

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

Förderkennzeichen 13 AS 0115

Berichtszeitraum: 1.7. bis 31.12.1991

*MotoMeter AG
Daimlerstraße 6
7250 Leonberg*

*Projektleiter: Dr. S. Dagenbach
Bearbeiter: W. Hartig*

Quarzmembran als Drucksensor

Inhaltsübersicht

- 1 Anregung der Biegeschwingung
 - 1.1 Theoretische Untersuchungen
 - 1.1.1 Matrizenschreibweise des piezoel. Verhaltens von Quarz
 - 1.1.2 FEM Berechnungen
 - 1.2 Messung der Schwingungsanregung
 - 1.2.1 Gain-Phase-Analysen:
 - 1.2.2 Anregung mit einem Piezolausprecher:
 - 1.2.3 Messungen mit dem Polytec - Laservibrometer
 - 1.3 Schaltungen
 - 1.3.1 "Normale" Oszillator Schaltungen
 - 1.3.2 Burstanregung durch Sinusgenerator
- 2 Strukturierungsverbesserungen
 - 2.1 an der lasergeschnittenen Elektrodenform
 - 2.2 an der quarzgeätzten Membranringstruktur
- 3 Herstellung/Technologie
 - 3.1 Quarztechnologie
 - 3.2 Testblankmaske "FAS2"
 - 3.2.1 Justierhilfen für Laser
 - 3.2.2 Flatzeichen
 - 3.2.3 Maßbalken zur Tiefenbestimmung
 - 3.2.4 Homogene Testkreisringe
 - 3.3 Erzieltes Ätzergebnis der ersten "Korrekturform"
- 4 Druckempfindlichkeit und Schwingungsformen
 - 4.1 Bei Burstanregung mit Sinusgenerator
 - 4.2 Messungen mit dem Polytec-Laservibrometer am HSI
 - 4.2.1 An der FAS1 Struktur
 - 4.2.2 An der FAS2 Struktur
- 5 Ausblick

1 Anregung der Biegeschwingung

1.1 Theoretische Untersuchungen

Da die im Juni/Juli 91 am HSI aufgenommenen Gain-Phase-Analyse Kurven der ersten Sensoren nicht zu interpretieren waren, d.h. es konnte kein Resonanzverhalten festgestellt werden, wurde überprüft, ob im theoretisch-rechnerischen Bereich ein Fehler gemacht wurde.

1.1.1 Anschauliche allgemeine Darstellung des piezoelektrischen Verhaltens im Quarz anhand der Matrizenschreibweise.

Der grundsätzliche Zusammenhang lautet:

El.Feldstärke * piezoelektr. Konstante = Verschiebung ($E \cdot d = \epsilon$)

Verschiebung = Längenänderung / Ausgangslänge ($\epsilon = dl/l$)

Die Matrizenschreibweise macht die globalen richtungsmäßigen Zusammenhänge deutlich, die zwischen der Anregung (El.Feld) und der Auswirkung (Verschiebung) bestehen. Sie zeigt schön, daß bei einem angelegten Feld mit X- bzw Y-Komponente sich jeweils in mehreren unterschiedlichen Richtungen eine Verschiebung ergibt. Es gibt also in der Praxis keinen reinen Longitudinaleffekt oder Schubeffekt in einer Richtung (so die übliche Lehrbucheinteilung), sondern es wird eine Verschiebung erzeugt, die sich aus mehreren Einzelverschiebungen zusammensetzt.

Das Ziel bei einem frequenzanalogen Sensor ist es, eine durch den Piezoeffekt verursachte Auslenkung zu erzwingen, die der gewünschten Eigenmodeform entspricht und deren Amplitude (also dl) dabei so groß wie möglich wird. Betrachtet man die Matrix, so sieht man zwei Einflußmöglichkeiten, dieses Ziel zu erreichen.

Erstens: Man bringt die Elektroden am Sensor so an, daß die sich ergebende Feldstärke in solch eine Richtung weist, in der auch die betragsmäßig großen piezoel.Konstanten wirken. Daraus resultieren dann große Verschiebungen.

Zweitens: Damit sich aus dieser Verschiebung (ϵ) auch eine große Längenänderung (dl) ergibt, muß dazu die Ausgangslänge (l) groß sein.

Mit der vorgestellten Matrix kann nun sehr schnell abgeschätzt werden, wie groß die statisch erzwungene Auslenkung bei einer bestimmten Geometrie und einer bestimmten Feldrichtung sein wird. Die jeweilige bestimmte Geometrie hat natürlich auch eine mechanische Resonanzfrequenz. Wird der Quarz mit einem Feld dieser Frequenz angeregt, so erhöht sich die Amplitude im Resonanzfall natürlich um ein Vielfaches.

In [Abb. 2 und 3] sind als zahlenmäßige Beispiele eine Standard-Stimmgabel und der MotoMeter Drucksensor aufgeführt. Die erzwungene statische Auslenkung des MM-Drucksensors entspricht (bei 1 Volt Anregespannung) nach dieser groben Näherung mit ca. 0,1 Nanometer. etwa 10% der Stimmgabelauslenkung.

1.1.2 FEM-Simulation

Aus Vereinfachungsgründen wurde eine quadratische Membran modelliert, die aber ansonsten die exakten AT-Quarzschnitt-Materialeigenschaften enthielt [Abb.4]. Die Elektroden wurden wie auf dem realen Sensor angebracht, d.h. zwei in X-Richtung nebeneinanderliegende Elektrodenpaare mit entgegengesetzter Feldrichtung.

Ergebnisse:

- Die durch den Piezoeffekt erzwungene statische Auslenkung beträgt bei 1 Volt Anregung ca. 0,3 Nanometer. Dieser Wert stimmt gut mit der oben gemachten "Handrechnung" überein.
- An der nicht exakt zentrischen Auslenkung sieht man schön den Einfluß anderer Scheerdeformationen, die sich der Hauptdeformation überlagern [Abb. 4].

1.2 Messungen

1.2.1 Gain-Phase-Analysen:

Die Impedanz- und die Phasenverlaufskurven des MM-Drucksensors am 1 Volt-Ausgang des Gain-Phase-Analysers zeigten wohl bei ca. 18 kHz eine "auffällige Stelle", waren aber ansonsten nicht weiter interpretierbar. Auch ein Versuch am 1.26 Volt-Ausgang brachte keine besseren Ergebnisse [Abb.5 oben]. Eine Vergleichsmessung mit einem 22 pF-Kondensator (dieser Wert entspricht der statischen Kapazität des Quarz-Sensorelements) ergab nahezu identische Kurvenverläufe [Abb.5 unten]. Dies bedeutet, daß an dem 1.26 Volt-Ausgang im Bereich bis ca. 30 kHz nur das kapazitive Verhalten gemessen wird. Somit schieden weitere Messungen mit diesem Verfahren aus.

1.2.2 Anregung mit einem Piezolausprecher:

[Abb.6] zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau. An einen Piezolausprecher wird eine Wechselspannung angelegt. Die erzeugten Schallwellen regen den am Rand eingespannten MM-Drucksensor zu Biegeschwingungen an. Diese schwingende Bewegung wiederum erzeugt durch den Piezoeffekt an den Sensorelektroden eine sinusförmige Spannung, die mit einem Oszilloskop gemessen wurde.

Verändert man nun die Frequenz am Lautsprecher (3 bis 40 kHz), so wird ab einem gewissen Frequenzbereich das im Sensor erzeugte Signal größer [Abb.7 oben], erreicht einen Höchstpunkt (Resonanzstelle) bei ca. 18260 Hz und wird dann wieder kleiner.

In einem weiteren Versuch mit dem Lautsprecher wurde mittels Burstansteuerung das Ein- und Ausschwingverhalten des Sensors untersucht. In [Abb.7 unten] sind die vier Fenster einer Oszilloskopmessung dargestellt.

Das oberste Fenster zeigt die angelegte Spannung am Lautsprecher. Im zweiten Bild sieht man die erzeugte Spannung am Sensor. Gut erkennt man das Einschwingen auf einen Höchstwert und das langsame Abklingen nachdem der Lautsprecher abgeschaltet wurde. Die Fenster 3 und 4 zeigen eine Vergrößerung des Abschaltzeitpunktes.

1.2.3 Messungen mit dem Polytec - Laservibrometer

Am HSI in Villingen wurden Messungen mit dem Polytec - Laservibrometer durchgeführt. Die Parameter waren wie folgt eingestellt.:

Anregung: HP Spectrum Analyzer, Model 3588A, 10 Hz -150 MHz,
Sorce Leistung = 10 dB = 4,2 V_{ss} an 50 Ω

Amplituden-Meßbereich: 2 μ m / Volt = 2 nm / Milivolt

Zunächst wurde die ETA-Doppelstimmgabel untersucht, um einen Referenzwert für die zu erwartenden Amplituden zu erhalten. Bei der Resonanzfrequenz von 46,473 kHz (Bandbreite 9,1 Hz) konnten wir eine Amplitude von ca. 70 nm messen.

[Abb.8] zeigt die Amplitudenüberhöhung in der Membranmitte des MM-Drucksensors wobei das obere Bild den Frequenzbereich von 1 kHz bis 101 kHz zeigt und das untere Bild den Ausschnitt +/- 5 kHz um das Zentrum (Resonanzfrequenz) mit 18,3 kHz. Aus der Halbwertsbreite läßt sich eine Güte von ca. 80 ermitteln. Die Amplitude beträgt mit ca. 8,8 nm ungefähr 13% der ETA Stimmgabelamplitude. Dies ist für einen ersten Sensorelemententwurf ausreichend und wird bei weiteren Entwürfen sicher noch deutlich gesteigert werden können.

Im nächsten Versuch wurde der Zusammenhang zwischen Anregespg. und Amplitude untersucht [Abb.9]. Aus Sicherheitsgründen wurde zunächst nur der Bereich von 0 bis 20 Volt durchfahren. Dabei ist ein lineares Verhalten zu beobachten. Im Bereich bis ca. 5 Volt scheint der Verlauf nicht ideal linear zu sein, dies muß jedoch nochmals mit mehr Meßpunkten überprüft werden. Nach einer Reihe anderer Messungen, bei denen verschiedene Parameter verändert wurden, wurde die Anregespg. von 20 auf 30 Volt erhöht, wobei die Amplitude ebenfalls wieder linear zunahm. Der Startwert bei 20 Volt hatte sich jedoch von 30 nm Amplitude (aus der ersten Messreihe) auf 25 nm verringert. Dies hängt vermutlich mit den Aufbauänderungen zusammen, und ist somit nicht als Knickstelle aufzufassen.

1.3 Schaltungen

1.3.1 "Normale" Oszillator Schaltungen

Es wurde versucht, den Sensor mit verschiedensten Oszillatorschaltungen zu Schwingungen anzuregen. Alle Versuche brachten jedoch keinen Erfolg. Dies liegt vermutlich an dem schlechten Kopplungsfaktor, den das vorliegende Sensorelement noch hat.

1.3.2 Burstanregung durch Sinusgenerator

Mit einer einfachen Anordnung (Funktionsgenerator HP 3314A mit interner Burststeuerung) konnte der Nachweis erbracht werden, daß sich das Sensorelement auch elektrisch anregen läßt. Die Anregespg. des Sinusgenerators betrug dabei 15 Volt, die vom Sensorelement abgegebene Spannung betrug 1,5 Millivolt. Die Messung dieses doch noch sehr kleinen Signals war nur durch eine sehr gute Masseführung und Abschirmung möglich. Die Oszilloskopmessungen zeigten die gleichen Signalverläufe wie bei der Lautsprecheranregung [Abb.6 unten].

2 Strukturierungsverbesserungen

2.1 an der lasergeschnittenen Elektrodenform

Durch die grundsätzlichen Überlegungen, wie sie unter Punkt 1.1.1 beschrieben werden, wurde deutlich, daß man eine leichte Änderung der Elektrodenform vornehmen sollte. In [Abb.10] ist die alte und neue Elektrodenform gegenübergestellt. Bei der alten Form bewirken die kleinen Elektroden am Membranrand eine Auslenkung entgegen der Richtung, die die Hauptelektroden in der Membranmitte erzeugen [Abb. 10 oben links]. Die neue Elektrodenform unterteilt die Goldschicht auf der Membran hingegen nur noch in zwei Zonen, anstatt in vier. Dazu genügt jetzt ein einfacher Schnitt durch die Membranmitte. Die erzwungene Biegeauslenkung erfolgt nun nur noch in der gewünschten einen Richtung. Der Einfluß der Trennlinienbreite muß noch untersucht werden.

2.2 an der quarzgeätzten Membranringstruktur

Damit die Elektroden innerhalb des geätzten Ringes elektrisch kontaktiert werden können, muß der geätzte Ring eine bzw. zwei Unterbrechungen haben [Abb.11 a]. Da diese Ätzunterbrechung die ursprüngliche Dicke des Blanks hat, ist sie biegesteifer als der geätzte Ring. Dies hat wiederum eine ungünstige Auswirkung auf das Schwingungsverhalten. Deshalb wurde in der ersten Sensorversion (FAS1) im Bereich der Unterbrechung der Ätzgraben eine gewisse Strecke parallel geführt [Abb.11 b]. Nachteilig dabei sind die beiden relativ scharfen 90 Grad Winkel, in denen bei Druckbelastung hohe mechanische Spannungsspitzen erzeugt werden. Bei der in [Abb.11 c] dargestellten Ätzgrabenform sind diese gefährdeten Bereiche beseitigt.

Diese vorläufige Form muß jedoch noch hauptsächlich in zwei Richtungen weiterentwickelt werden.

