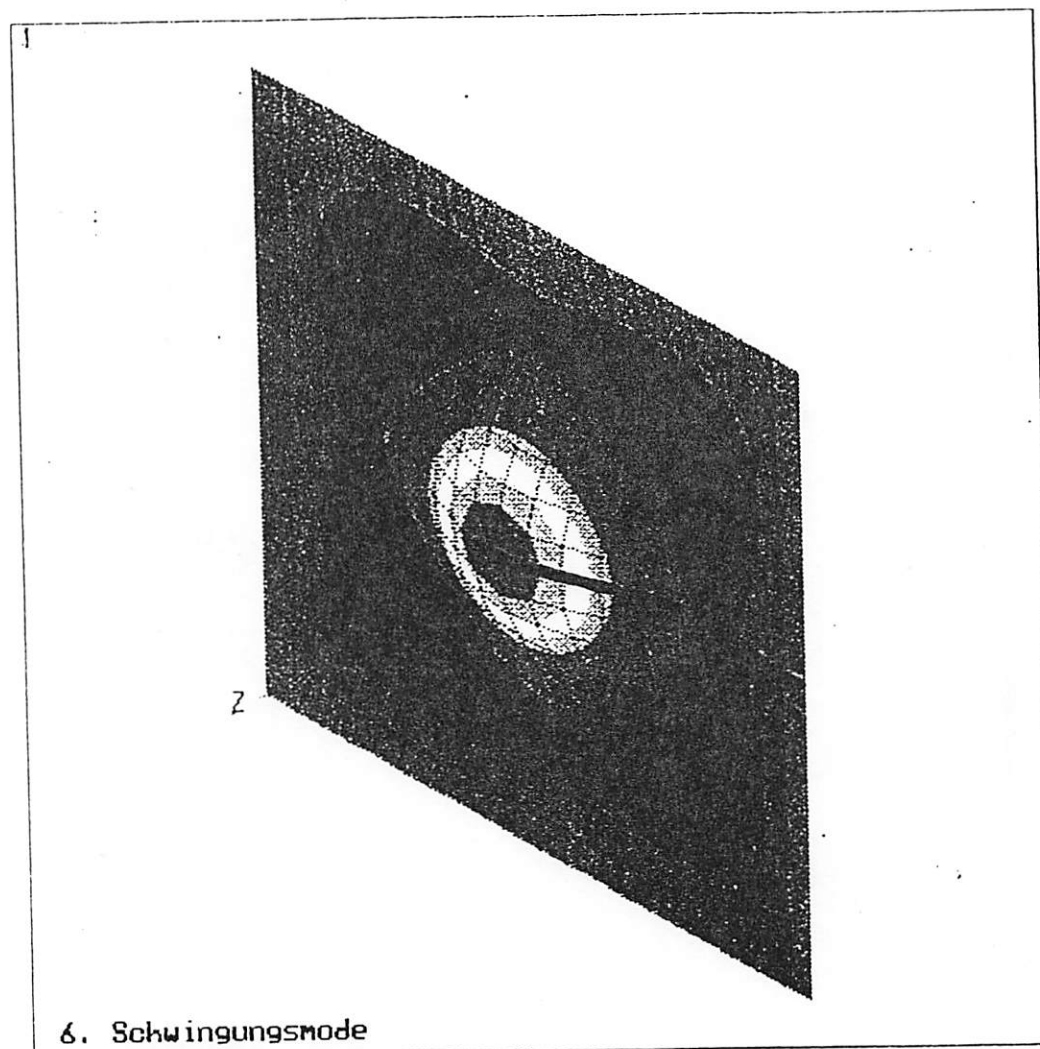
FEM-Simulation HSI-Fabula



ANSYS 4.4  
UNIV VERSION  
MAY 24 1991  
17:40:16  
POST1 STRESS  
STEP=1  
ITER=5  
FREQ=15755  
UZ  
D GLOBAL  
DMX =1  
SMN =-0.993208  
SMX =1  
  
XU =1  
YU =1  
ZU =1  
DIST=6.197  
XF =4.6  
YF =4.6  
  
-0.993208  
-0.77174  
-0.550273  
-0.328805  
-0.107338  
0.11413  
0.335597  
0.557065  
0.778532  
1

