

7. Zwischenbericht

zum

BMFT-Verbundprojekt
"Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung
frequenzanaloger Sensoren"

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

Förderkennzeichen: 13 AS 0118

Berichtszeitraum: 01.07.1992 - 31.12.1992

Robert Bosch GmbH
Postfach 10 60 50
7000 Stuttgart 10

Projektleiter: Dr. Gottfried Flik, Dr. Franz Lärmer

Mitarbeit:

Alexandra Böhringer	Günther Meier
Klaus Breitschwerdt	Dr. Roland Müller-Fiedler
Heinz Friedrich	Dr. Michael Offenberg
Karsten Funk	Andrea Schilp
Michael Gundlach	Dr. Jörg Schweikhardt
Klaus Küttner	Siegbert Steinlechner
Nils Kummer	Renate Weise
Harald König	Peter Westhuis

Inhalt

1. Zusammenfassung	2
2. Frequenzanaloge Kraftsensoren	2
2.1 Passivierung von ZnO	2
2.2 Batch-Prozesse zur Herstellung frequenzanaloger Kraftsensoren	2
2.3 Modenselektive Anregungsgeometrie	4
2.4 Geregelte Oscillatorschaltung	4
3. Frequenzanaloge Drucksensoren	5
3.1 Sensordesign und Lage der Resonanzen	5
3.2 Druckabhängigkeit der Resonanzfrequenzen	6
3.3 Aufbau- und Verbindungstechnik	6
3.4 Temperaturkompensation	6

1. Zusammenfassung

Im zurückliegenden Berichtszeitraum wurde die Prozeßentwicklung zur Herstellung frequenzanaloger Kraftsensoren weitgehend abgeschlossen; zwei Prozeßvariationen sind standardmäßig durchführbar, wobei das sogenannte "MIS"-Design besonders vorteilhaft erscheint. Eine Vielzahl von Design besonderen vorteilhaft erscheint. Eine Vielzahl von Designbesonderheiten konnte an den Verbundpartner Bizerba Werke Balingen abgegeben werden, so daß bis Projektende 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.

Die Schichtentwicklung für piezoelektrisches ZnO wurde fortgeführt und das Material weiter verbessert. Mit verbesserten ZnO-Schichten konnte erstmals ein deutlicher Resonanzeffekt im Impedanzverlauf eines Schwingers festgestellt werden. Neben der Charakterisierung der piezoelektrischen Eigenschaften und der piezomechanischen Kopplung wurde auch das Sensorverhalten als Funktion von Druck, Lastwechseln, Packaging, Temperatur und Temperaturwechseln untersucht. Durch anodisches Bonden der Drucksensorchips auf Pyrexglas konnten Kriecheffekte weitgehend beseitigt werden. Ansätze zur Temperaturkompensation frequenzanaloger Sensoren mit ZnO-Antrieb wurden erarbeitet.

2. Frequenzanaloge Kraftsensoren

2.1 Passivierung von ZnO

Abbildung 1 zeigt eine Zusammenstellung gebräuchlicher Passivierschichten und deren Passivierungseigenschaften gegenüber ZnO. Es wurde einmal die Beeinflussung der elektrischen Eigenschaften des ZnO durch den Schichtabscheideprozeß untersucht, zum anderen die Schichthaftung und Beständigkeit in heißer Kalilauge, was ein sehr hartes Beurteilungskriterium darstellt.

Ein spezielles Niedertemperatur-Plasmaoxid kann ohne ZnO-Schädigung aufgebracht werden; Plasma-Nitridschichten führen aufgrund des wasserstoffreichen Plasmas zu einem elektrischen Ausfall des ZnO. Eine Kombination aus Plasmaoxid und darüber abgeschiedenem Plasmanitrid erweist sich als über mehrere Stunden in heißer KOH beständig, wobei keine Pinholes beobachtet werden.

Direkt auf ZnO gesputterte Schichten zeigen Haftungsschwierigkeiten; günstig erscheint eine Kombination von Plasmaoxid und darüber gesputtertem Nitrid.

2.2 Batch-Prozesse zur Herstellung frequenzanaloger Kraftsensoren

In Abbildung 2 ist nochmals die zu realisierende Sensorstruktur schematisiert: Aus einem Siliciumwafer werden dünne, beidseitig eingespannte Biegebalken herausgeätzt, die die kraftempfindlichen Resonatorelemente darstellen.

Für den Resonatorantrieb sorgen piezoelektrische Felder (ZnO-Bereiche) mit Metallisierung; die ebenfalls erforderliche Passivierung ist in der Skizze weggelassen. Durch in Längsrichtung eingeleitete Zug- oder Druckkräfte, die sich zwischen dünnem Resonatorelement und den ungedünnten Siliciumstegen zu beiden Seiten ("Shunts") aufteilen, wird die Resonanzfrequenz entsprechend bestimmt.

Abbildung 3 zeigt einen Batch-Prozeß zur Herstellung von Sensoren, deren Schichtaufbau im Bereich des piezoelektrischen ZnO einer MIS-Struktur (Metall-Insulator-Semiconductor) entspricht.

Ein Siliciumwafer wird thermisch oxidiert (50 nm) und beidseitig mit LPCVD-Nitrid (140 nm) beschichtet. Anschließend werden in einem doppelseitigen Fotolithographieprozeß beidseitig Fenster in der Passivierschicht geöffnet: In den Fenstern der Vorderseite erfolgt eine p-Dotierung (10^{19} cm^{-3} Bor über 5 µm Dotierungstiefe) und anschließende Reoxidation mit 2 µm dickem thermischen Oxid, die Rückseitenfenster definieren die durch Naßätzen zu erzeugenden Membranen. Da die Wafervorderseite in diesem Prozeßstadium ganzflächig durch Oxid bzw. durch Nitrid/Oxid geschützt ist, kann das naßchemische Ätzen der Membranen in heißer KOH unmittelbar anschließend erfolgen oder alternativ nach kompletter Vorderseitenprozessierung (vor dem Plasmatrenchprozeß) in einer Ätzdose.

Im folgenden werden nacheinander das Vorderseitenoxid strukturiert (Fenster öffnen), ZnO, Plasmapassivierung und Metallisierung aufgebracht und jeweils strukturiert und im letzten Schritt in einem Plasmatrenchprozeß die Biegebalken erzeugt. Dabei wird das PIE-Hochratenätzverfahren (Abbildung 4) eingesetzt, das anisotropes Silicium-Ätzen mit hoher Selektivität gegenüber z.B. einer Photoresistmaske erlaubt.

Wird wie skizziert eine Aluminiummetallisierung verwendet, sollte diese mit einer weiteren Nitritschicht gegen Überweltseinflüssen passiviert werden.

Verwendet man anstelle der angegebenen Aluminiummetallisierung eine KOH-beständige Metallisierung von WTi/Au oder Cr/Au, kann dieser letzte Schritt der Herstellung von Biegebalken aus der komplett prozessierten Membran auch durch beidseitiges Naßätzen in heißer KOH erfolgen.

Beide Alternativen wurden realisiert und führten zu funktionsfähigen Sensoren, wie anhand der GainPhase-Kurve in Abbildung 5 zu erkennen ist. Die MIS-Strukturen zeigen sich den "klassischen" Designs nach Abbildung 6 überlegen hinsichtlich der Größe der GainPhase-Signale; darüberhinaus wird bei höheren Temperaturen bis 450°C eine Aluminiumdiffusion ins ZnO (=>elektrischer Ausfall der ZnO-Schicht !) verhindert.

Abbildung 7 zeigt einen komplett prozessierten Wafer mit 23 Sensorstrukturen nach "klassischem" Design; die Strukturen werden durch Schneiden entlang ihrer kurzen Seite vereinzelt.

Abbildung 8 zeigt REM-Aufnahmen eines einzelnen Sensors im Bereich des Biegebalkens für drei verschiedene Ver-

größerungen. Man erkennt deutlich die glatten Seitenwände der Resonatorstrukturen.

In Abbildung 9 sind GainPhase-Kurven eines in einen Bi-zerba-Hebellenker applizierten Kraftsensors unbelastet und unter 1 kg Last dargestellt; die der Last von 1 kg entsprechende Kraft von 10 N wird um einen Faktor 5 auf den Sensor untersetzt. Es ergibt sich eine Verschiebung der Grundresonanzfrequenz von etwa 22 kHz auf etwa 24 kHz (entspricht etwa 1 kHz/N Sensorempfindlichkeit).

2.3 Modenselektive Anregungsgeometrie

Abbildung 10 zeigt verbesserte modenselektive Anregungs- und Abtastgeometrien und ein mögliches Oscillatorkonzept: durch die Anpassung der piezoelektrisch induzierten Spannungsverteilung auf dem Biegebalken an eine bestimmte Schwingungsmodus wird diese gegenüber anderen Moden begünstigt, also Modenselektivität erreicht. Durch komplementären bipolaren Sensorantrieb und Differenzauswertung zweier Aufnehmerfelder sollte das Übersprechen vom Antrieb zum Aufnehmer reduziert werden (Verminderung von Spannungsabfällen im Substrat durch komplementäre Ströme, Elimination der Substratspannung an den Aufnehmerfeldern durch Differenzbildung). Abbildungen 11, 12 und 13 zeigen das Öffnen der Fenster im Oxid, Aufbringen und Strukturieren des ZnO sowie der Metallisierung.

Abbildungen 14 und 15 zeigen GainPhase-Kurven eines typischen mit dieser Geometrie realisierten Sensors für verschiedene Kombinationen von Antriebs- und Aufnehmerelektrode: die Sensoren sind voll funktionsfähig und zeigen hohe Resonanzeffekte (ca +/- 20 dB). Modenselektivität entsprechend der gewählten Antriebsgeometrie lässt sich nachweisen. Die ebenfalls angestrebte Reduktion des Über- sprechens (ca -50 dB) durch Differenzbildung lässt sich dagegen nicht erreichen: da das Übersprechsignal für verschiedene Elektrodenpaarungen unterschiedlich ausfällt, ist das Differenzsignal nicht wesentlich untergrundfreier als die Ausgangssignale. Im gewählten Beispiel liegen die Übersprechsignale bei -49 dB, -47 dB, -51 dB und -50 dB. Im ungünstigsten Fall ergibt sich eine Differenz aus -47 dB und -51 dB, also ein Wert von -56 dB.

2.4 Geregelte Oscillatorschaltung

Abbildung 16 zeigt eine verbesserte elektronische Schaltung zur Sensorentdämpfung, die 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 wählbarer Ausgangsamplitude, wobei auch lastabhängige Änderungen der Resonanzüberhöhung in der Gain-Phase-Charakteristik des Sensors ausgeglichen werden. Der eigentliche Rückkopplungskreis besteht aus einem geregelten Aufholverstärker und einem einstellbaren Phasenschieber, die Regelstufe wird gebildet aus linearer Gleichrichtung (Elimination der Diodenflußspannung) und Tiefpassfilter. Das Stellelement ist ein MOS-FET vom Anreicherungstyp. In der Praxis werden die Sensoren mit einer Oscillatorausgangsspannung von nur 100 mV stabil betrieben, so daß die elektrische Belastung des ZnO-Antriebsfelds sehr klein bleibt.

3. Frequenzanaloge Drucksensoren

3.1 Sensordesign und Lage der Resonanzen

In Abbildung 17 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.

Abbildung 18 zeigt das mit einem Polytec Vibrometer optisch ermittelte Schwingungsspektrum einer solchen Sensorsmembran; aufgetragen ist hier die Geschwindigkeit der Membranmitte über der Anregungsfrequenz.

Eine nach diesem Verfahren ermittelte Amplitudenverteilung über der Membranfläche zeigt Abbildung 19 für die 48 kHz-Mode; Abbildung 20 gibt das Ergebnis einer entsprechenden FEM-Simulationsrechnung wieder, die die Zuordnung dieser Resonanz zum 6. Schwingungsmodus erlaubt.

Abbildung 21 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 Membrantrieb 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 Abbildung 22 anhand einer FEM-berechneten Amplitudenverteilung erläutert: die gegenüberliegenden Aufnehmerelektroden stehen bei dieser Mode gerade unter entgegengesetzten mechanischen Spannungen, so daß sich die generierten Piezospannungen aufheben.

Abbildung 23 zeigt GainPhase-Kurven einer Membran, wobei aus der Lage von Serien- und Parallelresonanz der effektive Kopplungsfaktor k_{eff} des piezoelektrischen ZnO zu 0.31 bestimmt werden konnte.

Abbildung 24 zeigt den Zusammenhang zwischen abgegriffener Piezospnung und Antriebsspannung im Membrangrundmode für zwei verschiedene Elektrodenkombinationen.

In Abbildung 25 ist eine Si-Zunge mit einer MIS-Struktur von ZnO, plasmaabgeschiedenem Dielektrikum und Al-Metallisierung skizziert; an dieser Struktur konnte erstmals ein deutlicher Effekt im Impedanz-/Phasenverlauf (Abbildung 26) nachgewiesen werden. Damit besteht eventuell die Möglichkeit einer Schwingungsentdämpfung durch eine Impedanzkontrollierte Oscillatorschaltung, die das Impedanzminimum oder -maximum ausnutzt entsprechend einem Serien- oder Parallelresonanzoscillator in Analogie zur Quartztechnik..

Abbildung 27 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 Abbildung 28 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 Abbildung 29 als Funktion der Sputterraten mit dem Scharparameter Abscheidetemperatur aufgetragen; gerade bei sehr hohen Sputterraten wird der Literaturwert weit übertroffen.

Abbildung 30 zeigt die Membrandurchbiegung infolge der mechanischen Spannung 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" dort also nicht überschritten wird.

3.2 Druckabhängigkeit der Resonanzfrequenzen

Die Abbildungen 31 und 32 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 steil an.

In den Abbildungen 33 und 34 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.

3.3 Aufbau- und Verbindungstechnik

Die Resonanzfrequenz eines aufgeklebten und eines anodisch gebondeten Sensors ist in Abbildung 35 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 gebundenen Sensor kein eindeutig nachweisbarer Kriecheffekt auf, einer der bekannten Vorteile dieser Verbindungstechnik ohne Klebematerialien.

3.4 Temperaturkompensation

In Abbildung 36 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 temperaturabhängigen Spannungen führen, hat auch das Layout der ZnO-Antriebsfelder und der Elektrodengeometrie Einfluß auf das Temperaturverhalten des Sensors.

Die Abbildungen 37 und 38 zeigen für eine ebene und eine "gebuckelte" Membran den Temperaturverlauf einer Resonanzfrequenz. In Abbildung 39 werden zwei verschiedene Elektrodenlayouts unter diesem Gesichtspunkt miteinander verglichen. Man erkennt, daß durch geeignete Elektrodenstrukturierung eine weitgehende Temperaturkompensation des Sensors möglich ist.

In Abbildung 40 ist die Nullpunktsdrift als Funktion der Anzahl der Temperaturwechsel ($\Delta T = 50K$) aufgetragen; eine systematische Drift ist nicht eindeutig auszumachen.

15.11.93

F. Künne



Passivierung von Zinkoxid

	Plasmaoxid	Plasmanitrid	Pl.oxid+Pl.nitrid	Sputteroxid	Sputternitrid
Prozeß: T RF	200°C 10 W SiH ₄ /N ₂ O	200°C 10 W SiH ₄ /NH ₃	200°C 10 W SiH ₄ /N ₂ O SiH ₄ /NH ₃	150°C 500 W Ar-Sputtern Quarztarget	150°C 500 W reaktives Ar-/ N ₂ -Sputtern Si
Veränderung in Rel von ZnO + Al	neutral durch hohen N ₂ O- Überschuß	fatal (H ₂ -Gehalt !)	neutral, da ZnO durch SiO vor H geschützt	Verschlechte- rung in Rel ca Faktor 30	Verschlechte- rung in Rel um ca Faktor 5
Ätzrate KOH (40%, 60°C)	50 nm/h	130 nm/h	130 nm/h	40 nm/h	0 nm/h
Haftung auf ZnO in KOH	sehr gut, Pinhole- Bildung	sehr gut, keine Pinholes	sehr gut, keine Pinholes	schlecht (< 15')	schlecht (<25')

