

Abschlußbericht

Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung frequenzanaloger Sensoren

Teilprojekt: Design, Herstellung und Charakterisierung von Sensoren mit
thermischen Anregungsprinzip

Förderungskennzeichen : 13 AS 161A

Verbundpartner:

- (1) Fa. GMSmbH
- (2) HSG/ Institut f. Mikro- und Informationstechnik
- (3) BIZERBA - Werke Balingen

Projektleiter:

- (1) Dipl.Phys. A.Schmid/ Dr.H. Bartuch
- (2) Dipl.Phys. H.-J. Wagner

Teilprojektbearbeiter : Dipl.Phys. T. Fabula

- (3) Dr. K.P. Selig

Projektlaufzeit: 1.7.1989 - 31.12.1992

Arbeitsinhalte

Fa. GMSmbH

Entwicklung einer Labortechnologie zur Herstellung frequenzanaloger Sensoren auf Si-Basis mit den Schwerpunkten :

- Untersuchungen an SiOxNy-Plasma-CVD-Schichten
- Untersuchungen zur elektr. Stabilität eines löt- und bondbaren Kontaktschichtsystems
- Anisotropes Si-Ätzen resonanter Balkenstrukturen
- Layoutentwicklung und Bereitstellung von Maskensätzen
- Musterbereitstellung

HSG/IMIT

- Charakterisierung des Schwingungsverhaltens der Balkenstrukturen auf dafür entwickelten Meßplätzen bei passiver und aktiver Anregung
- Untersuchungen der sensitiven Eigenschaften der Resonanzfrequenz
- FEM-Berechnungen für Redesign und Wärmebilanz des Sensors

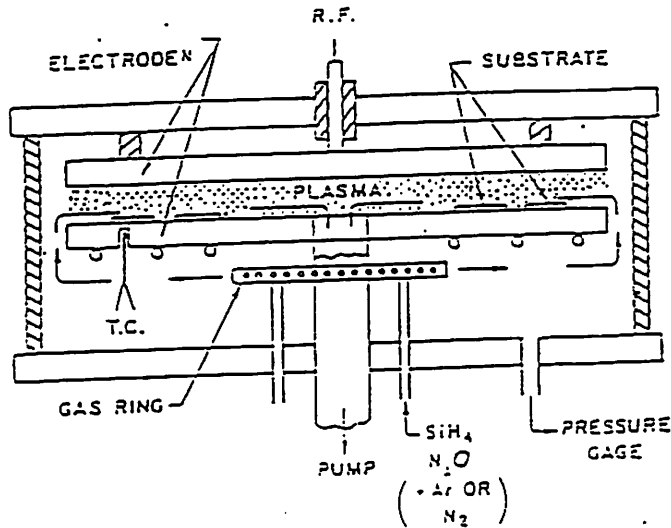
BIZERBA-Werke

- Entwicklung einer elektronischen Anregungsschaltung
- schwingungstechn. Charakterisierung aktiv angeregter Sensoren und exp. Bestimmung der Temperaturverteilung
- Untersuchungen zum Strömungseinfluß auf die Resonanzfrequenz

Topics

1. Zusammenfassung der Untersuchungen an SiO_xNy -Plasma
- CVD - Schichten
2. Zusammenfassung der Untersuchungen zur elektr. Stabilität
eines löt- und bondbaren Kontaktschichtsystems
3. Charakterisierung anisotrop geätzter resonanter Balkenstrukturen
4. Realisierung des thermischen Anregungsprinzips
5. Meßergebnisse zum sensitiven Verhalten der Strukturen
6. Schlußbemerkung

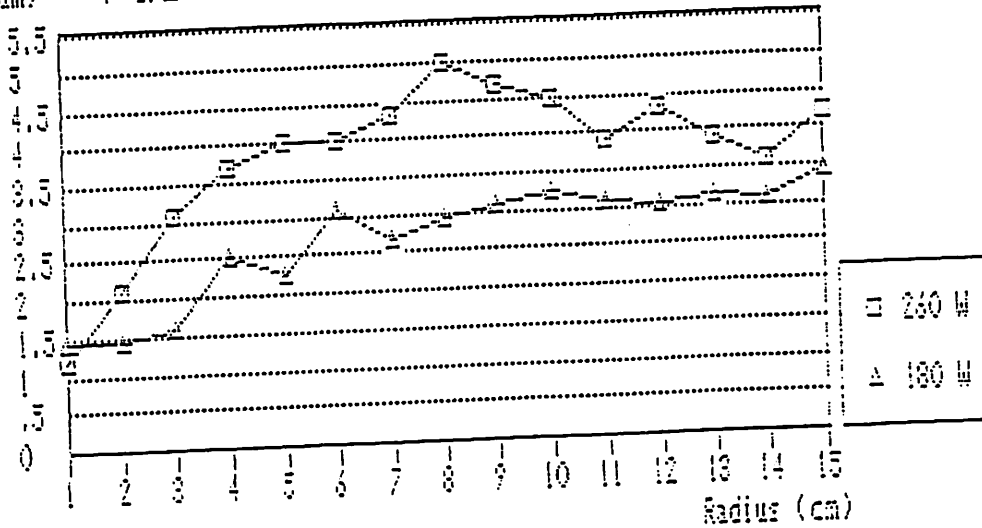
SiO_xN_y-Plasma-CVD-Schichten



Parallelplattenreaktor

| | |
|--------------------|---------------|
| Plattenabstand | 35...55 mm |
| Plattendurchmesser | 300 mm |
| Arbeitsfrequenz | 105 kHz. |
| Leistung | 100...500 W |
| Substr.-heizung | bis 350°C |
| Arbeitsdruck | 0.5... 1 mbar |

