

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

Förderkennzeichen 13 AS 0115

Berichtszeitraum: 1.1. bis 30.6.1991

*MotoMeter GmbH
Daimlerstraße 6
7250 Leonberg*

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

Inhalt:

Zusammenfassung:

- Stand der Arbeiten
- Geplanter Fortgang der Arbeiten

Einzeldarstellung:

- 1 Verbesserungen am FEM Modell
- 1.1 Beschreibung des neuen MotoMeter (MM) Modells
- 1.2 Vergleich der BOSCH Messungen mit den HSI und MM Berechnungen
- 2 Simulation verschiedener Membranparameter
- 2.1 Materialeinfluß
- 2.2 Dickeneinfluß
- 2.3 Membrandurchmesser
- 2.4 Strukturierte Membran
- 2.5 Fazit
- 3 Das neue FAS3-Layout
- 3.1 Sensorgrundformvarianten
- 3.1.1 Kreis mit Durchmesser 4,2mm und 6mm
- 3.1.2 Langloch (4,2mm/6mm) mit zwei versch. Entlastungsformen
- 3.1.3 Membranen mit geschlossenem Ring
- 3.2 Elektrodenformvarianten
- 3.2.1 Breite der Mittelelektrode
- 3.2.2 FEM-Piezo-Simulation zur Anregungsoptimierung
- 4 Quarätztechnologie
- 4.1 Doppelseitiges Quarzäten
- 4.2 Ätzraten und Ätzformen bei AT-Quarzwafern
- 4.2.1 Ätzdaten
- 4.2.2 Ätzformen
- 5 Elektrodenstrukturierung mittels Laser
- 6 Aufbau für Druckmesskammer
- 7 Schwingungsanregung und Druckempfindlichkeit
- 7.1 Laservibrometermessungen
- 7.2 Burstanregung
- 7.3 Vierpolanwendung

Zusammenfassung:

Stand der Arbeiten:

- Da in den letzten Zwischenberichten die Mess- und Berechnungsergebnisse der Verbundpartner in Bezug auf das Schwingungsverhalten von Membranen von den FEM-Berechnungsergebnissen, die die MotoMeter AG in ihrem ersten Zwischenbericht vorstellte, unterschieden, wurde ein verbessertes FEM Modell erstellt. Dieses verbesserte Modell deckt sich nun mit den Mess- und Berechnungsergebnissen der Verbundpartner BOSCH und HSI.
- Mit diesem verbesserten Modell wurden diverse Membranparameter variiert, woraus wichtige Sensor-Design-Regeln abgeleitet werden konnten, die zu einer Änderung der bisherigen MotoMeter Sensorstruktur führten.
- Quarätztechnologie:
 - * Auf dem neuen Layout FAS3 wurden nun 16 Elemente untergebracht (bisher waren es nur 6)
 - * Erste Versuche zum doppelseitigen Quarzätzen wurden durchgeführt, um eine Justierhilfe beim doppelseitigen Laserstrukturieren und bei der Montage zu haben.
 - * Die Ätzraten und Ätzformen wurden genauer bestimmt (Dabei wurden vom Verbundpartner HSI Stuttgart Schliffbilder angefertigt)
- Beim Verbundpartner HSI Stuttgart wurde eine qualitativ bessere und einfacher ansteuerbare Laserstrukturierung ausgeführt.
- Für den Betrieb der Sensorelemente an einer Druckkammer wurde versuchsweise eine spezielle Aufbau- und Verbindungstechnik eingesetzt. Bei Laservibrometermessungen am HSI Villingen und verschiedenen Messungen bei MotoMeter zeigten sich Stärken und Schwächen des vorliegenden Gesamtaufbaus. Eine gute Druckempfindlichkeit ist vorhanden, die Schwingungsanregung für den praktischen Einsatz ist jedoch noch zu gering.

Verbleibende Arbeiten bis Projektende:

- Die Schwingungsanregung bzw. Abgriff müssen noch durch konstruktive Änderungen am Gesamtaufbau verbessert werden. Mögliche Änderungsansätze sind Aufgrund der durchgeföhrten Arbeiten vorhanden.
- Für diesen Aufbau wird eine Anregeschaltung entwickelt.

1 Verbesserungen am FEM Modell

Im ersten und zweiten Zwischenbericht stellte MotoMeter seine ersten FEM Simulationsergebnisse vor. Diese gaben an, daß unstrukturierte Quarzmembranen mit $125 \mu\text{m}$ Dicke und 8 mm Seitenlänge eine vernachlässigbar kleine Druckempfindlichkeit besitzen würden. Ab dem vierten Zwischenbericht stellte der Verbundpartner BOSCH die Messungen an ihren Silizium Membranen vor. Diese zeigten eine sehr gute Druckempfindlichkeit. Obwohl es sich hier um ein anderes Material, einen anderen Aufbau und andere Abmessungen handelte, tat sich natürlich die Frage nach der Korrektheit der bisherigen MotoMeter-FEM-Simulationen auf. Bei der Überprüfung unserer alten Modelle stellten wir tatsächlich einige fehlerhafte Annahmen und Randbedingungen fest. Im weiteren Verlauf wurde nun ein neues Modell erstellt, bei dem alle Fehler entfernt waren. Die Berechnungsergebnisse dieses Modells stimmen nun mit den BOSCH Messungen und den ebenfalls seit dem vierten Zwischenbericht vorgestellten FEM Simulationen des HSI überein. Damit ist die Zuverlässigkeit dieses neuen Modells gegeben, welches nun für alle weitere Simulationen verwendet wird.

1.1 Beschreibung des neuen MotoMeter (MM) Modells

Die vergleichbaren BOSCH Meßergebnisse beziehen sich auf eine quadratische Siliziummembran mit $25 \mu\text{m}$ Dicke und 9,2 mm Seitenlänge. Da unser FEM Programm nur auf einem PC läuft, sind wir mit der Zahl der Freiheitsgrade eingeschränkt. Deshalb wurde statt der quadratischen Membran eine kreisförmige Membran modelliert. Für den interessierenden Grundmode dürfte der daraus resultierende Fehler gering sein. Die kreisförmige Membran hat dagegen den Vorteil, daß man von ihr nur einen 2 dimensionalen Schnitt modellieren muß, der die Eigenschaft "achsensymmetrisch" besitzt.

Der Durchmesser ist mit 9,2 mm der Originalseitenlänge angeglichen, die Dicke ist ebenfalls gleich. Das Elementseitenlängenverhältnis ist mit max 1:2 bei 4 Elementen in der Dicke sehr gut (Modell:A3E.18A).

1.2 Vergleich der BOSCH Messungen mit den HSI und MM Berechnungen

Abbildung. 1 zeigt die Auslenkung der gesamten Membran im Schnitt. Sie beträgt bei 150 mbar maximaler Belastung $76,6 \mu\text{m}$. Abbildung 2 zeigt bei der selben Belastung die Vergleichsspannungen im Randbereich. Die max. Spg. ergibt sich zu 179 N/mm^2 . In der nachfolgenden Tabelle werden die MotoMeter Ergebnisse den Werten gegenübergestellt, die im 4. Zwischenbericht von BOSCH bzw. HSI vorgestellt wurden.

	BOSCH Messung	HSI 3D-Sim.	MotoMeter 2D-Sim.
Durchbieg. bei 150mbar in μm	≈ 95	86	76
Spg. bei 150mbar in N/mm^2	Berstdruck	≈ 120 Biegespg.	178
Res.Freq. bei Obar in kHz	7,5	4	5
Res.Freq. bei 15mbar in kHz	5		
Res.Freq. bei 100mbar in kHz	12,5	14	15
Res.Freq. bei 150mbar in kHz	14	16	17,5

In Abbildung 3 sind die verschiedenen Druck/Res.Frequenzkennlinien zusammengestellt. Die Abweichungen der BOSCH Membran dürfte sich aus der eingeprägten Vorspannung (Knackfroscheffekt) erklären. Zudem liegt den Simulationen 25 μm dickes Silizium zugrunde, die BOSCH Membran besteht jedoch aus 20 μm Silizium und 5 μm Zinkoxid, welches einen geringeren E-Modul besitzt. Dadurch wird die BOSCH Membran etwas weicher (größere Auslenkung, niedrigere Resonanzfrequenz). Andererseits erhöht sich die Steifigkeit bei kreisrunder Einspannung (MM 2D Simulation) etwas gegenüber der Quadratischen. Dies führt zu einer kleineren Auslenkung und höheren Resonanzfrequenz.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß dieses neue FE- Modell zuverlässige Ergebnisse liefert, vor allem für kreisförmige Strukturen.

2 Simulation verschiedener Membranparameter

2.1 Materialeinfluß

In Abbildung 3 ist zusätzlich noch der Resonanzfrequenzverlauf einer Quarz Membran (Kurve: MM 2D-Sim Quarz) bei sonst gleicher Geometrie der Siliziummembran (Kurve: MM 2D-Sim) gegenübergestellt. Die deutlich verringerte Frequenz beim Quarz hat seine Ursache in dessen geringerem E-Modul.