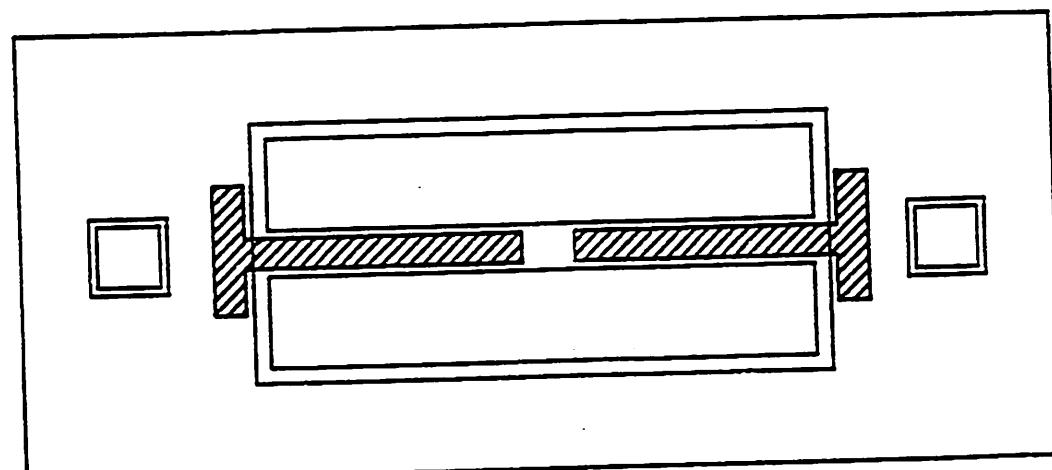
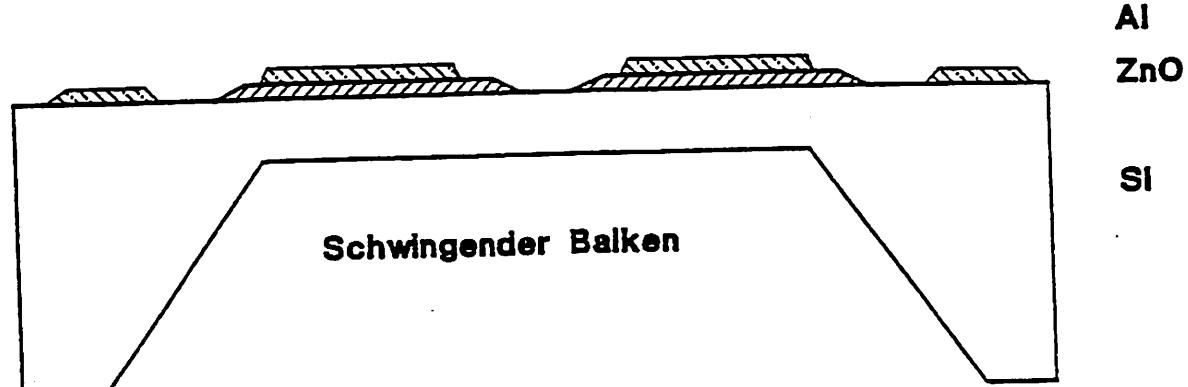
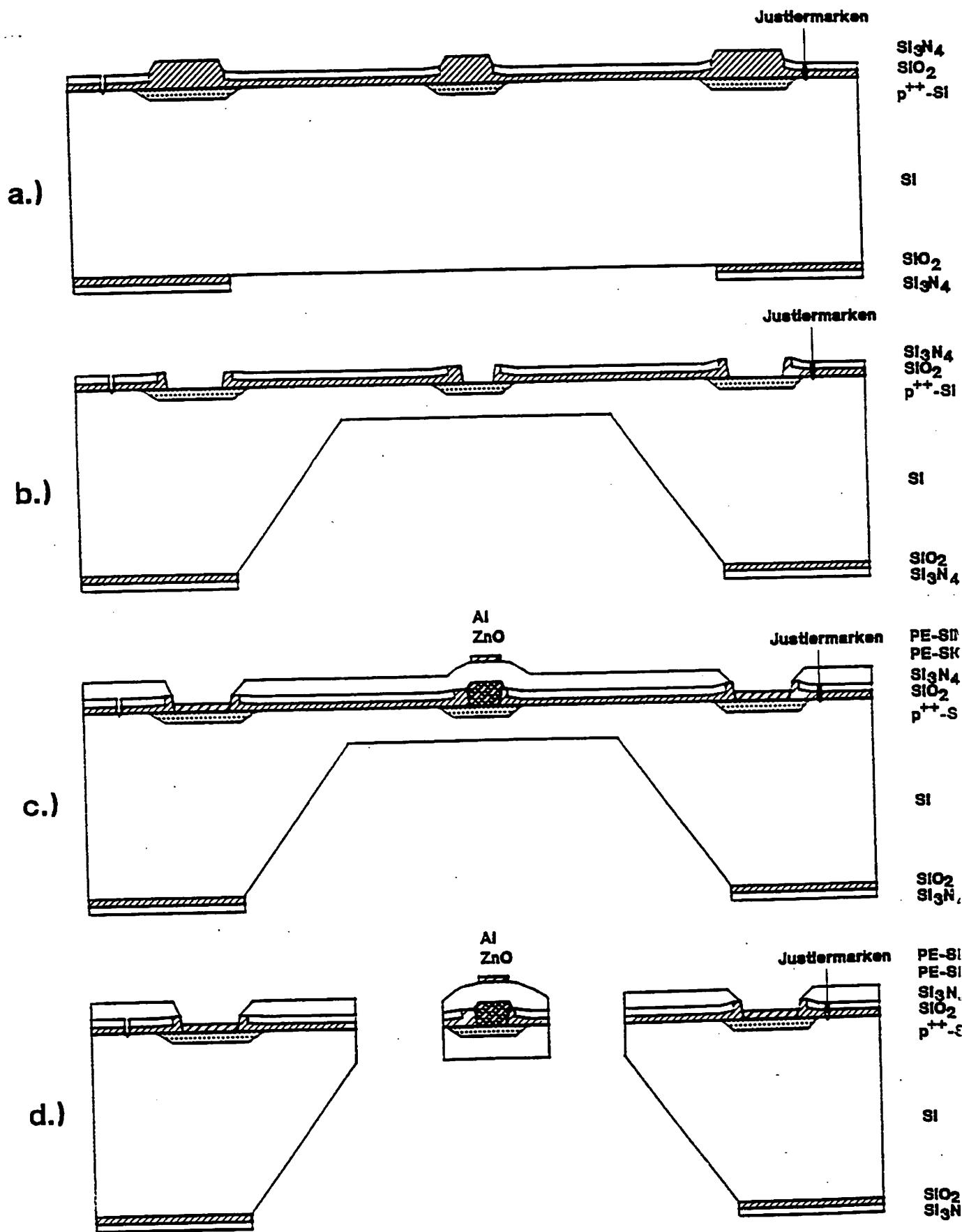
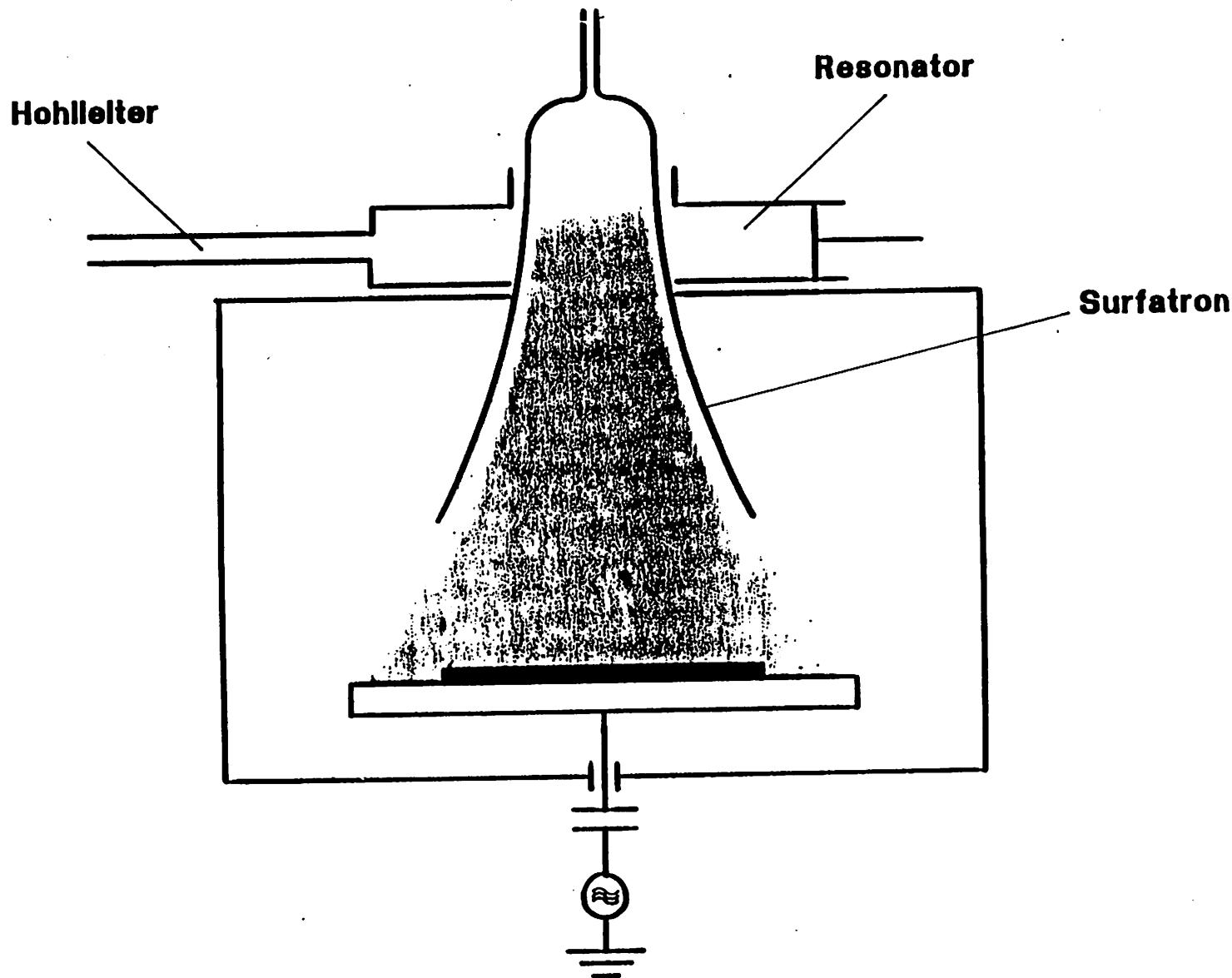
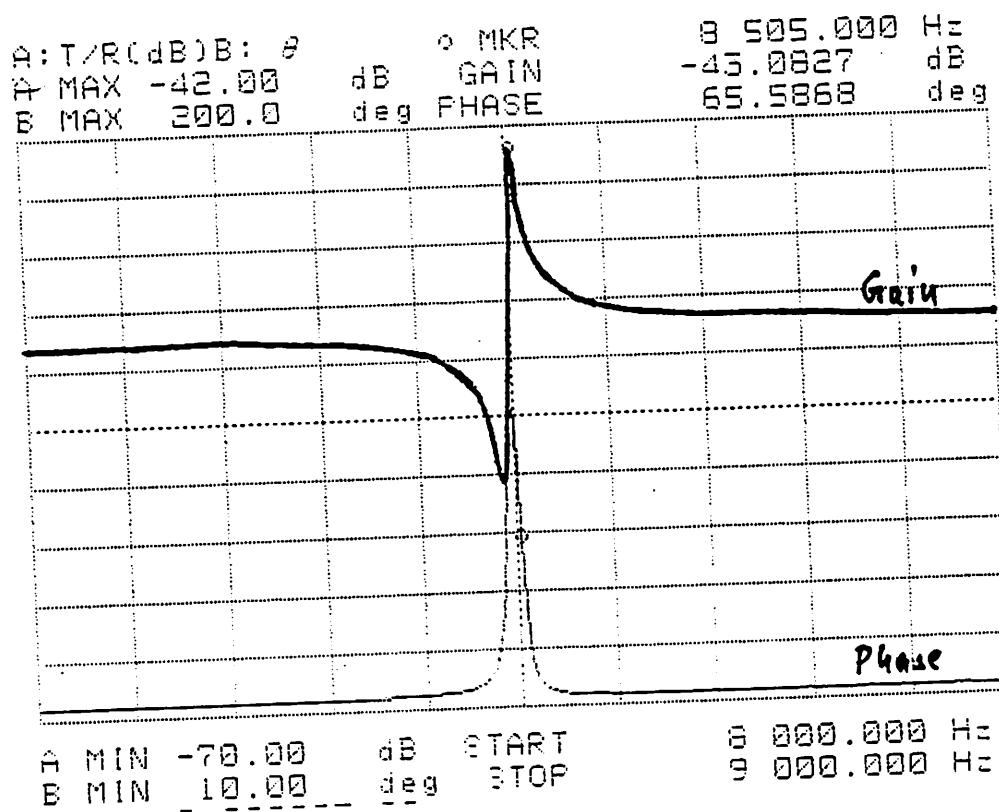
**Querschnitt und Draufsicht**

Abb. 2

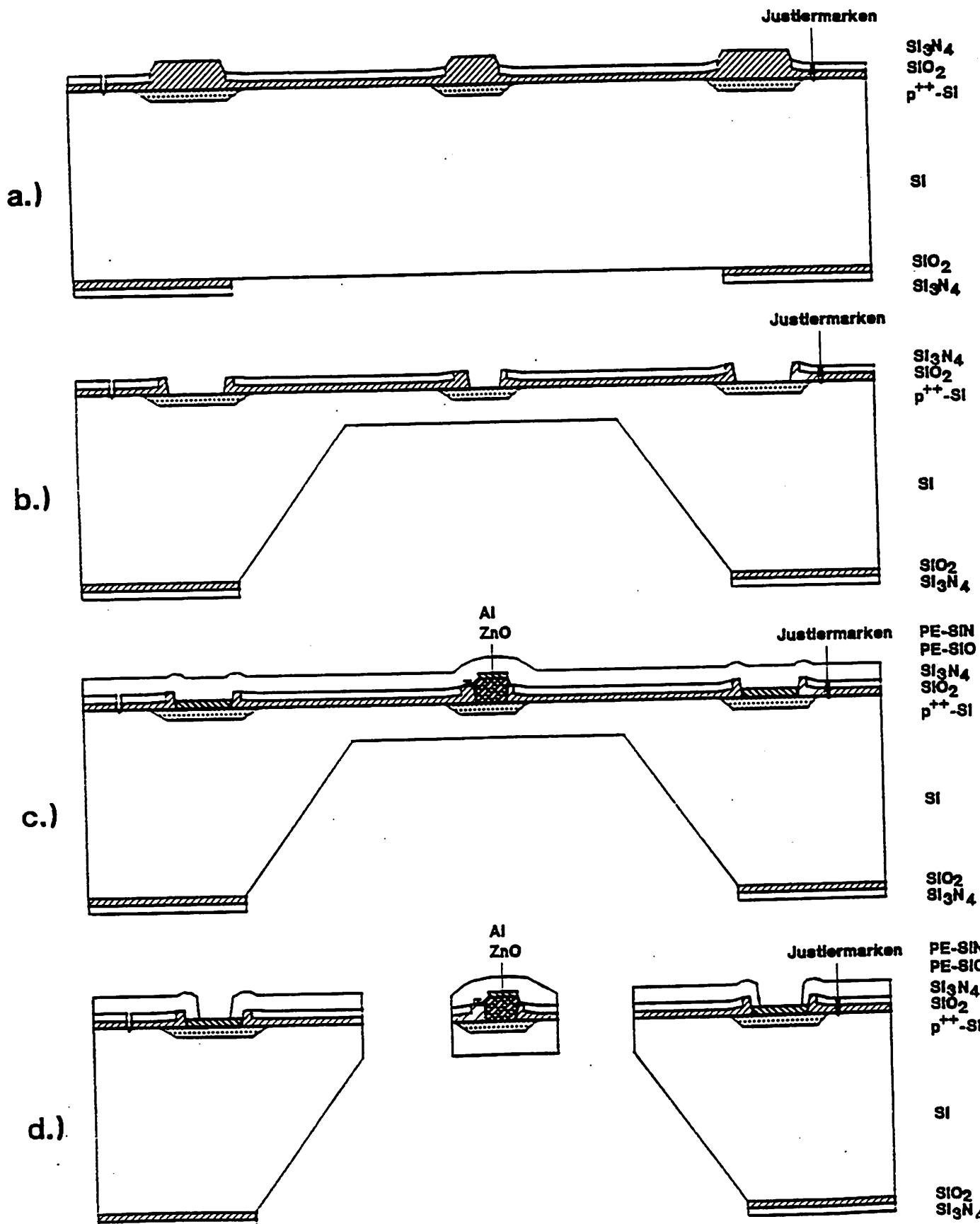


A66,3

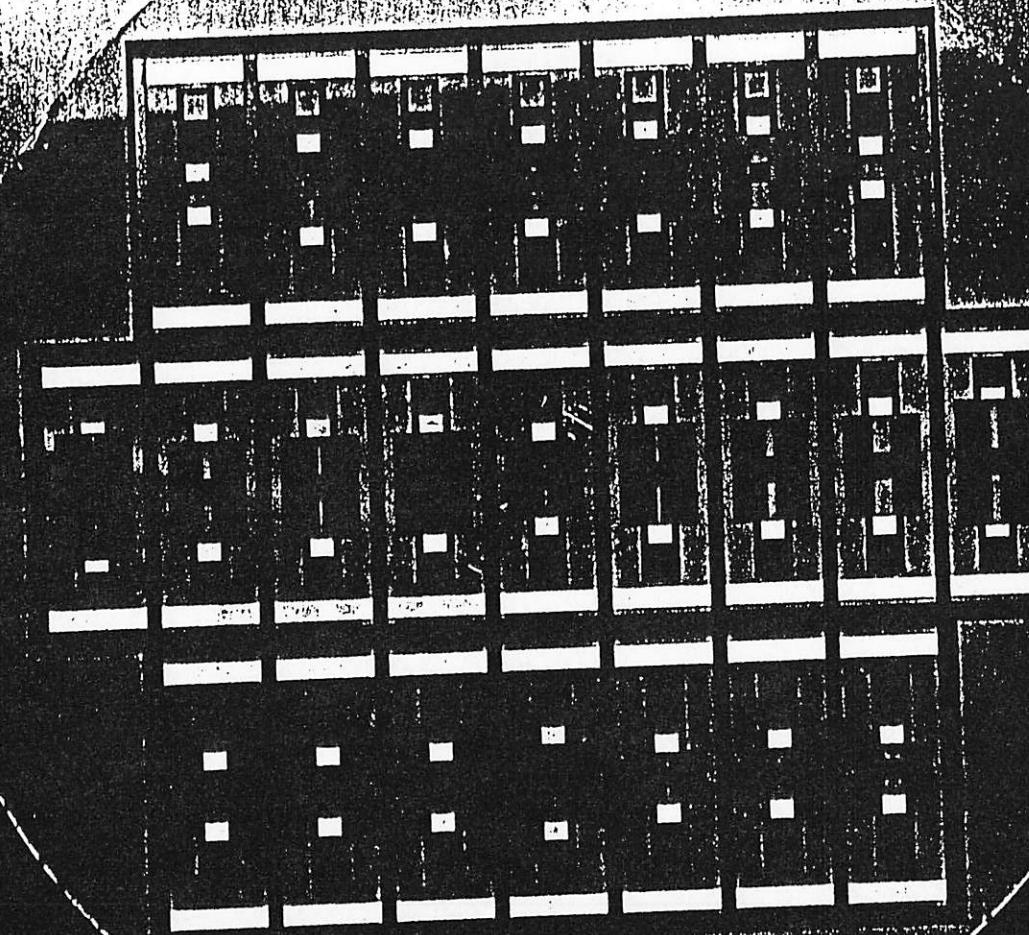




ZnO_149: "klassisches" Elektrodendesign
 FAS4_5 mit Au/WTi auf SiN/SiO₂-Passivierschichtfolge über ZnO auf p++-Silicium



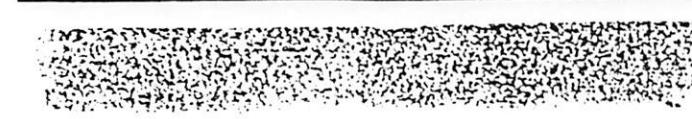
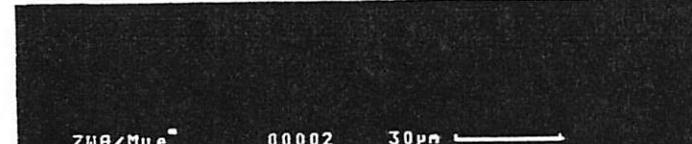
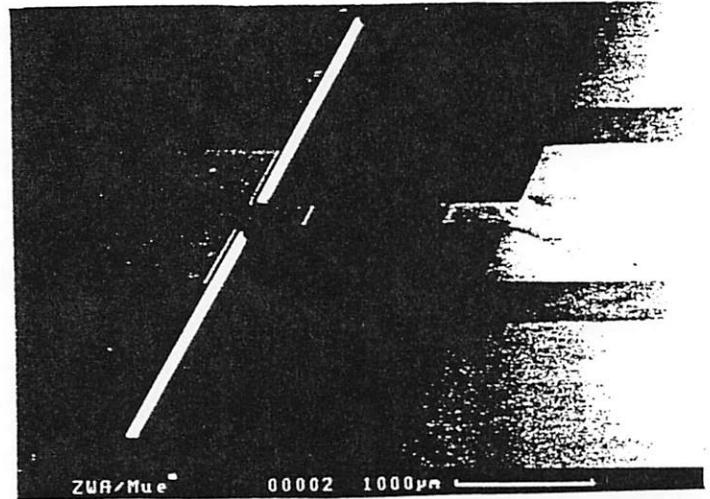
466.7