14kHz-Mode

FEM-Simulation HSI-Fabula



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  
  
 XV =1  
 YV =1  
 ZV =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

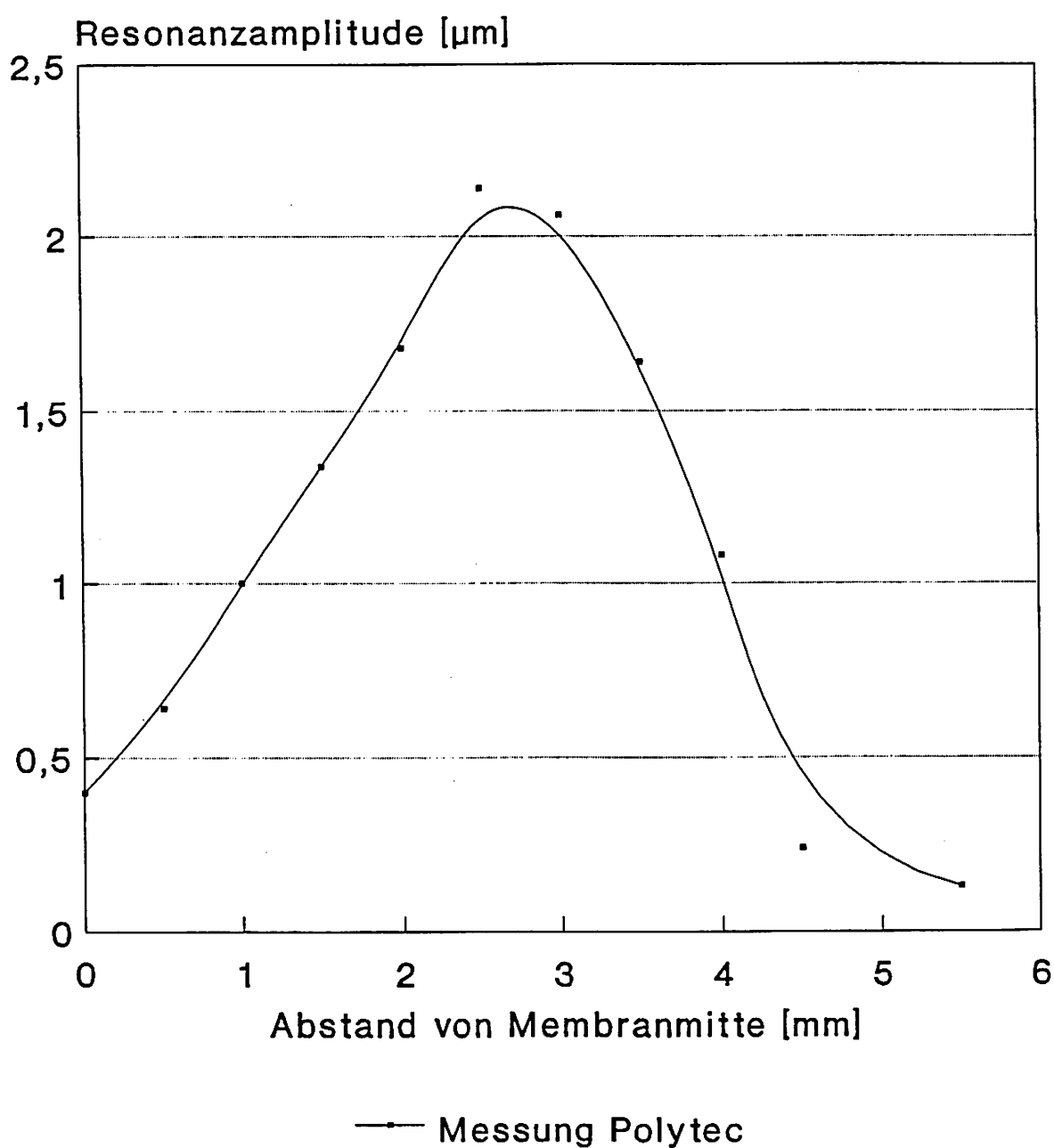
18kHz-Mode

FEM-Simulation HSI-Fabula