2.2 Dickeinfluß

Da bei der Quarzanregung die Elektroden (Goldflächen) auf der Ober- und Unterseite des Wafers sein müssen, ist der minimale Membrandurchmesser abhängig von der minimal lieferbaren Waferdicke. Diese liegt bei 125 μm . Dessen Resonanzänderung bis zum Berstdruck [Abb. 4] ist nochmals deutlich geringer (Kurve: R=4,6 f=16kHz).

2.3 Membrandurchmesser

Ein mikromechanischer Sensor sollte auch kleine Abmessungen haben. Je kleiner jedoch der Durchmesser wird [Abb. 4], desto steifer wird die Membran und desto geringer die Frequenzänderung. Bemerkenswert ist, daß bei positiver und negativer Belastung sich die Größe der Frequenzänderung bis zum Berstdruck teils deutlich unterscheidet (z.B. Kurve: R=2,6mm f=49kHz).

2.4 Strukturierte Membran

Um trotz kleinem Durchmesser eine große Frequenzänderung zu erhalten, müssen am Rand ringförmige Gräben in die 125 μm dicke Membran eingeätzt werden. Beim Ätzen ergibt sich dann größtenteils ein V - förmiger Graben von (je nach Ätzdauer) z.B. 100 μm Tiefe. Der verbleibende Teil wird Steg genannt und hat eine Dicke von 25 μm . Die Frequenzänderung bei verschiedenen Ringdurchmessern zeigt Abbildung 5. Gegenüber den unstrukturierten Membranen sind deutlich größere Frequenzänderungen erreichbar.

Fazit:

Im Berichtszeitraum wurden viele Simulationen mit den verschiedensten Membranparametern durchgeführt. Abbildung 6 zeigt einen kleinen Ausschnitt davon. Es lassen sich folgende Ergebnisse davon ableiten:

- * Quarz hat durch seine kleineren E-Module eine kleinere Steifigkeit und somit bei gleicher Geometrie generell eine geringere Resonanzfrequenz [Abb. 3].
- * Wenn das Verhältnis Membrandurchmesser / Membrandicke sehr groß ist (z.B. BOSCH Membran 9200/25 = 368 ergibt sich bei Druckbelastung eine große Auslenkung/Verformung und somit eine große Frequenzänderung.

3.2.2 FEM-Piezo-Simulation zur Anregungsoptimierung

Es wurden mit FEM-Piezo-Simulationen begonnen, um die günstigste Elektrodenplazierung heraus zu finden. Wegen diverser Schwierigkeiten werden wir die daraus resultierenden Ergebnisse erst im nächsten Zwischenbericht vorstellen können.

4 Quarätztechnologie

4.1 Doppelseitiges Quarzätzen

Es wurde erstmals von MotoMeter aus das doppelseitige Ätzen von Quarzwafern in den Laborräumen des HSI Stuttgart durchgeführt. Dabei wurde ein kreisrundes Loch genau an der Stelle auf der Waferrückseite angebracht, an der auf der Wafervorderseite die Ausrichtquadrate plaziert sind [Abb. 8]. Es ist die Ausrichtmarke "N" dargestellt. Von der Vorderseite wurden links unten und rechts oben je ein Quadrat eingeätzt (dunkle Flächen im oberen Bild). Die Quadrate links oben und rechts unten bleiben stehen. In dem Bereich dazwischen erkennt man einen weißen Kreis, der die Einätzung von der Rückseite darstellt. Die Eckpunkte der stehengebliebenen Quadrate sind somit von der Vorderseite und von der Rückseite [Abb. 9] aus zu sehen. Dies ist für die beidseitige Laserstrukturierung sehr wichtig (siehe unten).

4.2 Ätzraten und Ätzformen bei AT-Quarzwafern

4.2.1 Ätzdaten:

Ätzlösung: 3 Teile 48% HF, 2 Teile 40% NH₄F

Ätztemp.: Zwischen 78,6 und 79,4°C

Ätzrate: 1,11 µm je min

Ätztiefen: AT6 = 100 µm; AT7 = 99 µm; AT8 = 89 µm

Es wurde die alte Ätzlösung vom Januar 92 benutzt. Damals ist eine Ätzrate von 1,19 µm / min festgestellt worden. Die nun etwas geringer festgestellte Ätzrate könnte seine Ursache in der Alterung und/oder in der etwas geringeren Ätztemperatur haben. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, ist die Temperaturstabilisierung ebenfalls noch zu verbessern.

4.2.2 Ätzformen:

An einem Testring mit 250 µm Maskenkreisringbreite [Abb. 7: Element M] wurden genauere Messungen vorgenommen als im letzten Zwischenbericht vorgestellt. Die Unterätzung wurde nun ebenfalls berücksichtigt [Abb. 10]. Vom HSI Stuttgart wurden in der letzten Woche noch Schliffbilder von den Ätzquerschnitten hergestellt [Abb. 11]. Die beiden hellen, dünnen horizontalen Linien sind die Goldschicht, zwischen denen sich der geätzte Quarz befindet. Auf den vier gezeigten Schliffbildern sind die typischen Ätzformen sichtbar. Neben dem normalen V - Graben sind auf dem geätzten AT-Quarz auch senkrechte Ätzkanten und Äzwinkel sowohl größer als auch kleiner 90° zu finden. Die genaue Auswertung wird im Abschlußbericht vorgestellt werden.

5 Elektrodenstrukturierung mittels Laser

Wenn der Laserstrahl beim strukturieren über den Wafer fährt, wird im allgemeinen gleichzeitig die Goldschicht auf der Oberseite und auf der Unterseite des Quarzwafers abgetragen. Fährt der Laserstrahl jedoch über einen Ätzgraben, so wird dieser an der sehr glatten schrägen Fläche weggespiegelt. Im [Abb. 12] sieht man am unteren Rand eine Goldbrücke im Laserschnitt. In der Bildmitte sieht man hingegen einen dunklen schrägen Strich (also abgetragenes Gold), der durch das Wegspiegeln des Laserstrahls erzeugt wurde (in [Abb. 13] vergrößert).

Da die Ansteuerung des Lasers am HSI über AutoCAD-Files erfolgt, ist es durch Spiegeln der Laserstruktur sehr einfach möglich, die Rückseite des Wafers nochmals mit dem Laser zu bearbeiten. Die Ausrichtung erfolgt über die von beiden Seiten sichtbaren Ausrichtzeichen.

Der HSI Laser bietet darüber hinaus noch den Vorteil, daß er einen feineren und schärferen Schnitt durchführt (30 µm breit). Durch den beweglichen X-Y-Tisch lassen sich sehr präzise Schnitte beliebiger Form herstellen. Hier hatte der Laser von MotoMeter gewisse Nachteile, da bei ihm nicht die Probe, sondern der Laser bewegt wurde.

6 Aufbau für Druckmesskammer [Abb. 14]

Die Grundplatte ist aus 2 mm dickem Messing und hat die Befestigungslöcher im gleichen Abstand wie die HSI Grundplatten, damit zu Versuchszwecken dieselbe Druckmesskammer benutzt werden kann. Auf diese Platte, die in der Mitte ein 4 mm Loch besitzt, wird eine 1,5 mm dicke Epoxid-Leiterplatte [Abb. 13] aufgeklebt. Diese Platte besitzt Kupferleiterbahnen, die über Leitsilberpunkte mit der Unterseite der Quarzsensorelemente verbunden sind [Abb. 14]. In der Mitte der Epoxidplatte wurde ein Loch gefräst, das die selben Maße wie die Ätzgrabenstruktur außen (Bohrung mit 4,2 mm; 6,0 mm; Langloch mit 4,2/6,0 mm) besitzt. Am Rand dieses Loches wurde mittels Siebdrucktechnik ein ca 1 mm breiter Klebering aufgebracht. [Abb. 15] zeigt gleichzeitig die Kupferleiterbahnen auf der Epoxid-Platte, die Ätzgräben im Quarz und die Elektrodenstruktur (gestrichelt). Die Messungen bei angelegtem Druck zeigten eine große Hysteresis, was darauf schließen lässt, daß der verwendete Kleber zu weich war.

Das Vorsehen von Ersatzleiterbahnen auf der Platine hat sich als vorteilhaft erwiesen, da im nachhinein die Elektrodenform und -Anzahl stark variiert wurde.

7 Schwingungsanregung und Druckempfindlichkeit

7.1 Laservibromettermessungen am HSI

Es ließ sich sowohl bei der Langloch- als auch bei der Kreis-Version die Grundresonanzfrequenz feststellen [Abb. 16]. Die Amplitude war jedoch nur halb so hoch wie bei den letzten Mustern. Ursache dafür dürfte die veränderte Elektrodenform und der teilweise geringere Durchmesser sein. Hier müssen noch weitere Untersuchungen vorgenommen werden.