Frequenzanaloge Kraftsensorstrukturen

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



BOSCH

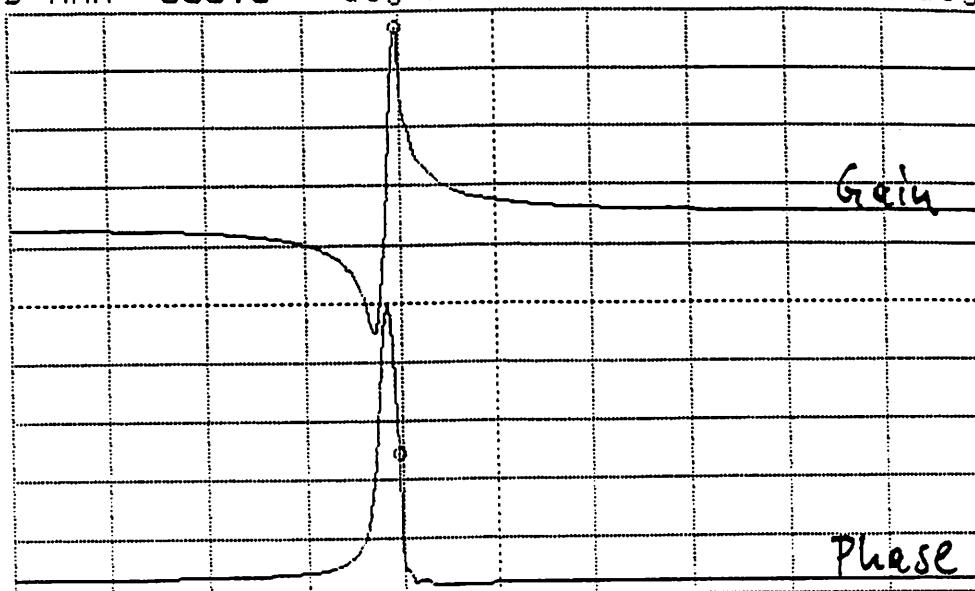
zWD

**Bizerba - Hebellenkett
Kraffunterstützung 5:1**

07/92

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

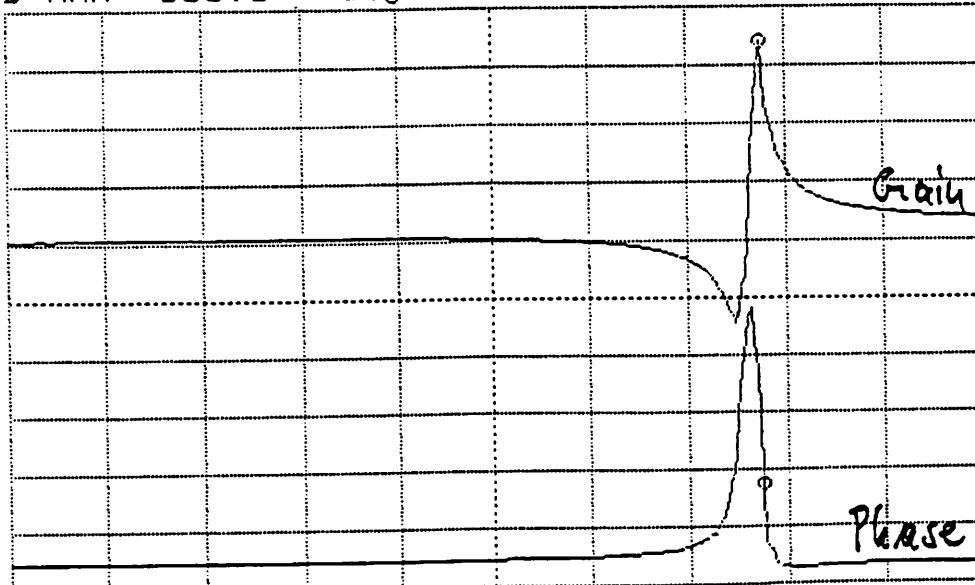
un-
belastet



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

A:T/R(dB)B: θ o MKR 23 875.000 Hz
 A MAX -30.00 dB GAIN -32.5815 dB
 B MAX 300.0 deg PHASE 69.3845 deg

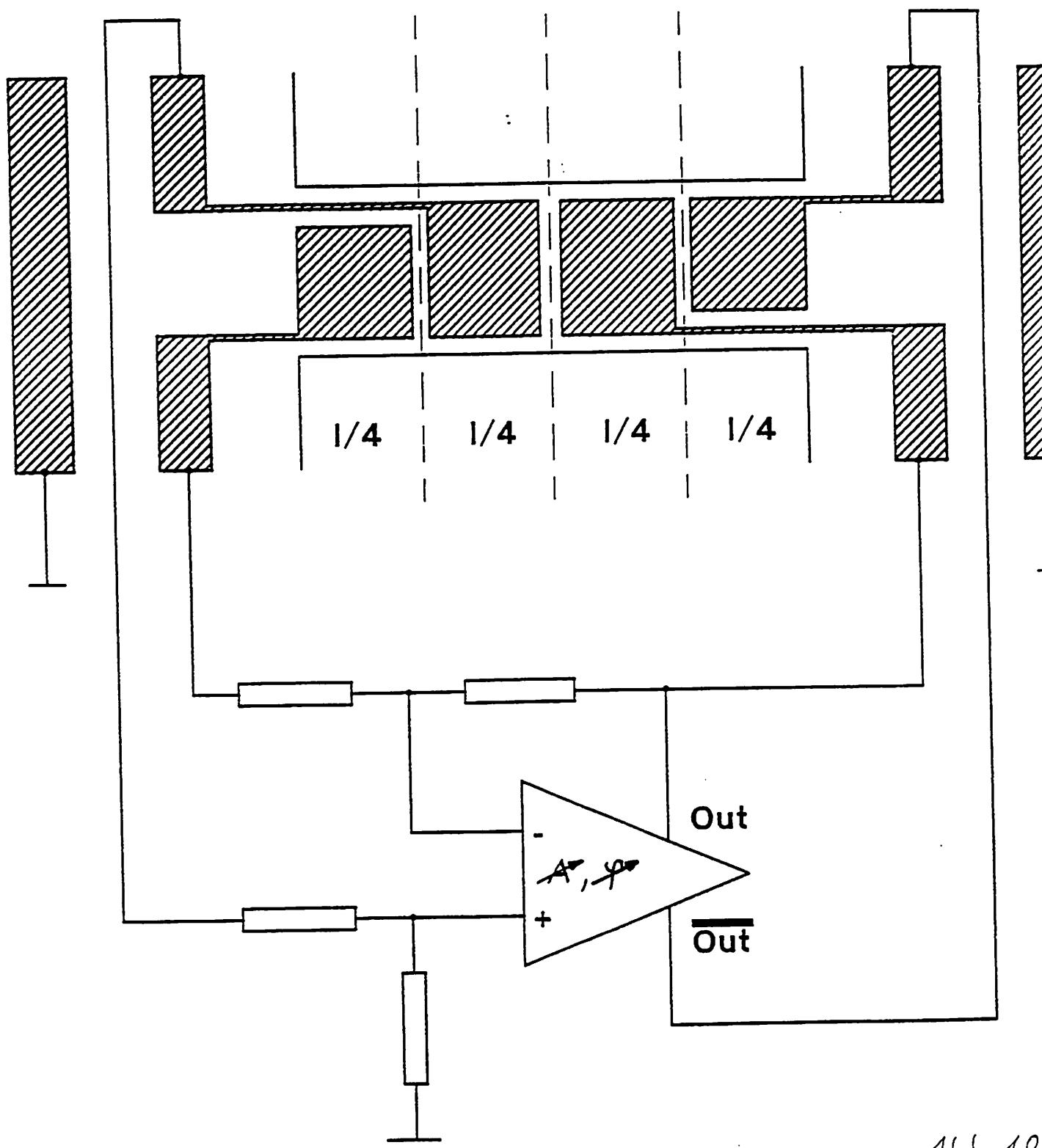
mit
1kg
Last



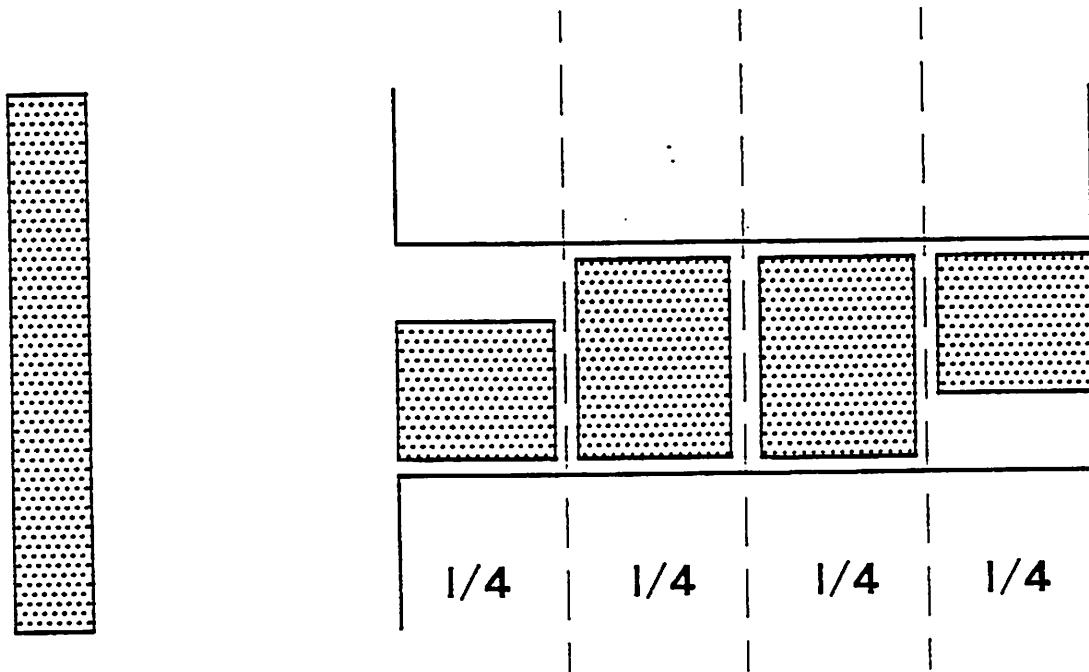
A/DIV 5.000 dB START 20 000.000 Hz
 B MIN 20.00 deg STOP 25 000.000 Hz
 BMIN=-2.00000E+01

Zu O-148 50 μ Biegeballen, l = 4mm
 b = 800 μ

Abb. 3

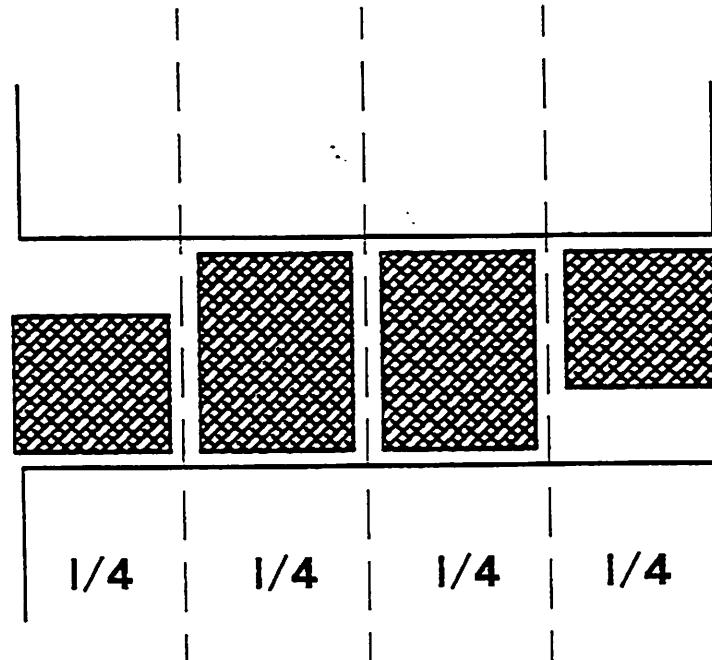


A66.10

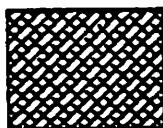


**SiO₂-Isolationsschicht in den bezeichneten Flächen
bis zum Silicium durchätzen**

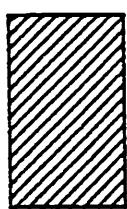
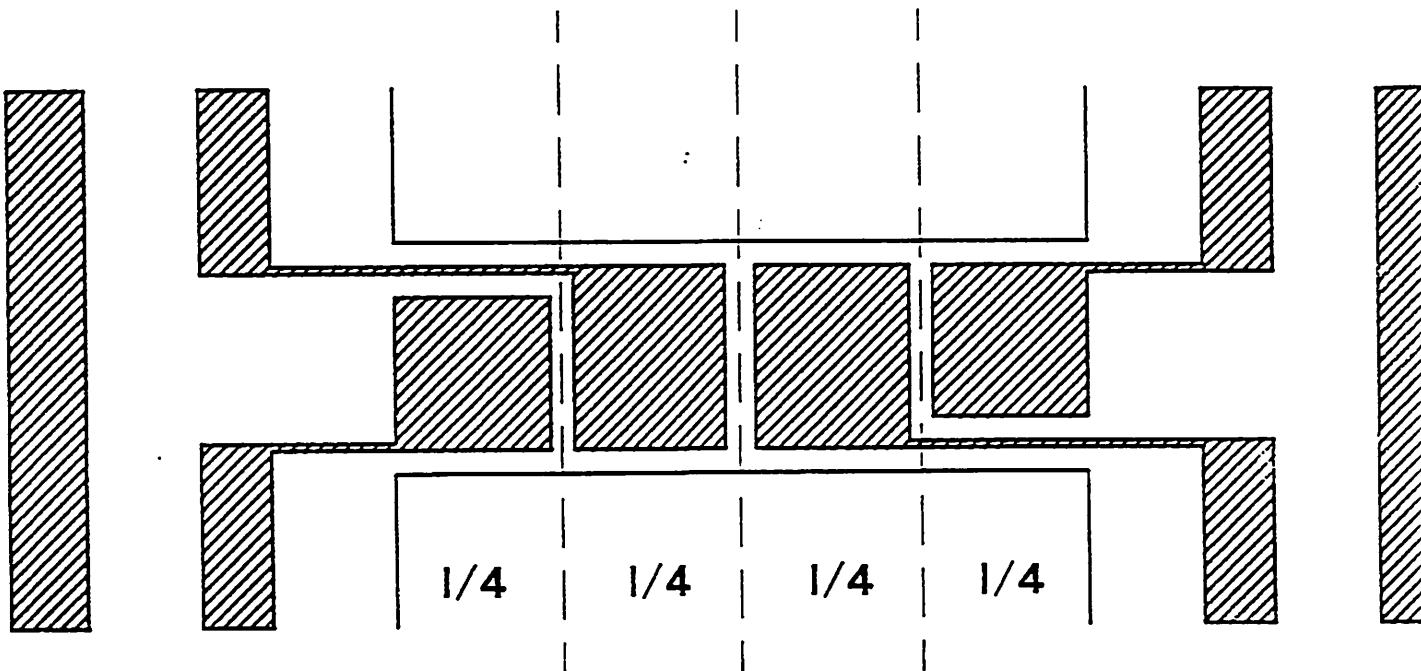
445.11



ZnO-Bereiche (in den SiO₂-Kontaktfenstern)



455.12



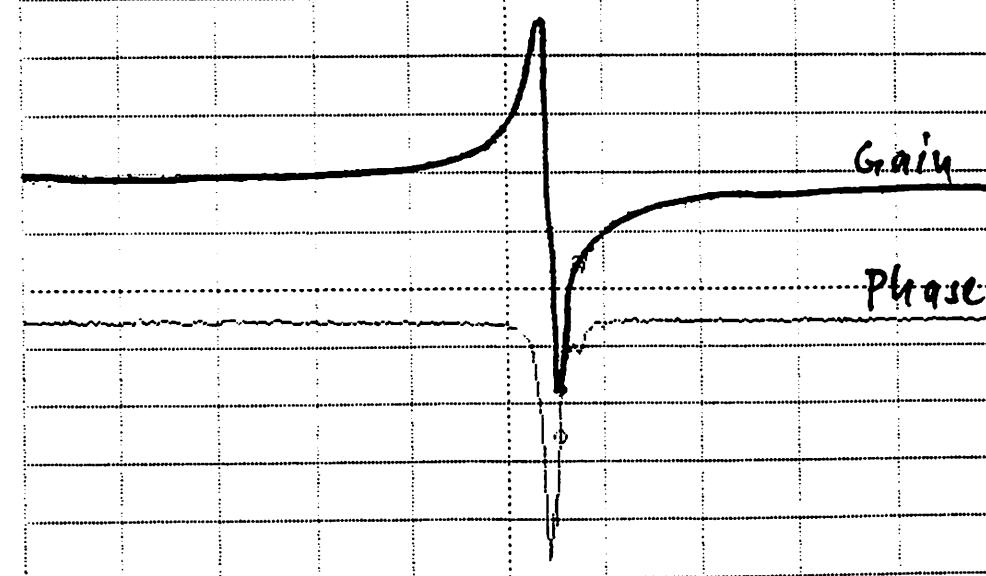
Aluminiumflächen (ZnO-Kontakte, Leiterbahnen, Si-Kontakte, Kontaktflächen)

456.13

A:T/R(dB)B: 5 ° MKR 3 817.500 Hz
 A MAX -33.00 dB GAIN -35.0983 dB
 B MAX 250.0 deg PHASE 61.0518 deg



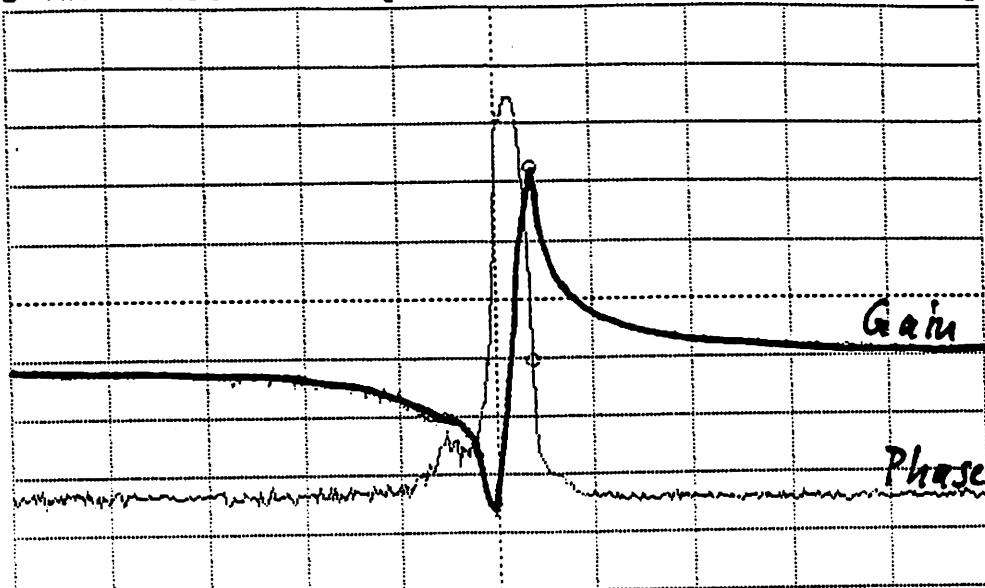
i-i A MIN -80.00 dB START 3 000.000 Hz
 B MIN 0.000 deg STOP 4 500.000 Hz
 A:T/R(dB)B: 8 ° MKR 3 828.750 Hz
 A MAX -33.00 dB GAIN -64.8411 dB
 B MAX 250.0 deg PHASE -76.7649 deg



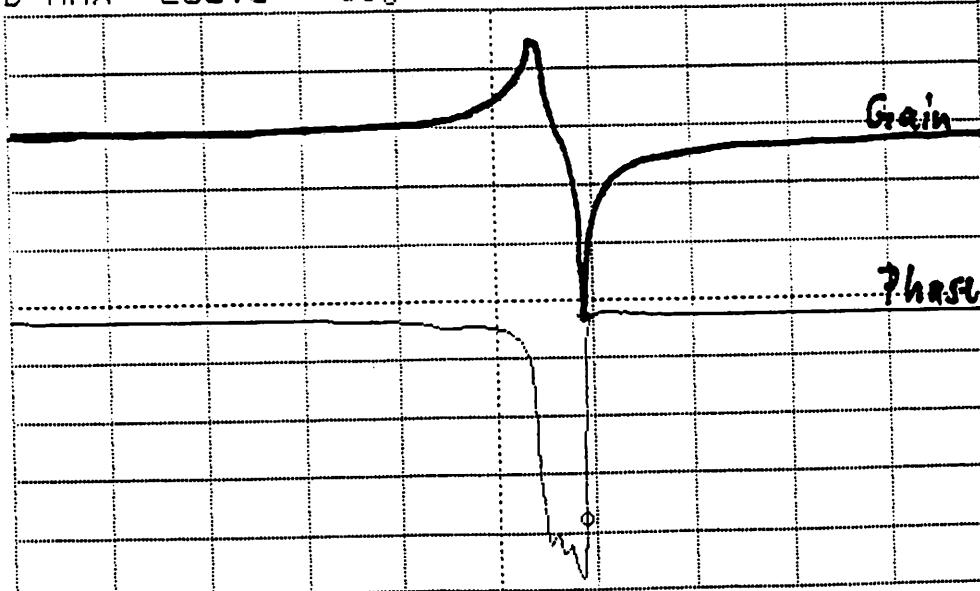
e-i A MIN -80.00 dB START 3 000.000 Hz
 B MIN -180.0 deg STOP 4 500.000 Hz