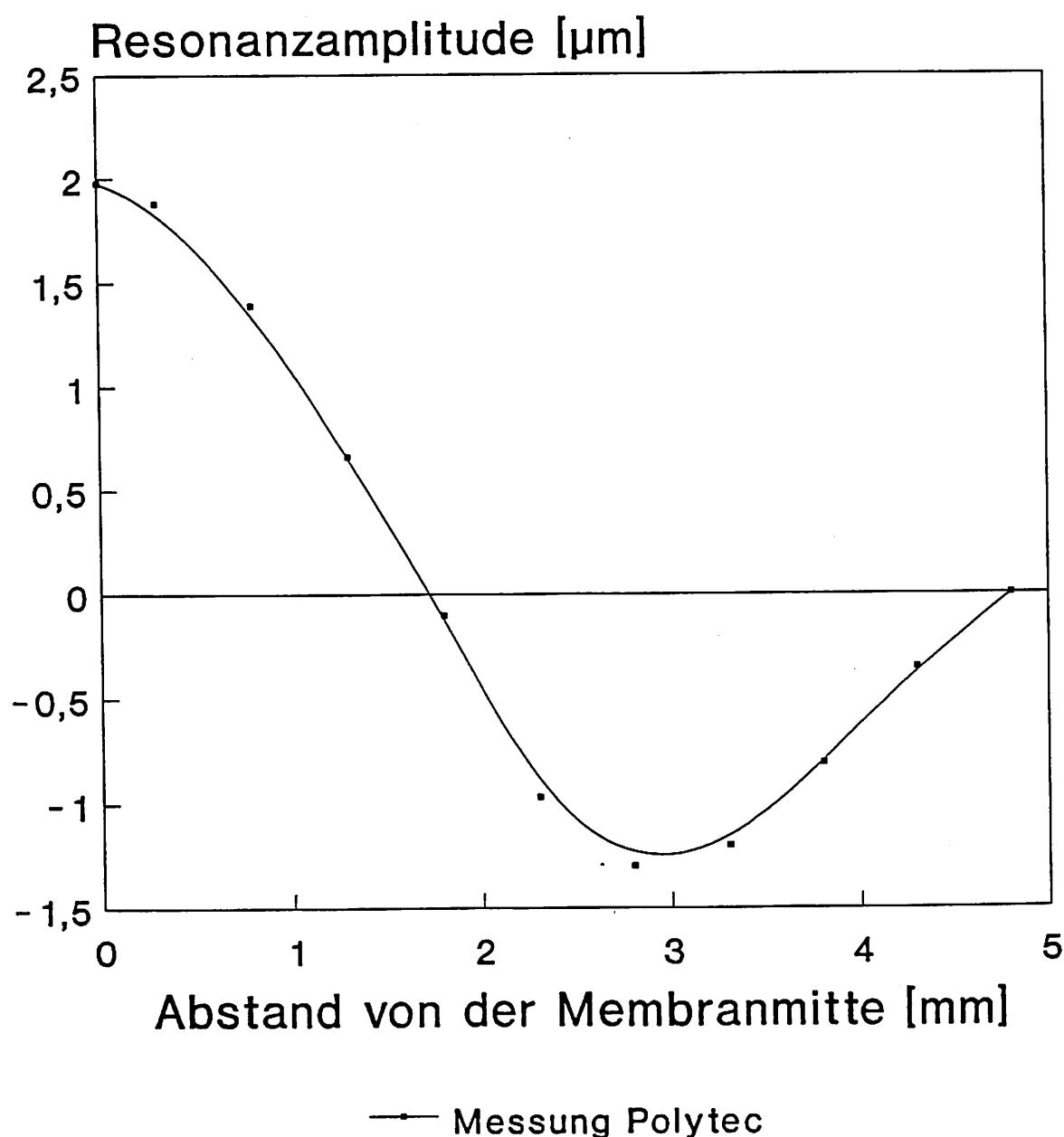


Messung der Resonanzamplitude in  
Abhängigkeit vom Ort

## Identifizierung der 14kHz-Mode

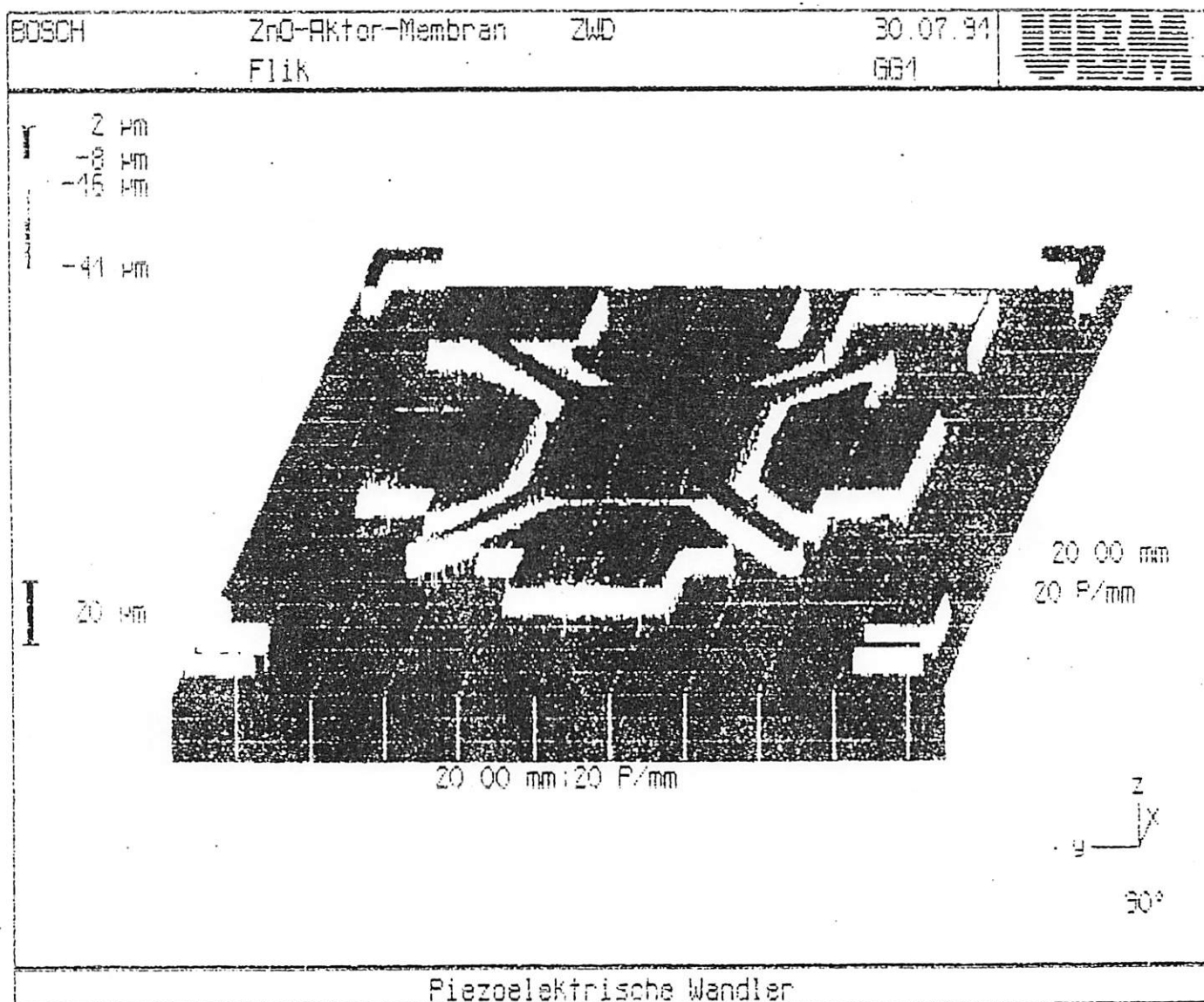
Abbildung 27

Messung der Resonanzamplitude in  
Abhängigkeit vom Ort  
Identifizierung der 18kHz-Mode