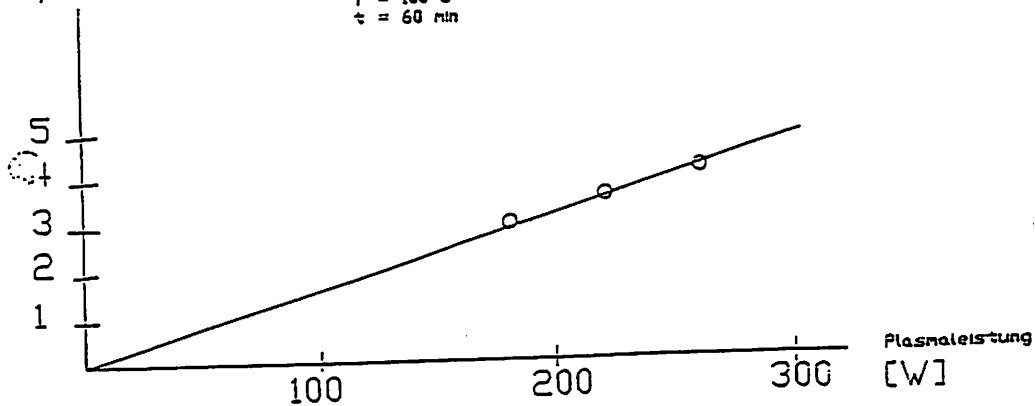
Dicke (µm) radiale Schichtverteilung



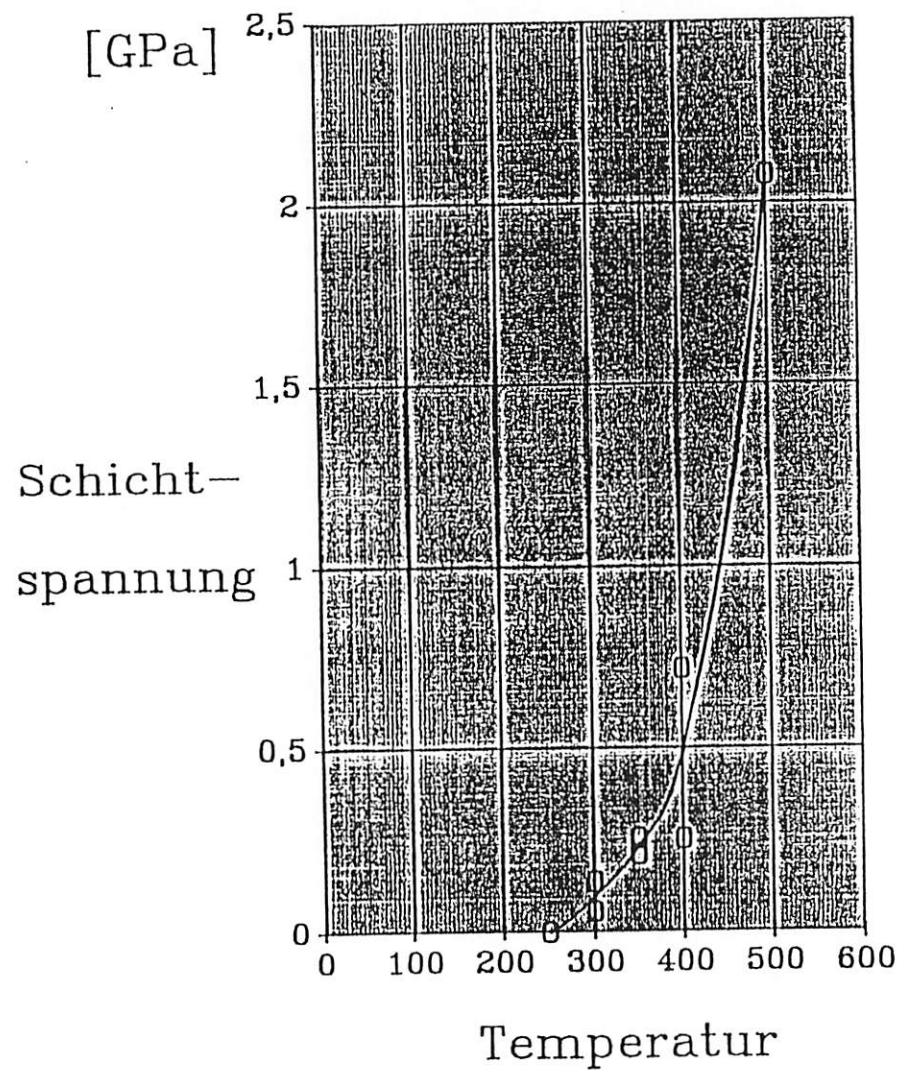
Schichtdicke

[µm]

SiH₄ 24 sccm/min
N₂ 976 sccm/min
NH₃ 120 sccm/min
p = 1 mbar
T = 100 °C
t = 60 min



Temperaturverhalten von Si_3N_4 Schichten



Temperaturzeit : 13 h

Untersuchungen zur Eignung als Ätzmaskierung und zur Membranherstellung

| | Ätzrate (KOH 30%/80°C) | | Prozeßtemperatur |
|--------------------------------|------------------------|-----------|------------------|
| | vertikal | lateral | |
| Si ₃ N ₄ | 1 nm/min | | 100°C ... 200°C |
| SiO _x Ny | 6 nm/min. | 2...4µm/h | |
| SiO ₂ | 7.8 nm/min | | |
| therm. Oxid | 7.2 nm/min | | |

- Eine zwar gute selektive Ätzbarkeit der Si₃N₄-Schichten gegenüber Si, aber zu starke laterale Unterätzungen und trotz abgesenkter Substrattemperatur zu hohe Schichtspannungen (Rißbildung) hatten zur Folge, daß dieser Weg nicht weiter beschritten wurde.
- Die technologischen Untersuchungen zum Aufbringen einer sensitiven Metallschicht (Ni) wurden gleichfalls eingestellt.
- Als Ätzmaskierung für die weitere Arbeiten wurde ausschließlich thermisches SiO₂ in Betracht gezogen.

Untersuchungen zur Eignung als Passivierungs- bzw. Isolationsschicht

| | Si ₃ N ₄ | SiO ₂ |
|-----------------------|--|--|
| Substrattemp. | 150°C | 300°C |
| Rate | 30 nm/min | 100 nm/min |
| Ätzrate (BHF 6:1) | --- | 160 nm/min therm.Oxid 40 nm/min |
| Schichtdicke 1...2µm | hohe Pinholdichte; ungenügender Schutz gegen aggressive Medien | Verbesserung der Stabilitätseigenschaften von NiCr |
| Schichtdicke 5...8µm | --- | vereinzelt Pinholes |
| Durchbruchsfeldstärke | --- | > 2*10 ⁶ V/cm als Isolationsschicht gut geeignet |

- Passivierungseigenschaften lassen sich auf Grundlage der bisherigen Untersuchungen bei Bedarf gezielt verbessern.
- Erkenntnisse aus Untersuchungen der Isolationseigenschaften der SiO₂-Schichten werden bereits technologisch genutzt.

Elektrisches Kontaktsystem

Anforderungen:

- lötbar, bondbar
- hohe thermische und mechanische Stabilität im Bereich von 120°C bis 180°C
- ätzresistent gegenüber KOH

KONTAKTSYSTEMVARIANTEN

| Gruppe | Haftschicht/Diffusionsbarriere | Lötschicht | Bondschiicht |
|----------|--------------------------------|------------|--------------|
| 1 | - | Ni (400) | Au (160) |
| 2 | Ni (50) | Pd (448) | Au (160) |
| 3 | Ni (50) / Ti (60) | Pd (448) | Au (160) |
| Standard | Ti (50) | Pd (448) | Au (160) |

(~~mm~~) Schichtdicke in nm

Technologie :

Fluoreszenzlichtabscheidung : Elektronenstrahl; in Vakuumfolge

Strukturierung : naßchemisch

| Kontaktformierung | Variante 1 | Variante 2 |
|-------------------|-------------------|----------------|
| | 280°C, 2.5 h Luft | 350°C, 24 h N2 |

Elektrische Untersuchungen – experimentelle Parameter

Teststruktur: Substrat Dünnschichtkeramik
Vorderseite Heizschicht 200 Ohm, Kont.-sch.
Rückseite Ni-Temp.-Messwiderstand
Anschlüsse Cu-Draht, gelötet

Impulsparameter: Imp.-Länge 1 sec; Frequenz 0.1 Hz
Leistung 0.98 W; Strom 70 mA
Impulsspitzen temperatur: $(175 \pm 5)^\circ\text{C}$

Ofen temperatur: $(150 \pm 5)^\circ\text{C}$
 $(175 \pm 5)^\circ\text{C}$

Impulsbelastung
Impulsspitzen temp.: $(175 \pm 5)^\circ\text{C}$

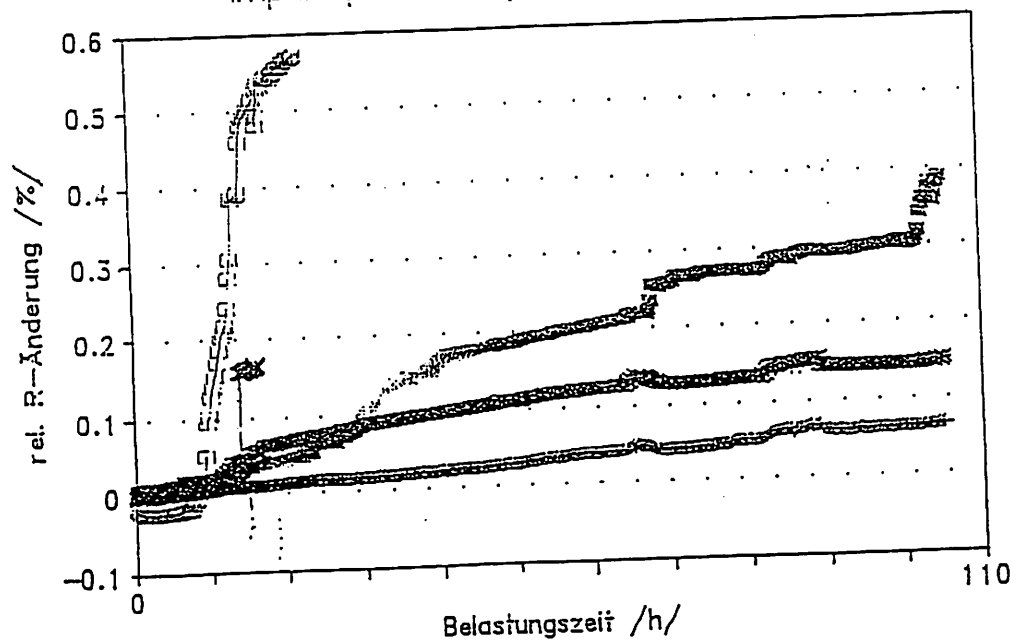
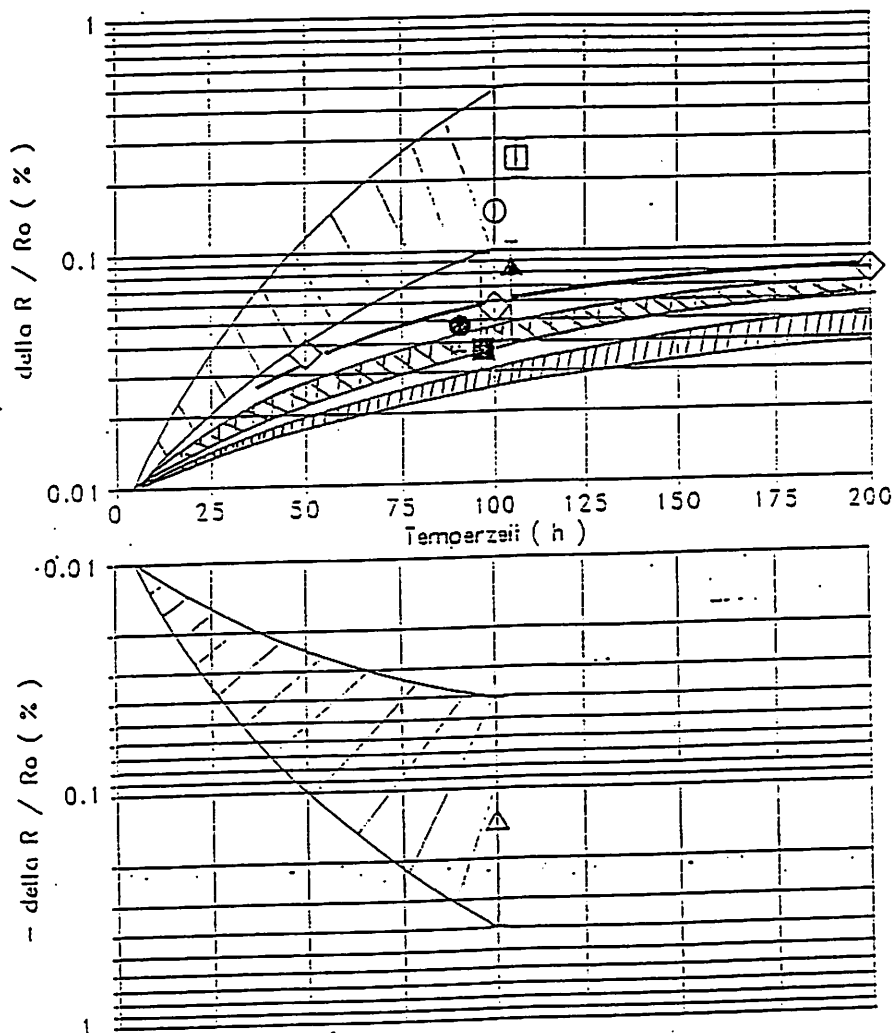