ZnO_156: Modenselektive Anregungs- und Abtastgeometrie (Au-Elektroden), PIE-geätzt, ZnO auf p++-Si ohne Passivierung (3/4)

A : T/R(dB) B : θ ○ MKR 3 806.250 Hz
 A MAX -20.00 dB GAIN -53.8580 dB
 B MAX 180.0 deg PHASE 59.0460 deg

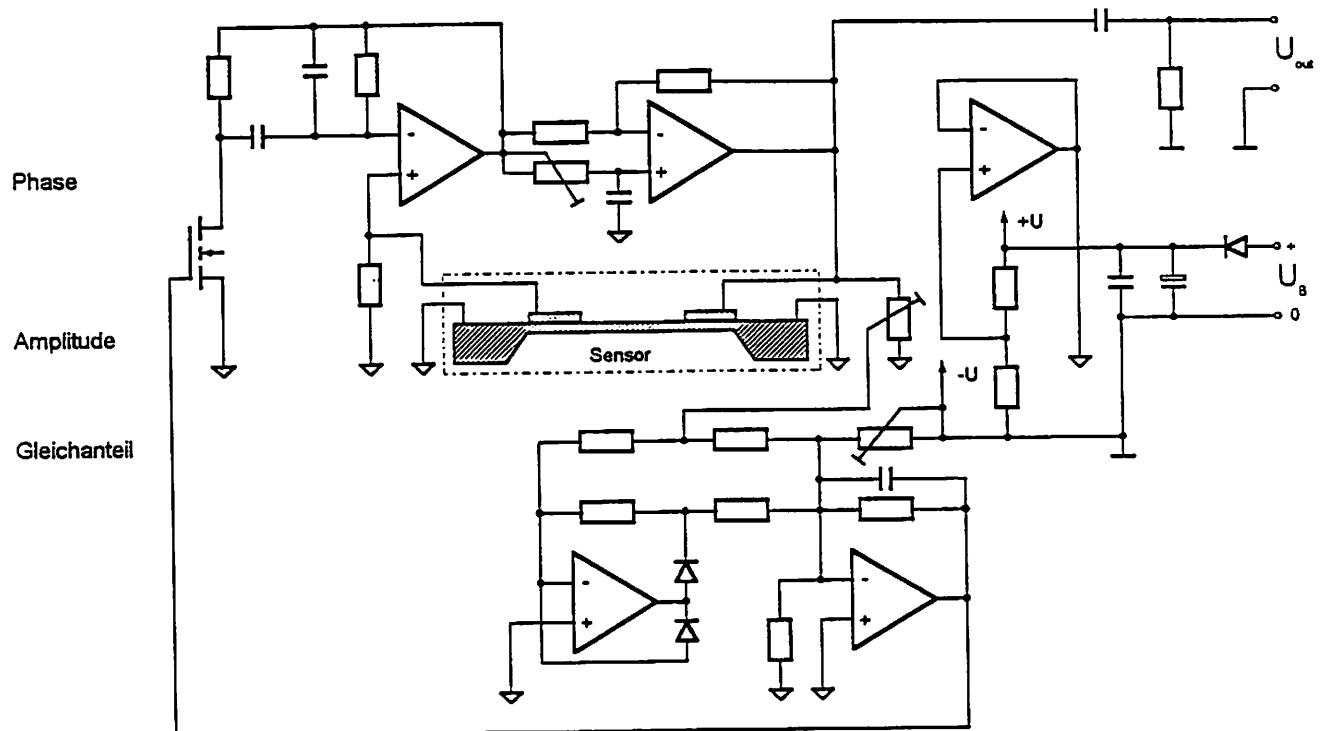


~~A-A~~ A/DIV 5.000 dB START 3 000.000 Hz
 B/DIV 20.00 deg STOP 4 500.000 Hz
 A : T/R(dB) B : θ ○ MKR 3 885.000 Hz
 A MAX -30.00 dB GAIN -82.7770 dB
 B MAX 200.0 deg PHASE -106.714 deg



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

ZnO_156: Modenselektive Anregungs- und Abtastgeometrie (Au-Elektroden), PIE-geätzt, ZnO auf p++-Si ohne Passivierung (3/4)

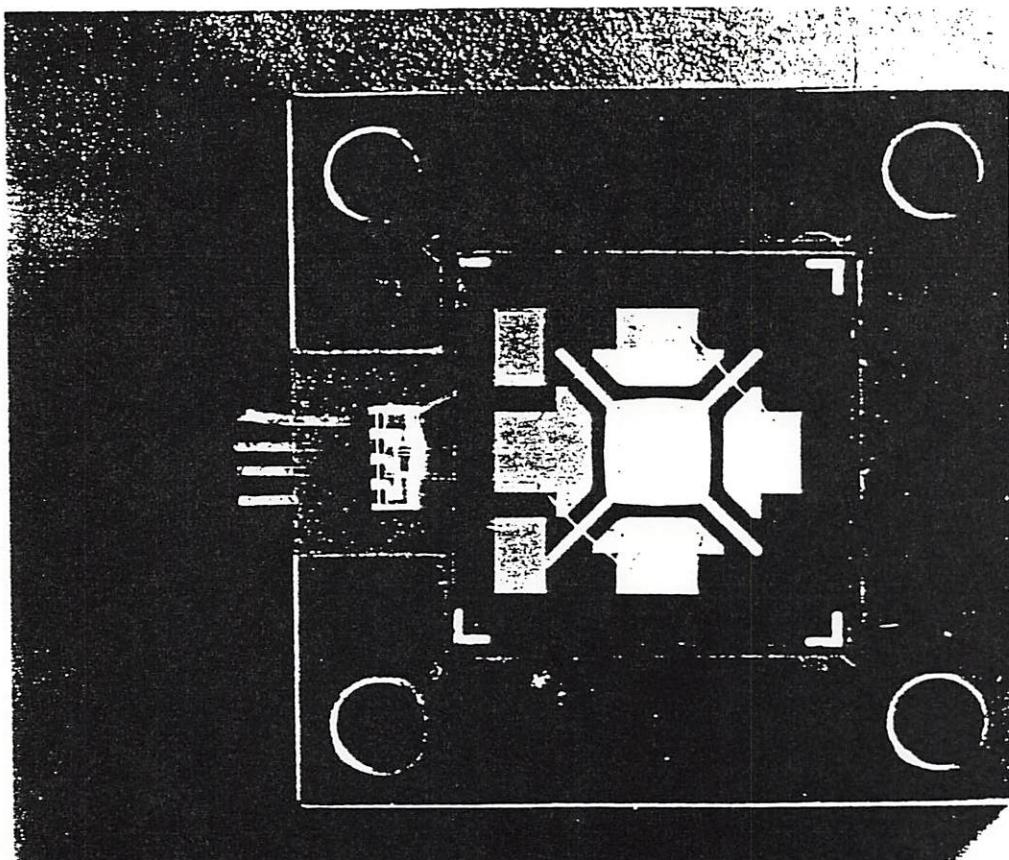
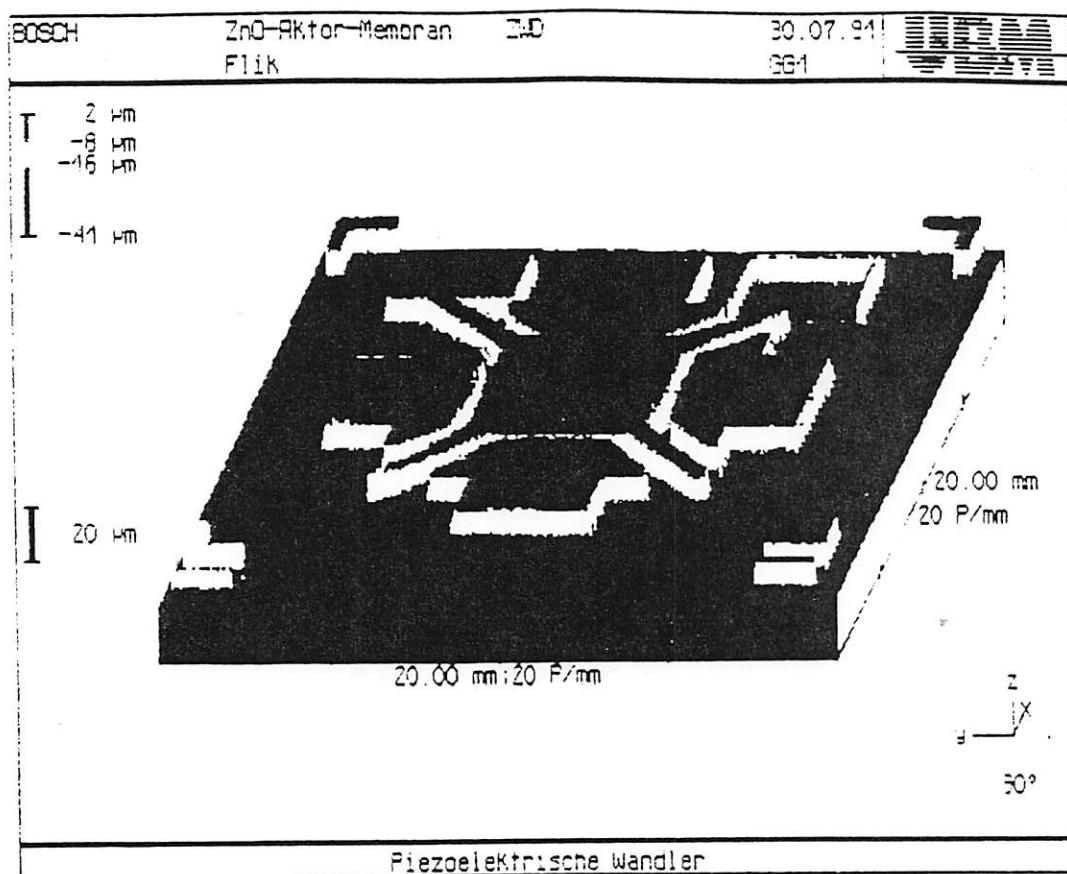


Einstellungen:

Phase Einstellung auf Verstärkungsminimum (Maximum der Übertragungsfunktion)

Amplitude Einstellung der Amplitude

Gleichanteil Arbeitspunktverschiebung des MOSFET-Transistors in den aktiven Bereich



A55.17

EUCH E
ZND

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

83 500 Hz 180.10 mVrms

A: SWEPT SPECTRUM

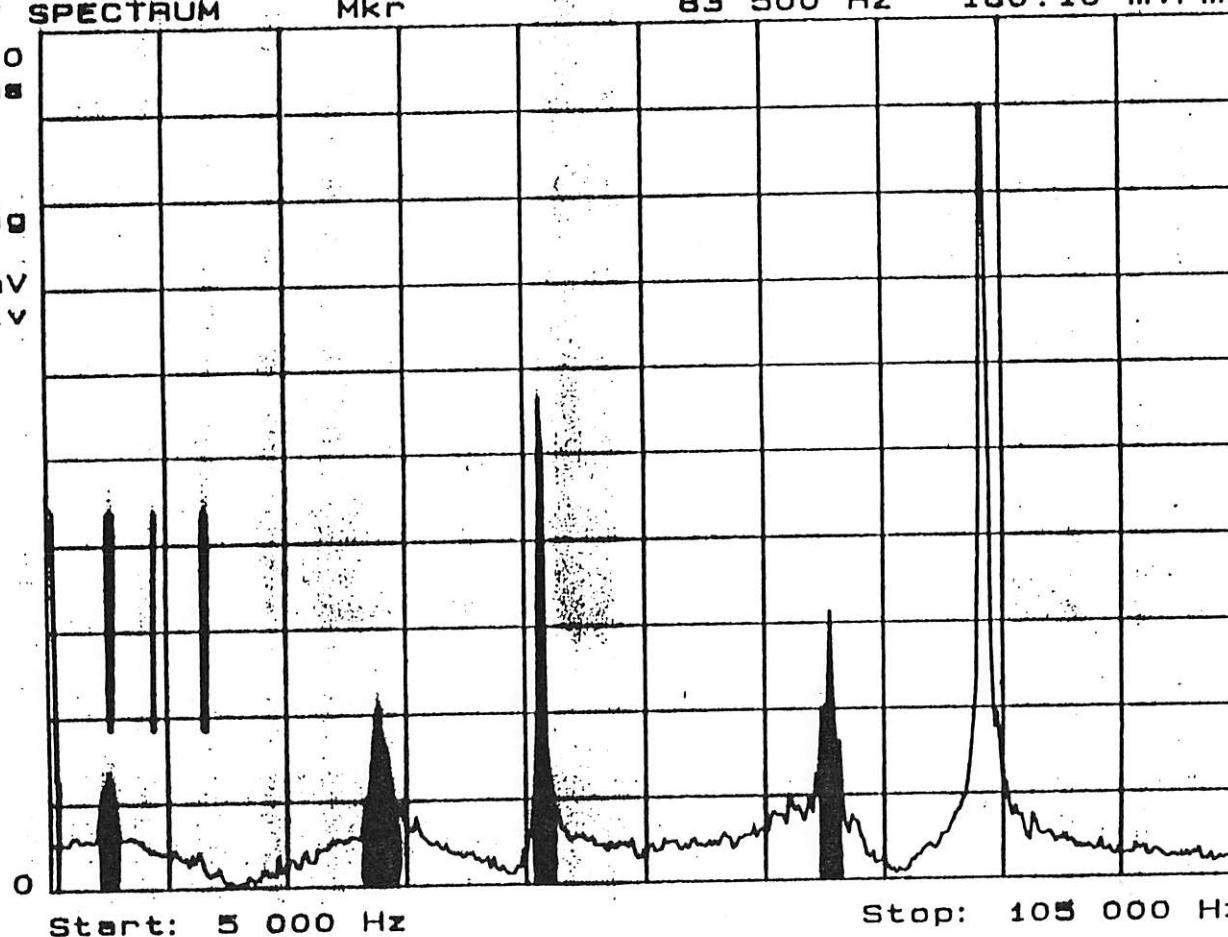
Mkr

200
mVrms

LinMag

20 mV
/DIV

Geschwindig-
keit der
Membran
(Mitte)



Abg. 18

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

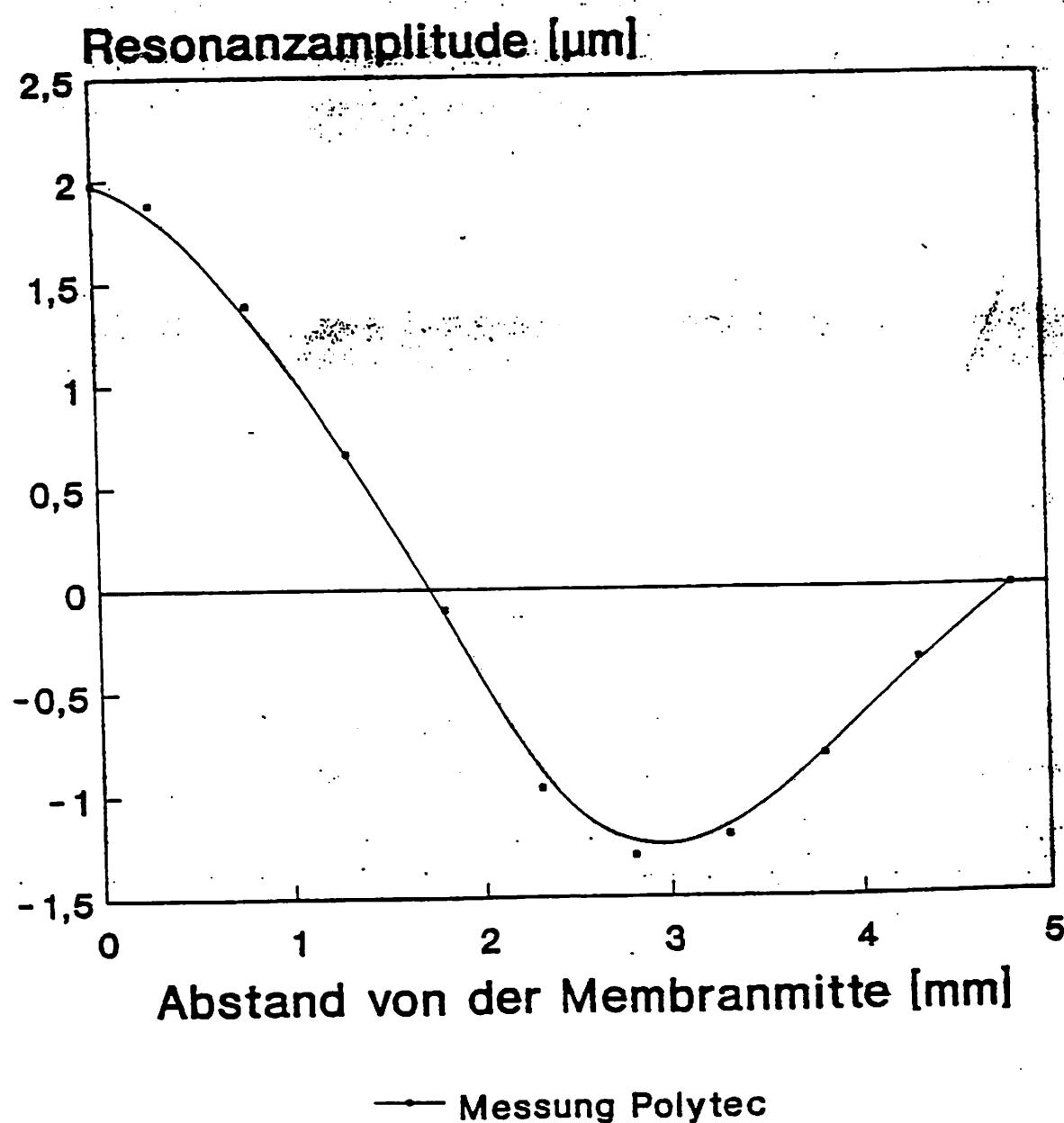
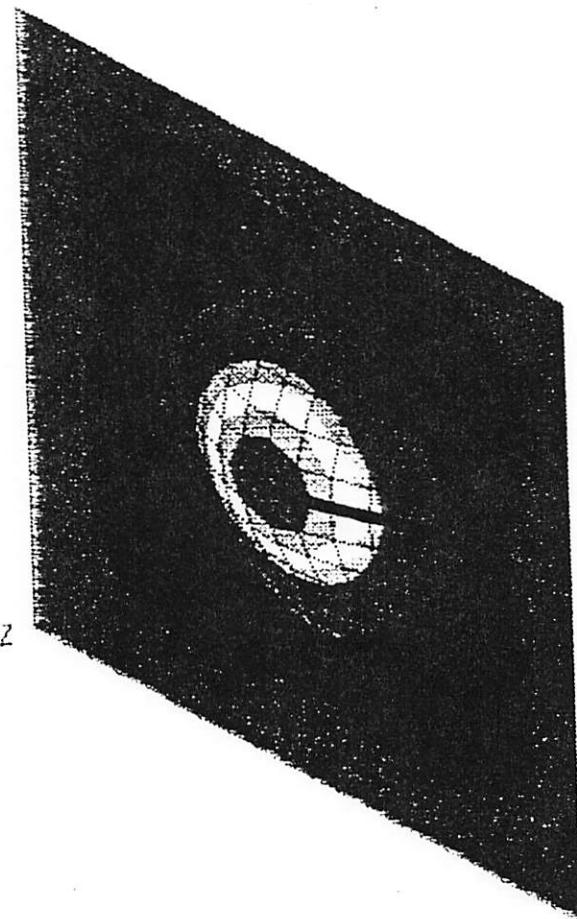