- Befestigung auf Träger:

Wird als Träger eine Platte mit (fertigungstechnisch leicht herstellbarer) Bohrung gewählt, so sollte auch der Ätzring eine Kreisform mit dem Durchmesser der Bohrung haben. Denn nur wenn die Befestigung des Trägers nahe am Ätzgraben des Sensorelementes erfolgt, kann ein guter Kopplungsfaktor erreicht werden. Bei der FAS2-Form ist diese Bedingung für die beiden inneren Halbkreise nicht erfüllt [Abb.11 c].

Eine denkbare Lösung wäre [Abb.11 d]. Hier liegen die beiden "inneren" und die beiden "äußeren" Halbkreise in großen Bereichen am Bohrungsrand an.

- Homogene Resonanzfrequenz in allen Richtungen:

Die Ätzgrabenform (Position, Breite, Tiefe, Anzahl...) beeinflusst sehr stark die Resonanzfrequenz der Membran. Eine guter Kopplungsfaktor ist dann zu erwarten, wenn die Resonanzfrequenz über den Radius in jeder Richtung gleich ist. Als Beispiel sind in [Abb.11 unten] aus der Ätzform [Abb.11 d] zwei Schnitte (A,B) herausgenommen, die sehr schön zeigen, daß über dem Radius unterschiedliche Ätzgrabenformen vorhanden sind. Es gilt nun, diese Gräben in Position und Breite so zu verändern, daß sie die gleiche Resonanzfrequenz aufweisen.

Wie im letzten Statusbericht schon erläutert wurde, ist die Druckempfindlichkeit ebenfalls von der Ätzgrabenform abhängig. Bei dem Finden einer guten Ätzringform ist also ein

Kompromis zu suchen zwischen

- Vermeidung von spannungsspitzenbelasteten Ecken
- äußere Kreisringform für die Befestigung
- gleiche Resonanzfrequenz in allen Schnittrichtungen
- Druckempfindlichkeit.

Diese Aufgabe wird im kommenden Quartal gelöst werden.

3 Herstellung/Technologie

3.1 Quarztechnologie

- Der vom HSI entwickelte Silizium-chuck wurde im praktischen Einsatz getestet. Es zeigte sich, daß das Belackungsergebnis bei einseitiger Belackung ausgezeichnet ist. Bei der doppelseitigen Belackung ergeben sich jedoch noch Probleme. Vermutlich durch die Aufwerfungen am Blankrand klebt der Quarzblank bei der Rückseitenbelackung genau an der Vertiefung des Siliziumchucks und der darin liegenden Aufwerfung der Vorderseite zusammen. Ideen zur weiteren Modifikation des Siliziumchucks sind vorhanden, müssen jedoch noch umgesetzt werden. Man denkt dabei an eine Vergrößerung des Quadratdurchmessers und das Anbringen von Anschlagnasen.

- Der Arbeitsablauf im HSI Labor ist soweit sehr gut eingefahren, so daß die weiter unten beschriebene Teststruktur innerhalb von zwei Tagen von uns komplett hergestellt und teilweise sogar ausgemessen werden konnte.

3.2 Testblankmaske "FAS2"

Auf dieser Maske [Abb.12] wurden verschiedene Teststrukturen bzw Verbesserungen aufgebracht.

3.2.1 Justierhilfen für Laser

Der Blank ist in sechs Hauptfelder unterteilt. Jedes Feld (Sensorelement) erhielt in allen vier Ecken eine Justiermarke, die aus zwei aneinandergrenzenden Quadraten besteht. Beim Beginn der Laserstrukturierung müssen dann nur noch von Hand zwei diagonalliegende Ecken angefahren werden. Der Laser errechnet sich dann daraus selbst die Mitte des Elementes und die einzelnen Positionen für seine Schnittbewegung.

3.2.2 Flatzeichen

Jedes der sechs Elemente erhält einen eigenen Kennbuchstaben, damit man ihnen nach dem Trennen der Elemente noch die alte Position auf dem Blank zuordnen kann. Dieser Kennbuchstabe ist in der Mitte des Flatzeichens untergebracht auf dem die Orientierung des Elementes zum Gesamtblank mit Hilfe der Flatposition dargestellt ist. Zudem ist noch die X-Richtung durch einen Pfeil gekennzeichnet.

3.2.3 Maßbalken zur Tiefenbestimmung

Wird auf der Maske ein länglicher Balken senkrecht zur X-Richtung angebracht, so wird in dessen Breitenrichtung ein V-Graben eingeätzt. Zu Beginn der Ätzung ist der Boden des V-Grabens so breit wie die Breite des Rechtecks. Je tiefer der Graben wird, desto schmaler wird der Ätzgrund, bis er schließlich zu einem dünnen Strich wird. Durch die seitlichen Ätzstoppebenen, die sich in diesem Strich berühren, kann hier nicht weiter geätzt werden. Es besteht also ein Zusammenhang zwischen der Rechteckbreite und der Ätztiefe bei der nur noch ein Strich als Ätzgrund übrig bleibt.

Bringt man nun auf einen Blank verschieden breite Rechtecke (deren Maße bezeichnet sind), und schaut sich den Blank nach einer gewissen Ätzzeit an, so finde man aus der Reihe der Rechtecke das heraus, dessen Ätzgrund gerade eben ein Strich geworden ist. Aus der bekannten Breite läßt sich dann über eine experimentell erhaltene Umrechnungstabelle die momentane Tiefe bestimmen.

Da man beim naßchemischen Quarzätzen auf Zeit ätzt, ist es ratsam, nach einer bestimmten Zeit den Ätzvorgang zu unterbrechen, um nachzuprüfen, ob die erwartete Ätzrate auch tatsächlich vorhanden ist, oder ob durch irgend welche Umstände (Sättigung der Ätzlösung, Verunreinigung durch Resist oder Cr/Au, Temperaturschwankung, Alterung...) sich diese verschoben hat. Mit den Tiefenbestimmungsbalken kann man dies schnell feststellen.

3.2.4 Homogene Testkreisringe

Bereits im letzten Statusbericht wurde ein Testkreisring vorgestellt, an dem die Ätzraten in verschiedenen Richtungen grob abgelesen werden konnten. In den Feldern B und F wurden nun jeweils vier Kreisringe mit unterschiedlichen Durchmessern aber konstanter Ringbreite (200µm) untergebracht. Zur besseren Auswertung wurden noch die Winkelposition in Bezug auf die X-Richtung dazugefügt. Damit ist eine exaktere Auswertung möglich.

Durch die unterschiedlichen Ätzraten in den unterschiedlichen Richtungen hat der erzeugte Ätzgrund keine gleichbleibende Breite mehr.

3.2.5 Erste Kreisring-Maskenkorrektur

Um einen Ätzgrund mit gleichbleibender Breite in allen Richtungen zu erhalten, muß die Kreisringmaske korrigiert werden. Als Korrekturfaktoren wurden die im letzten Quartal ermittelten Zahlenwerte verwendet. In den Feldern A und E wurden dann je zwei Kreisringe (3mm und 6mm Durchmesser) mit diesen korrigierten Breiten aufgebracht.

3.2.6 Verbesserte Membranringstruktur mit Ätzkorrektur

In den Feldern C und D wurde zu Testzwecken die verbesserte Sensorstruktur (siehe 2.2) mit gleichzeitiger Berücksichtigung der Ätzkorrektur eingefügt. Dabei wurde die Länge und Breite der äußeren Kreisabschnitte willkürlich gewählt, d.h. diese müssen für weitere Redesigns noch genauer bestimmt werden.

Im Feld C wurde zusätzlich mit ganz dünnen Strichen die Elektrodenstrukturierung, wie sie sonst vom Laser erzeugt wird, schon für das Ätzen vorgegeben.

3.3 Erzieltes Ätzergebnis der ersten "Korrekturform"

Der gepunktete Kreisring in [Abb.13] zeigt nochmals die gewünschte Form des Ätzgrundes mit einer konstanten Breite von $200\text{ }\mu\text{m}$. Die beiden anderen Kreise (bzw. 36-Ecke) stellen den konkaven und konvexen Maskenrand dar.

In [Abb.14 oben] ist das Ätzergebnis aufgetragen, das mit dem äußersten Kreisring aus [Abb.12 Element B] erzeugt wurde. Die beiden dicken Linien mit dem großen Kreis und Quadrat als Markierung deuten die Position des konvexen und des konkaven Maskenrandes an. Zwischen diesen Linien hat die Maske eine Öffnung, in die gewöhnlich eine V - förmige Vertiefung geätzt wird. Die beiden dünnen Linien zeigen dann die Position/Form des Ätzgrundes (schraffierte Fläche) nach dem Ätzen an.

Zwei Dinge fallen auf. Erstens schwankt die Ätzgrundbreite sehr stark ($0\text{ }\mu\text{m}$ bis $150\text{ }\mu\text{m}$ bei einer Maskenbreite von $200\text{ }\mu\text{m}$ und einer Tiefe von $100\text{ }\mu\text{m}$). Zweitens kommt es in den Winkelbereichen um 100 Grad und um 280 Grad bezogen auf die X-Richtung zu Ätzwinkeln größer 90 Grad , d.h. der Ätzgrund wandert unter die abgedeckten Maskenbereiche. Vergleiche dazu auch den letzten Statusbericht.

In [Abb.12 Element A] ist die äußerste Kreisringmaske korrigiert worden. Das Ätzergebnis zeigt [Abb.14 unten]. Der gewünschte konkave Ätzrand beim Kreisringradius $3100\text{ }\mu\text{m}$ ist bis auf die Stelle bei 120 Grad nahezu ideal. Bei dem konvexen Ätzrand sind an den Stellen 230 , 270 Grad leichte Abweichungen, und an der Stelle 320 Grad starke Abweichungen von dem angestrebten $2900\text{ }\mu\text{m}$ Radius festzustellen. Diese Korrekturfehler werden aber bei der nächsten (zweiten) Maskenkorrektur behoben sein.

Die Ätzrate betrug bei der neu angesetzten Lösung $1,23\text{ }\mu\text{m} / \text{min}$.

Auf dem Ätzgrund des Kreisringes konnte an bestimmten Stellen eine leichte Rauigkeit festgestellt werden. Die $5\text{ }\mu\text{m}$ Oberflächenrauigkeit ist jedoch bei weitem größer. Diese Rauigkeit hat im Bereich des geätzten Steges ($20\text{ }\mu\text{m}$ dick) einen stark dämpfenden Einfluß, der künftig beseitigt werden muß. Entweder durch doppelseitiges Ätzen oder durch Verwendung von polierten Quarzblanks.

4 Druckempfindlichkeit und Schwingungsformen

4.1 gemessen mit der Burstanregung des Sinusgenerators

Bei einer Druckänderung von 380 mbar erhöhte sich die Resonanzfrequenz von $18,14\text{ kHz}$ um 560 Hz . Beim Herunterfahren des Druckes auf Atmosphärendruck verringerte sich die Resonanzfrequenz um 770 Hz . Da nur grobe Werte abgelesen werden konnten, war die dabei aufgenommene Kennlinie relativ unregelmäßig.

Die große Differenz beim Hoch- und Herunterfahren des Druckes erklärte sich später bei den Polytec Messungen.

4.2 Messungen mit dem Polytec-Laservibrometer am HSI

4.2.1 An der FAS1 Struktur

Es fanden sich drei nahe beieinanderliegende Resonanzstellen (dünne Linie) [Abb.15 oben], wobei die mittlere davon die höchste Amplitude zeigte. Die dicke Linie zeigt den Amplitudenverlauf bei 400 mbar Belastung. Die Pfeile deuten die Veränderung von der Ausgangsamplitude (0 bar Belastung) an. Bei Belastung wird die dritte Resonanzstelle die mit der höchsten Amplitude! Dieses Verhalten erschwert die saubere el. Frequenznachführung. [Abb.15 unten] zeigt die Frequenzänderung aller drei Resonanzstellen über der Belastung von 0 bis 400 mbar.

4.2.2 An der FAS2 Struktur

Hier wurden in der Membranmitte 2 Resonanzstellen gemessen.

- $f_1 = 15 \text{ kHz}$, Amplitude = 16,9 nm
- $f_2 = 30 \text{ kHz}$, Amplitude = 5nm

Durch die neue Struktur wurde also schonmal eine deutliche Amplitudenvergrößerung erreicht.

[Abb.16] zeigt die beiden Amplitudenprofile in den beiden Richtungen X und Z' für beide Resonanzfrequenzen. Danach handelt es sich bei f_1 um den ersten Grundbiegemode mit einem Bauch, und bei f_2 um einen Biegemode mit 2 Bäuchen, die vermutlich entgegengesetzt schwingen. [Abb.17] zeigt für die Frequenz f_1 bei einer Druckbelastung von 250 mbar die Frequenzverschiebung und die Amplitudenveränderung.

5 Ausblick

Nachdem wir nun nachgewiesen haben, daß die von uns entwickelte Sensorstruktur sowohl el. anregbar ist, als auch eine brauchbare Druckempfindlichkeit besitzt, werden wir bis zum Ablauf der regulären Projektlaufzeit (Sommer 1992) folgende Arbeiten angehen.