Fotolithografisch strukturiertes Zinkoxid mit Aluminium-  
Elektrode auf 50µm dicker Silicium-Membran

### 3D Strukturprofil



**BOSCH**



ZWD

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

August 91  
Tag

Range: 0 dBm

Res BW: 580 Hz

VBW: Off

23-Apr-2000 10:23

Swp Time: 40.14 Sec

A: SWEPT SPECTRUM

Mkr

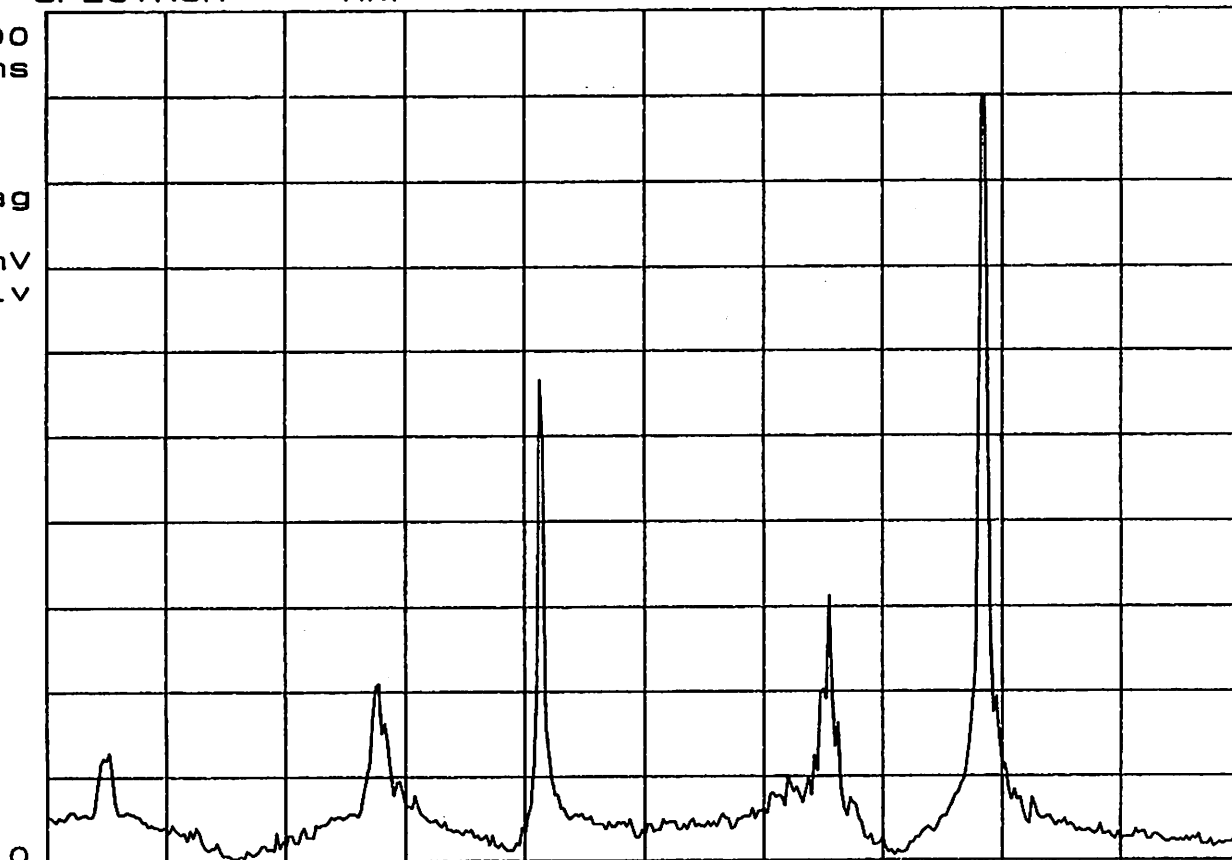
83 500 Hz 180.10 mVrms

200  
mVrms

LinMag

20 mV  
/div

Geschwindig-  
keit der  
Membran  
(Mitte)