Abb. 19

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

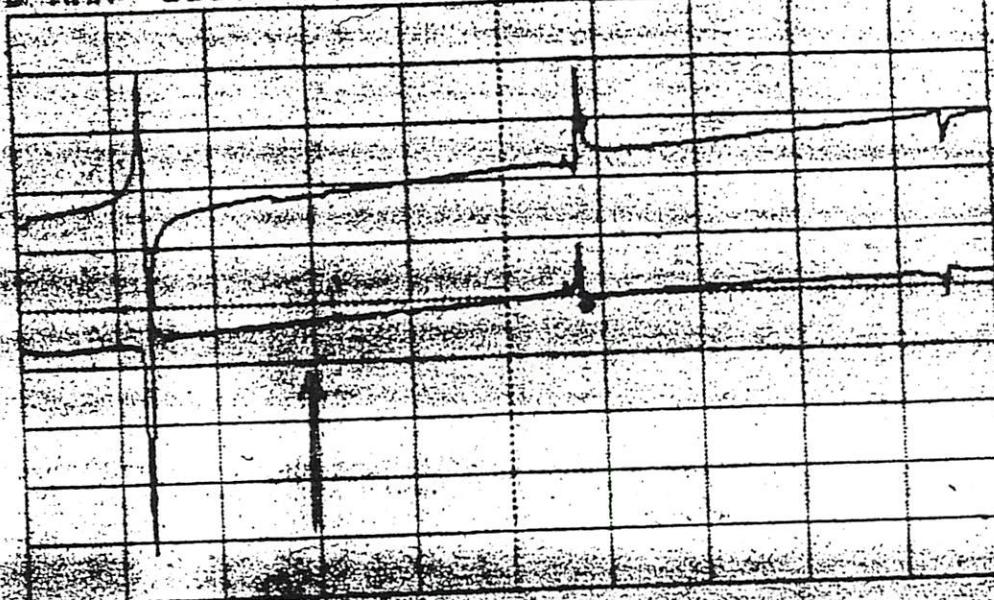
XU =1
YU =1
ZU =1
DIST=6.197
XF =4.6
YF =4.6
-0.593472
-0.41642
-0.239367
-0.062315
0.114738
0.29179
0.468843
0.645895
0.822948
1



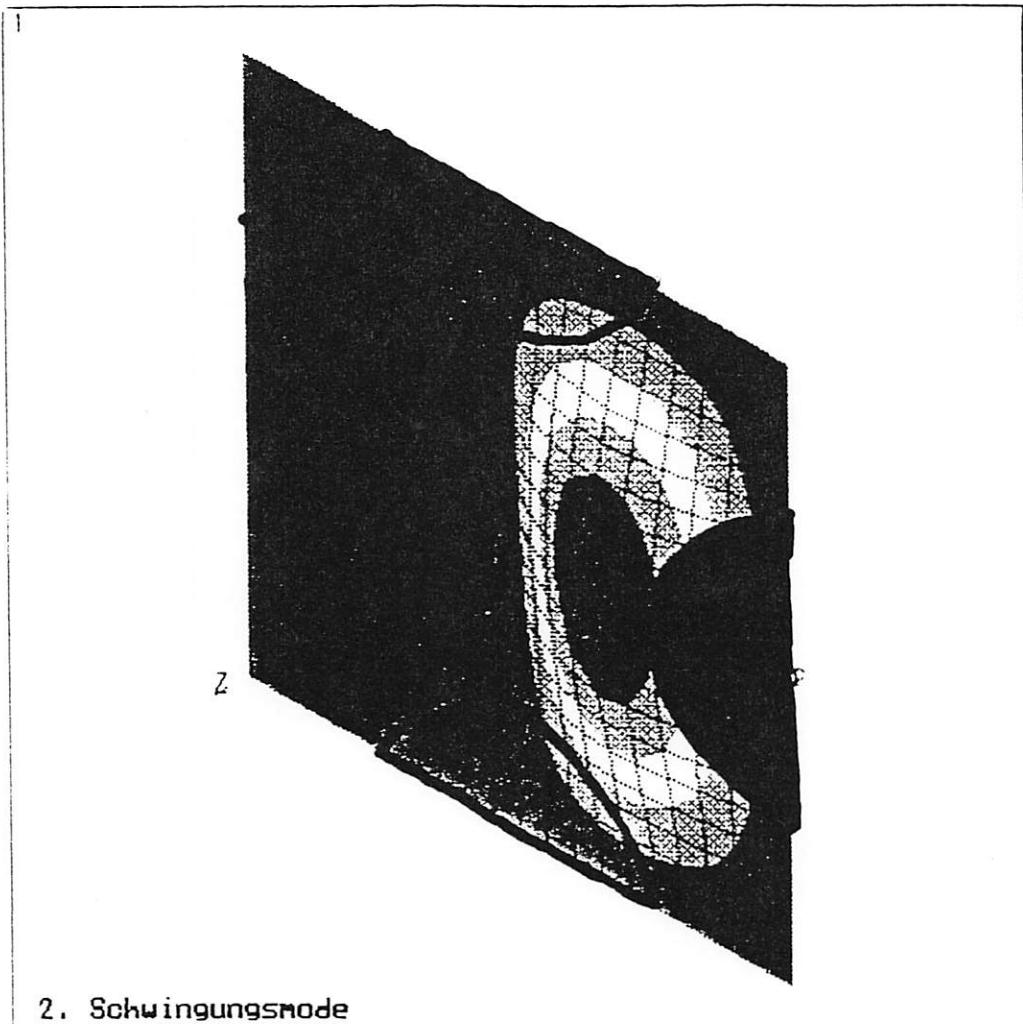
6. Schwingungsmodus

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

A:T/REFB1B: 8 o MKR
A MAX -38.00 dB GAIN
B MAX 380.0 deg PHASE 38 125.000 Hz
-48.3398 dB
-48.16981 deg



Modus Selektivität



15.25 kHz - Mode

BOSCH
ZWD

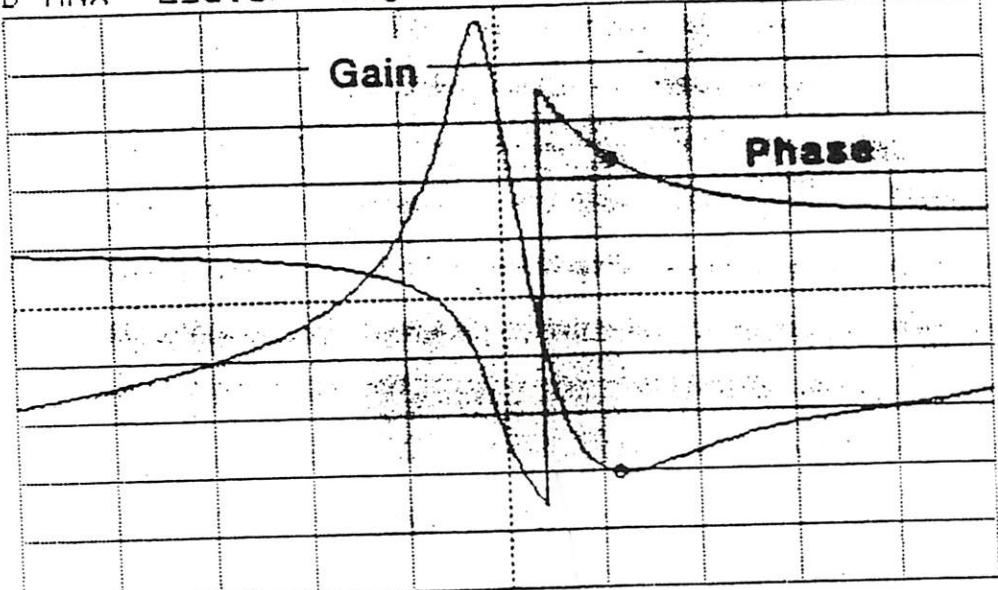
Resonanter Drucksensor M5 2/3
optische und elektrische Messung

3/92

A: T/R(dB)B: 0
A MAX -38.00
B MAX 250.0

o MKR
dB GAIN
deg PHASE

11 770.000 Hz
-54.0876 dB
115.918 deg



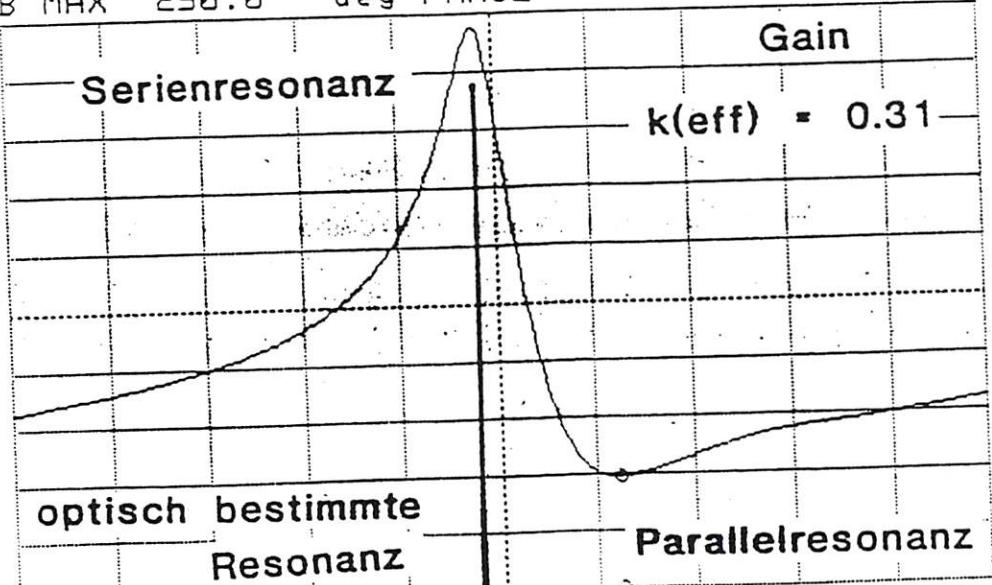
A/DIV 2.000 dB CENTER
B/DIV 50.00 deg SPAN
AMAX=-3.80000E+01

11 300.000 Hz
4 000.000 Hz

A: T/R(dB)B: 0
A MAX -38.00
B MAX 250.0

o MKR
dB GAIN
deg PHASE

11 800.000 Hz
-54.0837 dB
deg

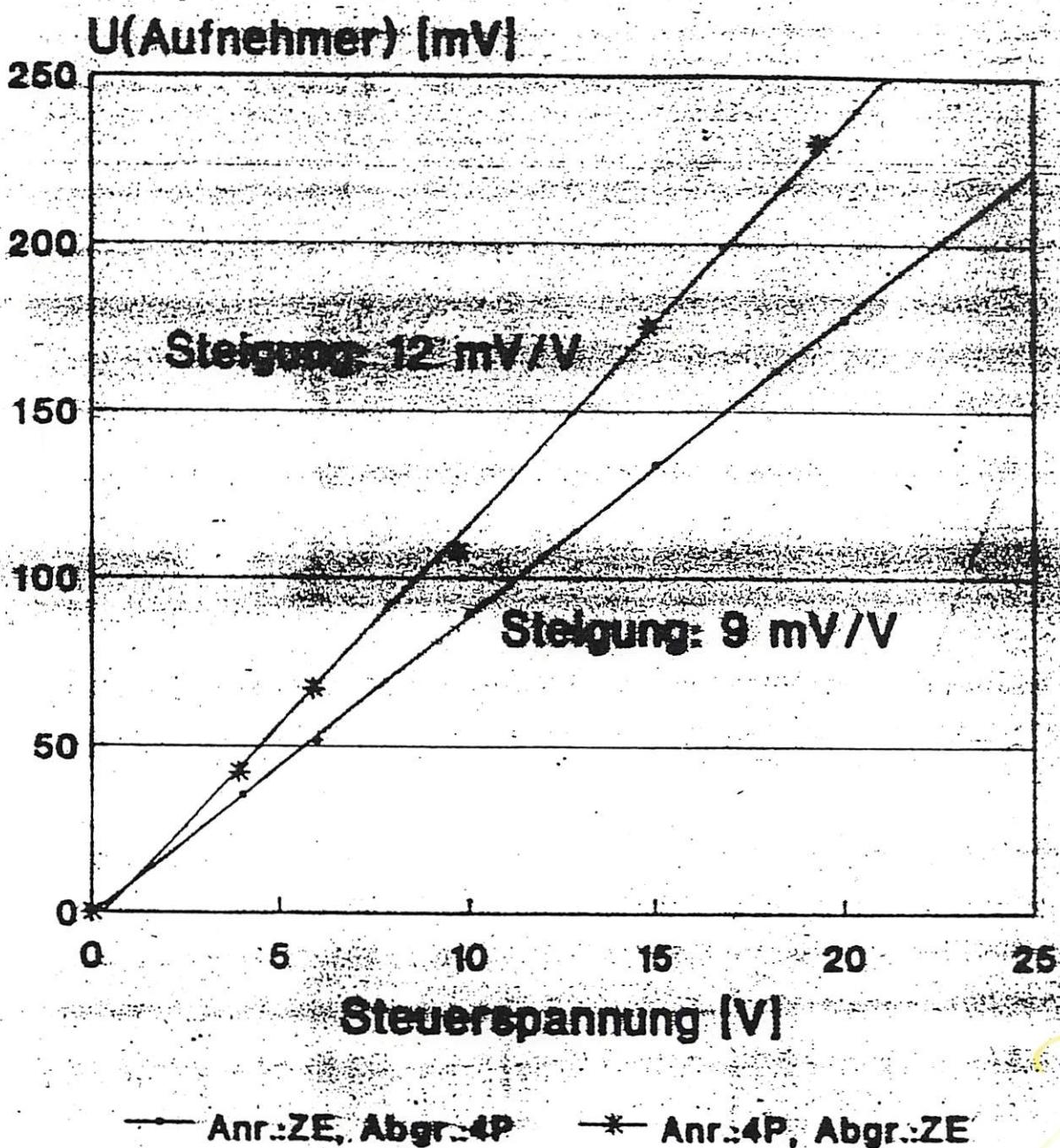


A/DIV 2.000 dB CENTER
B/DIV 50.00 deg SPAN
MANUAL=

11 300.000 Hz
4 000.000 Hz

Ab6, 23

Resonanter Drucksensor M7 2/4
Spannungsspannungsamplitude am Aufnehmer in Abh.
von der Steueramplitude



Grundmode 7.198 kHz

$$U_{\text{Abgr.}} = \frac{U_{\text{off}}^2}{2} * (\Delta_{\text{max}} / \Delta_{\text{min}})^{0.5} + U_{\text{min}}$$