- Ermittlung der el. und mech. Belastungsgrenzen der vorliegenden Sensorstruktur durch experimentelle Untersuchungen.
- Theor. Abschätzungen von möglichen Druckbereichen durch Variation der geometrischen Abmessungen.
- Verbesserung der Ätzstruktur bezogen auf den Kopplungsfaktor, auf die optimalen Einspannverhältnisse und unter Berücksichtigung der Einbauverhältnisse in einem Drucksensor-Prototyp. (Gehäusung, Druckeinleitung)
- Schaltungsoptimierung der el. Anregung und Frequenzerfassung (PPL-Schaltung)

Damit wir die ursprünglichen Projektziele jedoch erreichen können, haben wir eine Verlängerung von einem halben Jahr beantragt. In diesem Zeitraum wollen wir die noch verbleibenden Aufgaben erledigen, so daß am Projektende ein voll funktionsfähiger Drucksensor-Prototyp vorliegen wird.

- Aufbau eines Drucksensor-Prototyps
 - * Absolutdrucksensor
 - * Relativdrucksensor (Druckbereich ca. 1,5 bar)
- Aufbau einer elektronischen Auswertung mit Anzeige

Abbildungs-Übersicht:

1. Allgemeine Matrix zur Piezoanregung in Quarz
2. Matrix zur Piezoanregung in einer Stimmgabel
3. Matrix zur Piezoanregung im MM-Drucksensor
4. Piezoelektr. Anregung einer FEM-modellierten Membran

- 5.oben Impedanz- und Phasenverlauf des FAS1 Sensors
- 5.unten Impedanz- und Phasenverlauf eines 22 pF-Kondensators
6. Anregung durch Piezolausprecher
- 7.oben Resonanzfrequenz bei Lautsprecheranregung
- 7.unten Ein- und Ausschwingverhalten bei Burstanregung
- 8.oben Resonanzamplituden bis 100 kHz
- 8.unten Resonanzamplituden im Bereich von 13 kHz bis 23 kHz
9. Zusammenhang zwischen Anregesp. und Amplitude

10. Alte und neue Elektrodenform
- 11.a-d Alte, neue und künftige Ätzgrabenformen
12. Testblankmaske "FAS2"
13. Kreisringkorrektur für geätzten AT-Schnitt
14. Auswertung der Ätzkorrekturmaske

15. Resonanzstellen beim FAS1
16. Resonanzstellen beim FAS2
17. Frequenz- und Amplitudenshift von f_1 bei Druckbelastung an FAS2
18. Amplitudenprofil von FAS2

Piezoel. Schwingungsanregung in Quarz ($E * d = \epsilon = \Delta l/l$)

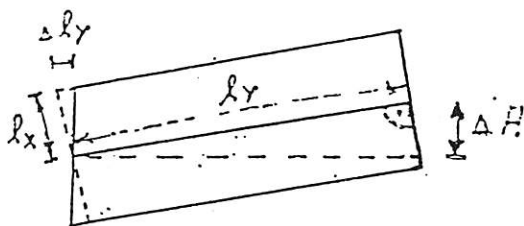
$$\begin{bmatrix} E_x & E_y & E_z \\ & * & \\ d_{11} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ -d_{11} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ d_{14} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & -d_{14} & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & -2d_{11} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \dots \\ \epsilon_{yy} \\ \dots \\ \epsilon_{zz} \\ \dots \\ \gamma_{yz} \\ \dots \\ \gamma_{xz} \\ \dots \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta l_x}{l_x} & & \\ \dots & \dots & \\ \frac{\Delta l_y}{l_y} & & \\ \dots & \dots & \\ \frac{\Delta l_z}{l_z} & & \\ \dots & \dots & \\ \frac{\Delta \varphi_y}{l_z} & = & \frac{\Delta \varphi_z}{l_y} \\ \dots & \dots & \\ \frac{\Delta \varphi_x}{l_z} & = & \frac{\Delta \varphi_z}{l_x} \\ \dots & \dots & \\ \frac{\Delta \varphi_x}{l_y} & = & \frac{\Delta \varphi_y}{l_x} \end{bmatrix}$$

[Abb. 1]

Piezoel. Schwing.anreg. in Quarzstimmgabel ($E * d = \epsilon = \Delta l/l$)

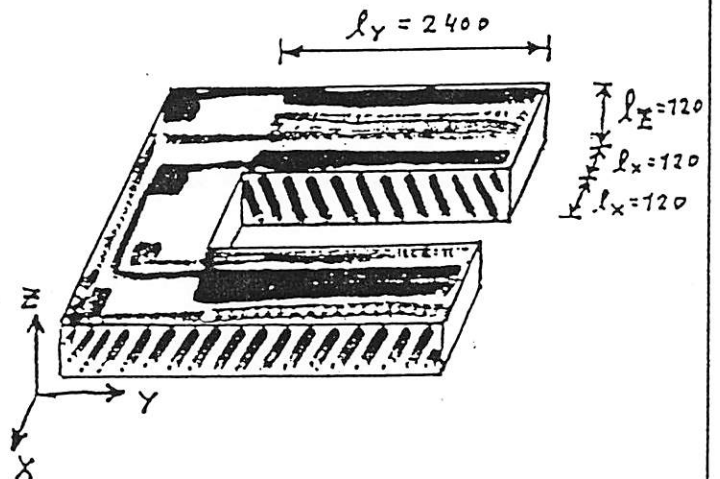
$\begin{bmatrix} E_x & E_y & E_z \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} * \\ * \\ * \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ 2,3 & & \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & & \\ 2,3 & & \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta l_x & 28 \cdot 10^{-7} \\ l_x & 120 \end{bmatrix}$	
		$\begin{bmatrix} -d_{11} & 0 & 0 \\ 2,3 & & \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \epsilon_{yy} & & \\ 2,3 & & \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta l_y & 552 \cdot 10^{-7} \\ l_y & 2400 \end{bmatrix}$	
		$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \epsilon_{zz} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta l_z \end{bmatrix}$	
		$\begin{bmatrix} d_{14} & 0 & 0 \\ 0,67 & & \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \gamma_{yz} & & \\ 0,67 & & \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta \varphi_y & 8 \cdot 10^{-7} \\ l_z & 120 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta \varphi_z & 160 \cdot 10^{-7} \\ l_y & 2400 \end{bmatrix}$
		$\begin{bmatrix} 0 & -d_{14} & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \gamma_{xz} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta \varphi_x \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta \varphi_z \end{bmatrix}$
		$\begin{bmatrix} 0 & -2d_{11} & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \gamma_{xy} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta \varphi_x \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta \varphi_y \end{bmatrix}$

piezoel. Koef. in 10^{-12} m/V Deformation in 10^{-8} Längenänderung/Gesamtlänge in $\mu\text{m}/\mu\text{m}$



$$\frac{\Delta A}{l_y} = \frac{\Delta l_y}{l_x}$$

Erzwungene stat. Auslenkung:
 $\Delta A = 11000 \cdot 10^{-7} \mu\text{m} \approx 1 \text{ nm}$



[Abb. 2]

Piezoel. Schwing.anreg. in MM Drucksensor ($E * d = \epsilon = \Delta l/l$)

$$\begin{bmatrix} E_x & E_y & E_z \end{bmatrix} \quad \text{El. Feldstärke in } 10^4 \text{ V/m} = 1\text{V}/100\mu\text{m}$$

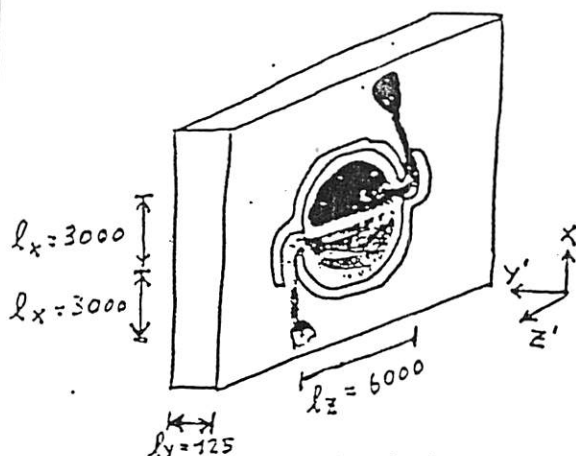
*

$$\begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ -d_{11} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ d_{14} & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & -d_{14} & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & -2d_{11} & 0 \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \dots \\ \epsilon_{yy} \\ \dots \\ \epsilon_{zz} \\ \dots \\ \gamma_{yz} \\ \dots \\ \gamma_{xz} \\ \dots \\ \gamma_{xy} \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta l_x}{l_x} \\ \dots \\ \frac{\Delta l_y}{l_y} \\ \dots \\ \frac{\Delta l_z}{l_z} \\ \dots \\ \frac{\Delta \phi_y}{l_z} = \frac{\Delta \phi_z}{l_y} \\ \dots \\ \frac{\Delta \phi_x}{l_z} = \frac{402 \cdot 10^{-7}}{6000} = \frac{\Delta \phi_z}{l_x} = \frac{201 \cdot 10^{-7}}{3000} \\ \dots \\ \frac{\Delta \phi_x}{l_y} = \frac{52 \cdot 10^{-7}}{125} = \frac{\Delta \phi_y}{l_x} = \frac{1260 \cdot 10^{-7}}{3000} \end{bmatrix}$$

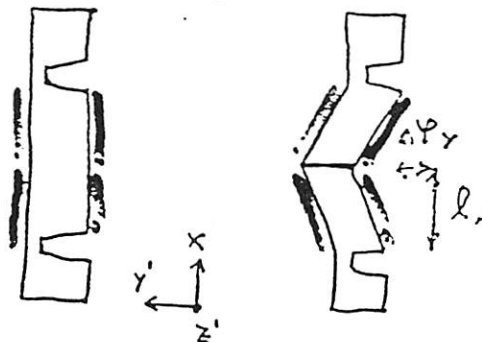
piezoel. Koef. in
in 10^{-12} m/V

Deformation
in 10^{-8}

Längenänderung/Gesamtlänge
in $\mu\text{m}/\mu\text{m}$

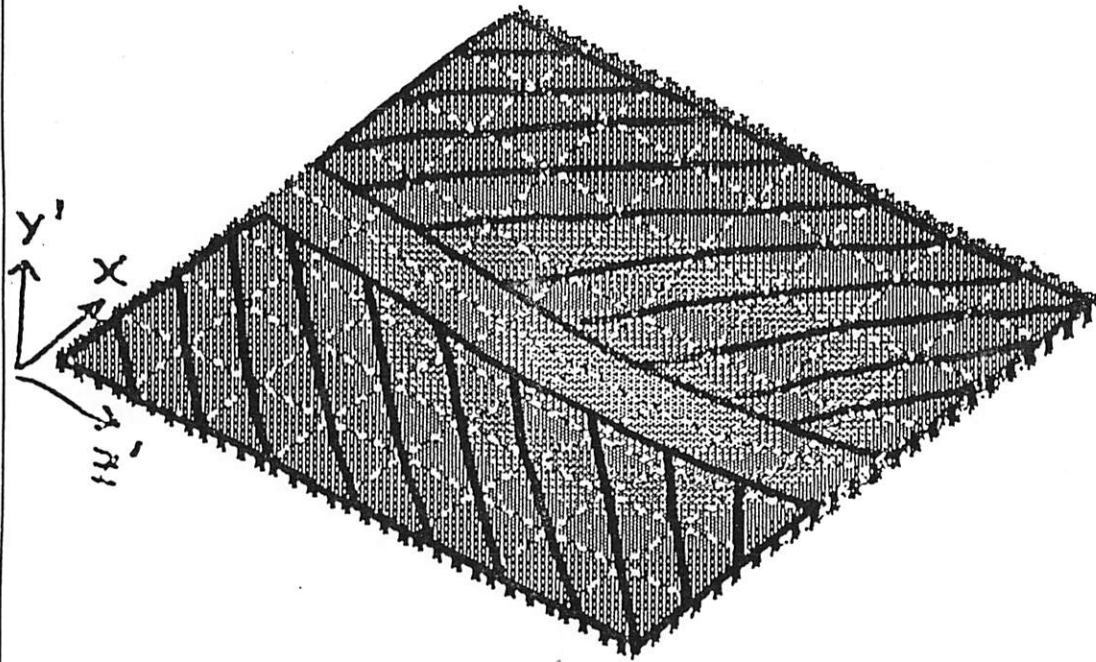


Erzwungene stat. Auslenkung:
 $\Delta A = \Delta \phi_y = \underline{\underline{\approx 0,1 \text{ nm}}}$



[Abb. 3]