Start: 5 000 Hz

Stop: 105 000 Hz

Anregungsfrequenz

Polytec Vibrometer

ZnO Nr. 033 Dot(Si) gegen Dot(ZnO)  
vor Plasmabeschichtung

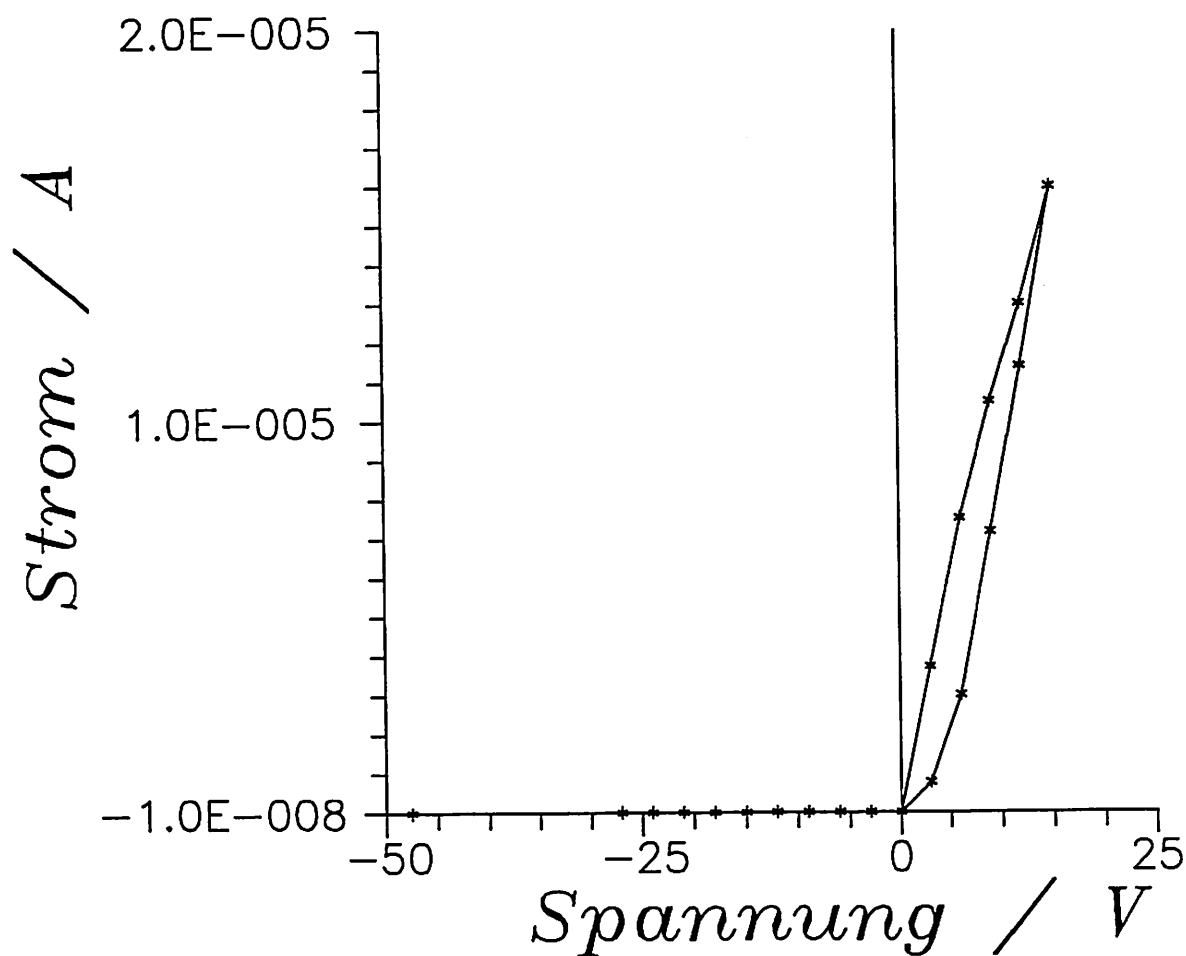


Abbildung 30

ZnO Nr. 033 Dot(Si) gegen Dot(ZnO)  
nach Plasmabeschichtung mit  
200 nm Si-Nitrid (100 C, 10 W RF)