Abb. 5: Versuch Kontaktoptimierung
Tempern 150°C Luft



| Kontaktaufbau | Vorbehandlung | gelötet | gebondet |
|-----------------------|---------------|---|---|
| Ni/Au | 280°C |  |  |
| | 350°C |  |  |
| Ni/Pd/Au | 280°C |  |  |
| | 350°C |  |  |
| Ni/Ti/Pd/Au | 280°C |  |  |
| | 350°C |  |  |
| NiCr-Grundkurve 280°C | |  | |

Elektrisches Kontaktsystem

Ergebnisse

- Eine signifikante Zunahme des Kontaktübergangswiderstandes bei Bondverbindungen und Temperaturen bis 200°C wurde variantenunabhängig nicht festgestellt.
- Lötverbindungen mit Standardkontaktsystem sind bei entsprechender thermischer Vorbehandlung (350°C, 24 h N₂) bis ca. 160°C stabil möglich.
- Haftfestigkeit auf therm. SiO₂ ist kritisch.
Bewährt hat sich NiCr als zusätzliche Haftschrift.

Resonante Balkenstrukturen

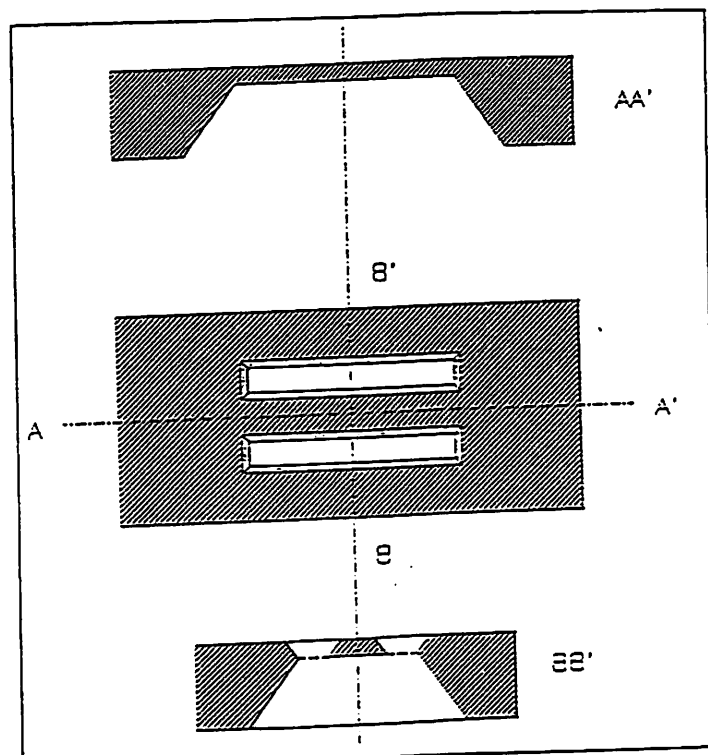


Abb. 1 Balkenstruktur

Die erste Resonanzfrequenz errechnet sich nach der Gleichung für einen, an beiden Seiten fest eingespannten, Balken

$$f_0 = 1,026 \frac{r}{l^2} \sqrt{\frac{E_{110}}{\rho}} \quad (1)$$

mit

Balkendicke

$$t = 50 \mu\text{m},$$

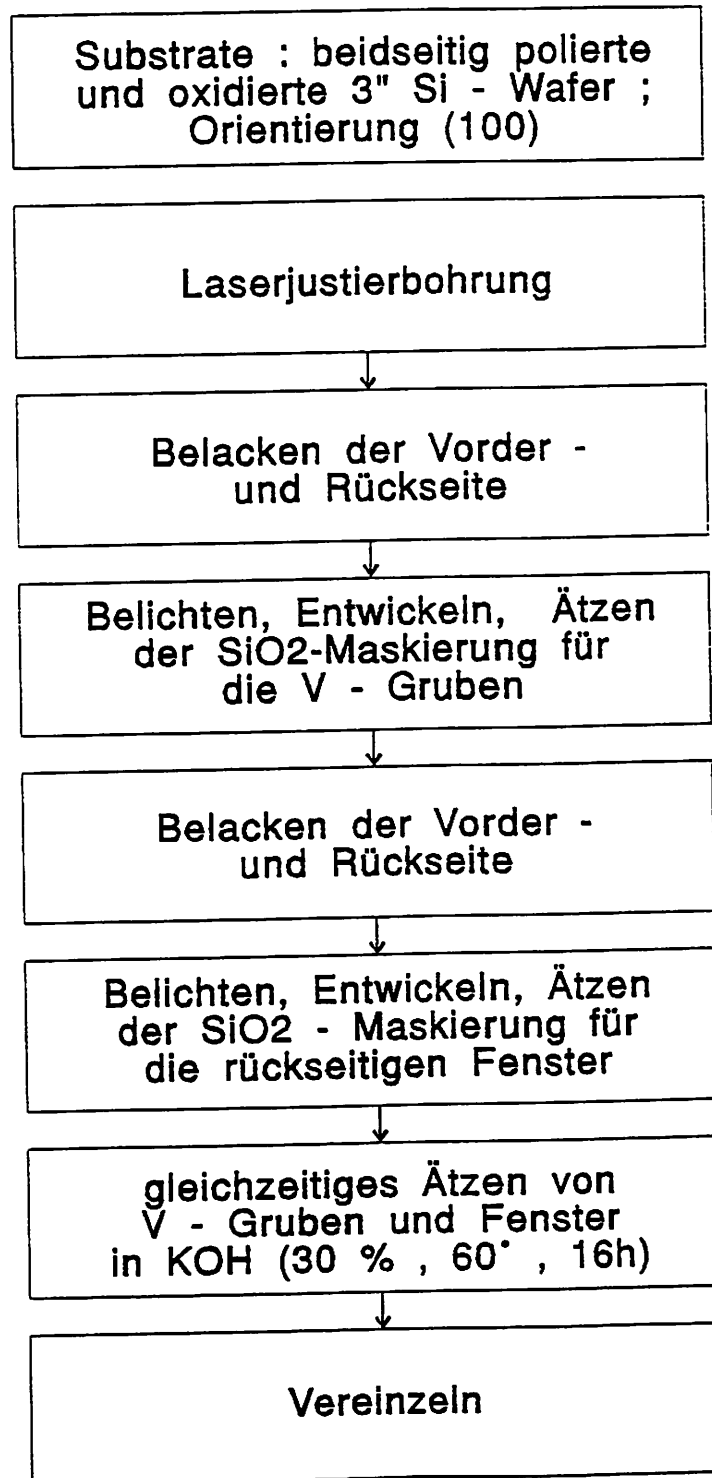
reduziertes E-Modul $E_{110} = 1.7 \cdot 10^{11} \text{Pa},$