Elektroden erzeugen ein Feld in y'- Richtung

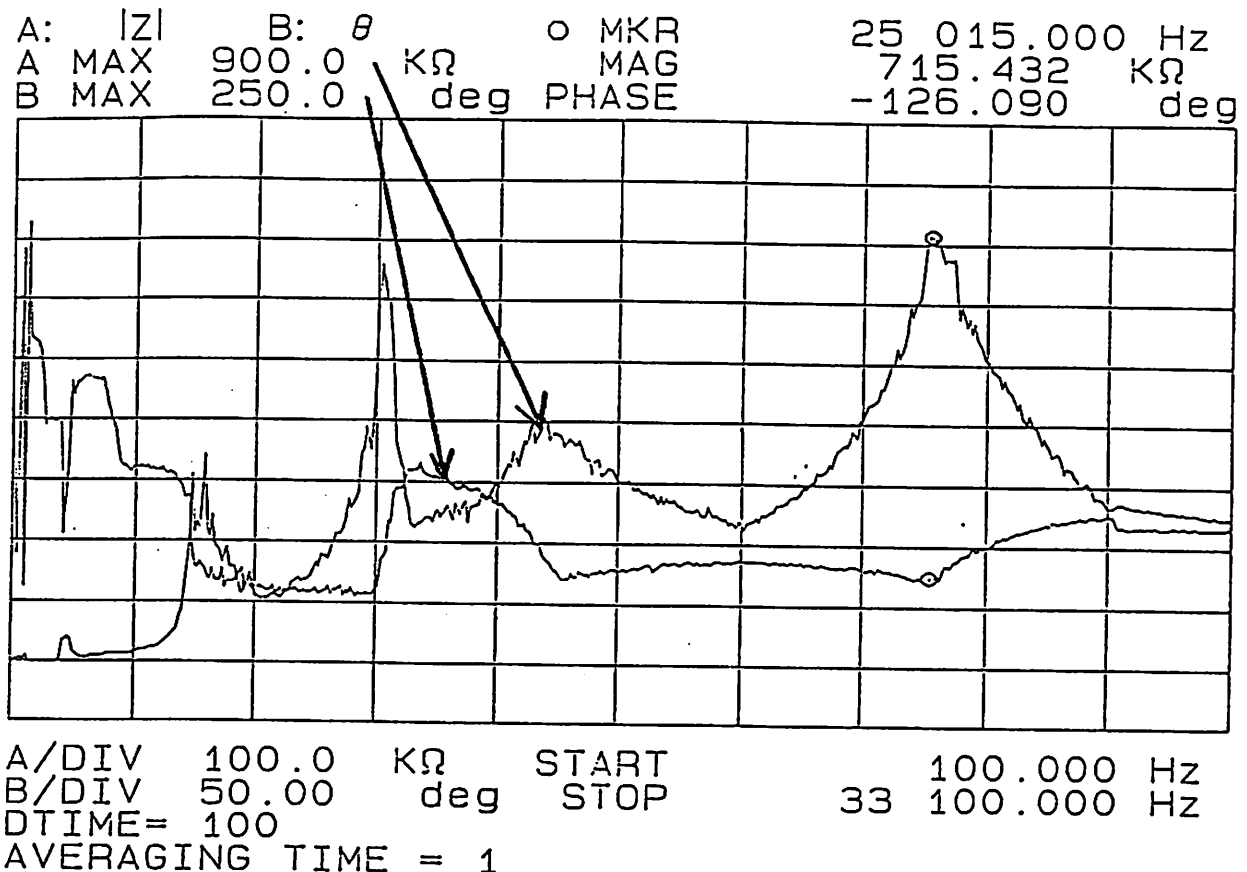


ANSYS 4.4
 NOV 7 1991
 08:55:07
 PLOT NO. 3
 POST1 STRESS
 STEP=1
 ITER=1
 UY = Auslenkung in Richtung der
 CSYS=11 Platten normalen
 DMX =0.294E-08
 SMN =-0.293E-08
 SMX =0.135E-09 $\hat{=}$ Biegegrundmode
 DSYS=11
 XV =-10
 YV =10
 ZV =8
 DIST=0.004638
 XF =0.003
 YF =0.625E-04
 ZF =0.003
 PRECISE HIDDEN

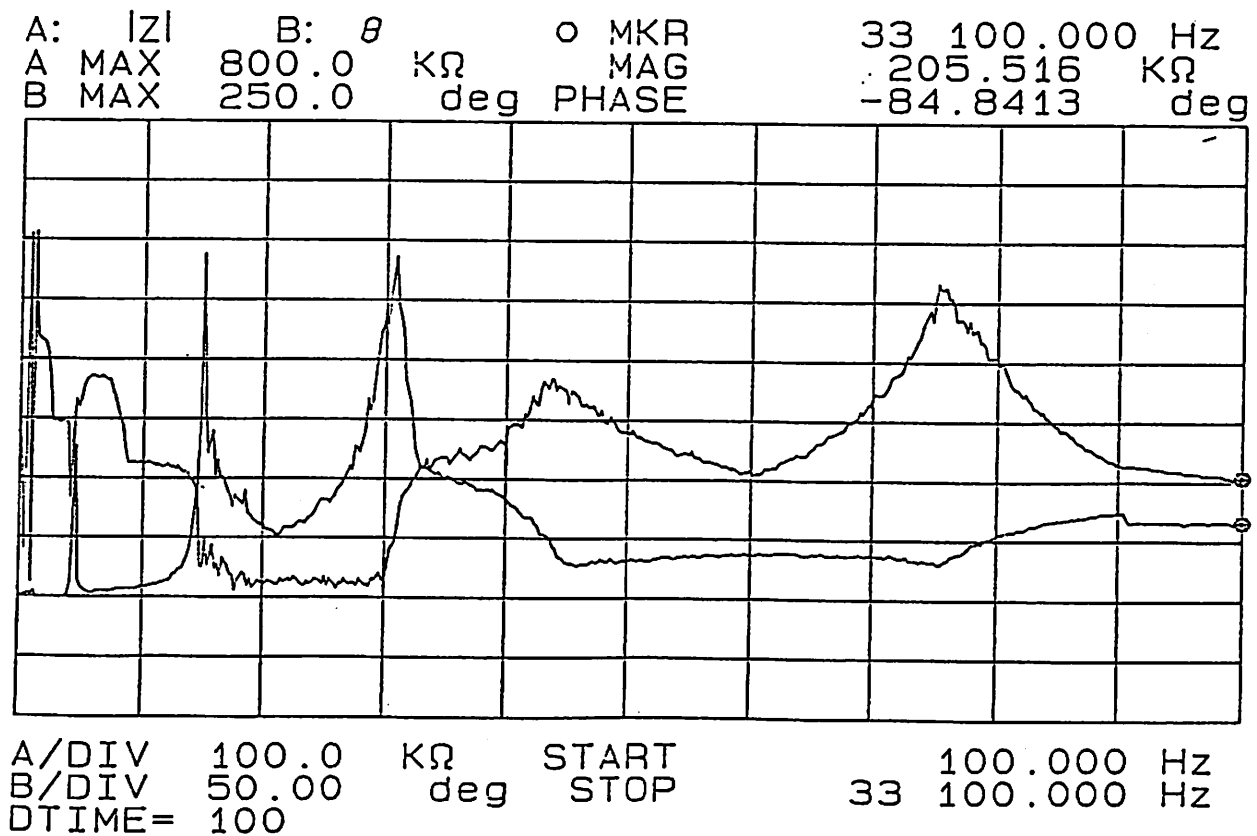
	-0.293E-08	= 2,93 nm	bei 10 V
	-0.259E-08		
	-0.191E-08		
	-0.123E-08		
	-0.547E-09		
	0.135E-09		

klo: AT-Schnitt; 4 Schicht-Platte in X-Richt. oben allseit. fest

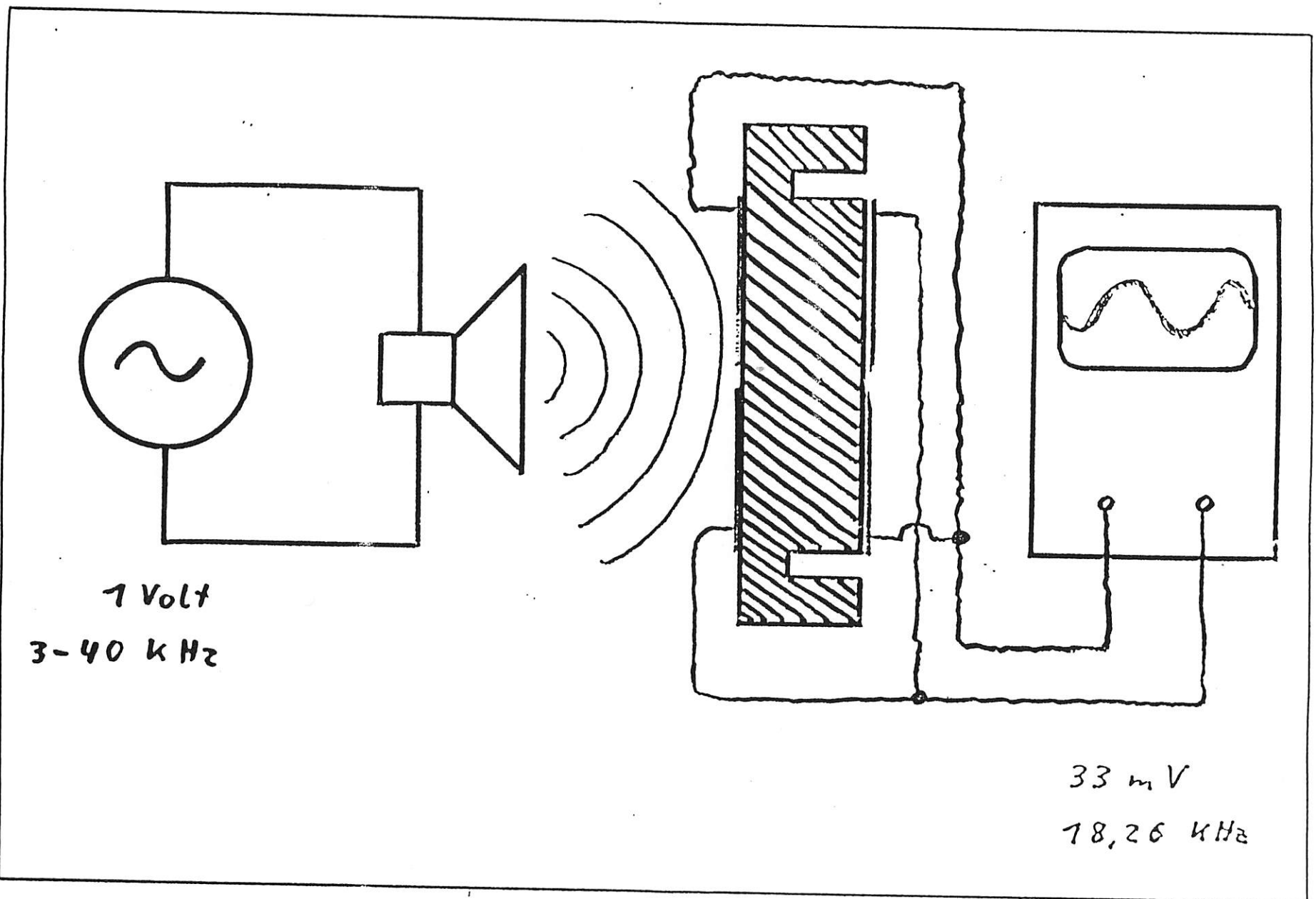
Impedanz- und Phasenverlauf am FAS1



Impedanz- und Phasenverlauf eines 22 pF Kondensators

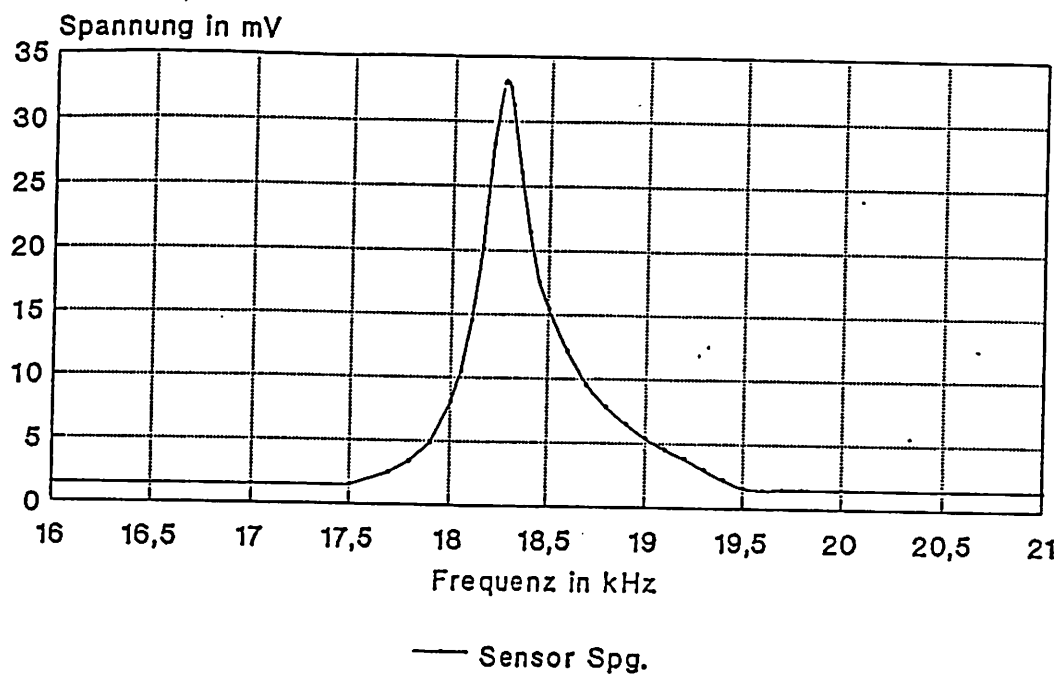


Schwingungsanregung durch Piezolautsprecher

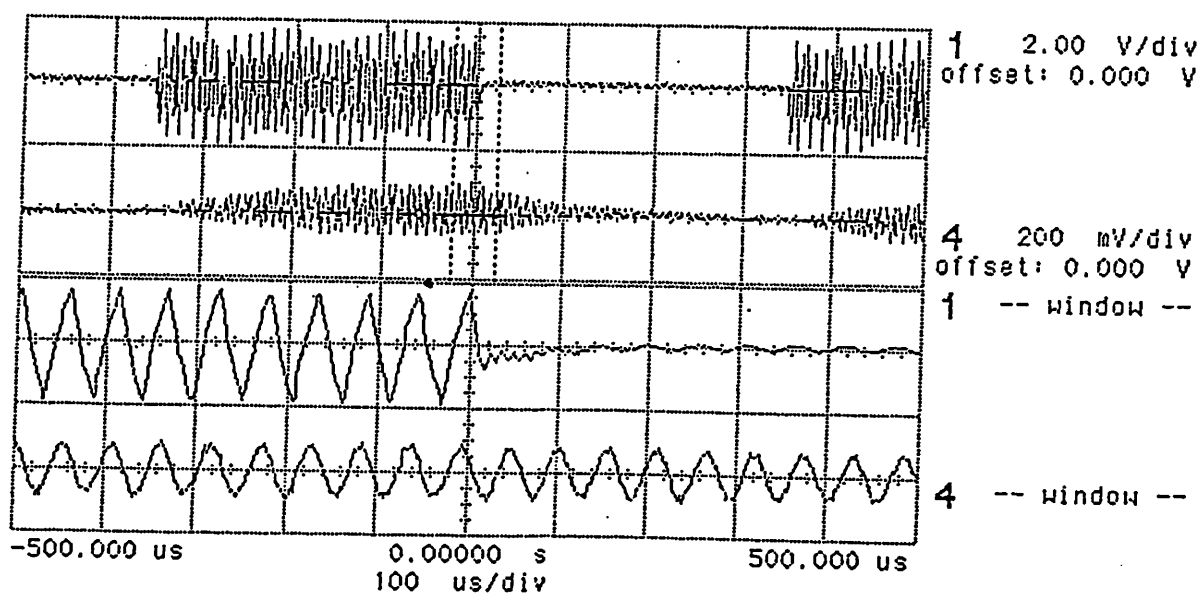


[Abb. 6]