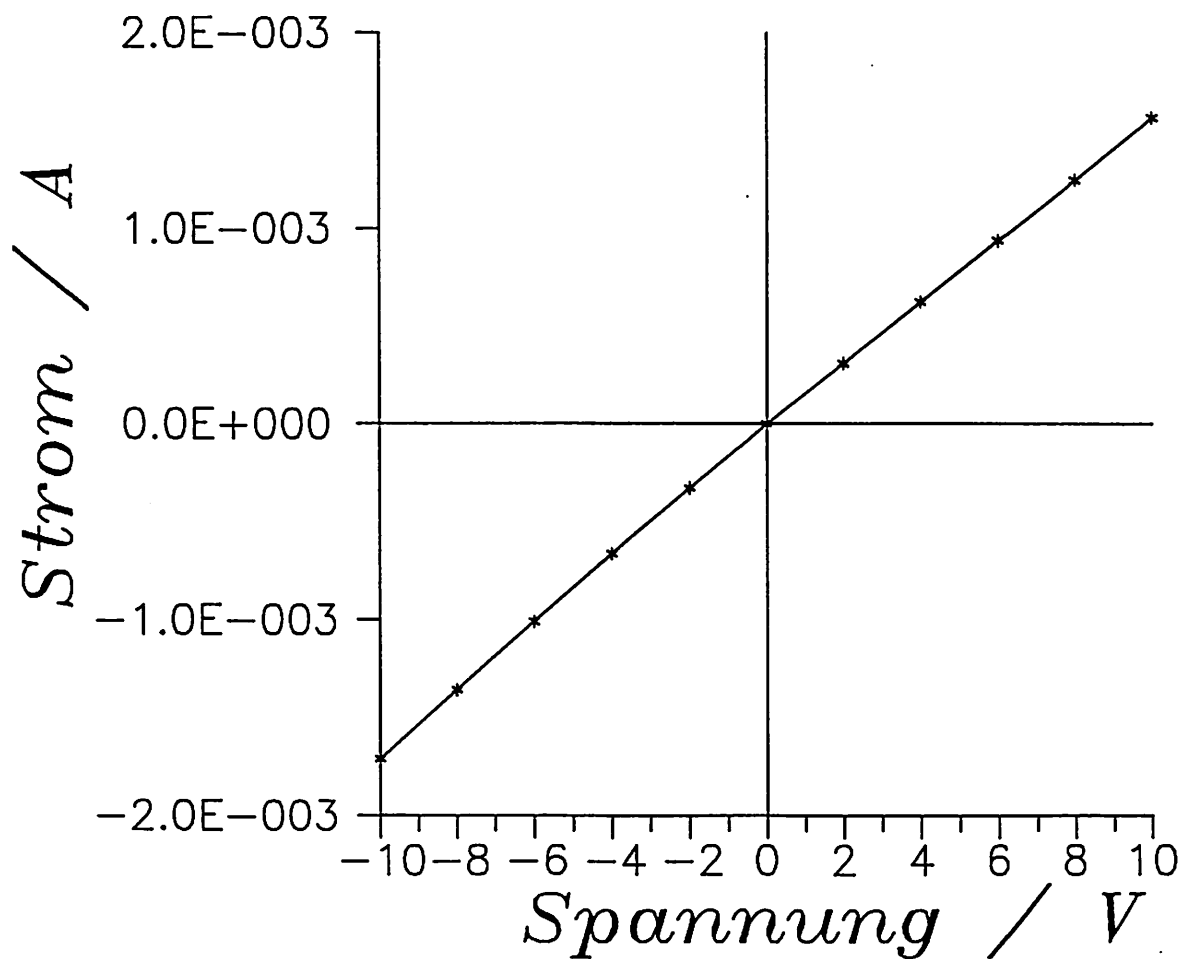
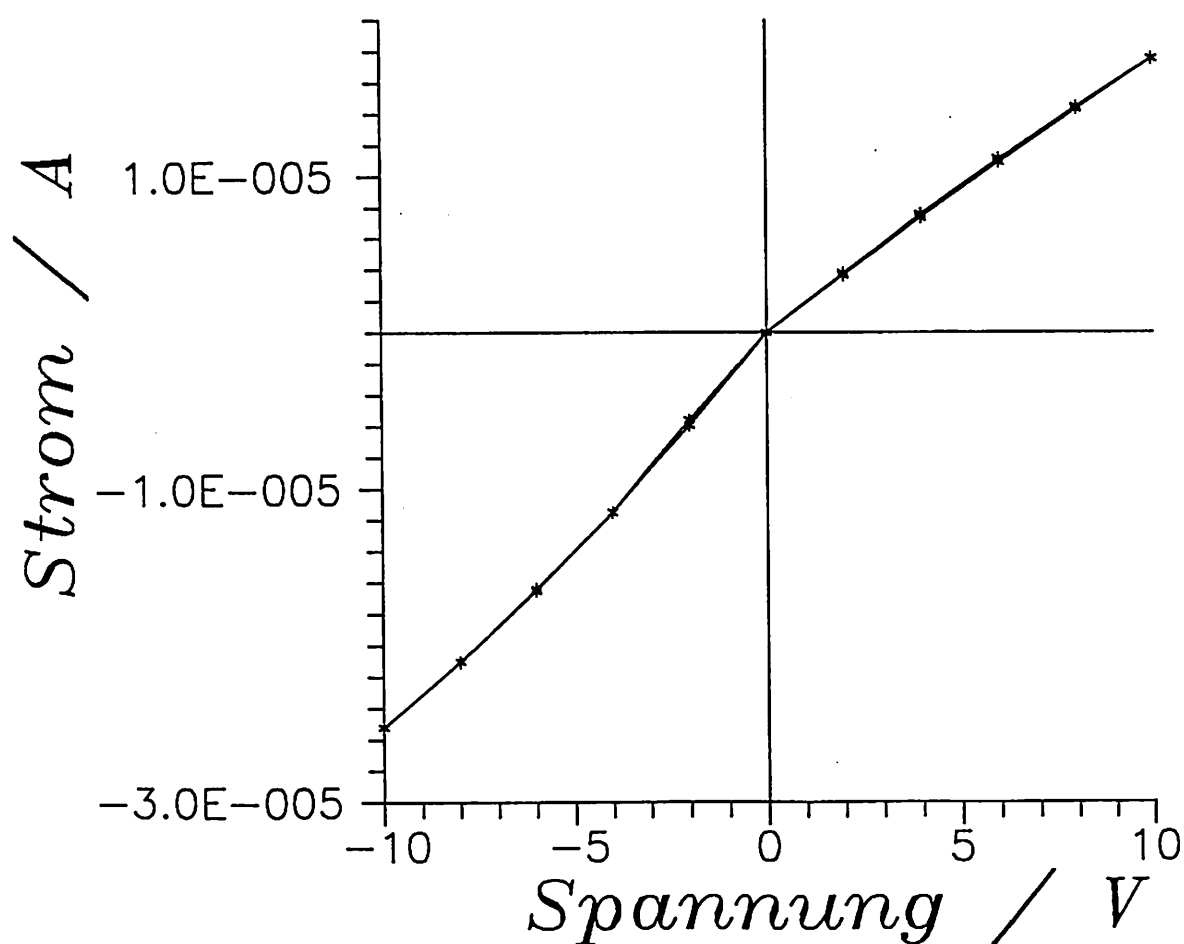