Dichte

$$\rho = 2.329 \text{g/cm}^3.$$

| $l[\text{mm}]$ | $f_0[\text{Hz}]$ |
|----------------|------------------|
| 10 | 4380 (1,00) |
| 8 | 6850 (1,00) |
| 6 | 12170 (1,00) |
| 4 | 27390 (1,00) |
| 3 | 48700 (1,00) |

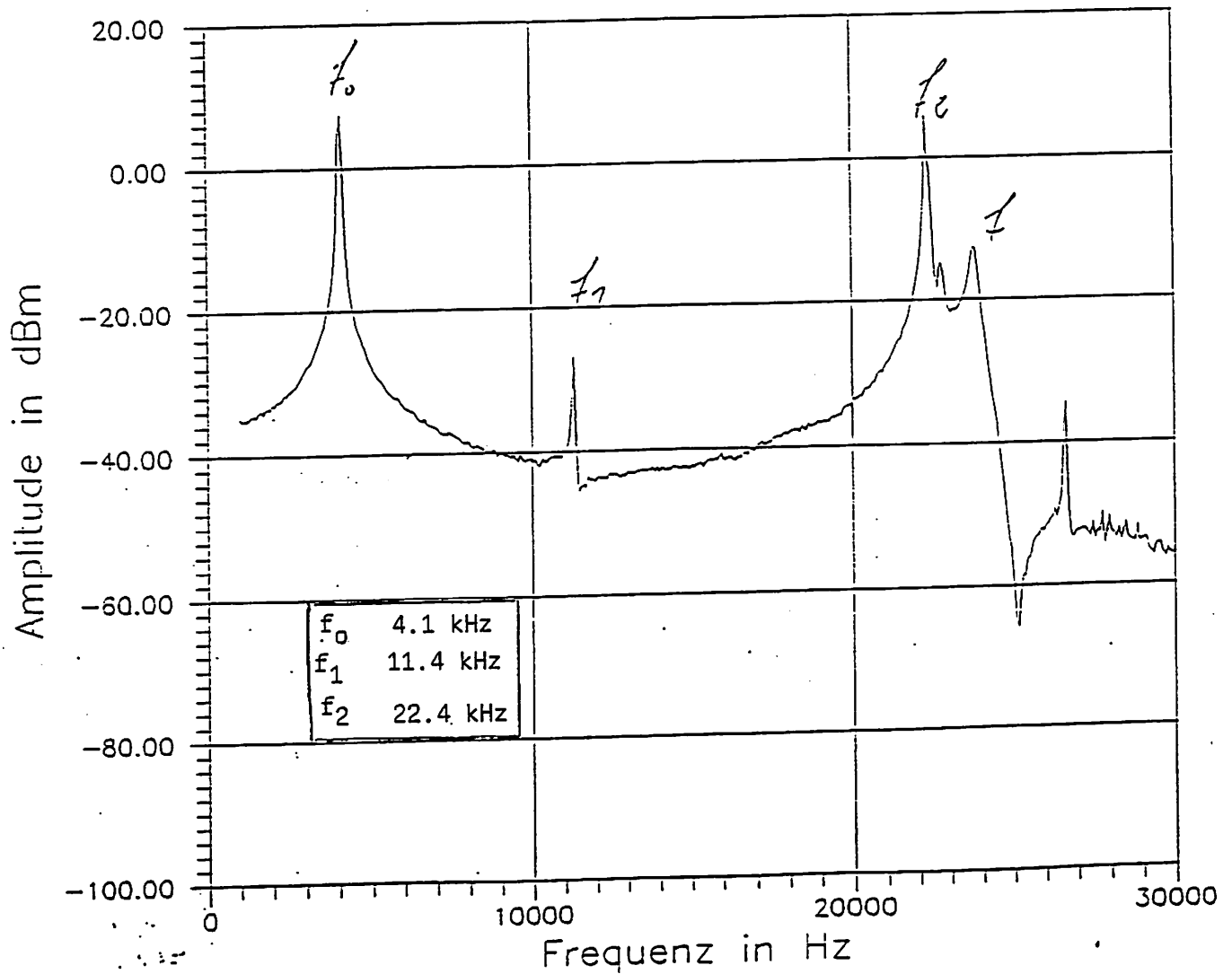
Technologie



| geometr. Meßdaten | | | | | | |
|-------------------|---------|-----|--------|-----|--------|---------|
| μm | Breite | | | | Dicke* | |
| Wafer-Nr. | V-Grube | | Balken | | Balken | |
| | Soll | Ist | Soll | Ist | Soll | Ist |
| 4 | 70 | 90 | 900 | 870 | 50 | 30...35 |
| 5 | 70 | 83 | 900 | 887 | 50 | 48...52 |
| 6 | 70 | 80 | 900 | 892 | 50 | 56...60 |