Schwingungserzeugung am Sensor durch akustische Anregung (Piezohochtöner: 3-40 kHz; 1,5V)



hp stopped



[Abb. 7]

Resonanzstellen beim FAS1

Range: 0 dBm

Res BW: 580 Hz

A: SWEPT SPECTRUM

VBW: Off

Mkr

9-Mar-2000 22:30

Swp Time: 10.04 Sec

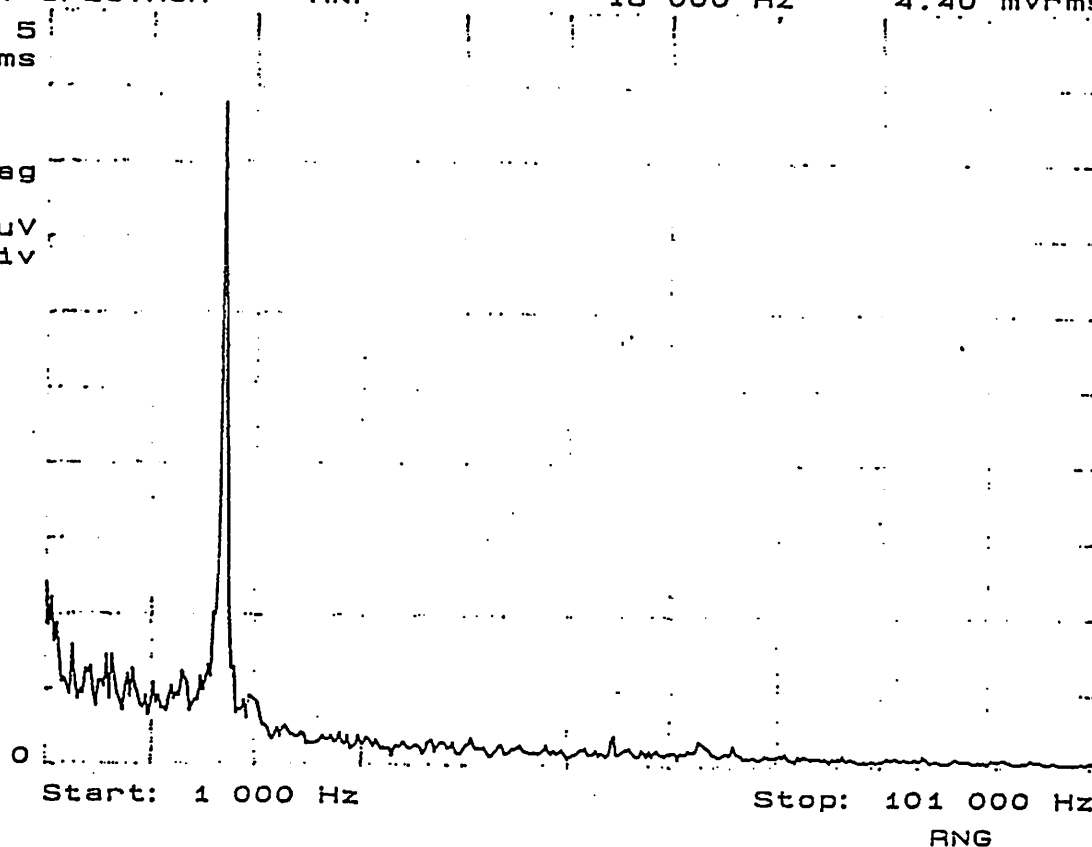
18 000 Hz

4.40 mVrms

5
mVrms

LinMag

500 μ V
/div



Range: 0 dBm

Res BW: 36 Hz

A: SWEPT SPECTRUM

VBW: Off

Mkr

9-Mar-2000 22:42

Swp Time: 10.65 Sec

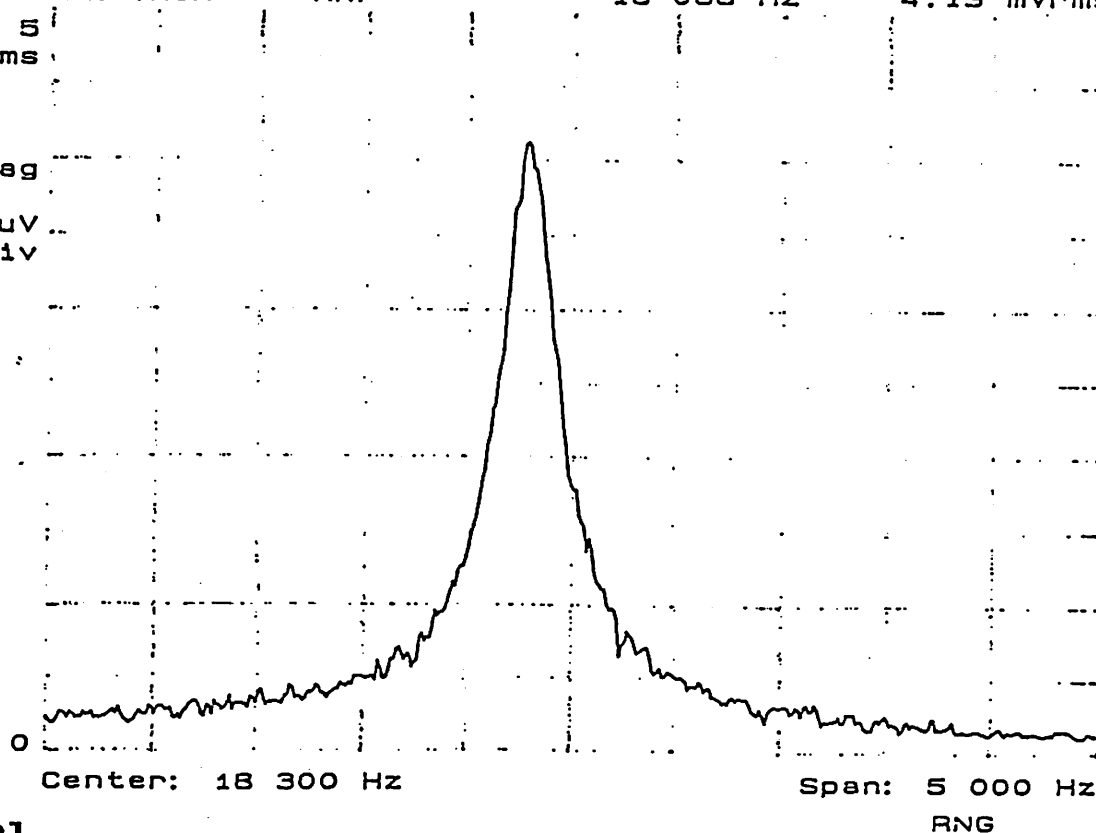
18 088 Hz

4.13 mVrms

5
mVrms

LinMag

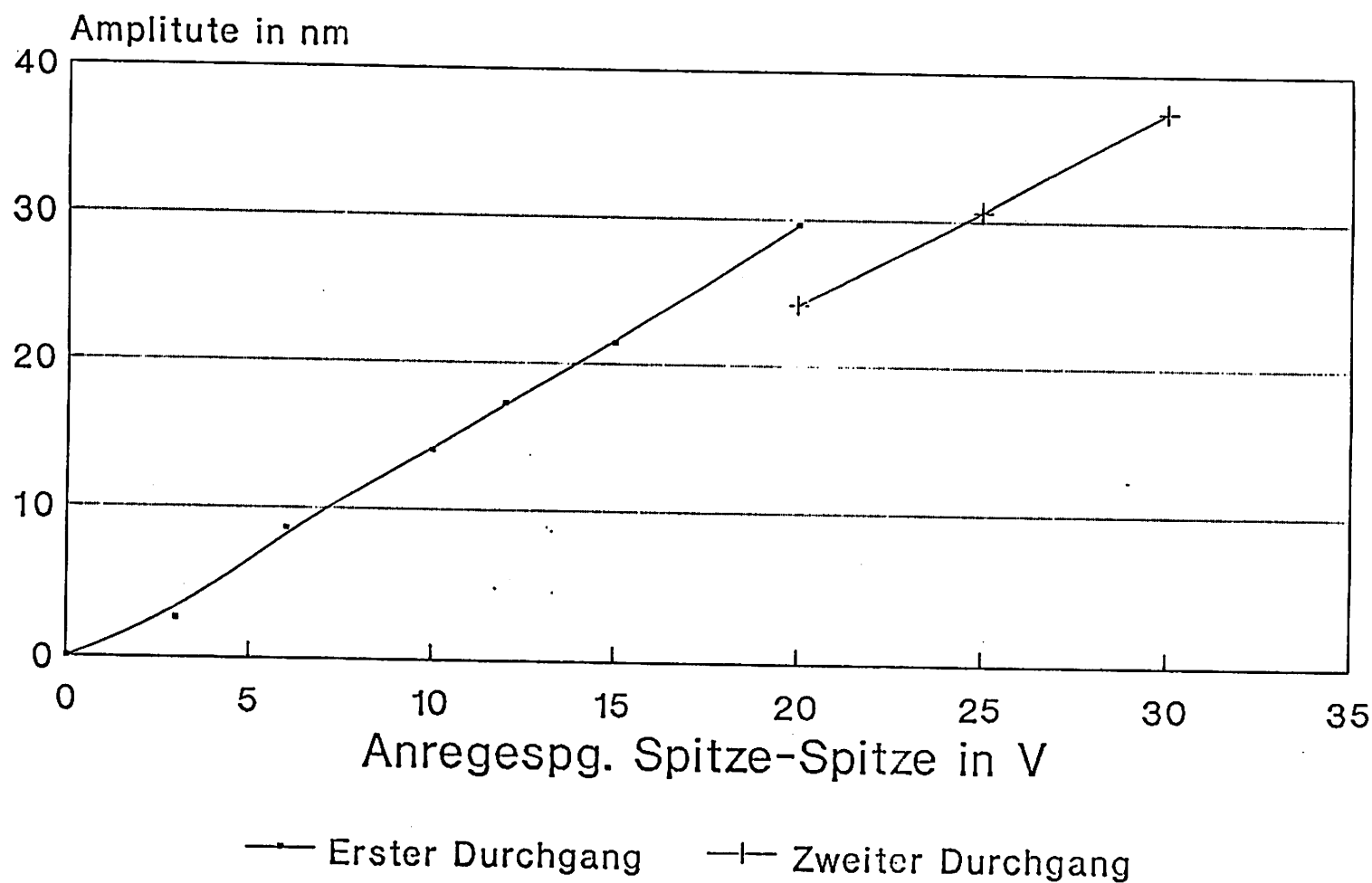
500 μ V
/div



[Abb. 8]

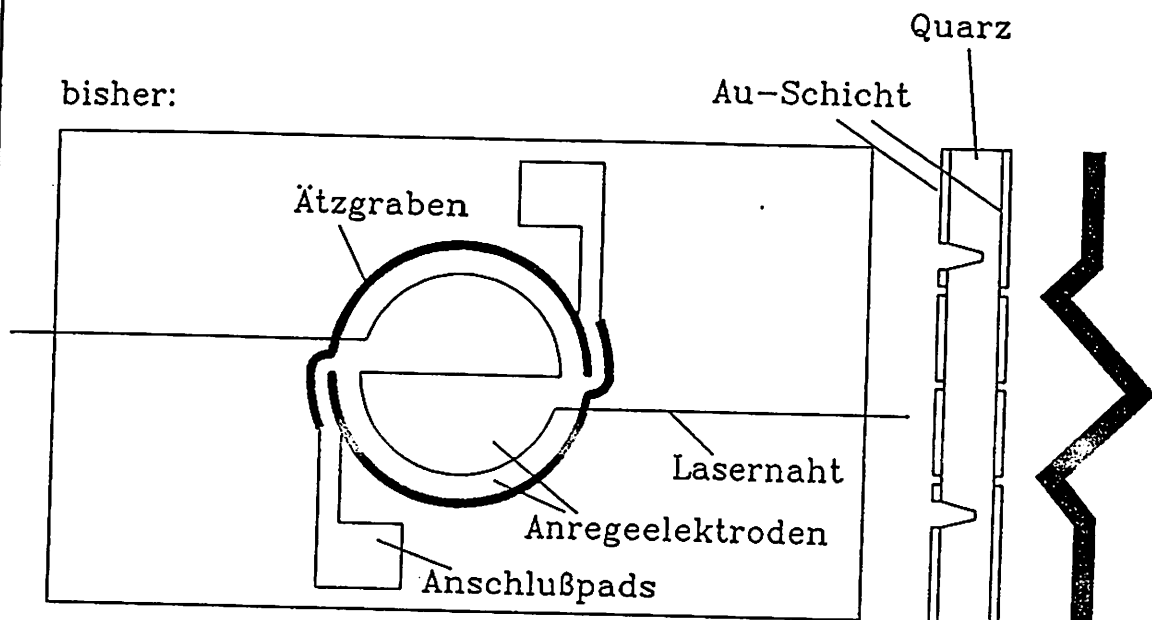
Schwingungs.Amplitude = f (Anregespg.)