7.2 Burstanregung

An unserer Burstschaltung konnten die Resonanzfrequenzen ebenfalls festgestellt werden [Abb. 17]. Das Empfangssignal war jedoch zu schwach, als daß die angeschlossene PLL-Schaltung selbstständig die Resonanzfrequenz gefunden hätte. Durch die Nachregelung von Hand konnte trotzdem eine Frequenz-Druck-Kennlinie aufgenommen werden [Abb. 18]. Die Hysteresis zwischen steigendem und fallendem Druck dürfte wie bereits erwähnt an der mangelhaften Einspannung liegen. Die starke Nichtlinearität röhrt von der Ablesegenauigkeit her.
Die Empfindlichkeit der Kreismembran beträgt ca. 900 Hz / 500 mbar bei einer Grundfrequenz von 23 kHz. Die Empfindlichkeit der Langlochmembran beträgt ca. 1150 Hz / 500 mbar bei 30 kHz Grundfrequenz.

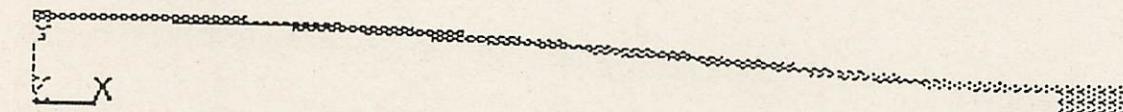
7.3 Vierpolanwendung

Bei der Anregung als Vierpol (ein Elektrodenpaar wird angeregt und am gegenüberliegenden Paar wird abgegriffen) stieg die Amplitude ab ca 25 kHz an und hat dann bis 33 kHz mehrere Maxima [Abb. 19]. Zusätzlich ist in den Wendepunkten gleichzeitig ein deutlicher Phasensprung (obere Linie mit X-Marken) zu beobachten. Welche Schwingungsformen sich dahinter verbergen muß noch mit dem Laservibrometer genauer ermittelt werden.

Die Wahl des Bezugspunktes beim Spannungsabgriff ist sehr sorgfältig zu wählen. Hierzu muß auch die Elektrodenstruktur nochmals verändert werden.

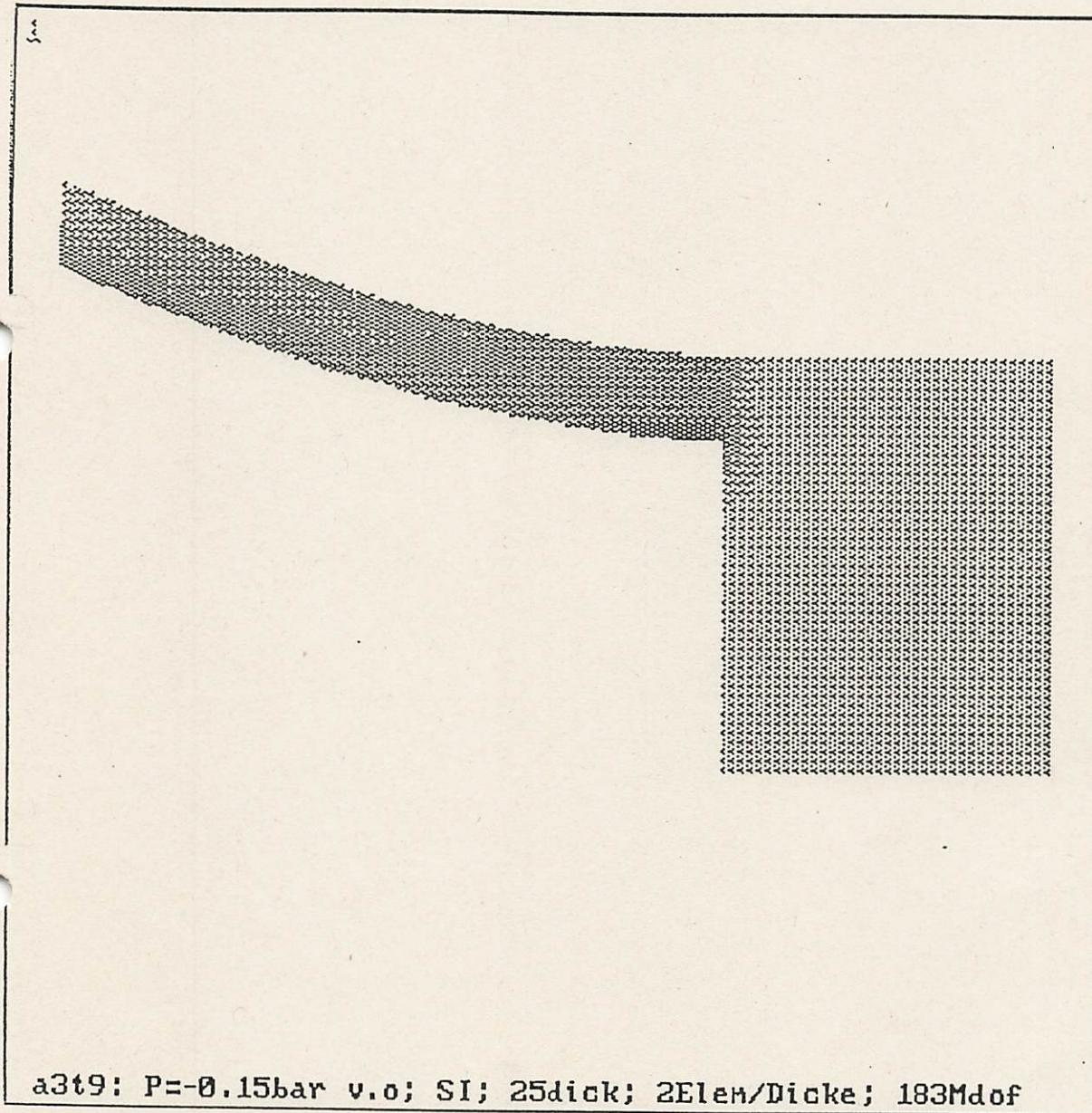
ANSYS 4.4
JUN 24 1992
11:20:45
PLOT NO. 2
POST1 STRESS
STEP=3
ITER=20
UY
D GLOBAL
DMX =76.608
SMN =-0.00276
SMX =76.608