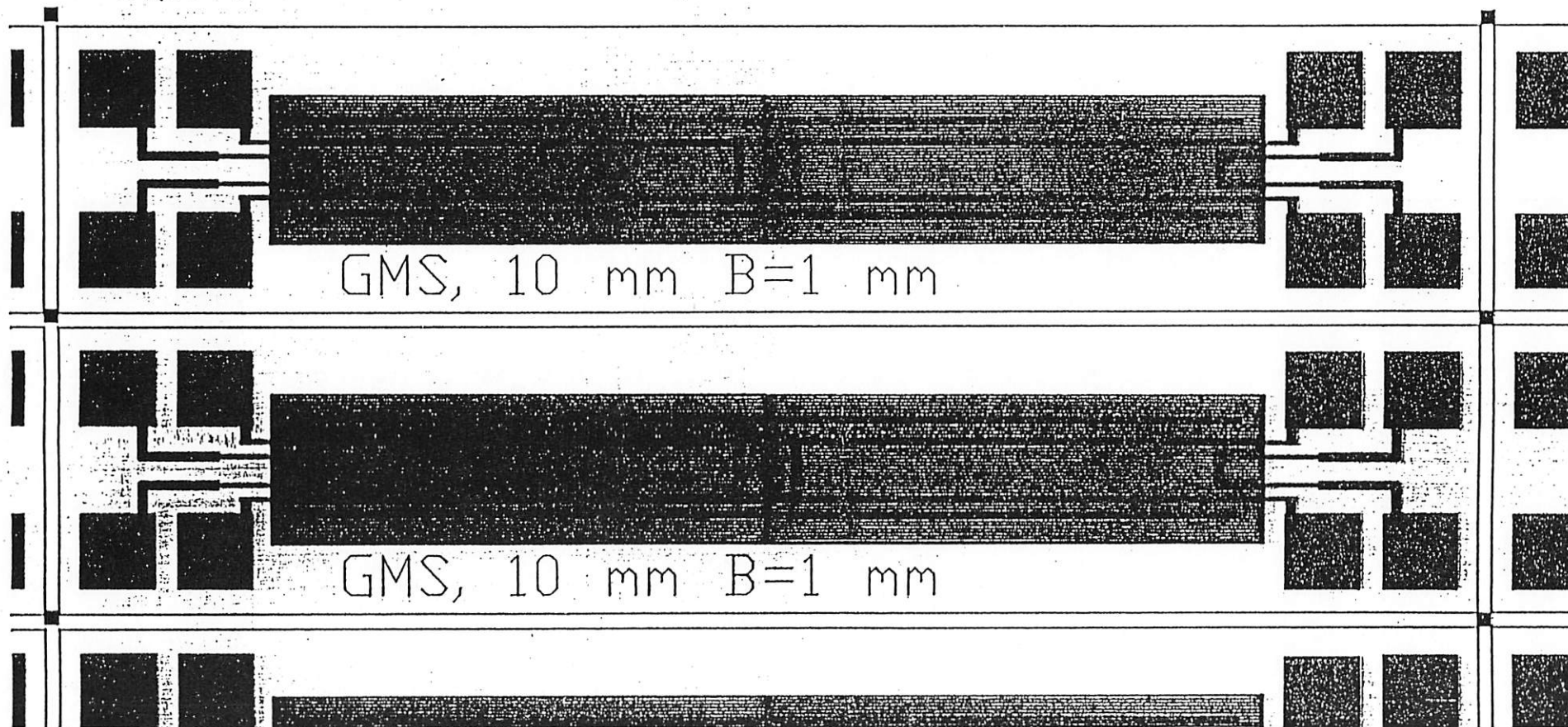
* durch HSI mit REM bestimmt

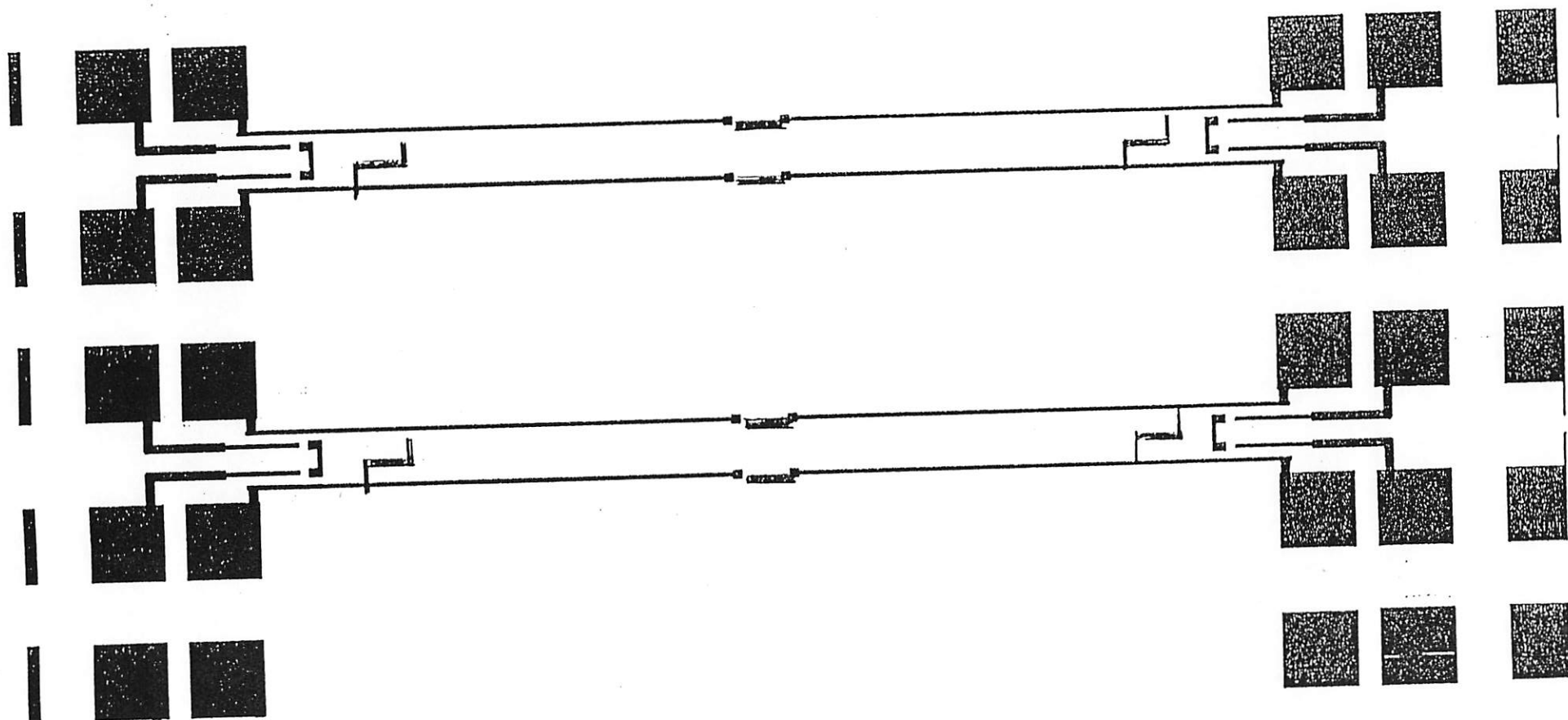
Frequenzspektrum eines 10mm-Schwingers



Resonante Balkenstrukturen

| I | Berechnung | | | Messung | | | |
|----|------------|-----------|------------|---|----------------|-------------|--------------|
| | f_i [Hz] | berechnet | Verhältnis | Balken # | gemessen | Güte | Verhältnis |
| 10 | f_0 | 4380 | 1,00 | 1 2 | 4150 - | 296 - | 1,00 - |
| | f_1 | 12050 | 2,75 | 1 2 | 11390 - | 872 - | 2,75 - |
| | f_2 | 23560 | 5,38 | 1 2 | 22410 - | 442 - | 5,40 - |
| 8 | f_0 | 6850 | 1,00 | 1 2 | 7180 7330 | 377 488 | 1,00 1,00 |
| | f_1 | 18840 | 2,75 | 1 2 | 19900 18990 | 836 950 | 2,77 2,59 |
| | f_2 | 36850 | 5,38 | 1 2 | 36610 36260 | 610 1133 | 5,10 4,95 |
| 6 | f_0 | 12170 | 1,00 | 1 2 | 14080 13740 | 140 138 | 1,00 1,00 |
| | f_1 | 33470 | 2,75 | 1 2 | 38320 37580 | 50 257 | 2,73 2,73 |
| | f_2 | 65470 | 5,38 | 1 2 | - - | - - | - - |
| 4 | f_0 | 27390 | 1,00 | 1 2 | 26860 26120 | 290 523 | 1,00 1,00 |
| | f_1 | 75320 | 2,75 | 1 2 | - - | - - | - - |
| | f_2 | 147350 | 5,38 | 1 2 | - - | - - | - - |
| 3 | f_0 | 48700 | 1,00 | Eigenfrequenzen nicht eindeutig detektierbar | | | |
| | f_1 | 133930 | 2,75 | | | | |
| | f_2 | 262000 | 5,38 | | | | |

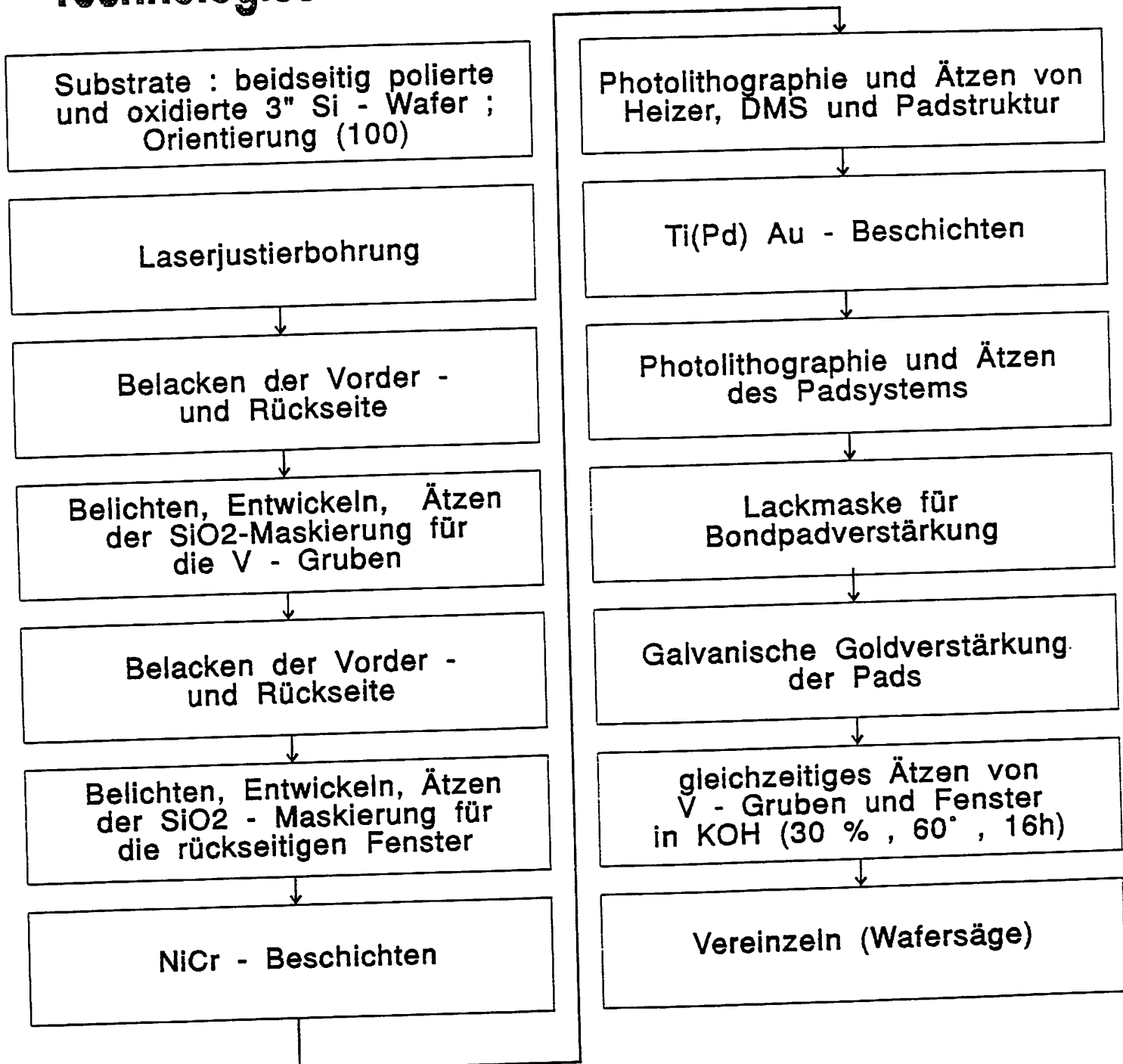




elektrische Meßdaten :