FAS1; Membranmitte; 0 mbar

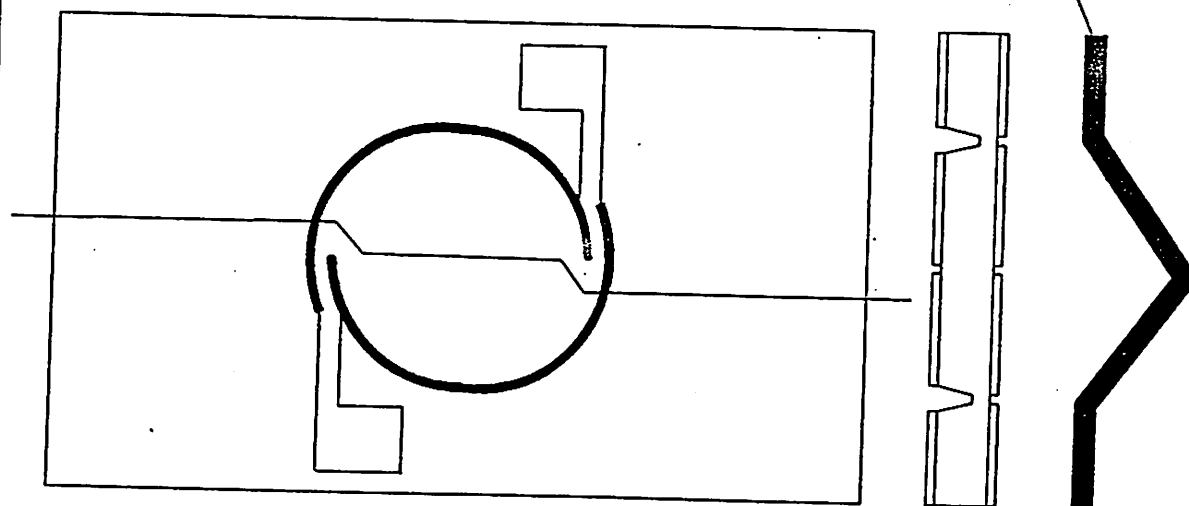


Elektrodenform

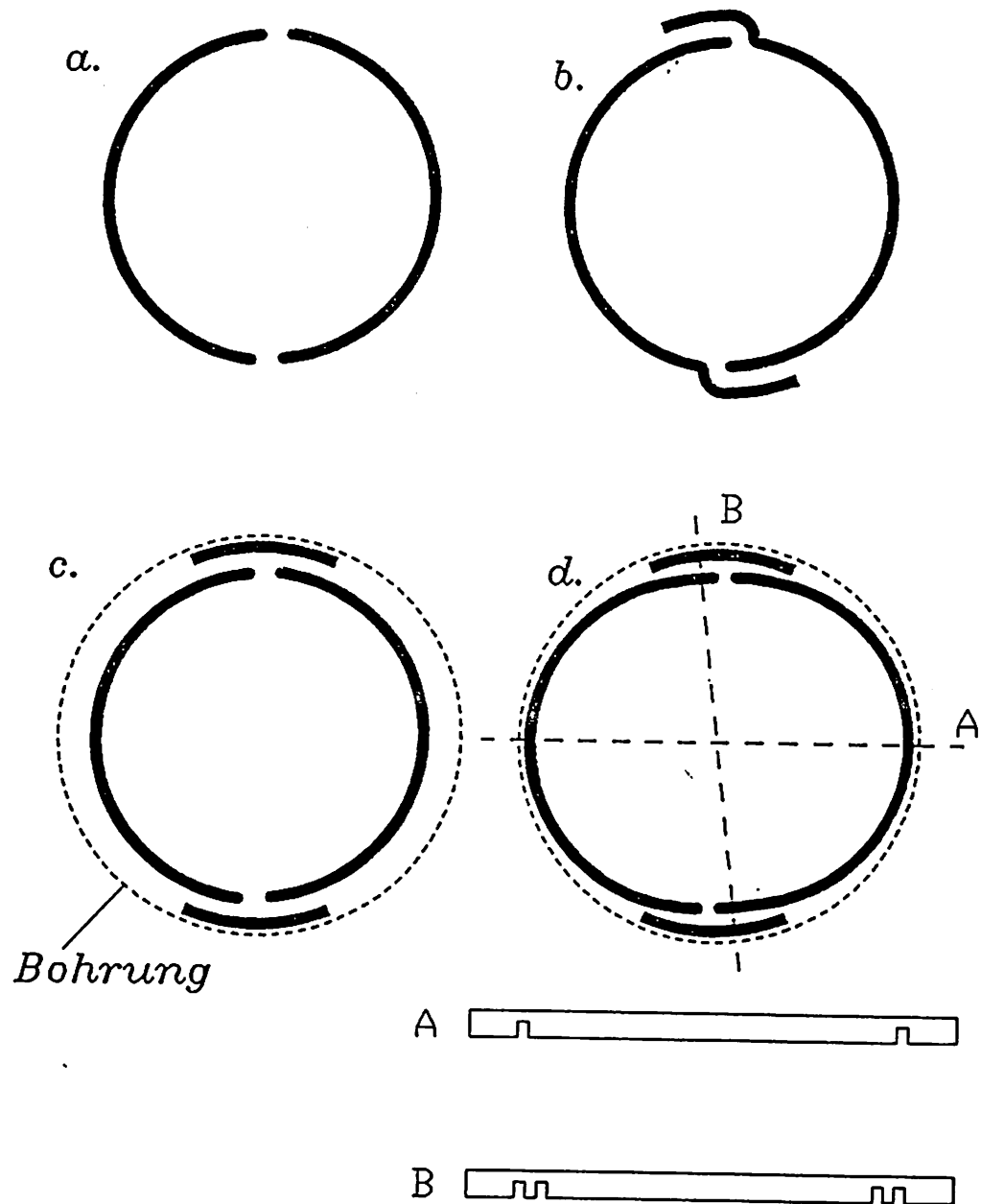
bisher:



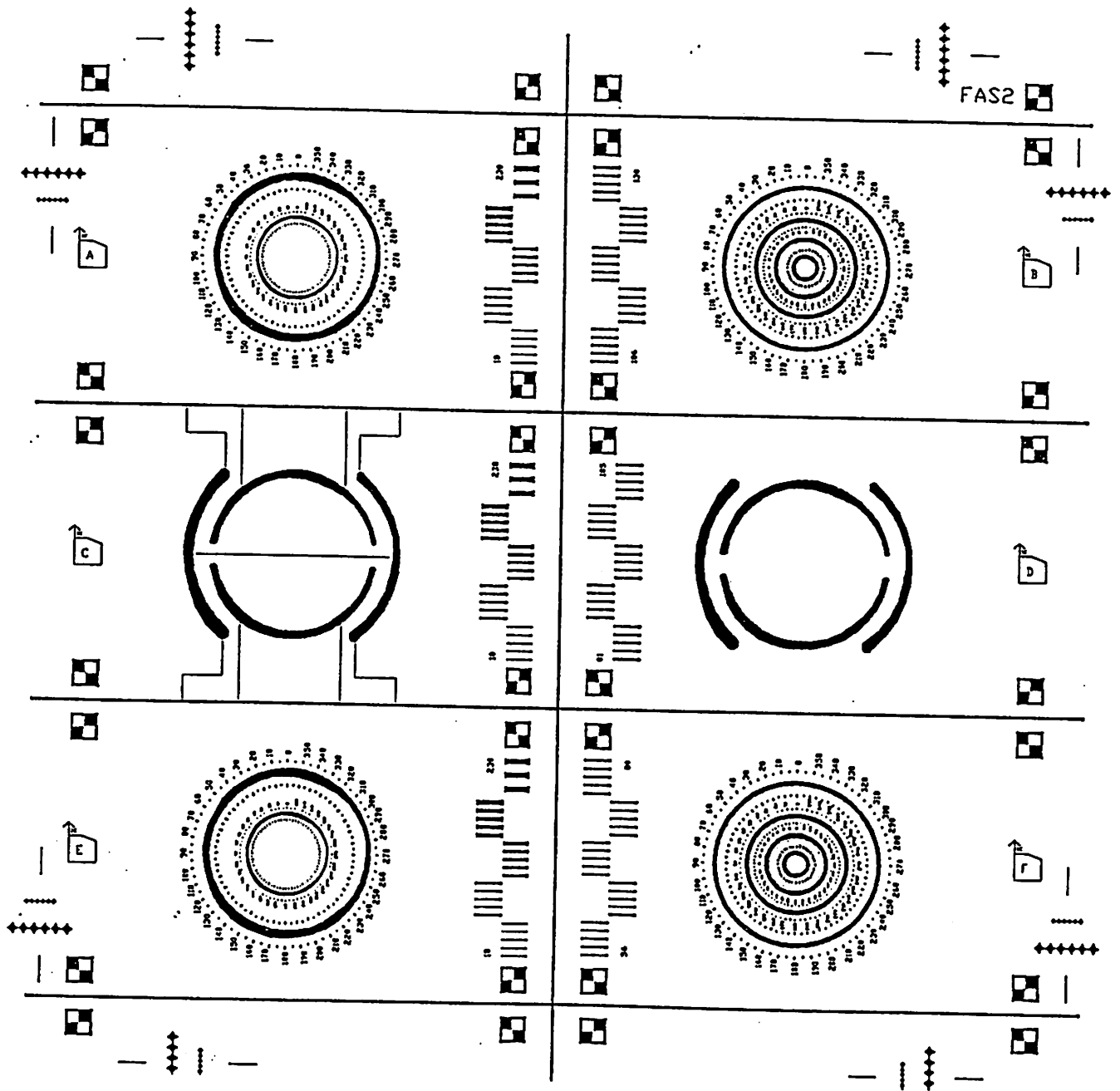
künftig:



Quarzätzformen



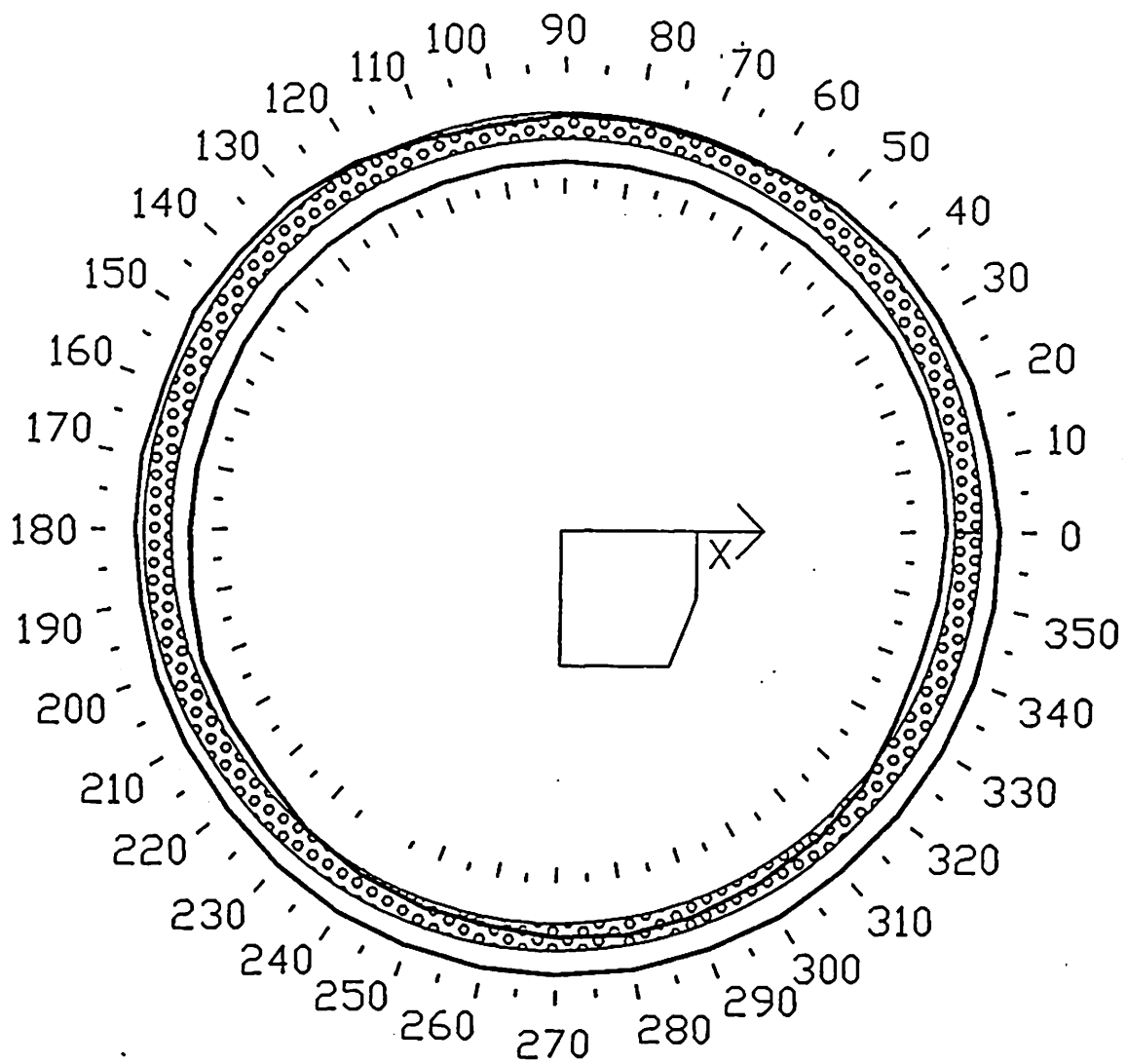
Testmaske FAS2



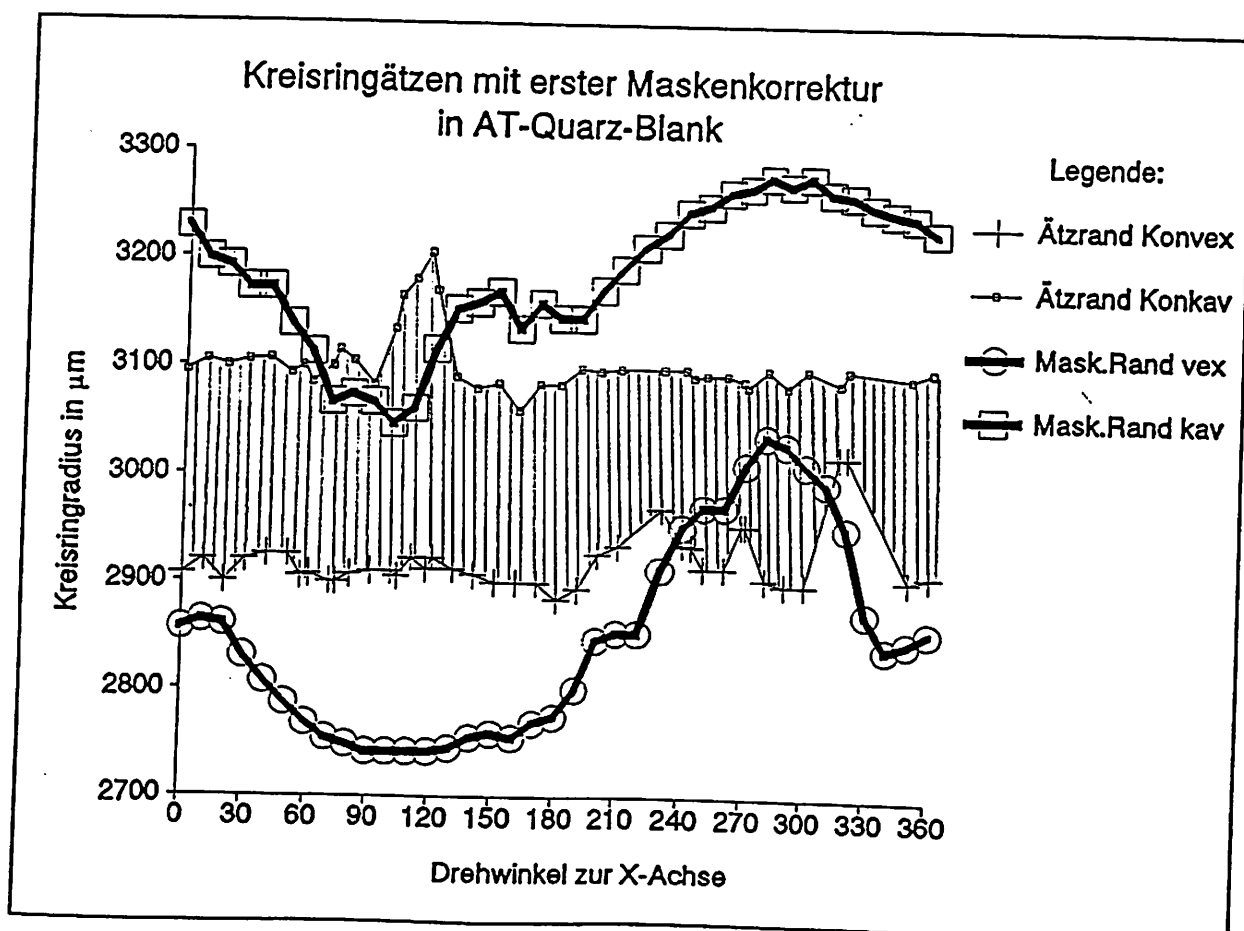
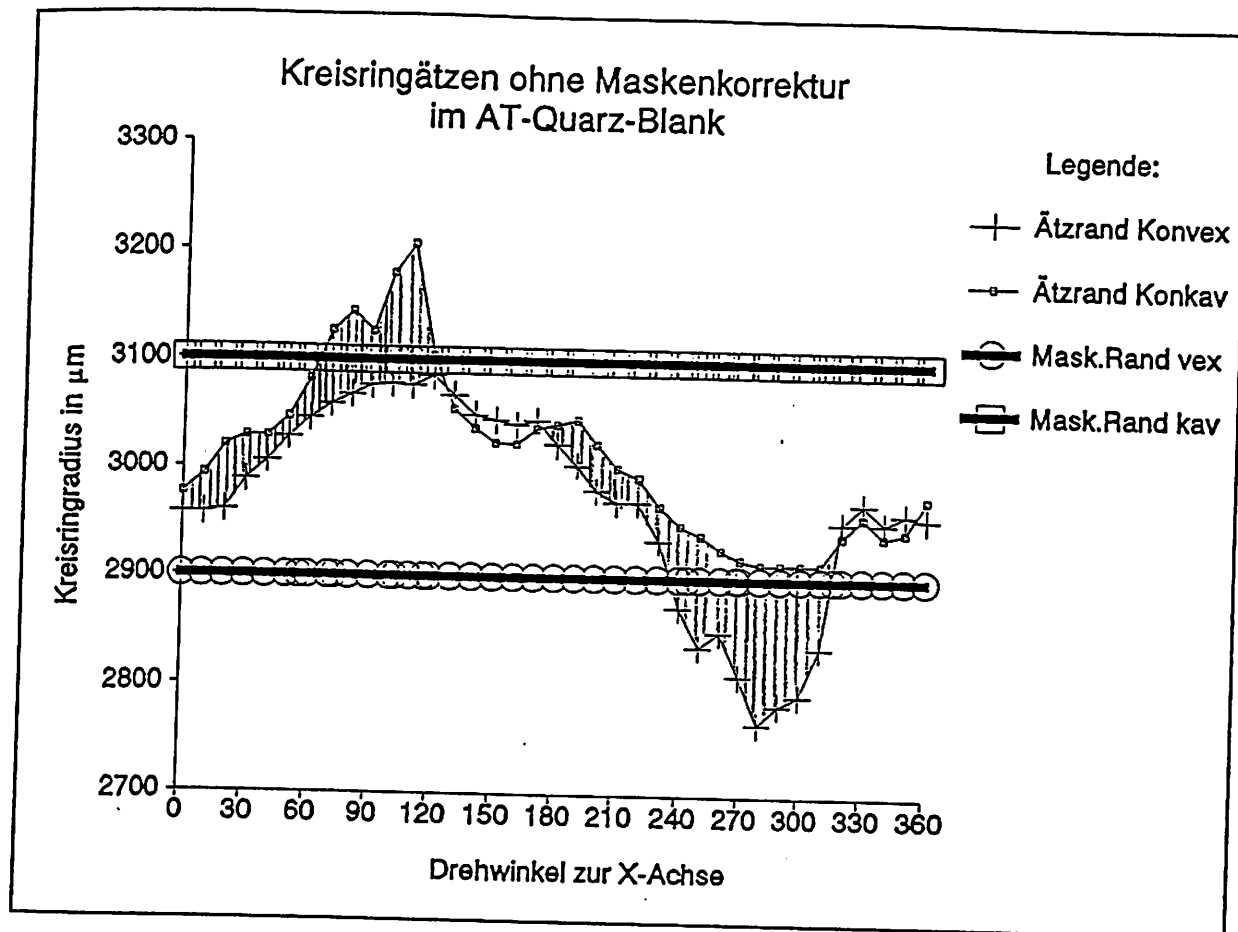
[Abb. 12]

Maskenkorrektur

um einen Ätzgrund mit konst. Breite in einem AT - Quarz zu erzeugen



[Abb. 13]



[Abb. 14]

Range: 0 dBm
Res BW: 36 Hz

FAS 1

VBW: Off

15-Jan-1991 13:38

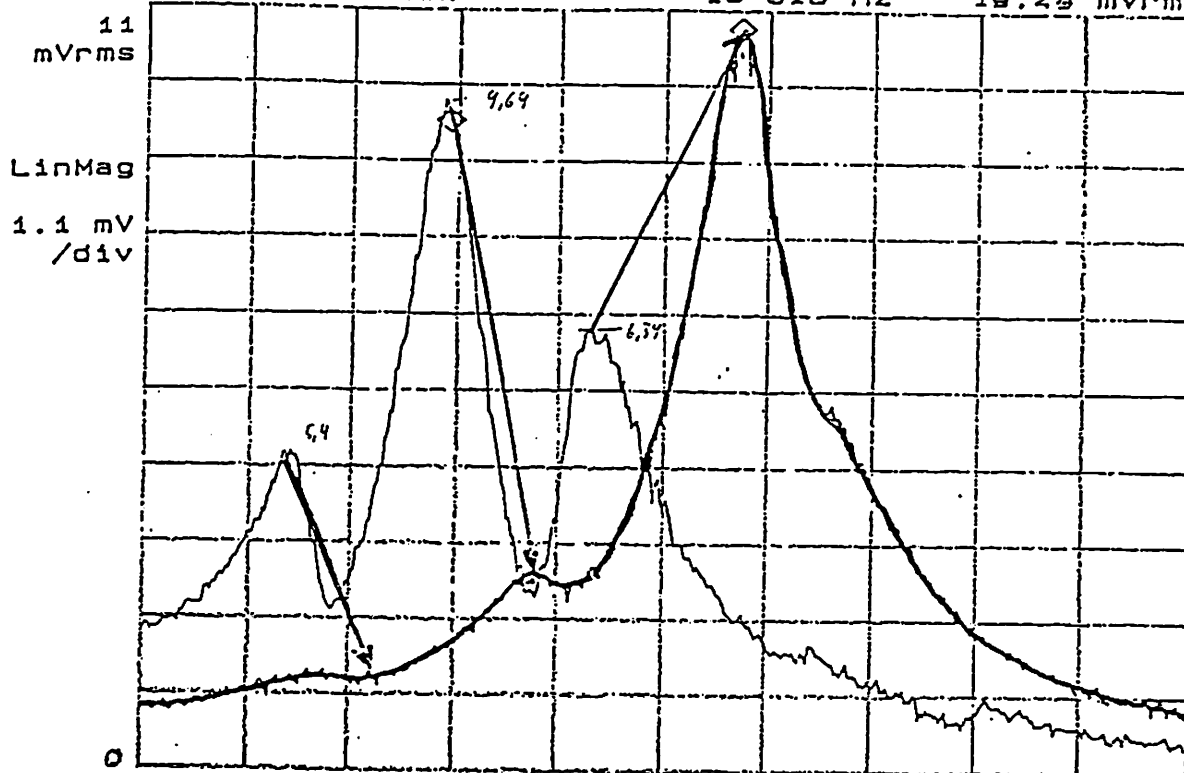
Swp Time: 10.65 Sec

A: SWEPT SPECTRUM

Mkr

18 378 Hz

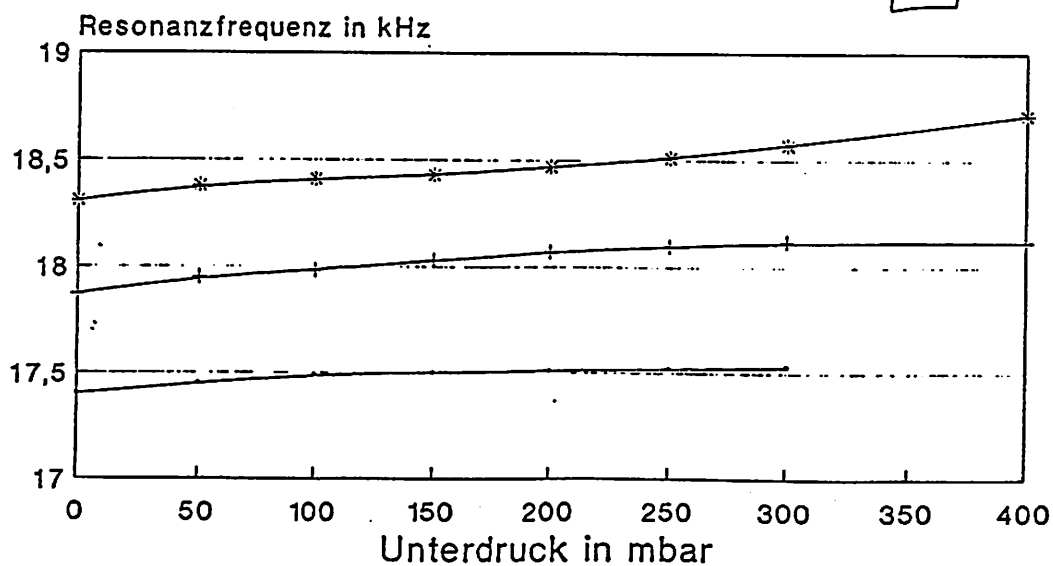
19.24 mVrms



RNG

Resonanzfrequenz = f (Druck)