ZU =1
DIST=2695
XF =2450
YF =62.5
-0.00276
8.51
17.022
25.534
34.046
42.559
51.071
59.583
68.095
76.608

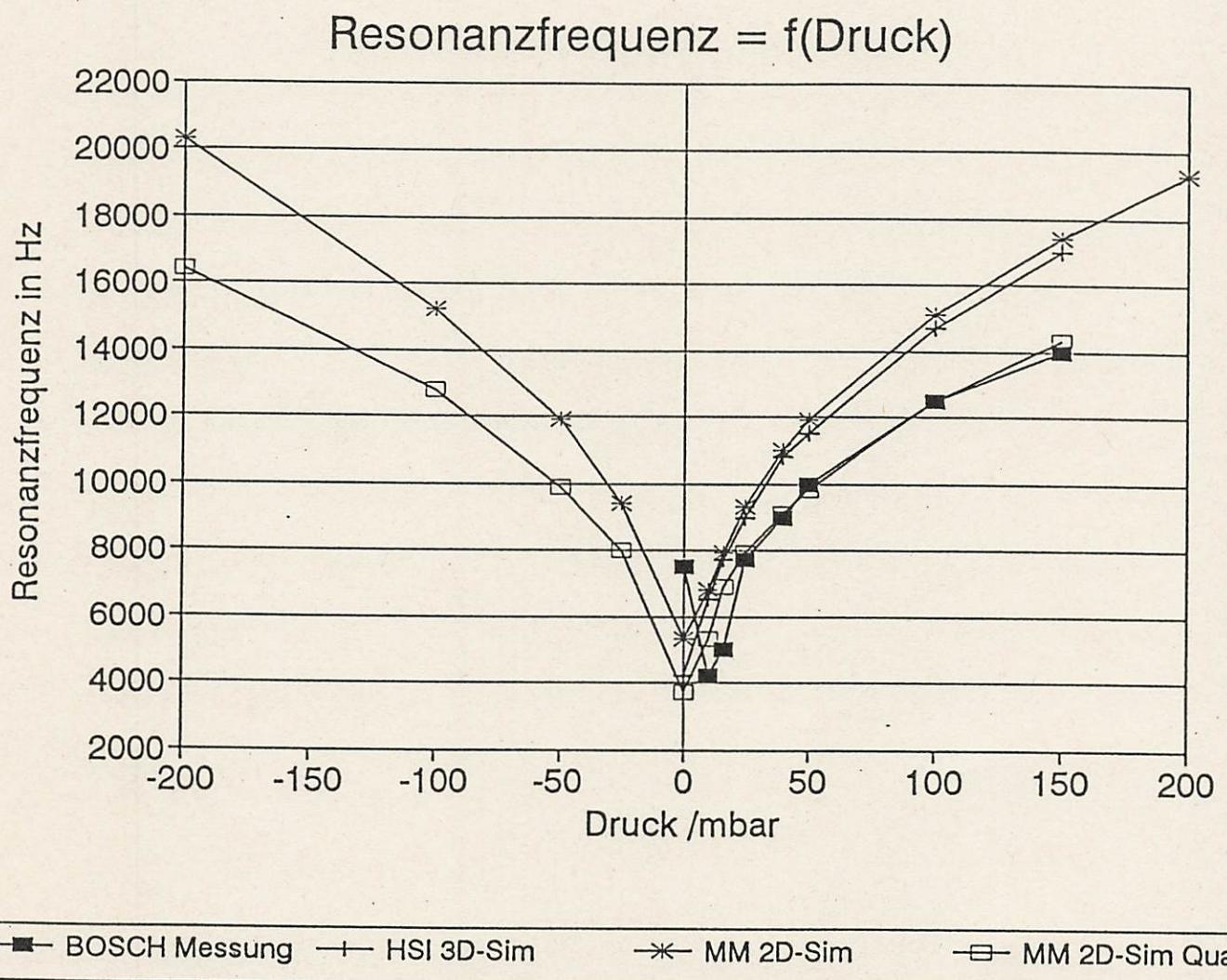


a3t9: P=-0.15bar v.o; SI; 25dick; 2Elem/Dicke; 183Mdof

[Abb. 1]

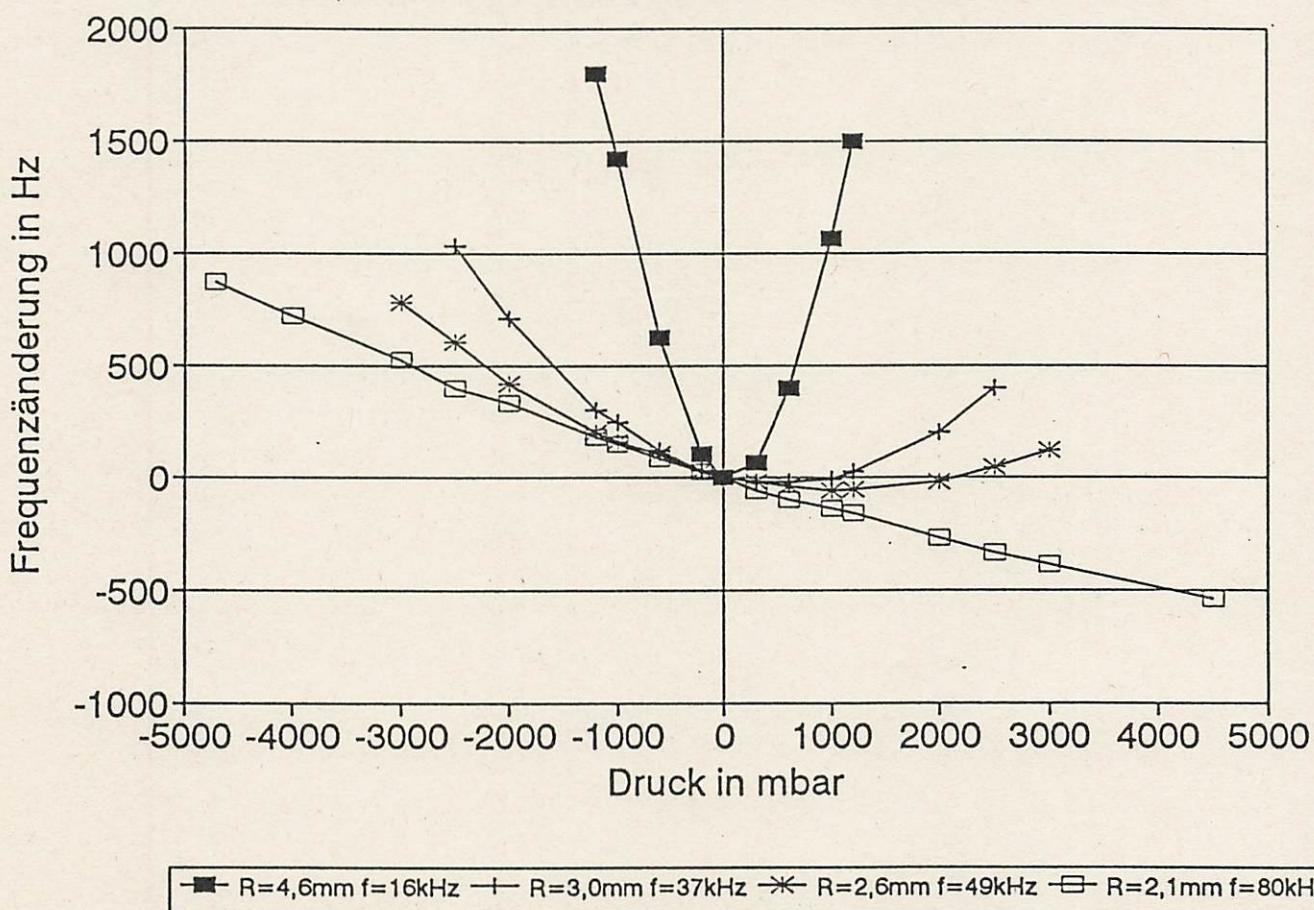


[Abb. 2]

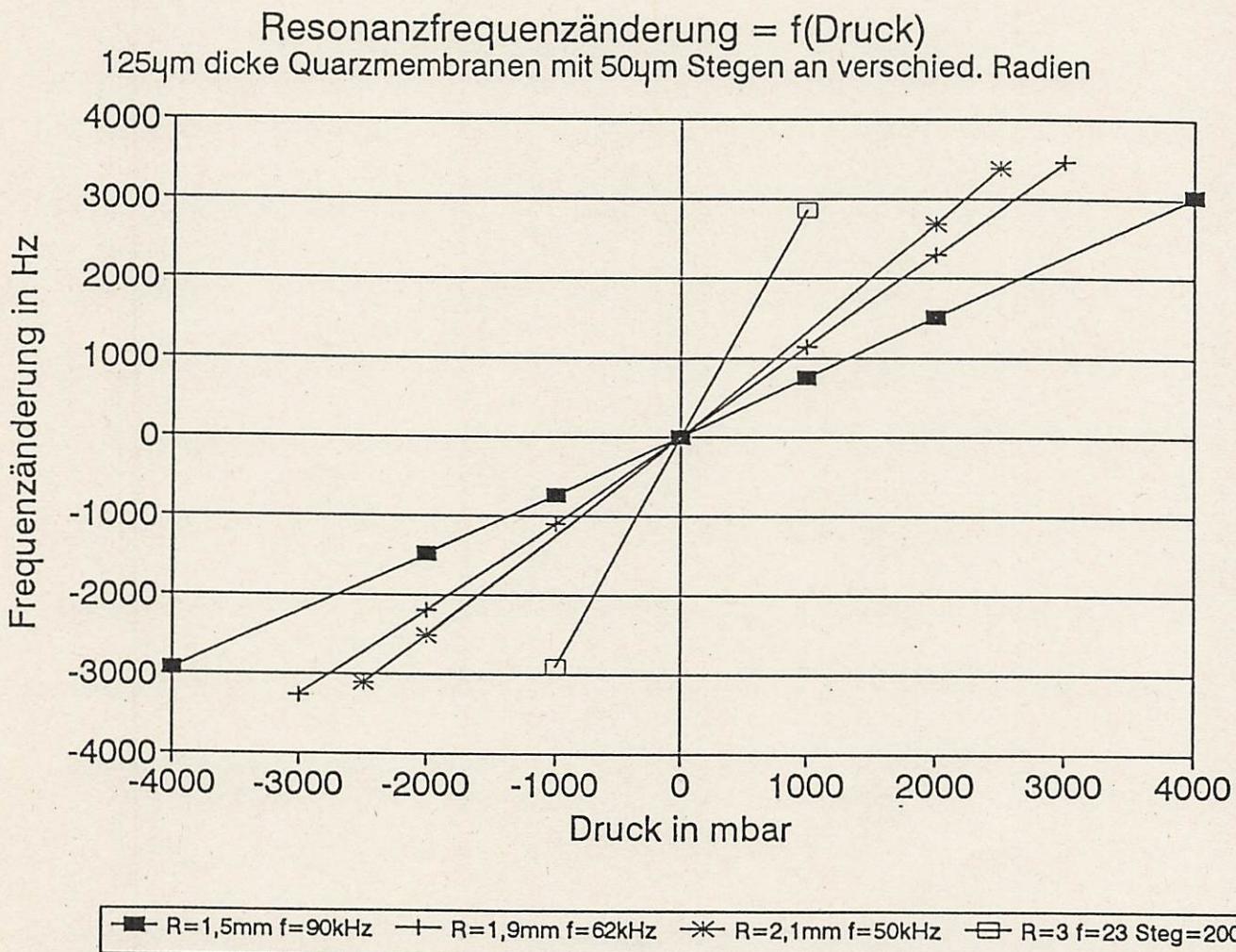


[Abb. 3]