Biegebalken

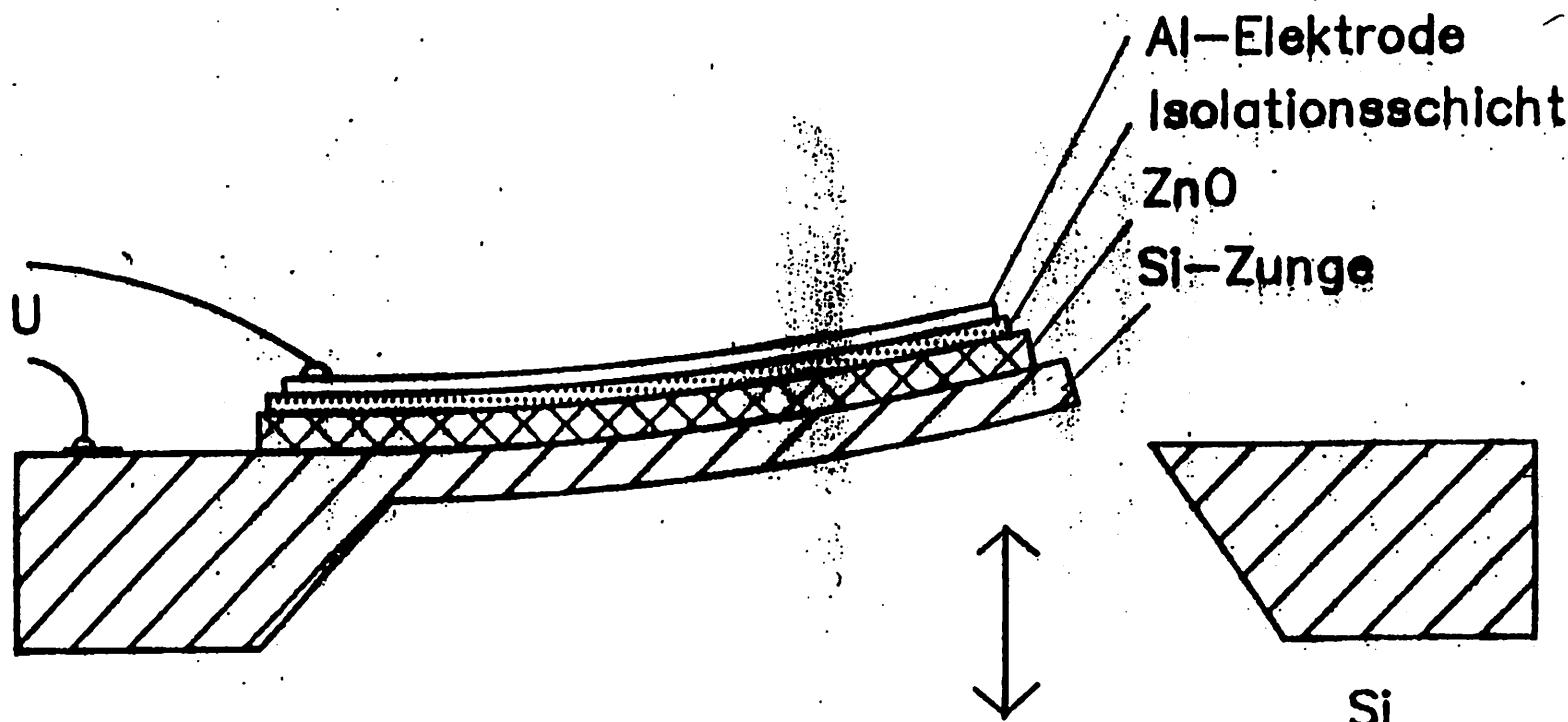


Abb.6

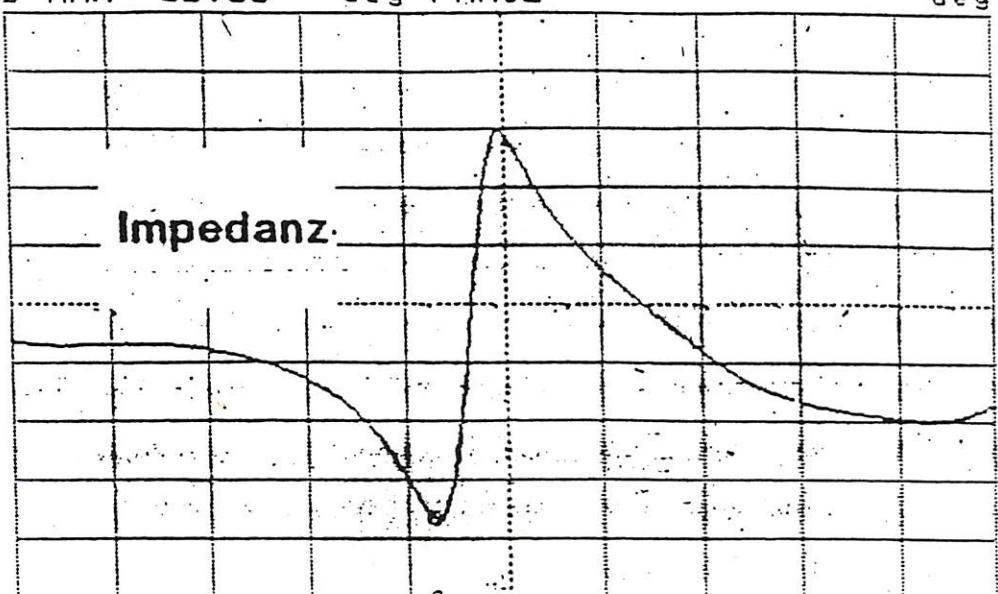
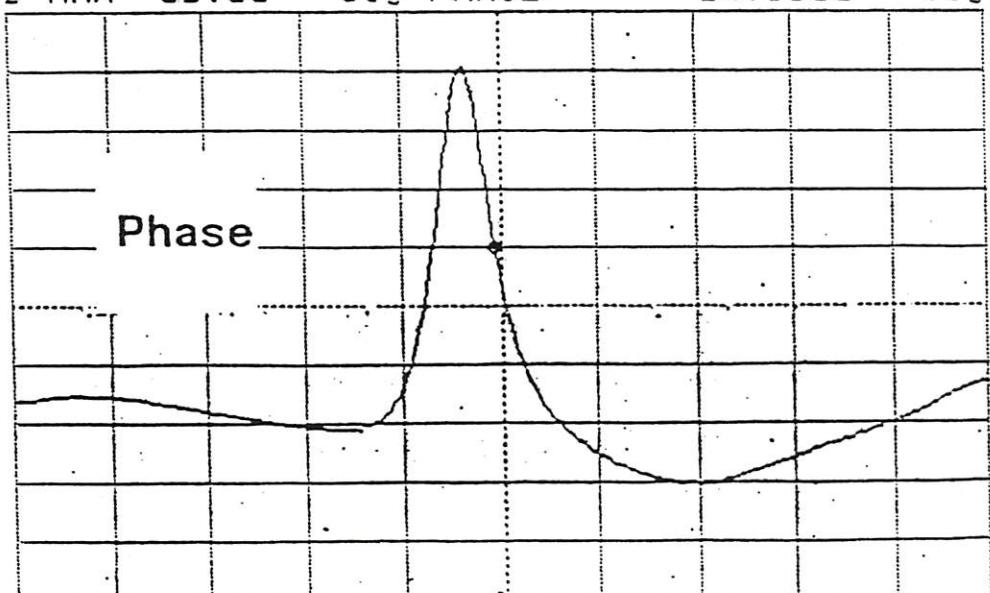
BOSCH**Impedanz- und Phasenmessung**

ZWD

11.92

A: I_{ZI} B: θ
A MAX 340.0 KΩ B MAX -35.00 deg○ MKR
MAG
PHASE3419.250 Hz
167.125 KΩ
deg

Brüel & Kjaer

A/DIV 20.00 KΩ CENTER
B/DIV 5.000 deg SPAN
SPAN = 300.000 Hz3 440.000 Hz
300.000 HzA: I_{ZI} B: θ
A MAX 340.0 KΩ B MAX -35.00 deg○ MKR
MAG
PHASE3 437.750 Hz
Ω
-54.9903 degA/DIV 20.00 KΩ CENTER
B/DIV 5.000 deg SPAN
SPAN = 300.000 Hz3 440.000 Hz
300.000 Hz

46,26

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

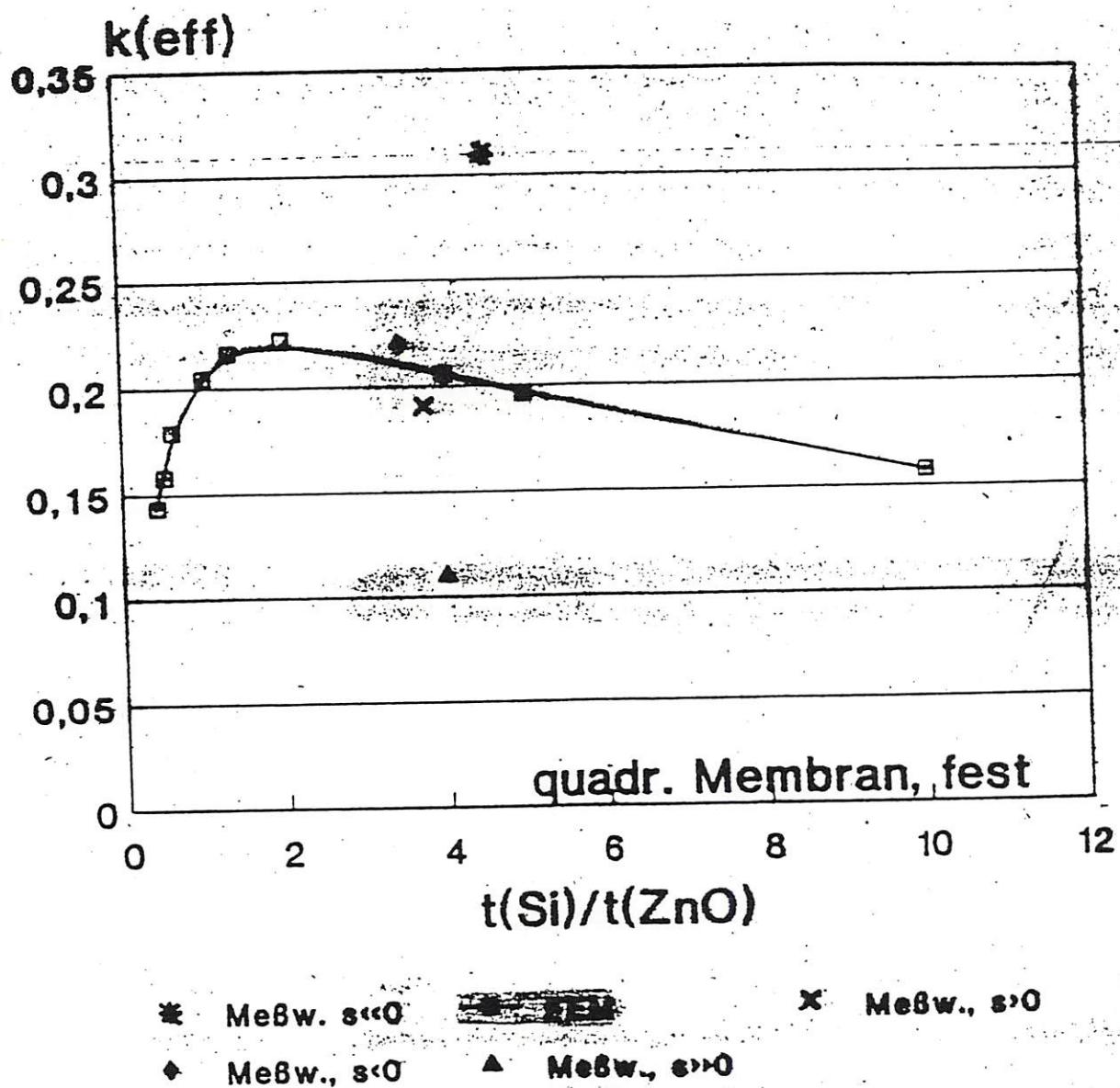
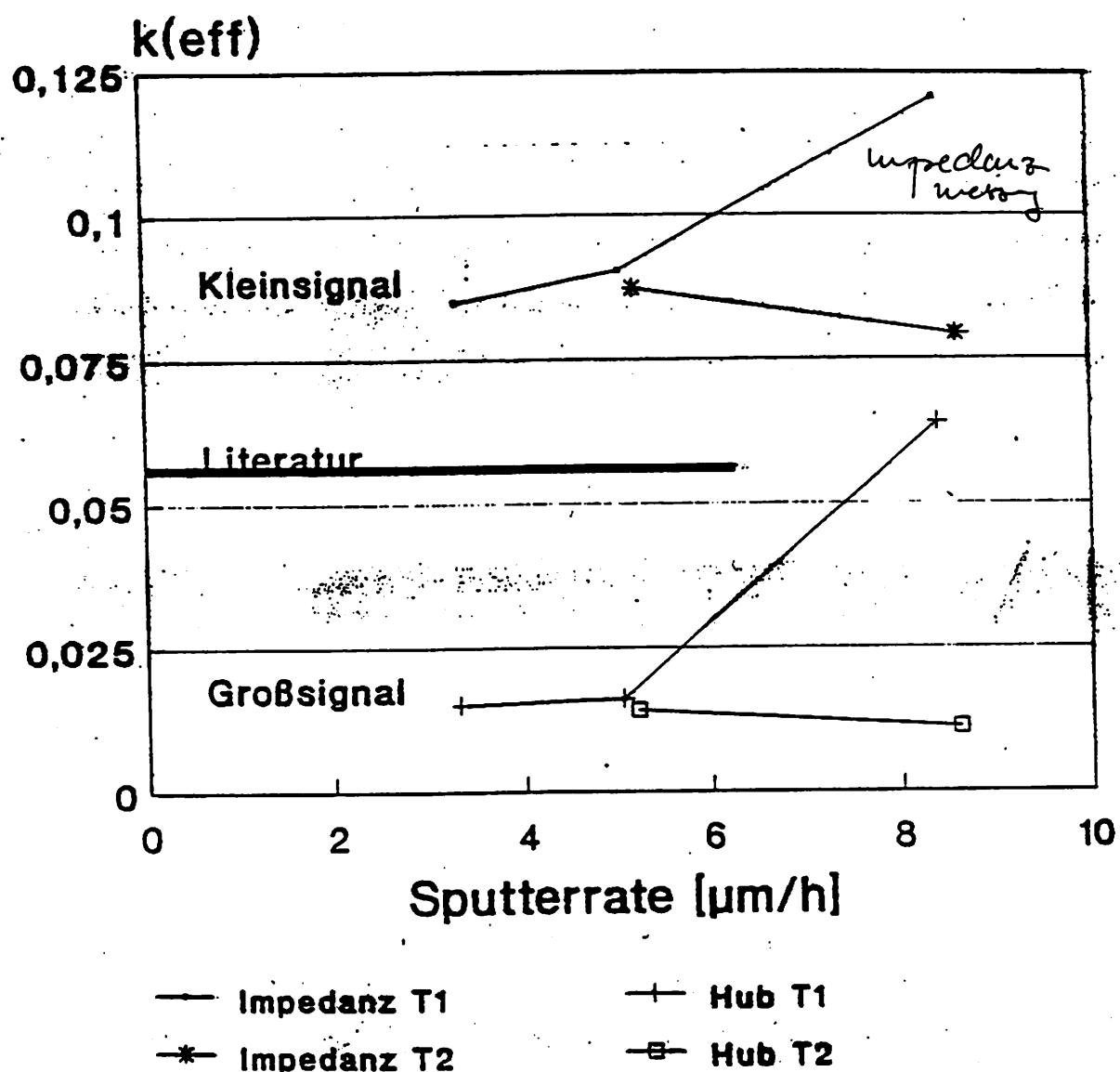


Abb. 21 Meßwerte für unterschiedliche Schichtspannungen

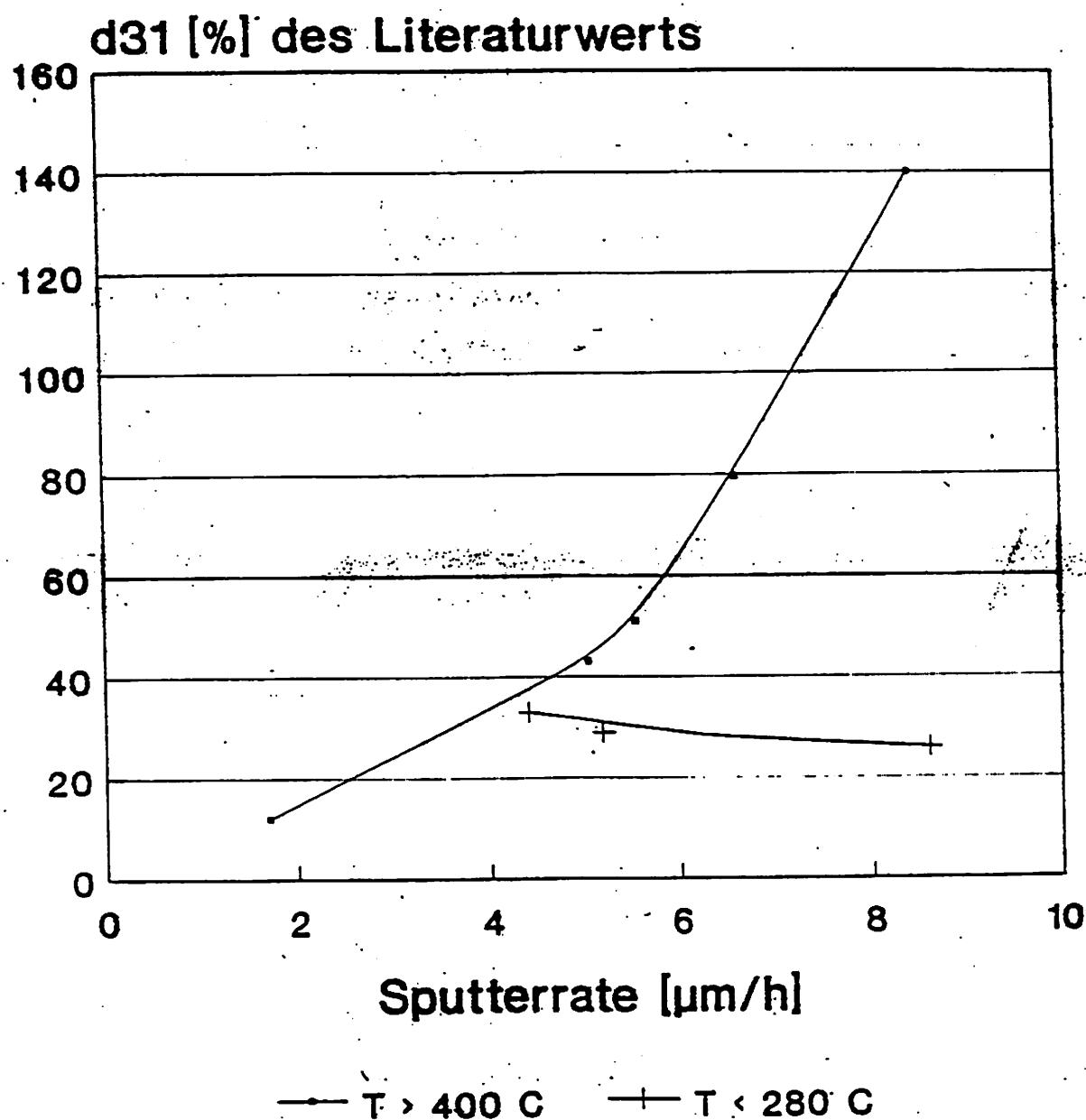
Abb. 27

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

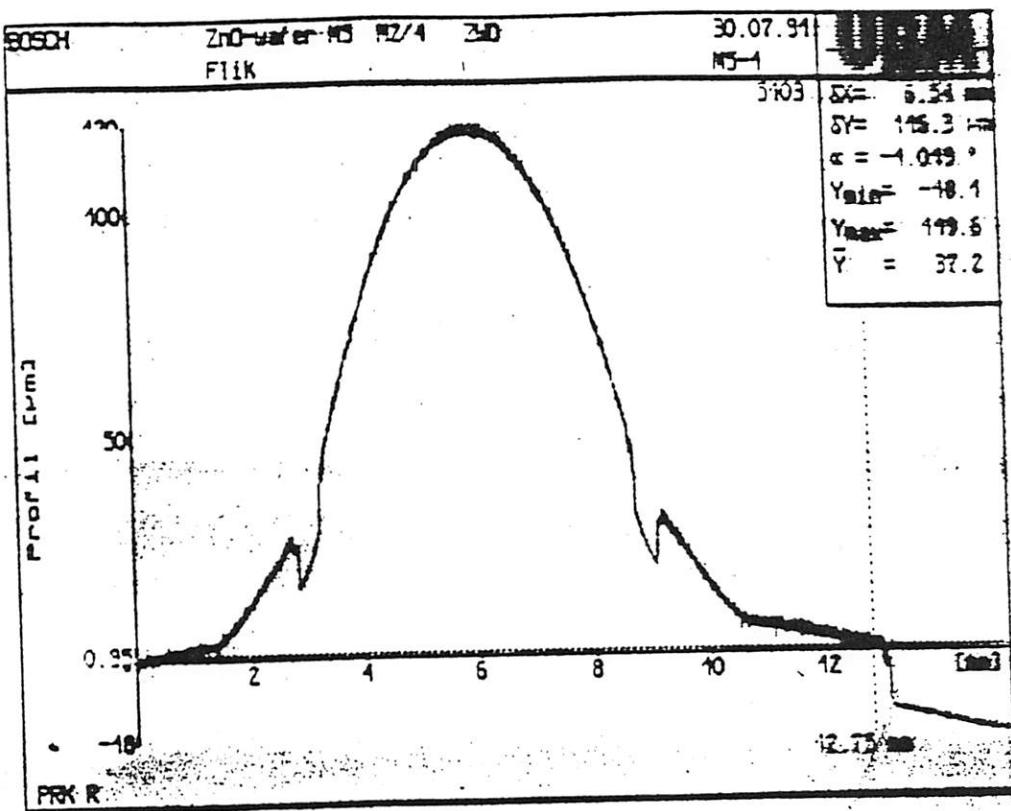


Vergleich von Groß- und Kleinsignal
messungen

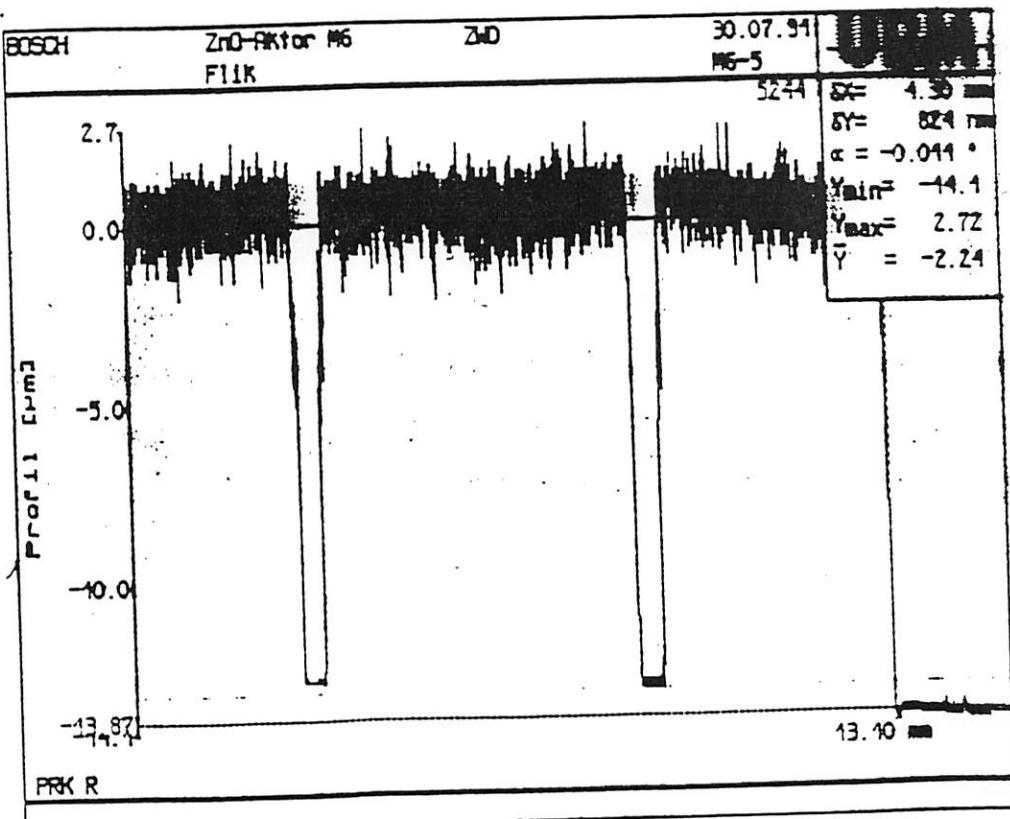
Reaktives Magnetronputtern von ZnO Einfluß von Substrattemp. und Sputter- rate auf piezoelektr. Konstante d31