Gemessen am FAS1 in der Membranmitte



df/dP=230Hz/bar; 625Hz/bar; 1kHz/bar

[Abb. 15]

Resonanzstellen am FAS2

Range: 0 dBm

Res BW: 290 Hz

VBW: Off

15-Jan-1991 14:33

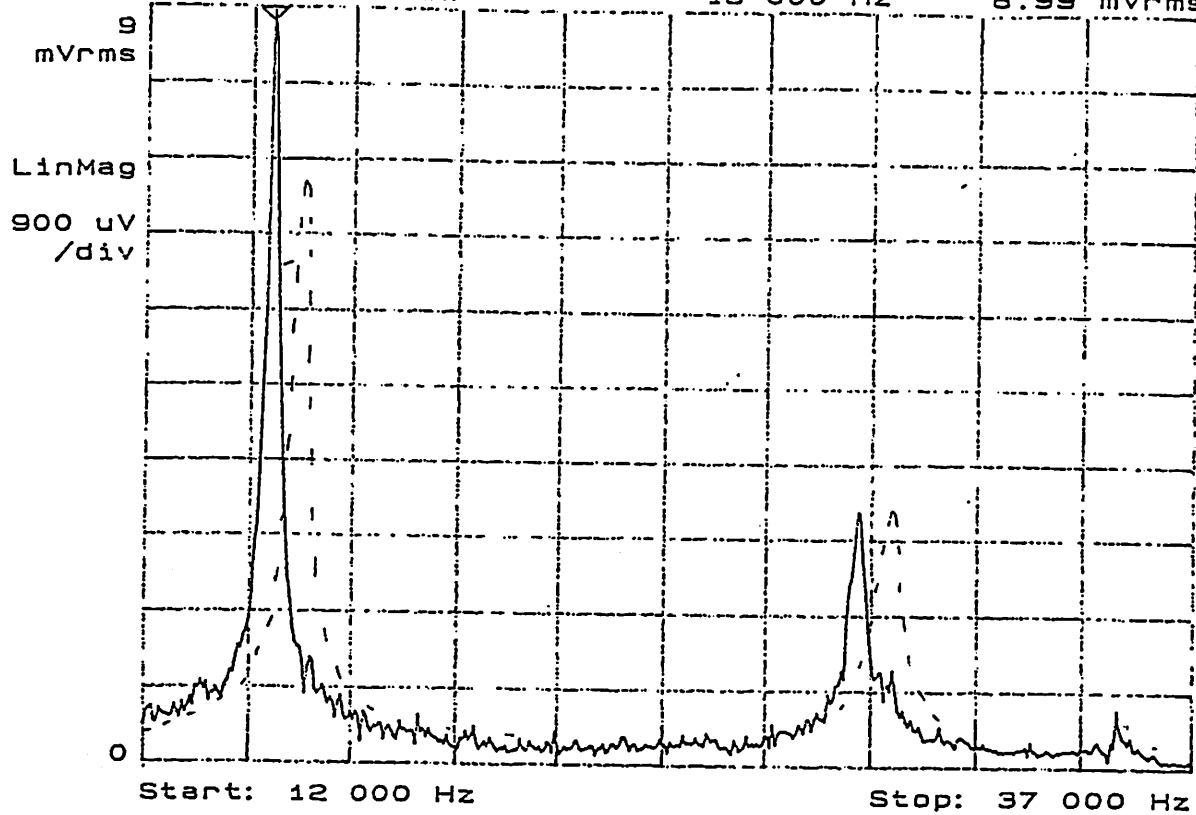
Swp Time: 10.04 Sec

A: SWEPT SPECTRUM

Mkr

15 000 Hz

8.99 mVrms



Range: 0 dBm

Res BW: 36 Hz

VBW: Off

15-Jan-1991 14:44

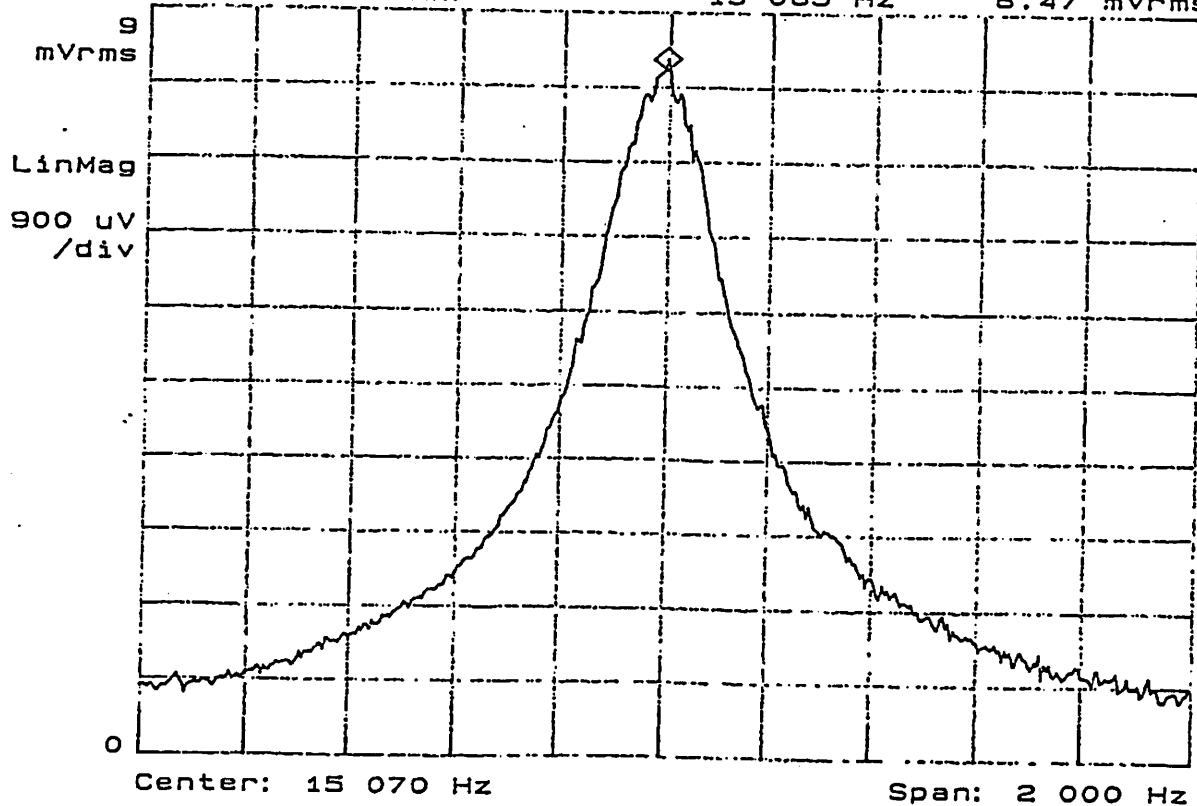
Swp Time: 20.48 Sec

A: SWEPT SPECTRUM

Mkr

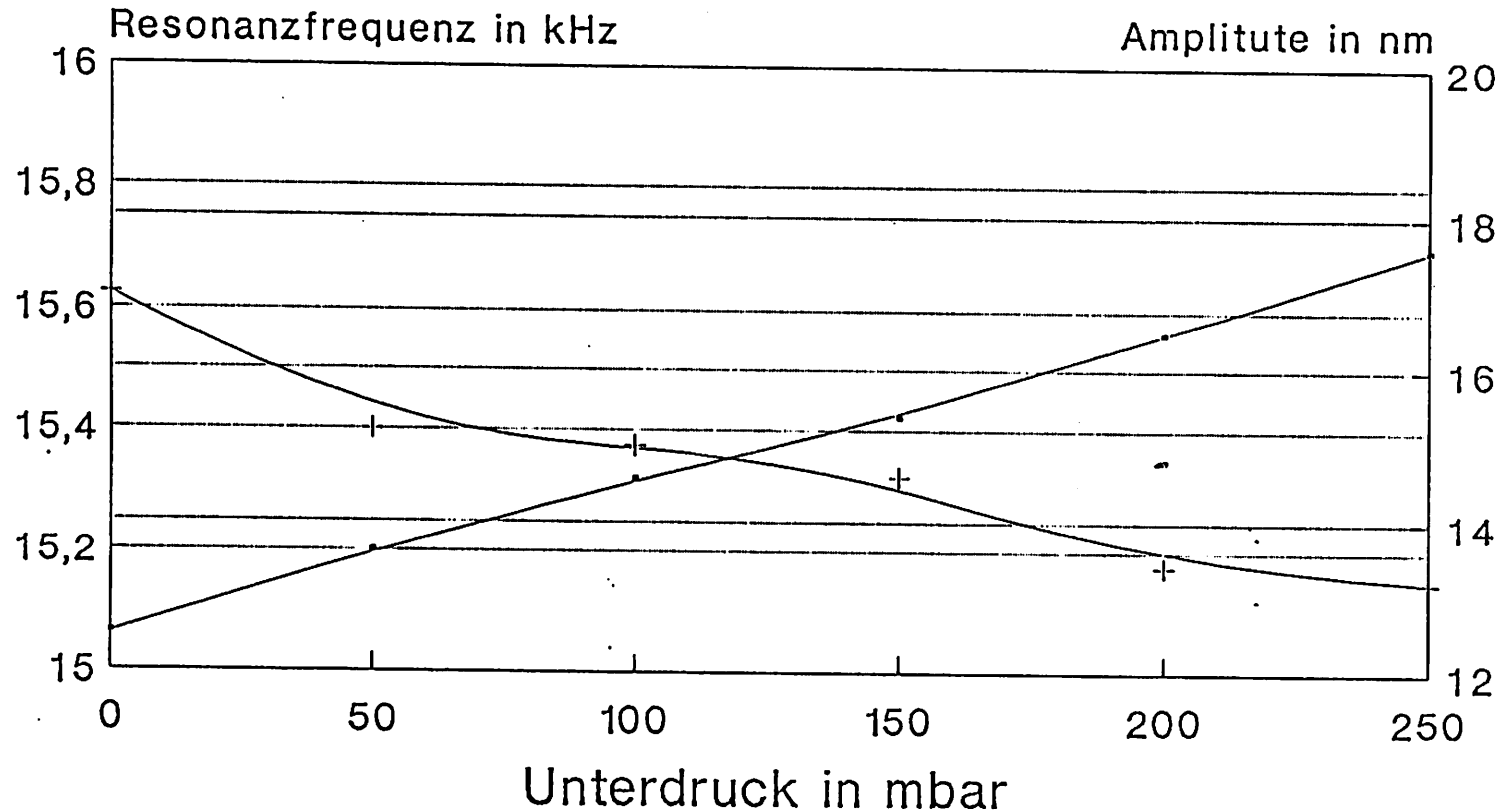
15 065 Hz

8.47 mVrms



Res.frequenz und Amplitude = f (Druck)

In der Membranmitte gemessen am FAS 2

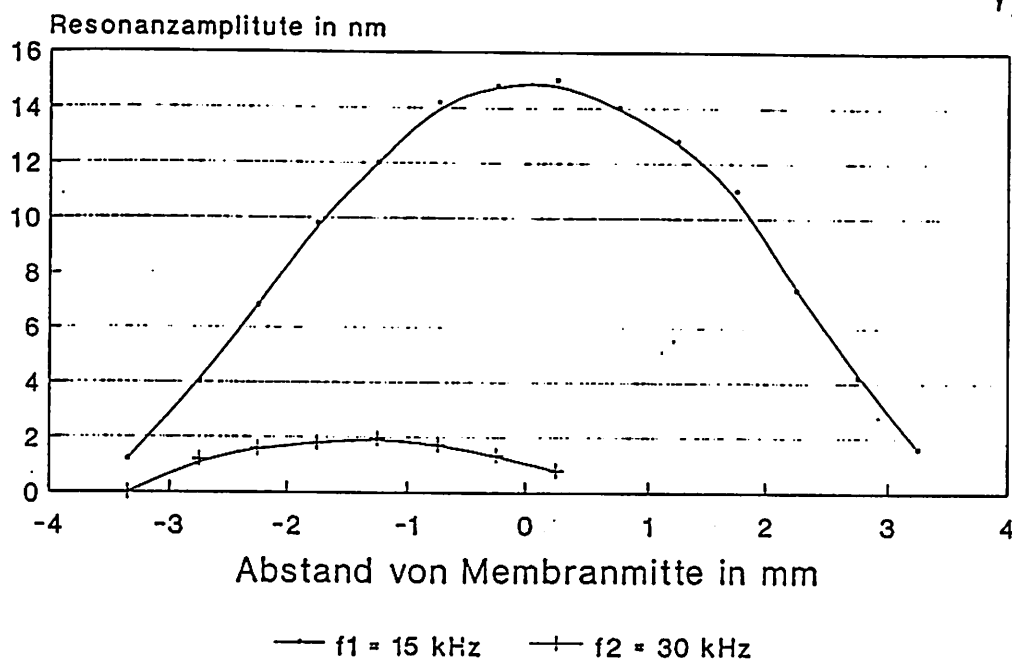


—•— Res.Freq. in Mitte —+— Amplitude in Mitte

$$df/dP = 635\text{Hz}/250\text{mbar} = 2,54\text{kHz}/\text{bar}$$

Amplitutenprofil

Senkrecht zur Lasertrennlinie (X-Richt.)



Amplitutenprofil

Entlang der Lasertrennlinie (Z-Richtung)