Resonanzfrequenzänderung = f(Druck)
125 μ m dicke Quarzmembranen mit verschied. Radien



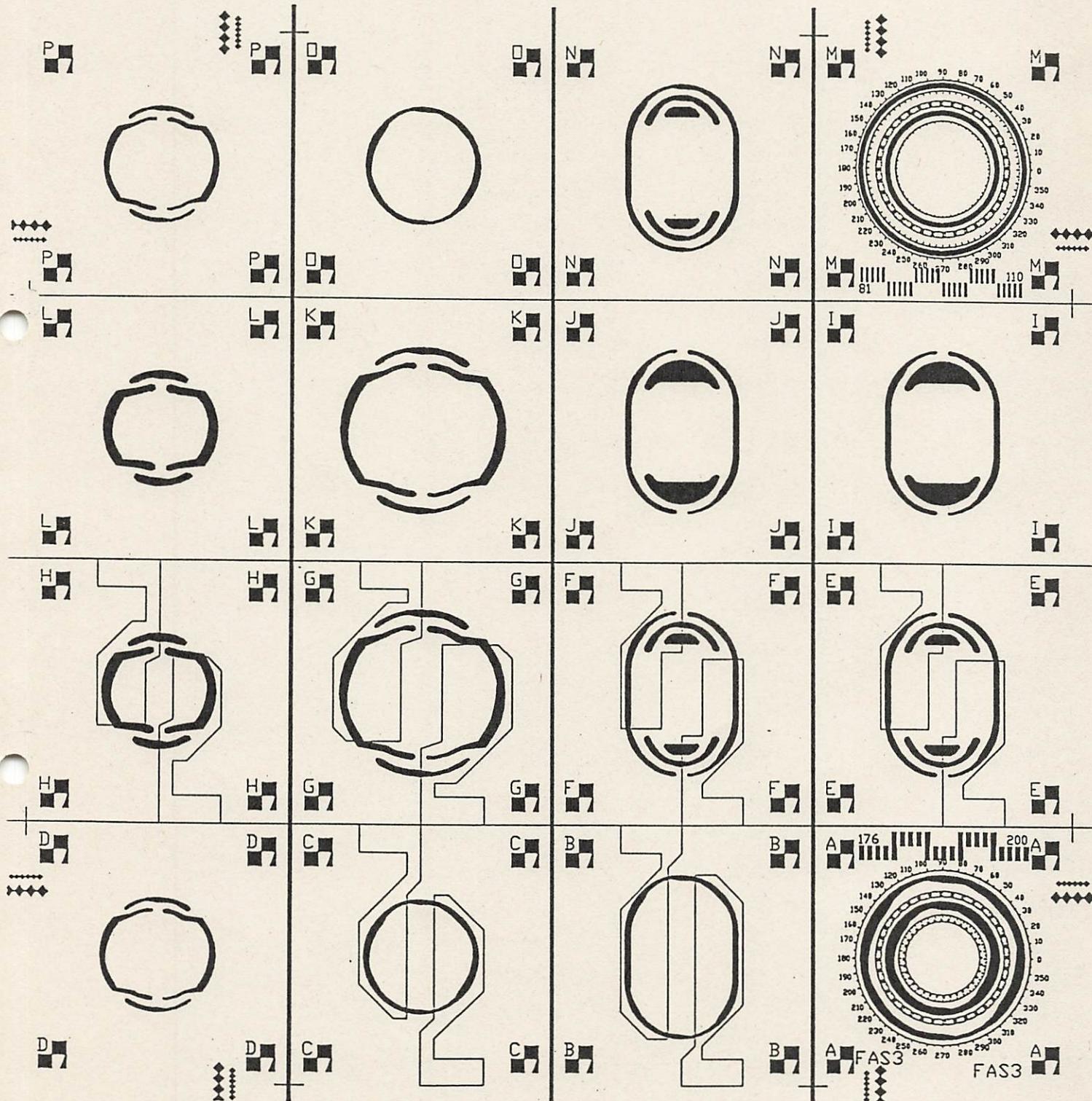
[Abb. 4]



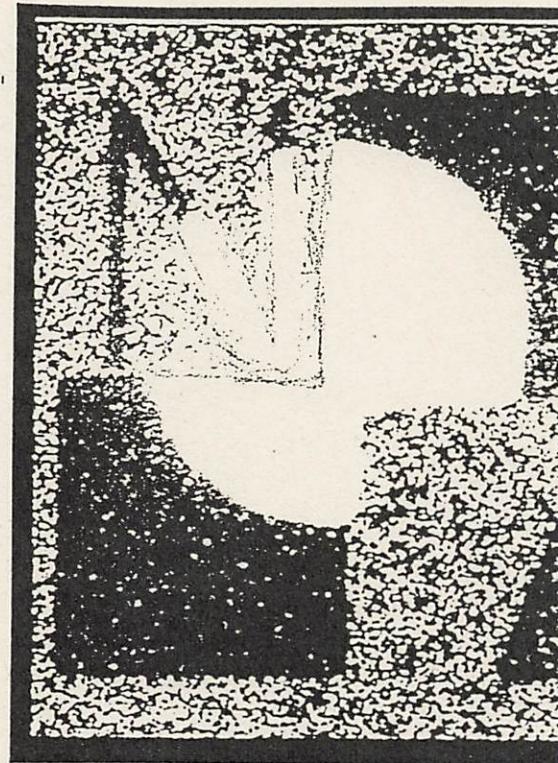
[Abb. 5]

Sim. Name	Druck [Bar]	Radi- us	Steg- Breite	Freq.	UY	f-f ₀	SI			Bemerkungen
a3k5	0	1500	50	90177	0	0	0			
a3k4	-2	"	"		2,91	-1482	74,6			
a3k3	2	"	"		-2,81	1503	73,1			
a3l5	4	"	"		-5,54	3032	145			
a3n0	0	1900	50	62518	0	0	0			
a3n6	-3	"	"		9,5	-3276	157			
a3n5	-2	"	"		6,21	-2208	103			
a3n4	-1	"	"		3,0	-1116	50,9			
a3n3	1	"	"		-2,9	1137	49,6			
a3n2	2	"	"		-5,8	2293	98,1			
a3n1	3	"	"		-8,5	3468	146			
a3c6	0	1900	50	55547	0	0	0			
a3c8	-2	"	"			-1988				
a3c7	2	"	"		-7,3	2121	100			
a3c0	0	2100	50	50087	0	0	0			
a3l3	-2,5	"	"	46974	12,4	-3113	162			
a3c2	-2	"	"			-2520				
a3c1	2	"	"		-8,85	2681	119			
a3l2	2,5	"	"	53464	-10,9	3377	147			
a3o0	0	2600	50		0	0	0			
a3o6	-3				36,7		342			
a3o5	-2				22,9		216			
a3o4	-1				10,7		103			
a3o3	1				-9,44		93,7			
a3o2	2				-17,9		180			
a3o1	3				-25,4		260			
a3a7	0	2000	200	46653	0	0	0			
a3a8	1	"	"		-5,11	1462	104			
a3a9	2	"	"		-9,93	2976	203			

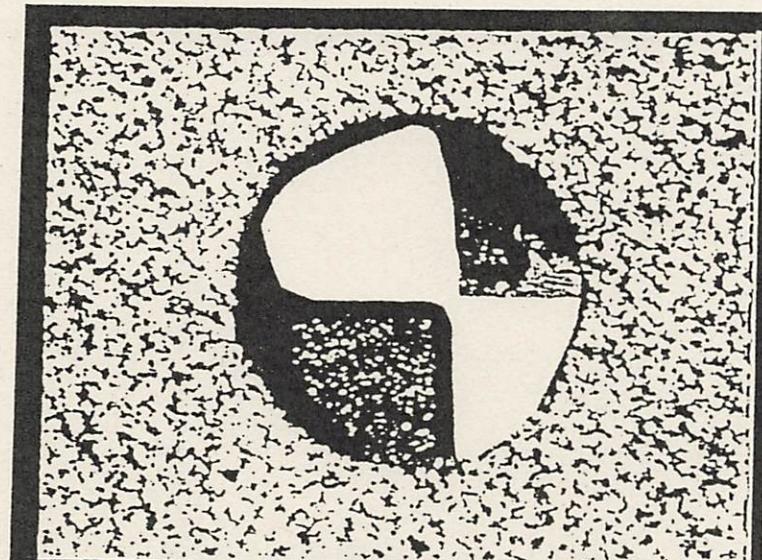
[Abb. 6]