- Brückenwiderstand (445 \pm 5) Ohm
- Heizerwiderstand (300 \pm 5) Ohm
- Temperaturkoeff. (80 \pm 10) ppm/K

Technologischer Ablauf zur Musterbereitstellung



Thermisches Anregungsprinzip

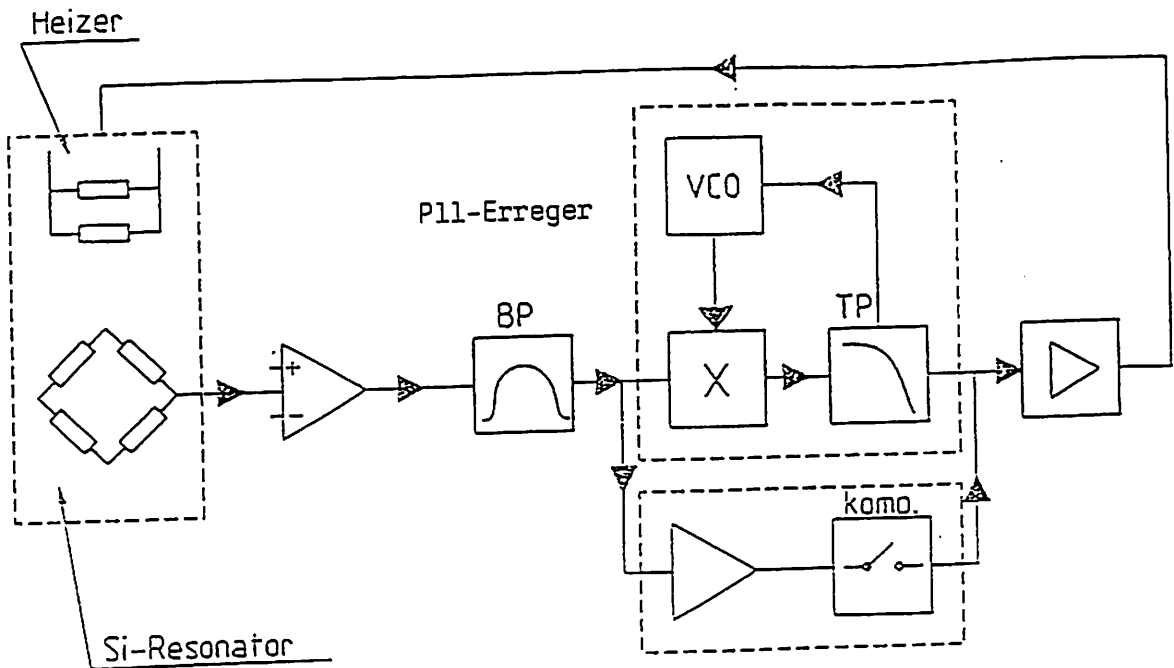
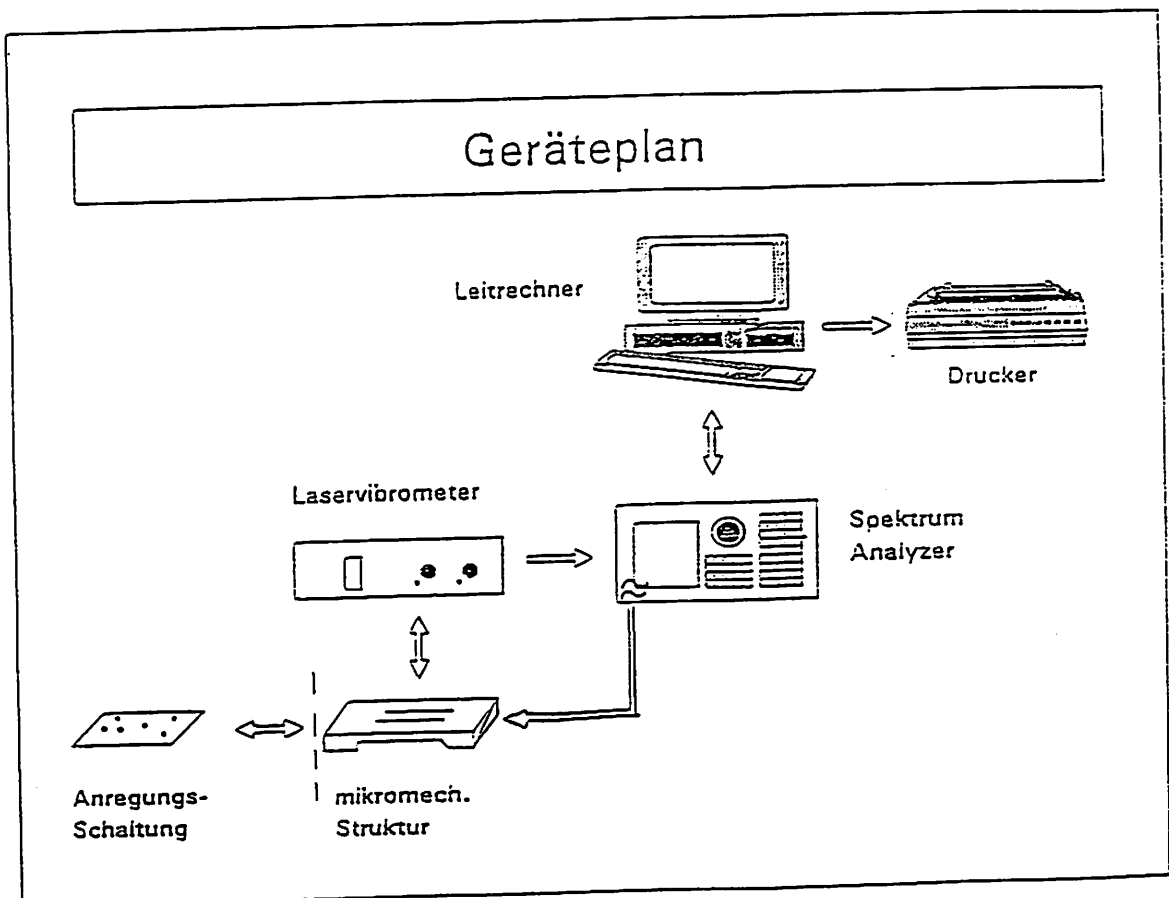


Bild 2: Prinzipschaltbild der verwendeten Erregerschaltung.
(VCO: Voltage Controlled Oscillator; X: Mischer)

Bild 4.1: Geräteplan des optischen Meßplatzes



MESSERGEBNISSE

| (1. Layout) | Balken | | Frequenz | | Güte |
|-----------------------------|--------|-------|----------|------|------|
| | Länge | Dicke | theor. | gem. | |
| | /mm/ | /μm/ | /kHz/ | | |
| | | | | | |
| (Heizleistung : 2 * 60 mW) | | | | | |
| 3 | | 34 | 29 | 19 | 570 |
| 6 | | 34 | 7 | 6 | 180 |
| 8 | | 34 | 4 | 4 | 220 |
| | | | | | |
| (Heizleistung : 2 * 600 mW) | | | | | |
| 6 | | 55 | 12 | 11 | 300 |
| 10 | | 55 | 4 | 4 | 300 |

| 10 mm - Balken | 1. Layout | | Redesign |
|--|-----------|---------------|----------|
| | | | |
| elektr. Leistung / mW / : | | | |
| Heizer | | 60 600 | 640 |
| Brücke | | — 280 | 320 |
| Temperaturdiff. / °C / (Mitte / Rand) | | — 60 | 30 |
| T _{max} | | — 100 (170) | 68 |
| DMS - Signal / mV / (Verst.-faktor : ca. 250) | | — 40 | 200 |
| Auslenkung / μm / | | <0,1 ca. 1 | ca. 1 |