Abbildung 31

ZnO Nr. 033 Dot(Si) gegen Dot(ZnO)  
nach Plasmabeschichtung mit  
1 um Si-Oxid (100 C, 50 W RF)



ZnO Nr. 033 Dot(Si) gegen Dot(ZnO)  
 nach Plasmabeschichtung mit  
 2 um Si-Oxid (100 C, 50 W RF) +  
 200 nm Si-Nitrid (100 C, 10 W RF)

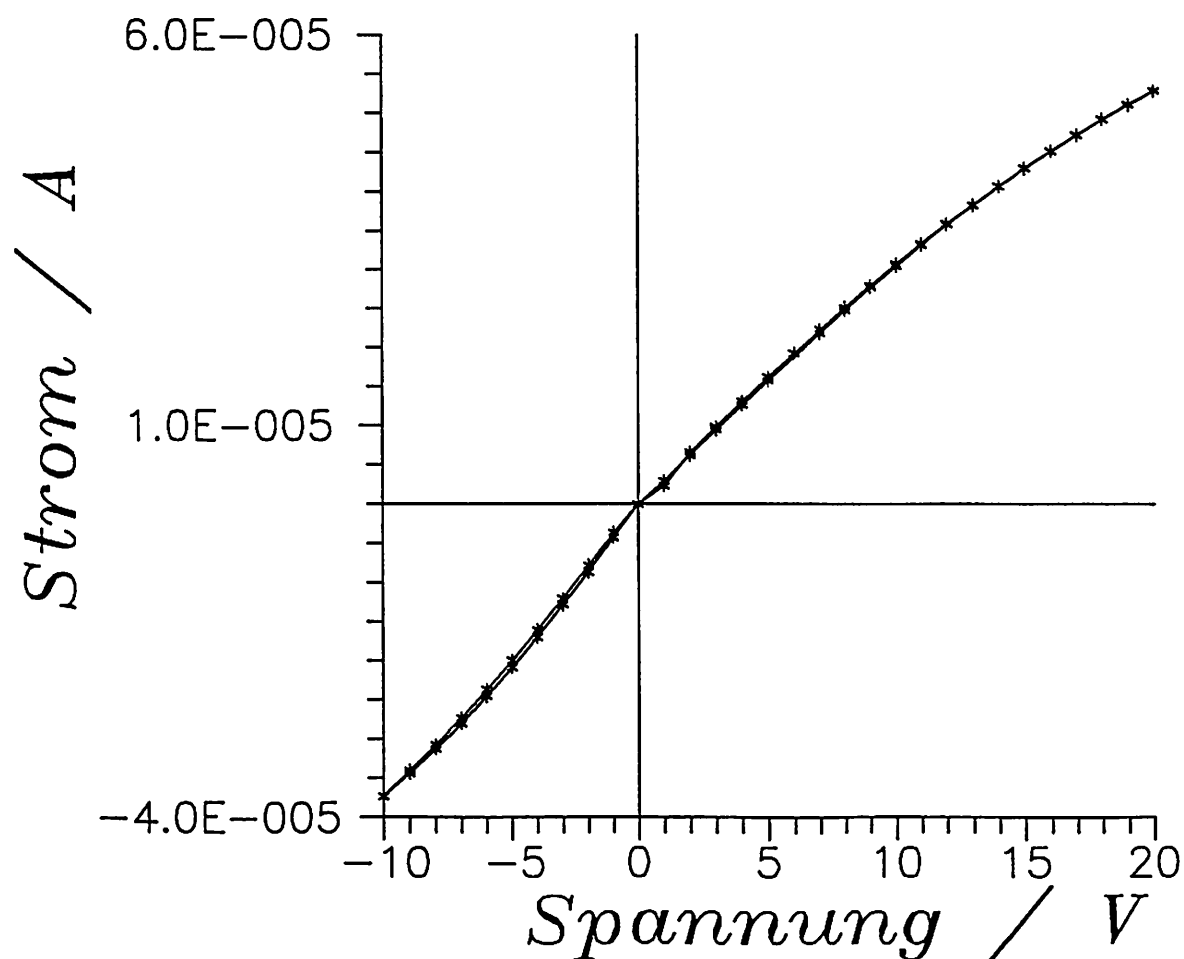


Abbildung 33



- a.) Aufbringen von Passivierschichten (thermisches  $\text{SiO}_2$  und LPCVD- $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) auf Wafervorder- und -rückseite als Maskierung für die Silizium-Mikromechanik. Doppelseitige Photolithographie. Öffnen der Passivierschichten in den Fenstern der Vorder- und Rückseitenmasken (Strukturen auf Rückseite, Justiermarken auf Vorderseite). Photolack entfernen. Anisotropes Naßätzen von beiden Seiten, dabei Einätzen der Justiermarken im Randbereich der Wafervorderseite.