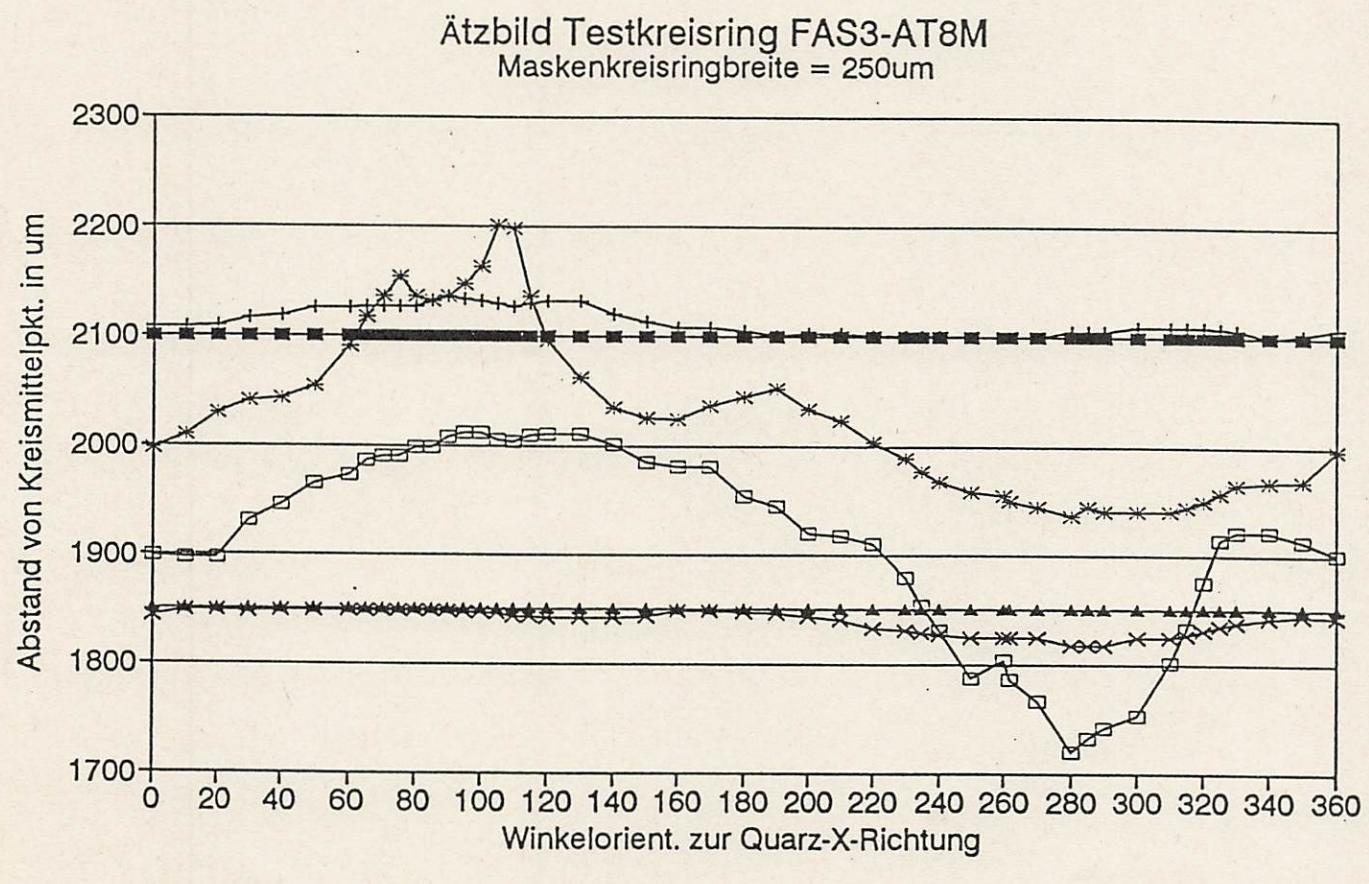
[Abb. 7]



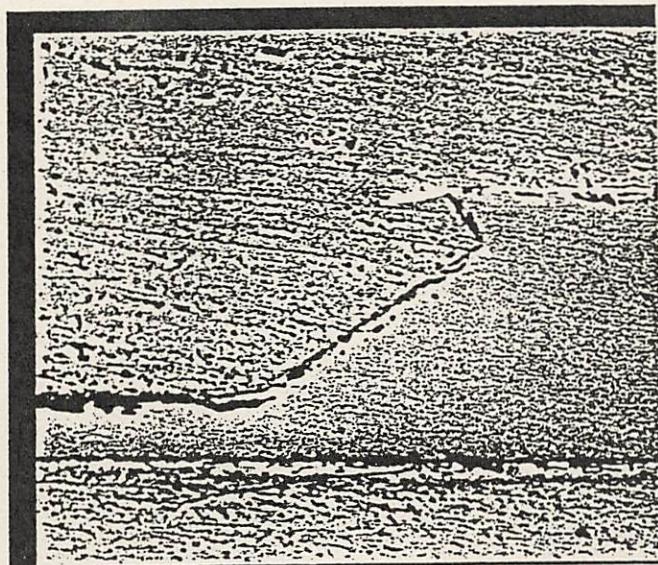
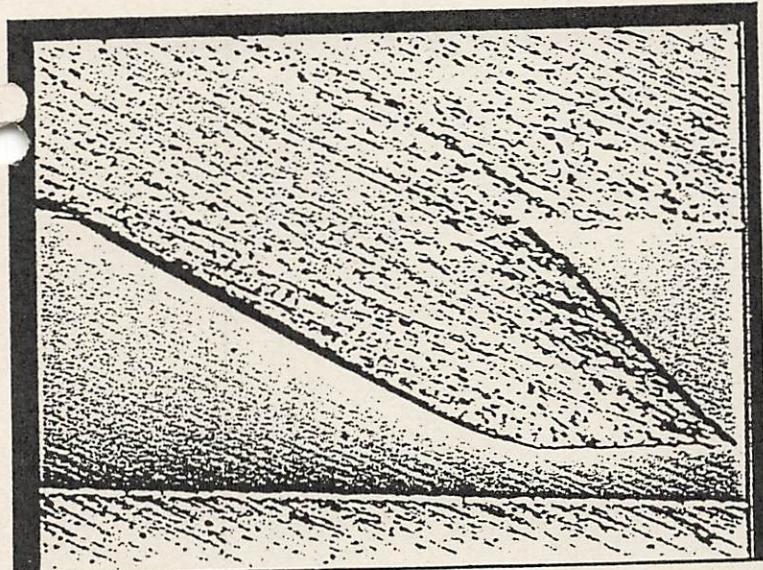
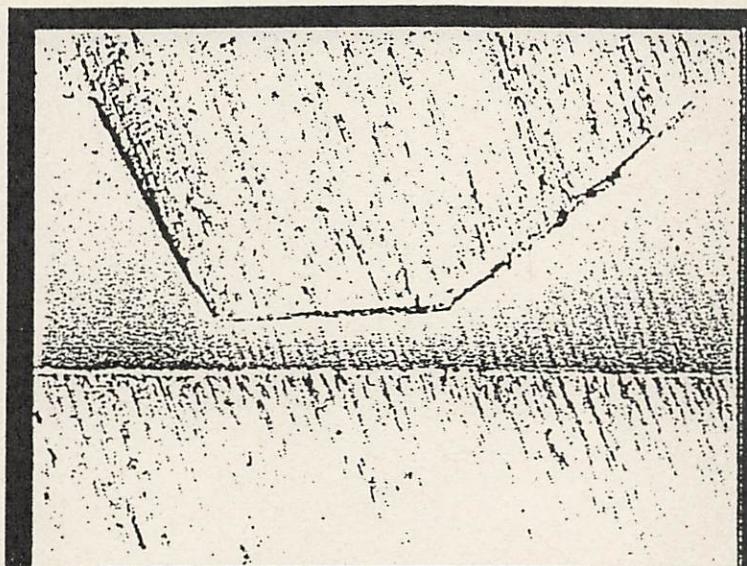
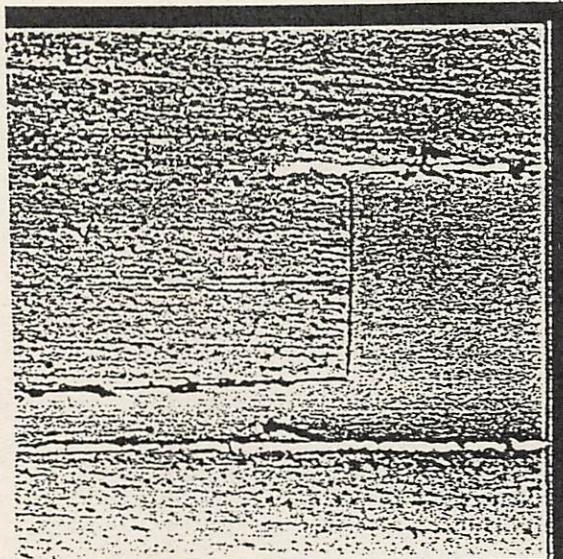
[Abb. 8]