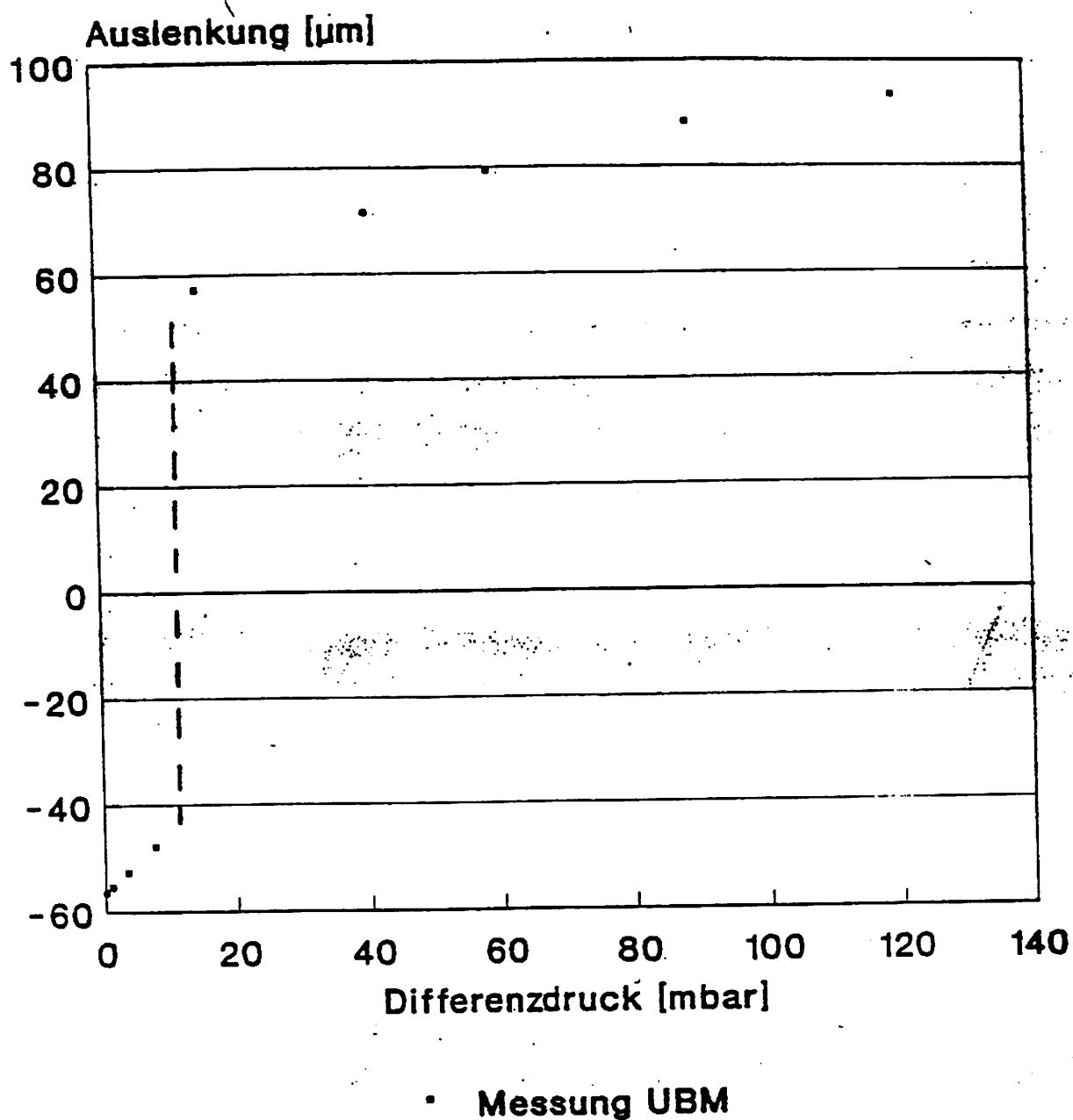
$d(\text{Si}) = 50 \mu\text{m}$
 $d(\text{ZnO}) = 12 \mu\text{m}$
 nur O_2
 $p = 2 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$
 $T = 280^\circ\text{C}$



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



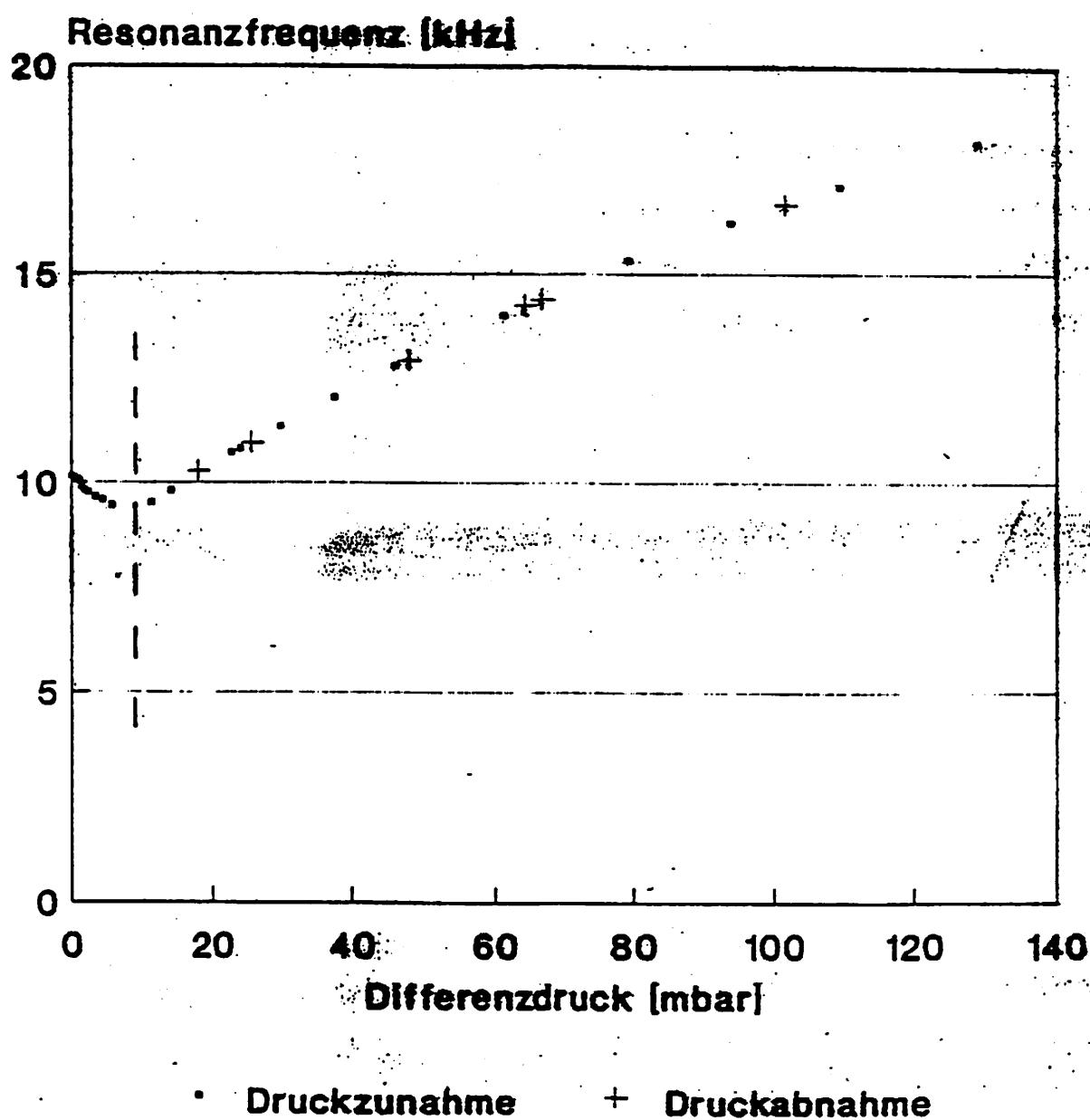
AGG.30

**"Knackfrosch"**

Resonanter Drucksensor

Druckabh. d. Resonanzfrequenz

10 kHz-Mode

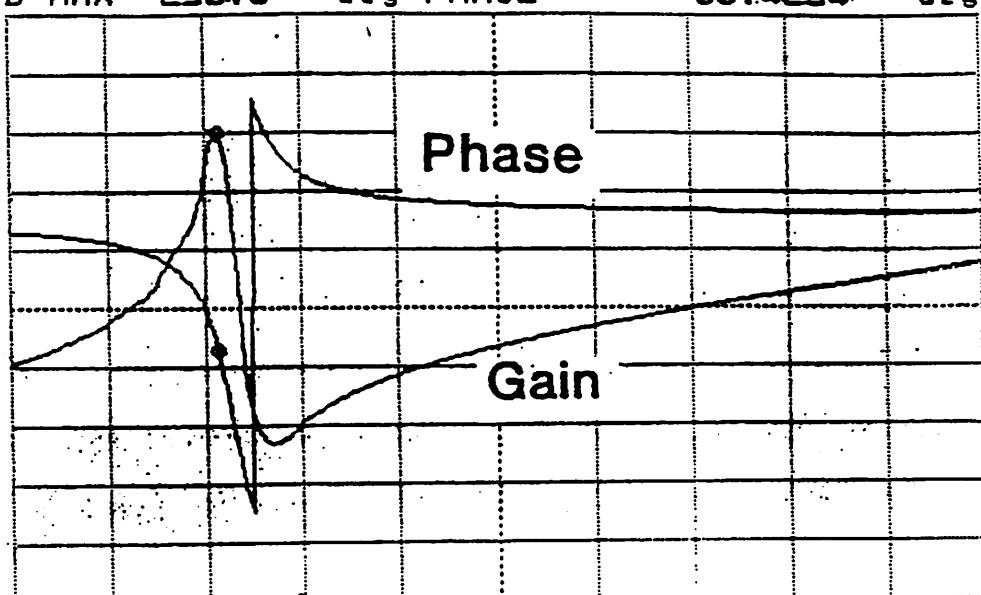


Frequenzverschiebung durch Differenzdruck, Medium: Luft

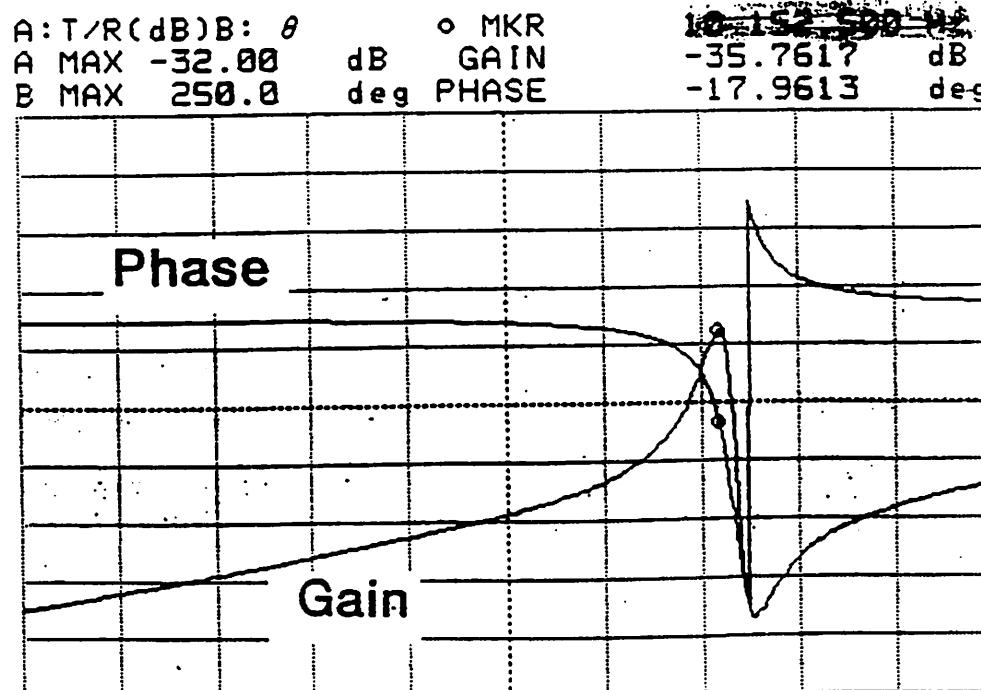
Anr.: ZE

Abgr.: 4P

A: T/R(dB) B: θ MKR
 A MAX -34.00 dB GAIN -35.9837 dB
 B MAX 250.0 deg PHASE -36.4234 deg

 $p = 0 \text{ bar}$ 

A/DIV 1.000 dB CENTER 9 500.000 Hz
 B/DIV 50.00 deg SPAN 3 000.000 Hz
 CENTER = 9500.000 Hz

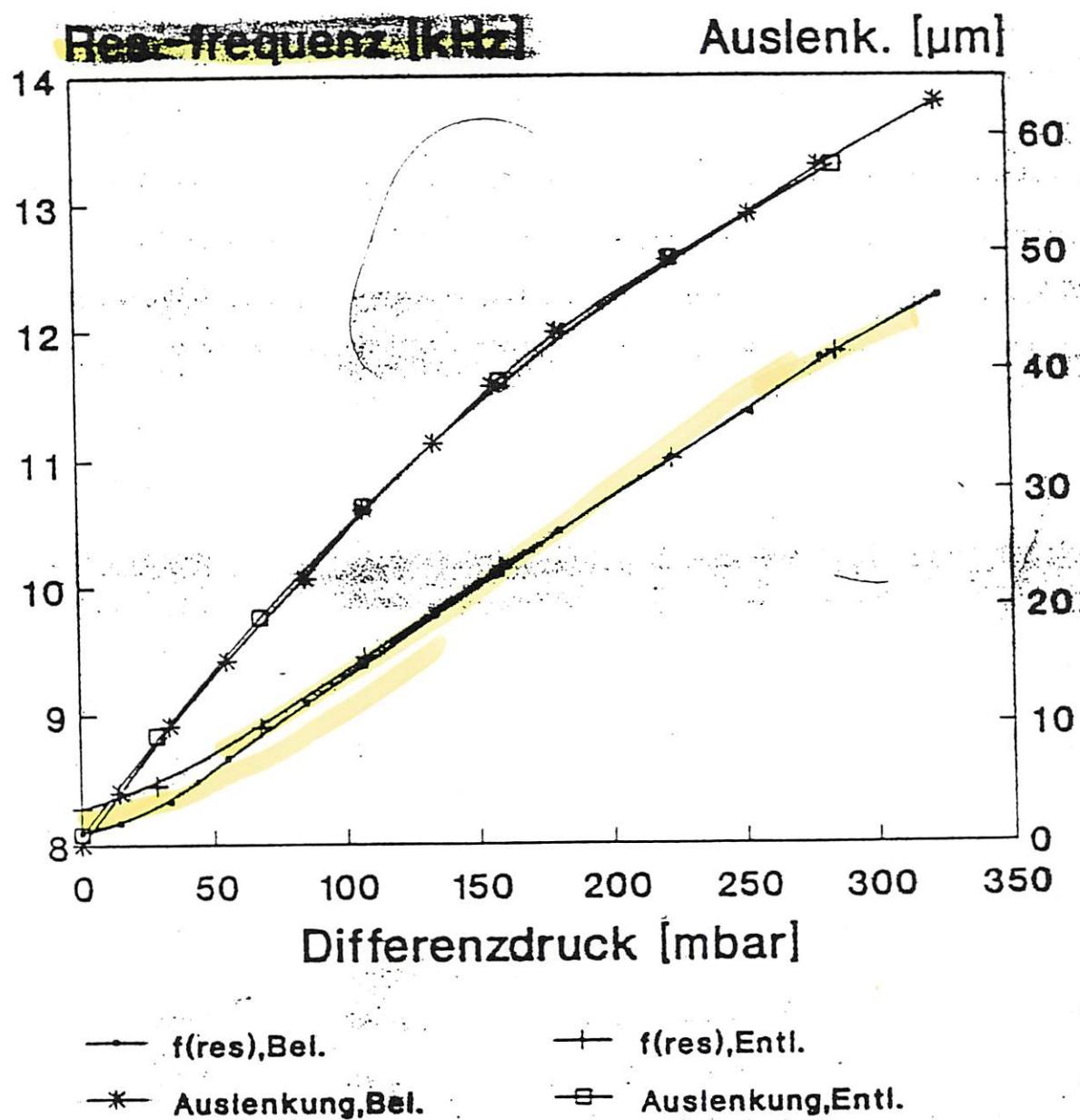
 $p = 0.13 \text{ bar}$ 

A/DIV 1.000 dB CENTER 9 500.000 Hz
 B/DIV 50.00 deg SPAN 3 000.000 Hz
 CENTER = 9500.000 Hz

A66,33

Resonanter Drucksensor M7 2/3

Resonanzfrequenz in Abhängigkeit vom Differenzdruck

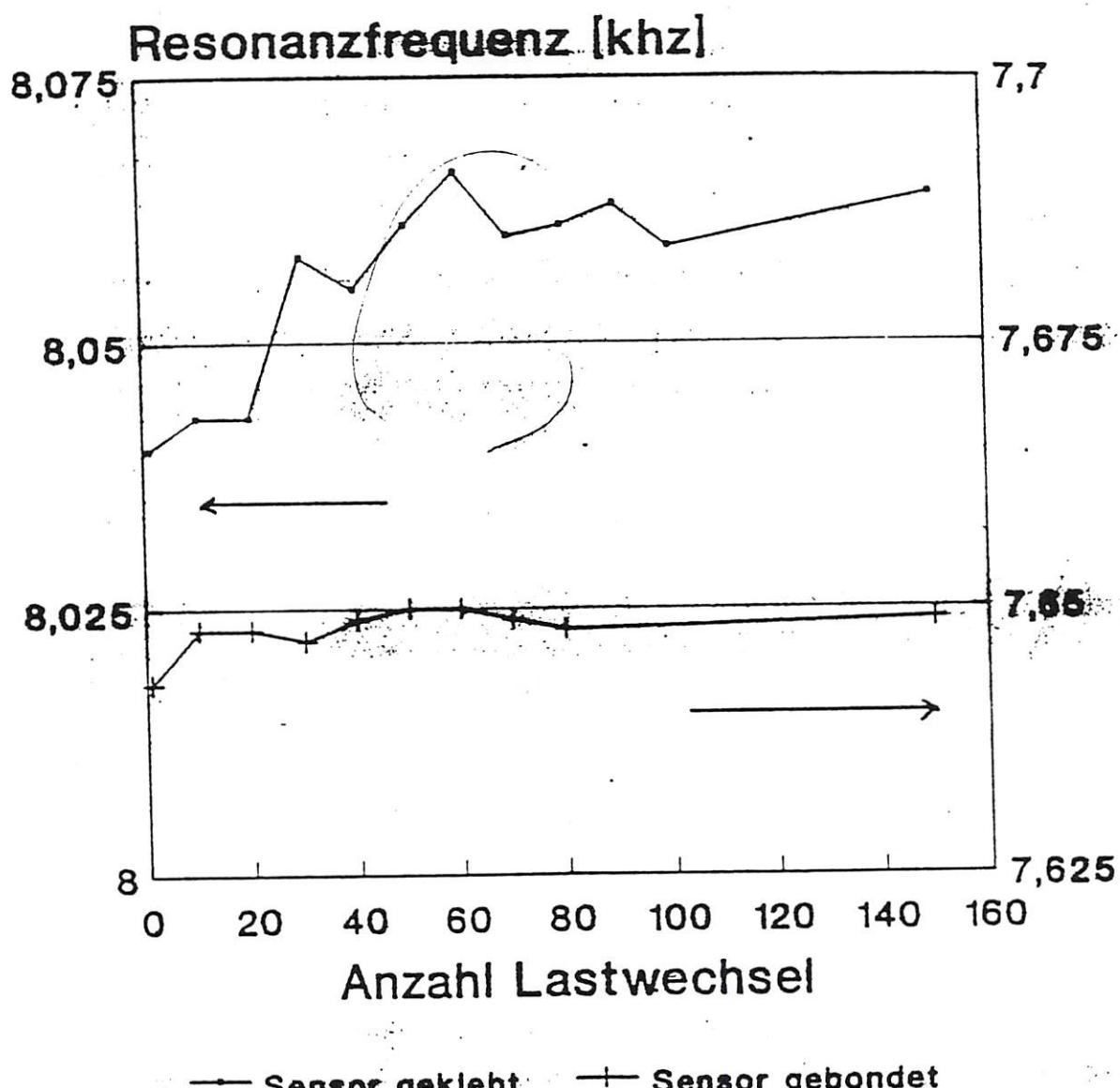


HP 4194 und RM600

AS6,34

Resonanter Drucksensor

Nullpunktabweichung nach Lastwechseln 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.