- b.) Strukturieren der Vorderseitenpassivierschichten zur Definition von Bereichen hoher Leitfähigkeit, Dotieren (Bordiffusion) der freigelegten Si-Bereiche, Aufbringen und Strukturieren von piezoelektrischem ZnO auf die Wafervorderseite
- c.) Aufbringen und Strukturieren des Kontaktmaterials (z.B. Aluminium oder Gold); hier kann auch ein lift-off Verfahren angewendet werden.
- d.) Passivierung der Wafervorderseite mit einer ätzbeständigen Maskierschicht (Niedertemperatur-Plasmaoxid und -Plasmanitrid für anisotropes Naßätzen, nur Plasmaoxid oder Photolack, wenn anschließend ein anisotropes Trockenätzverfahren eingesetzt werden soll). Strukturieren der Maske (Definition der Stege, Markieren der Kontaktfenster).
- e.) Freiätzen der Stege im (beidseitigen) Naß- oder (einseitigen) Trockenätzverfahren, Rückätzen der Passivierschicht zum Öffnen der Kontaktfenster

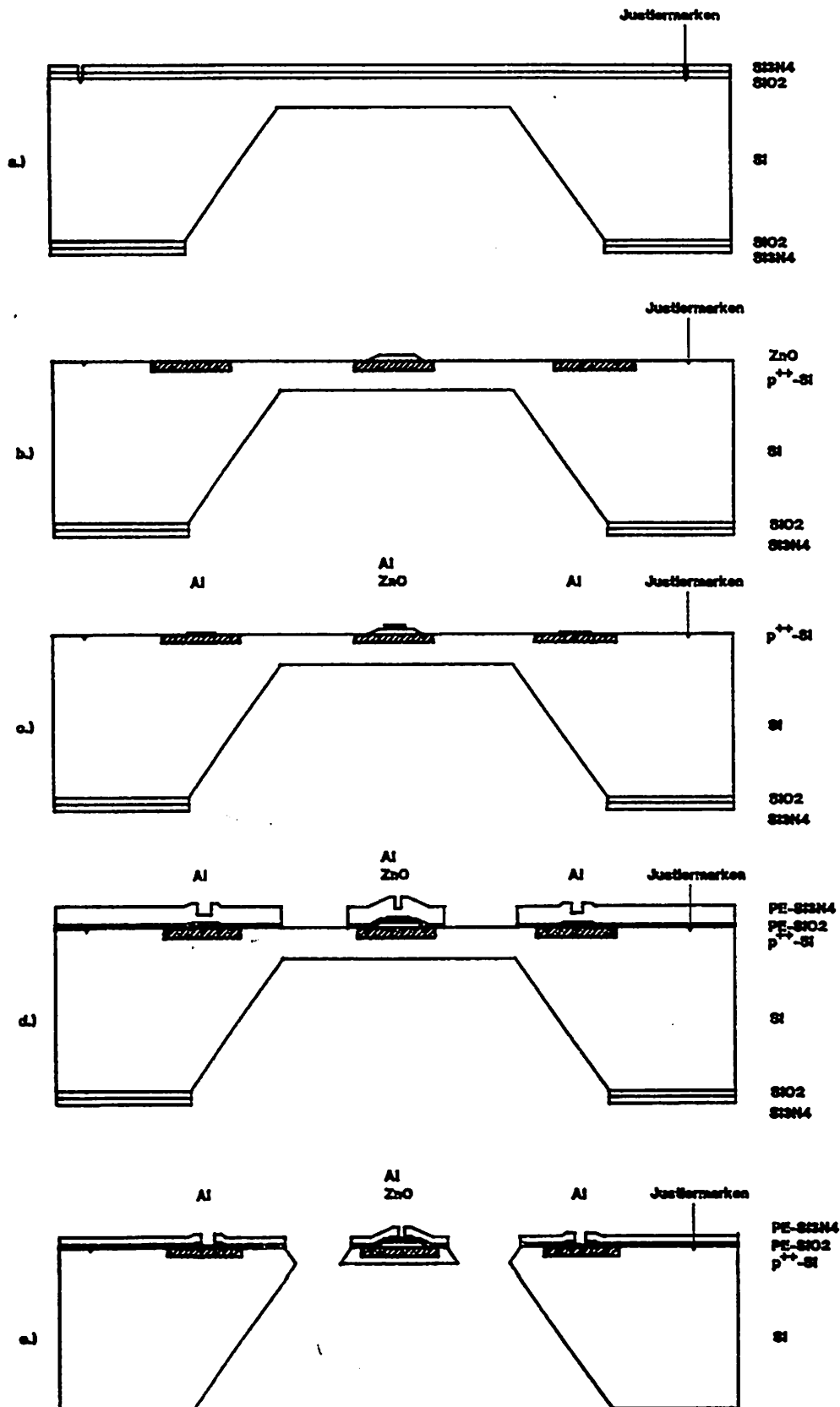


Abbildung 35