Bild 8.14: Verschiebung der Amplitudenspektren verschiedener Temperaturzustände

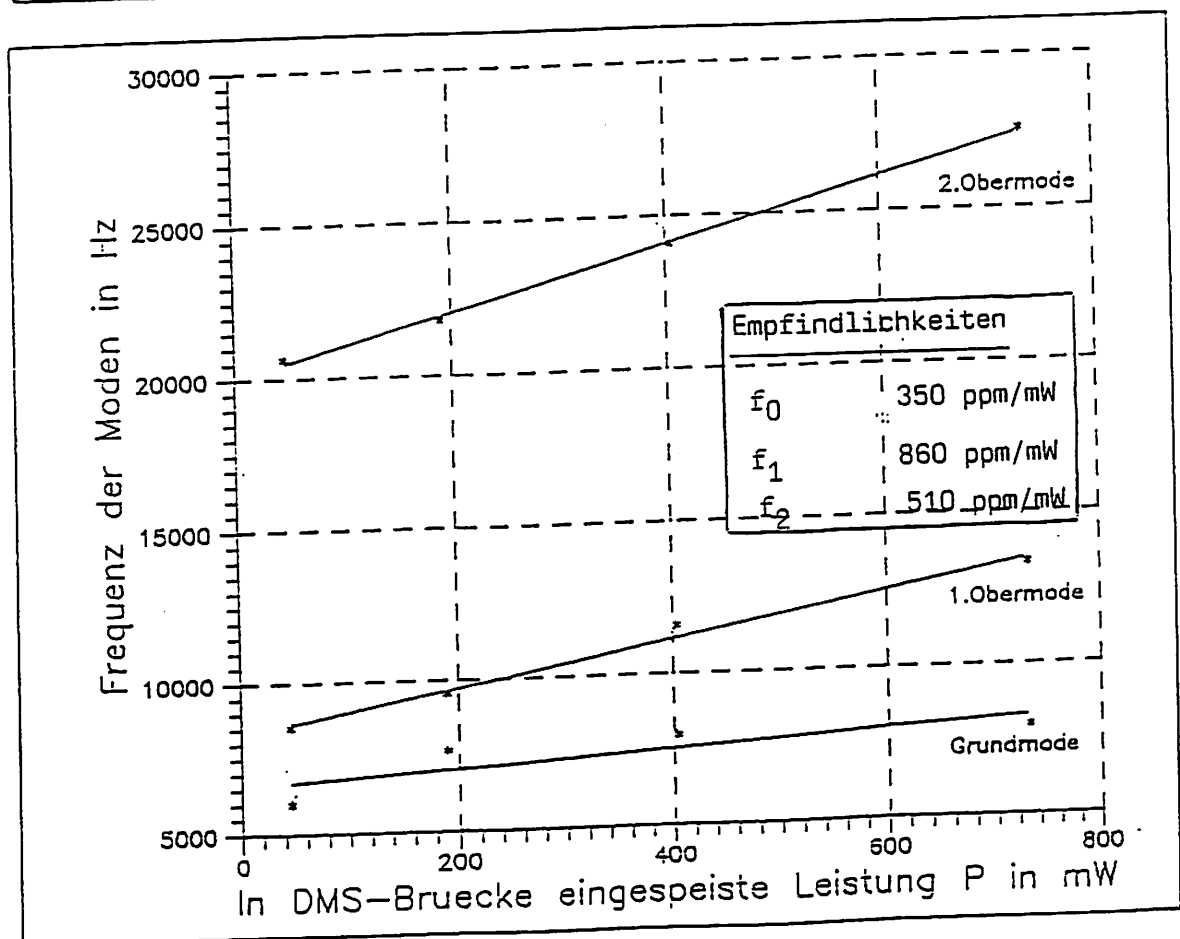
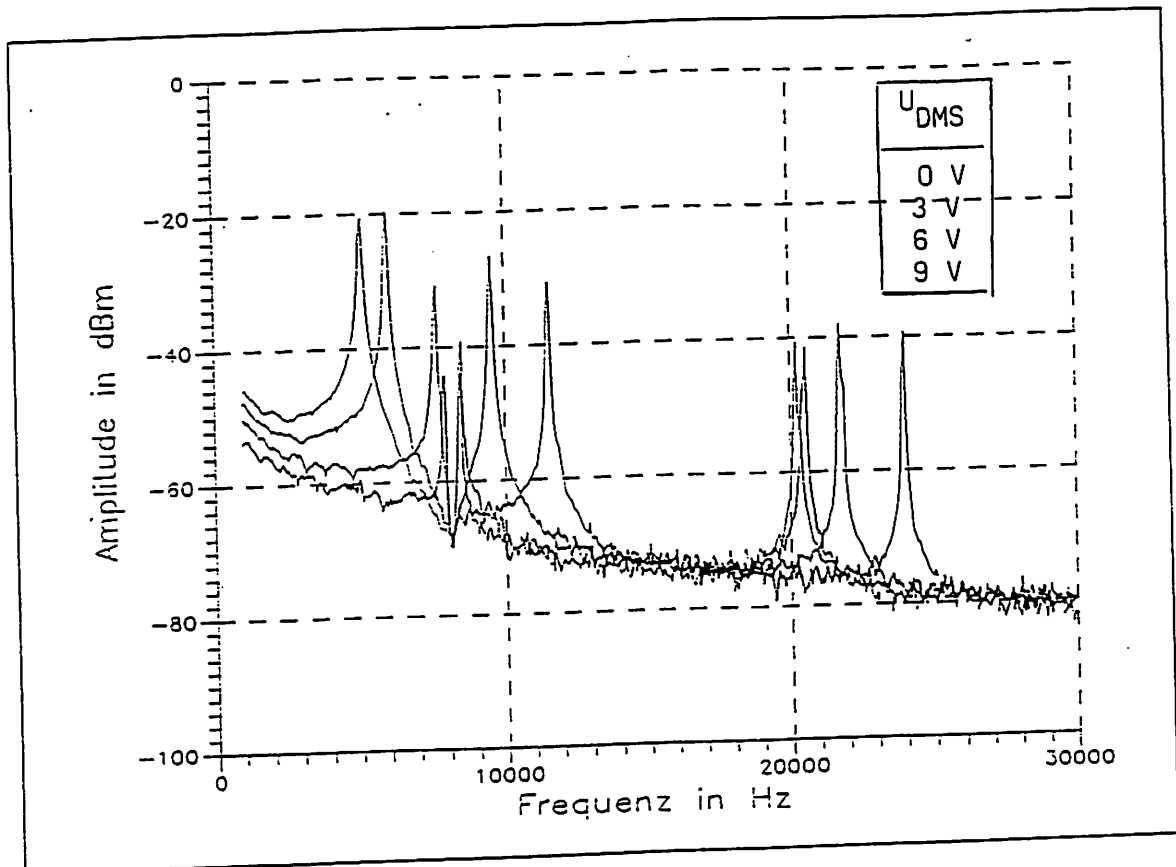