AGG, 35

Temperatureinflüsse bei Drucksensoren

- **Materialeigenschaften**
Elastzitätsmoduli
Ausdehnungskoeffizienten

$$f(\text{res}) = \text{const} \cdot T \text{ (FEM)}$$

- **Membranform (Krümmungszustand)**

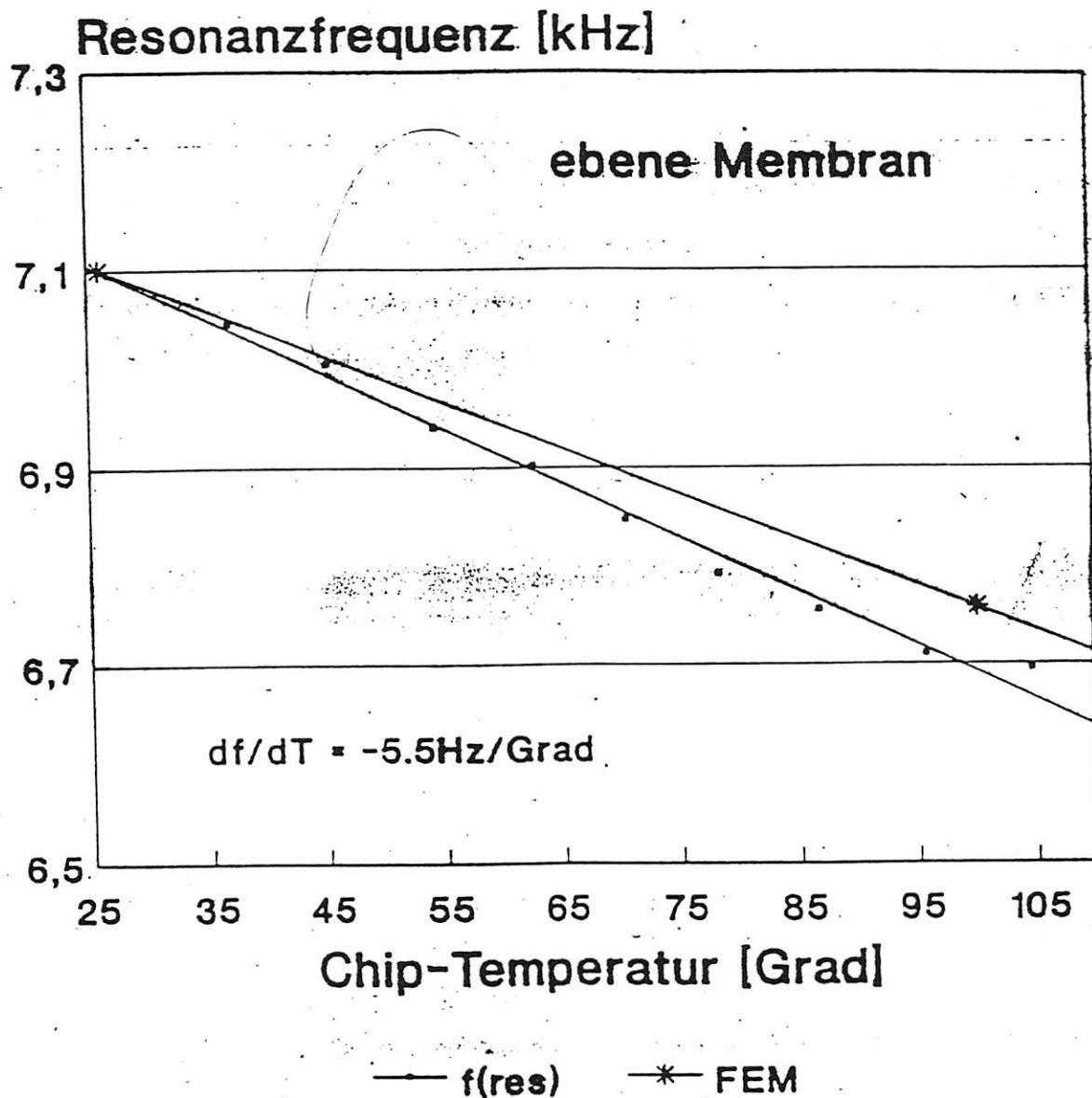
$$f(\text{res}) = \text{const}' \cdot T^2$$

- **Elektroden - Layout**

- **Packaging**

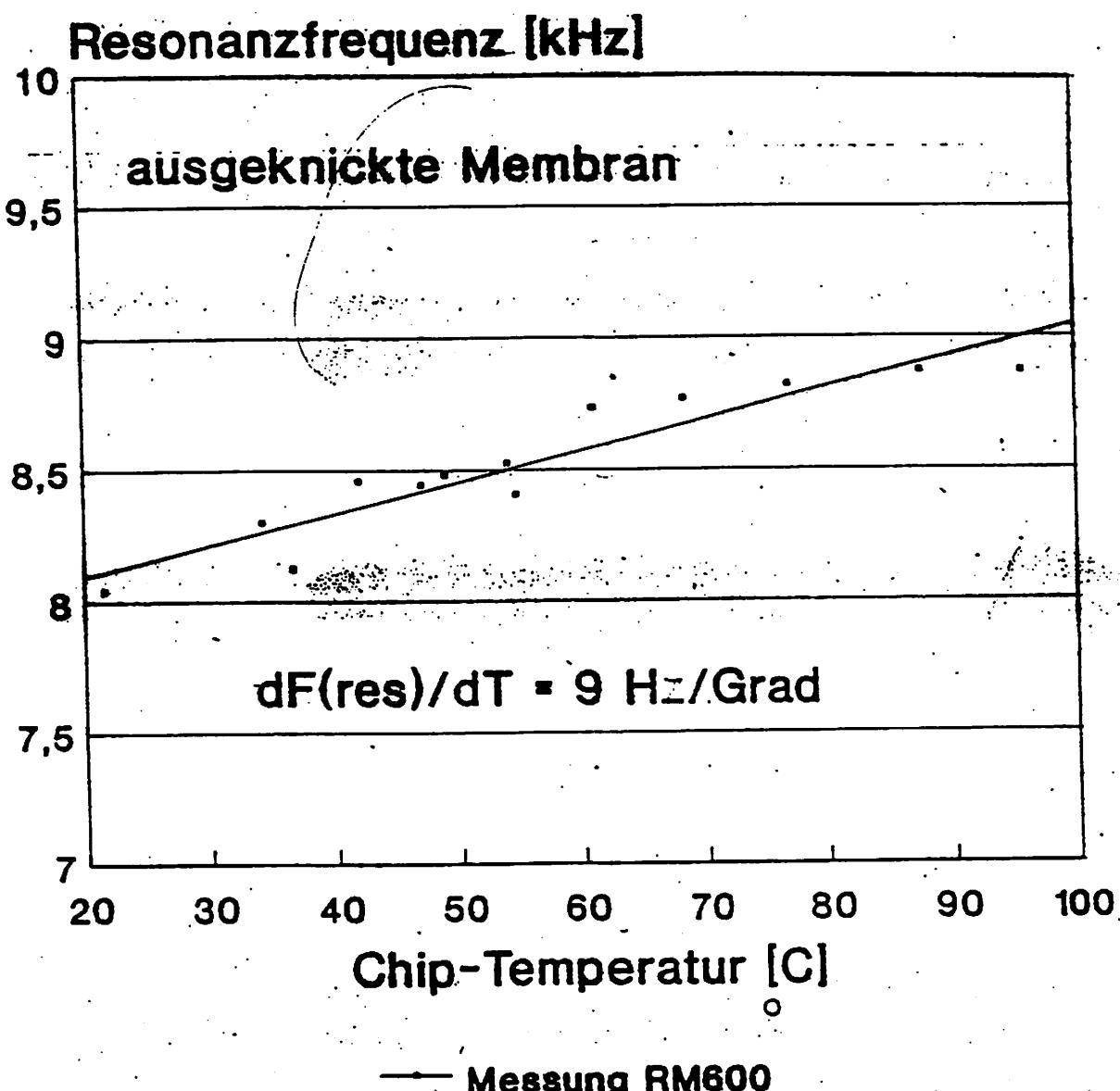
Resonanter Drucksensor M7 2/3

Serienresonanzfrequenz in Abhängigkeit von der Temperatur.

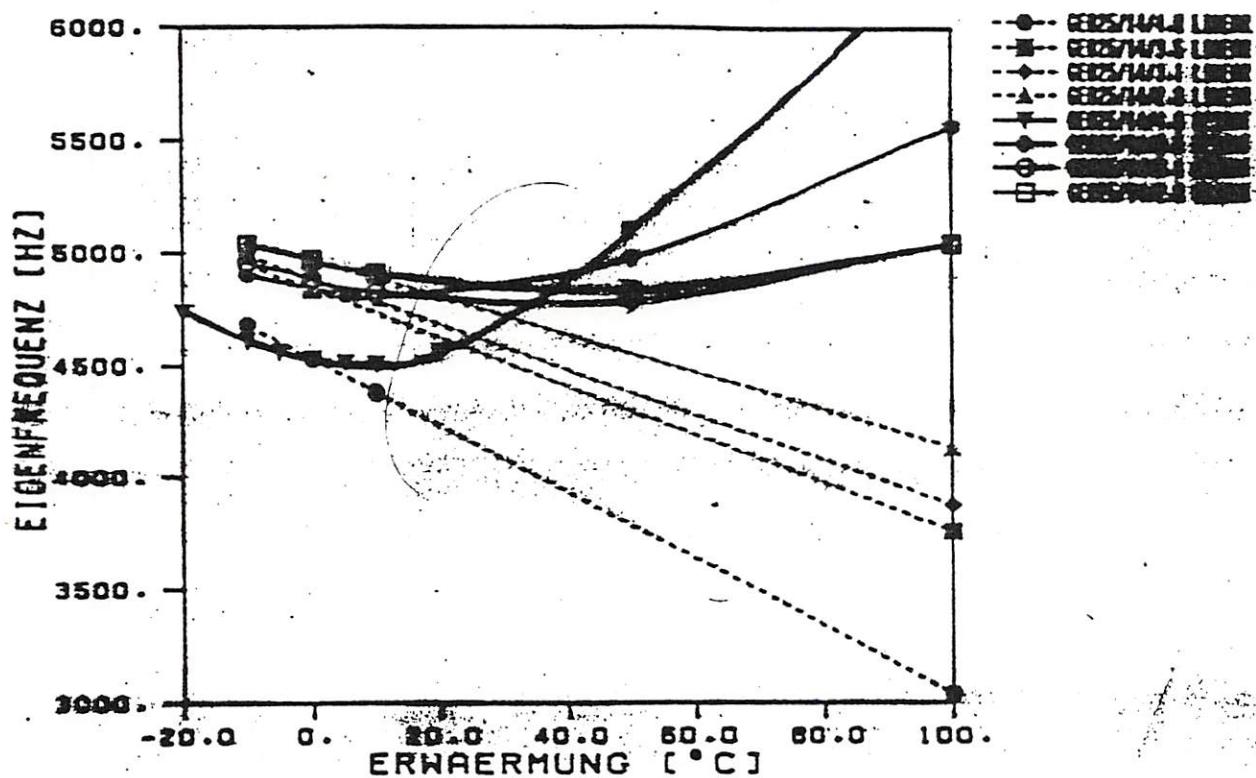


Si/ZnO-Chip, vereinzelt
HP 4194, Hotchuck

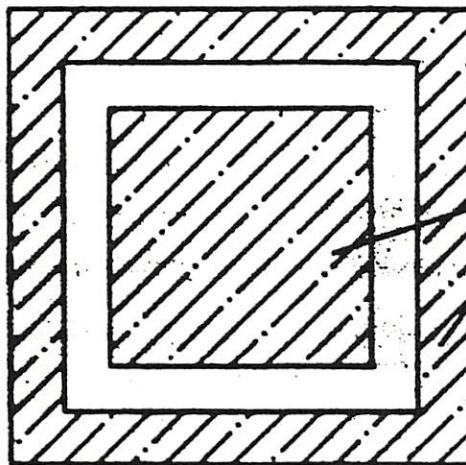
Resonanter Drucksensor Temperaturabhängigkeit der Resonanzfrequenz



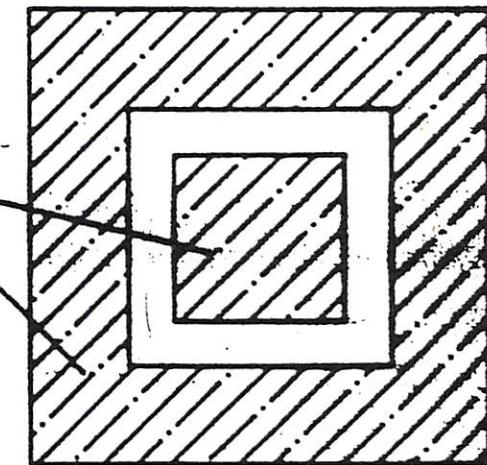
Si/ZnO-Chip, vereinzelt
 $d(\text{Si})= 50\mu\text{m}, d(\text{ZnO})= 11\mu\text{m}$ M11 1/1

EIGENFREQUENZ ALS FKT. DER TEMPERATUR
ZNO-SCHICHT 14µm. Si 25µm/10x10mm

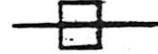
idealisiertes Layout:



stark temperaturabhängig

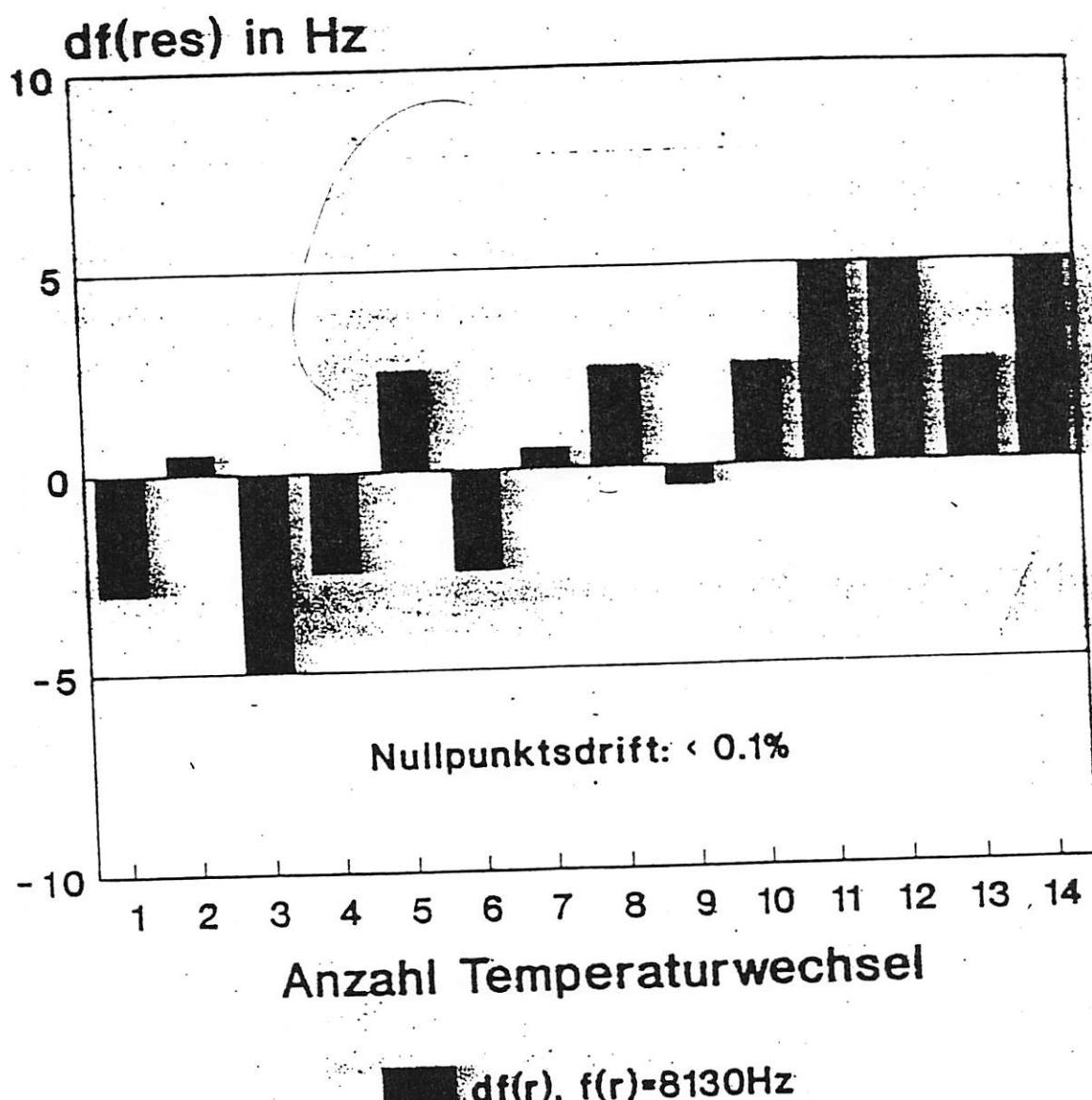


schwach temperaturabhängig



AGG, 39

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



HP 4194, Hotchuck
Si/ZnO-Chip, vereinzelt