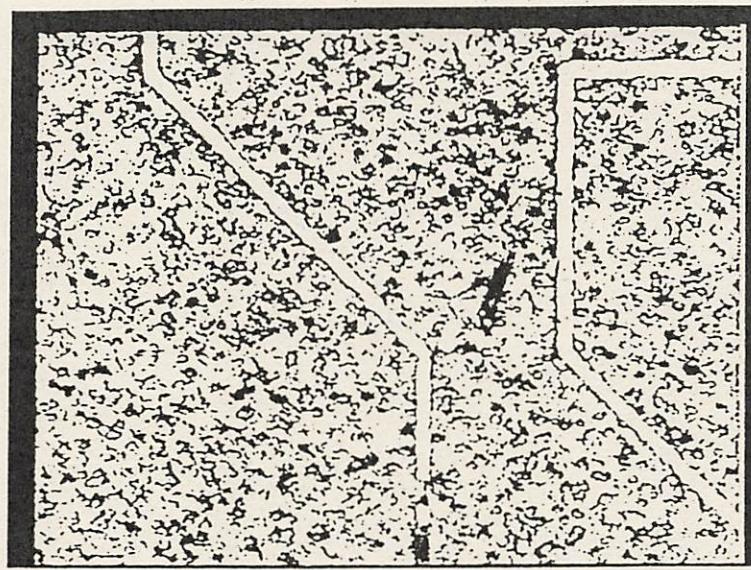
[Abb. 9]



[Abb. 10]



[Abb. 11]



5x
BRS-B
PT8

82 nm \pm 740 nm
7 nm \pm

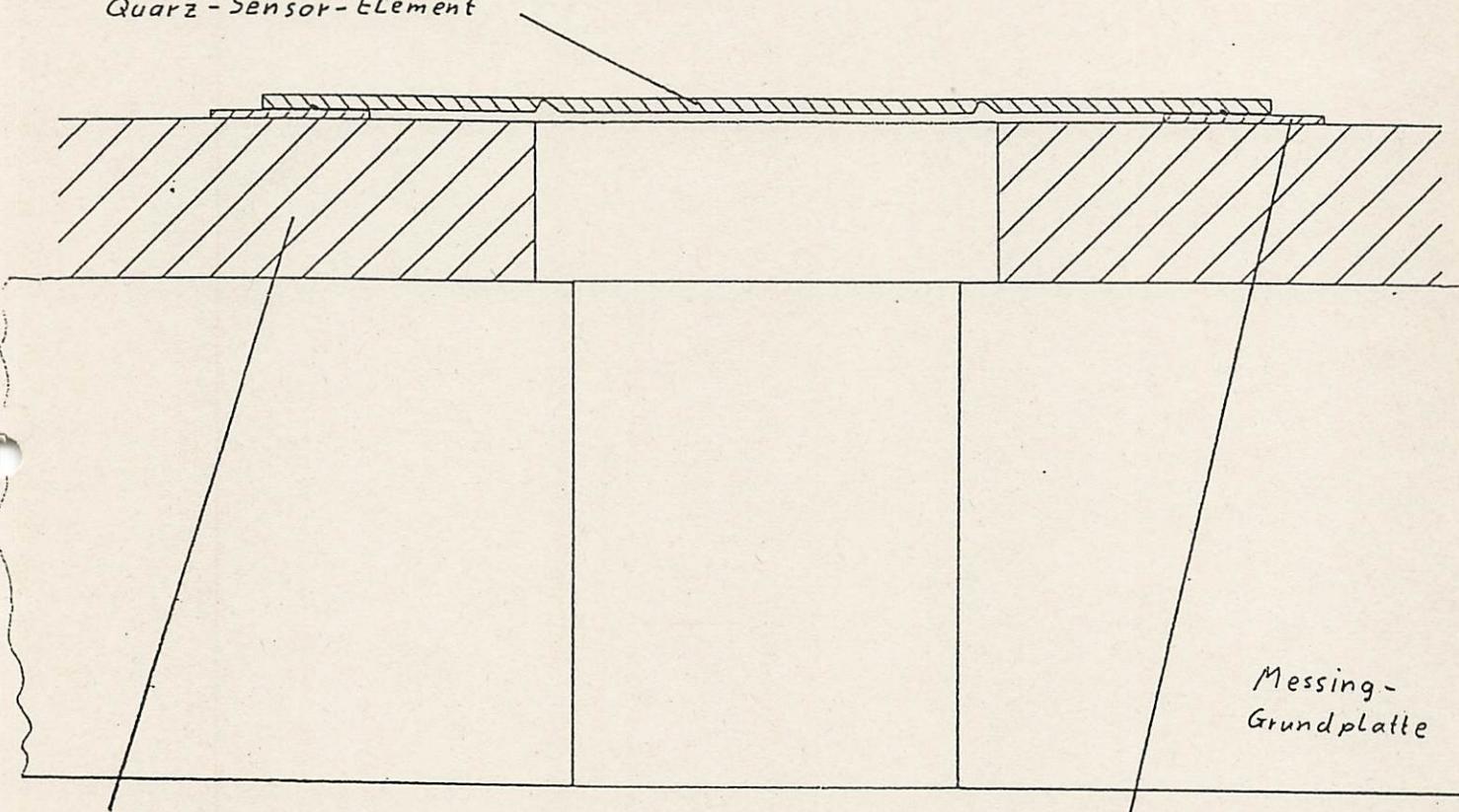
[Abb. 12]



20x
BRS-B
PT8

[Abb. 13]