Bild 7.1: Seitenansicht der Vorrichtung zur Krafteinleitung

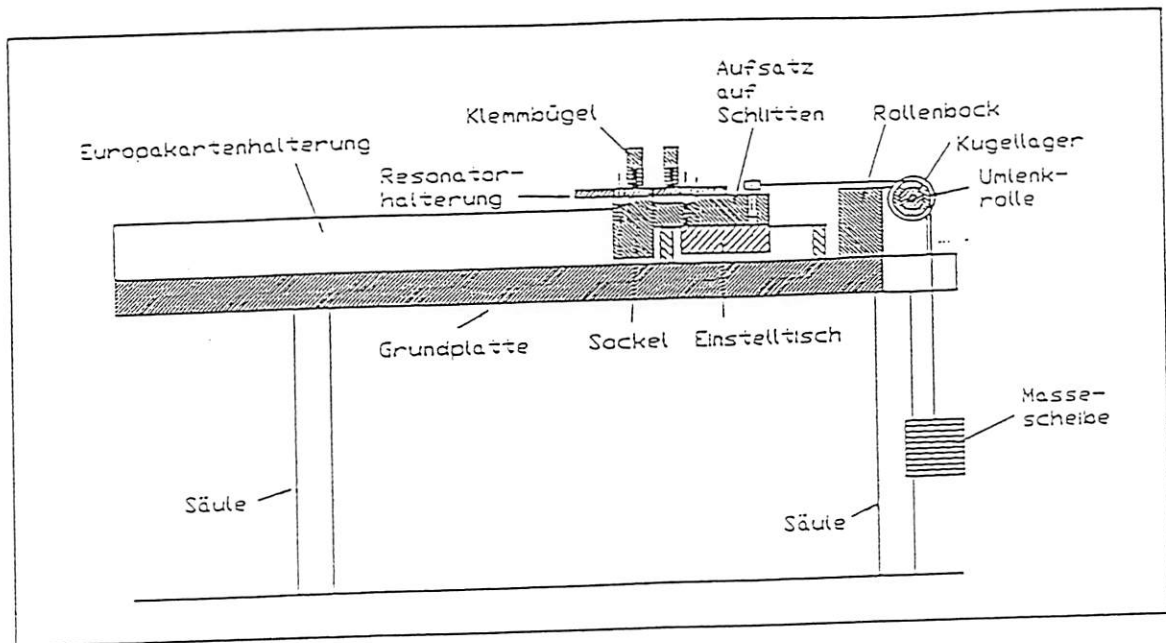
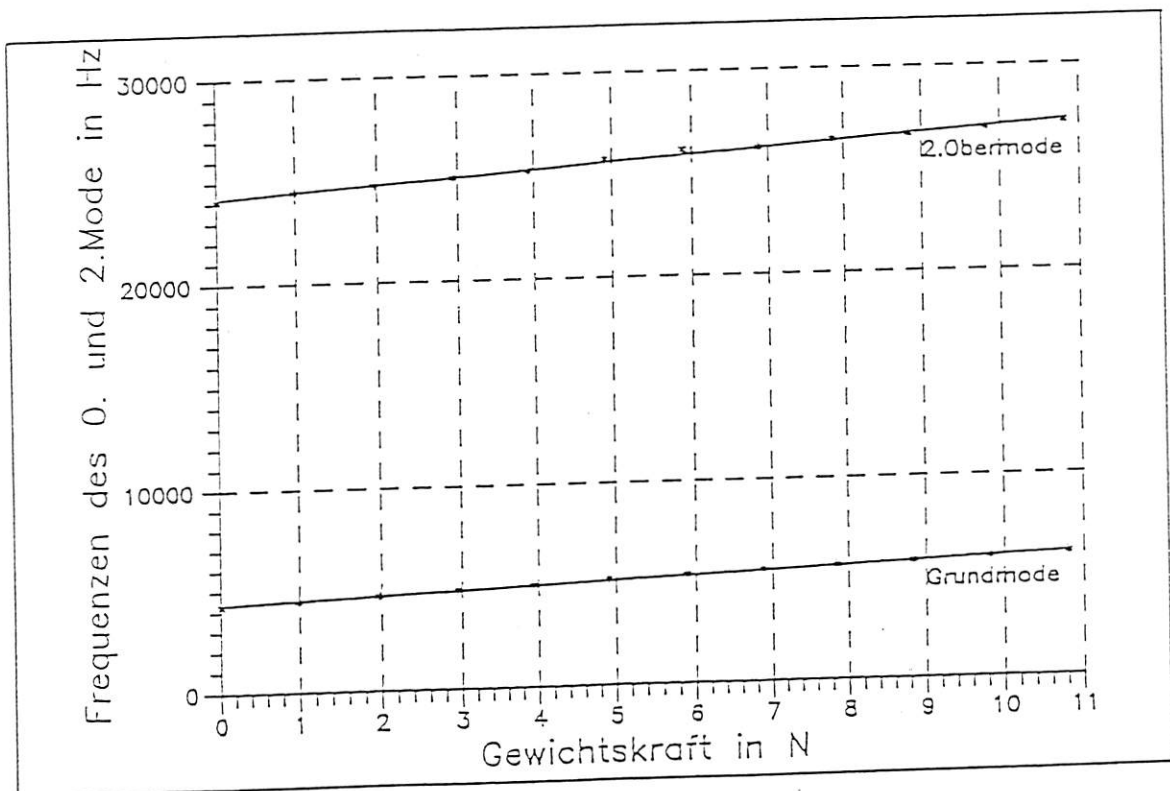


Bild 8.12: Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der eingeleiteten axialen Kraft



Aus den Kennlinien, die im gemessenen Bereich von $F_G = 0 - 11 \text{ N}$ annähernd linear verlaufen, wurden die Kraftempfindlichkeiten der Moden ermittelt und in Tabelle 8.5 festgehalten.

Tab.8.5: Kraftempfindlichkeiten $\eta = \frac{1}{f_0} \cdot \frac{\Delta f}{\Delta F}$ der Moden im Bereich $F = 0 - 11 \text{ N}$

| | Grundmode \hat{f}_0 | 2.Obermode \hat{f}_2 |
|--------|-----------------------|------------------------|
| η | $0,04 \text{ N}^{-1}$ | $0,011 \text{ N}^{-1}$ |

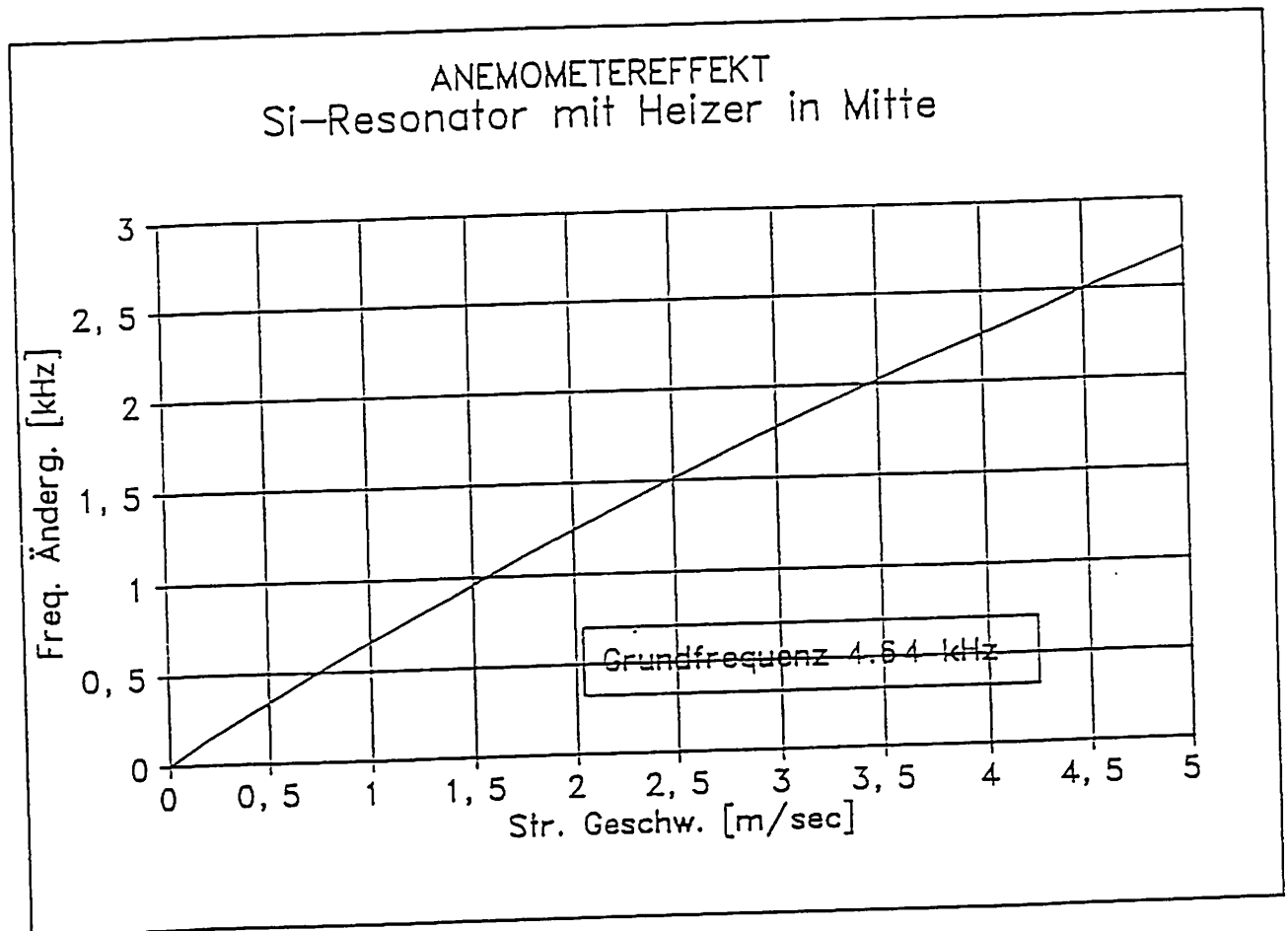


Bild 5: Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Strömungsgeschwindigkeit der Umgebungsluft.

SCHLUSSBETRACHTUNG

Entsprechend der im Projektantrag für die Fa. Staiger/GMSmbH formulierten Aufgabenstellung wurden im Bearbeitungszeitraum alle wesentlichen Zielstellungen erreicht. Das betrifft insbesondere

- Einrichtung einer Prozeßlinie zur Herstellung dreidimensionaler Mikrostrukturen auf Si-Basis
- Herstellung mikromechanischer Resonatoren als Testmuster (elektrothermisch anregbar); Optimierung von Prozeßparametern
- Untersuchungen zur Integration der Resonatoren mit elektronischer Signalverarbeitung (NiCr-DMS, Leitbahn- und Kontaktsystem; Passivierung); Optimierung von Prozeßparametern

Durch die Arbeiten der Verbundpartner im Teilprojekt konnte gezeigt werden, daß

- das thermische Anregungsprinzip zur Herstellung frequenzanaloger Sensoren geeignet ist,
- die nachgewiesenen Effekte für Sensoranwendungen (Kraft, Druck, Temperatur, Strömung) nutzbar gemacht werden können,
- die Umsetzung in ein zuverlässig funktionierendes Sensorsystem jedoch noch beträchtlicher Anstrengungen bedarf (Reduzierung von Querempfindlichkeiten, insb. Temp.; Einleitung von Meßgrößen; Langzeituntersuchungen)