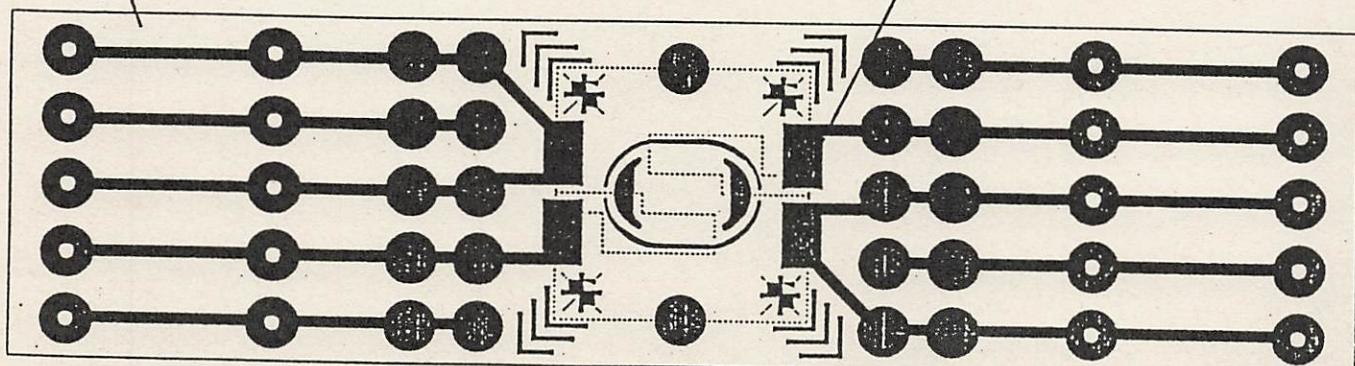
Quarz - Sensor - Element

Messing -
Grundplatte

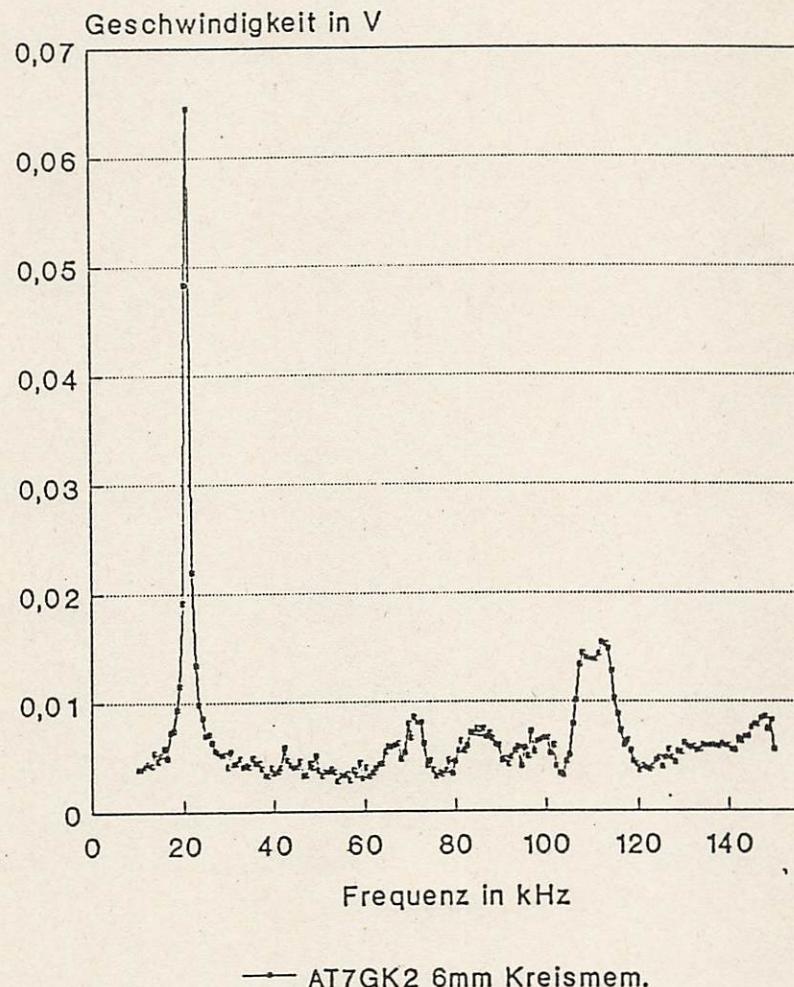
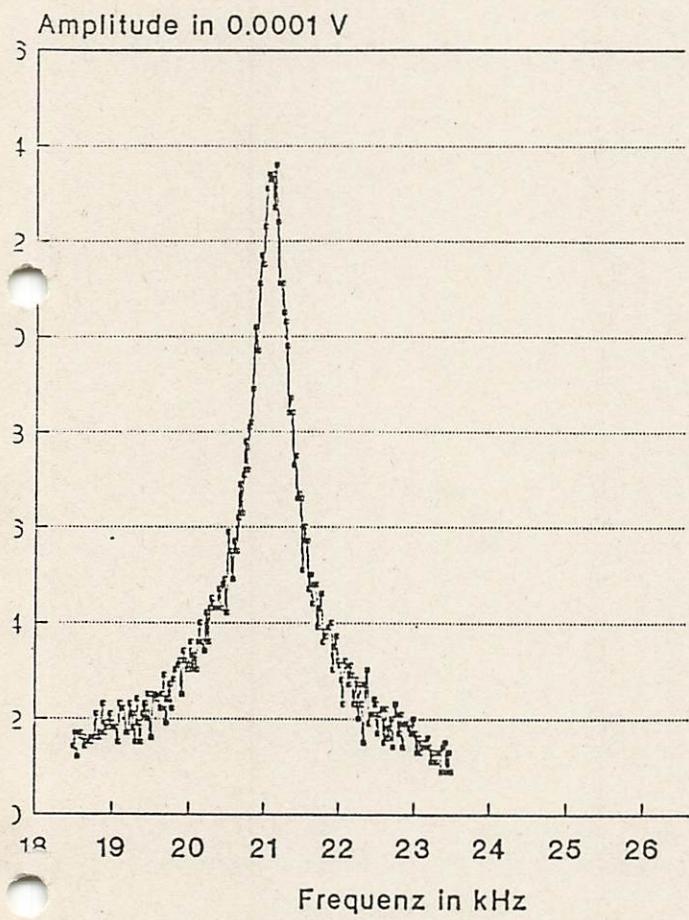
Epoxidplatte

Kupfer Leiterbahnen

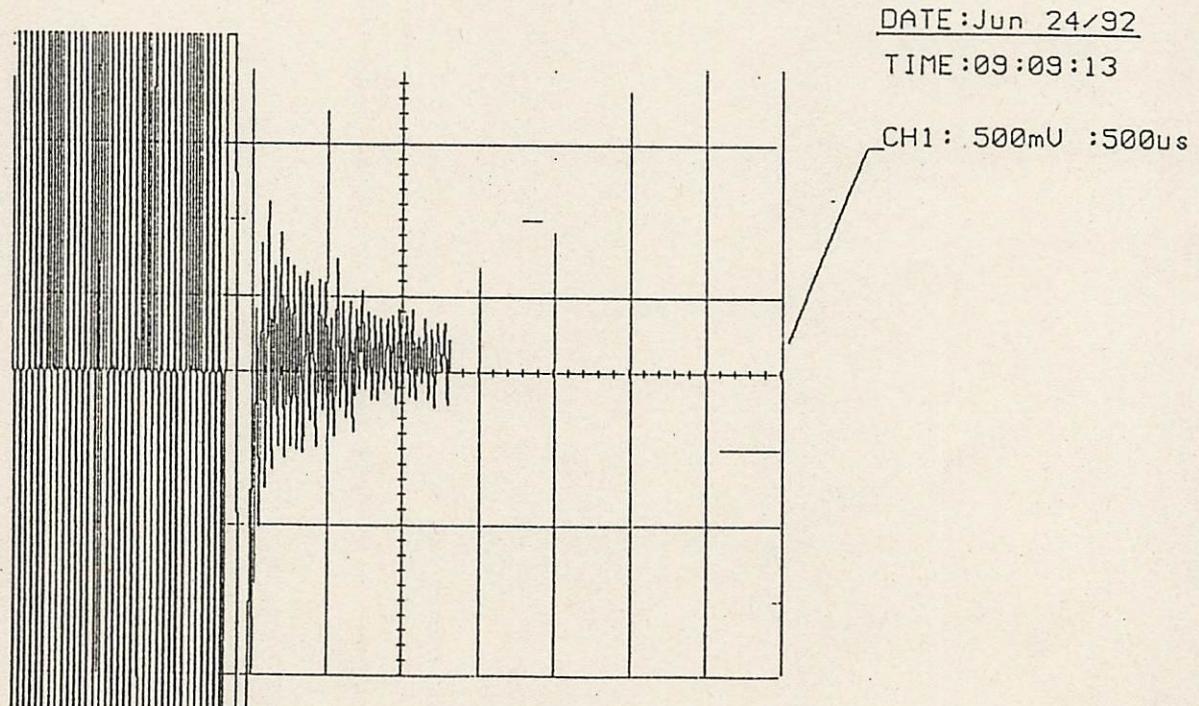
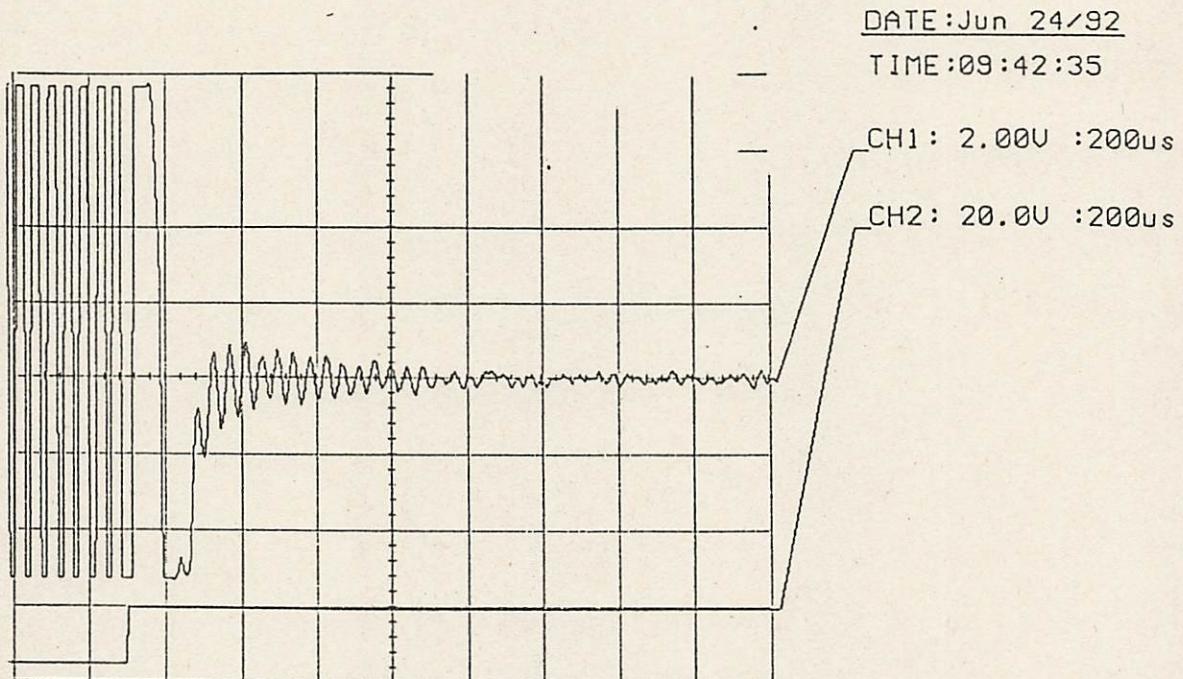
[Abb. 14]



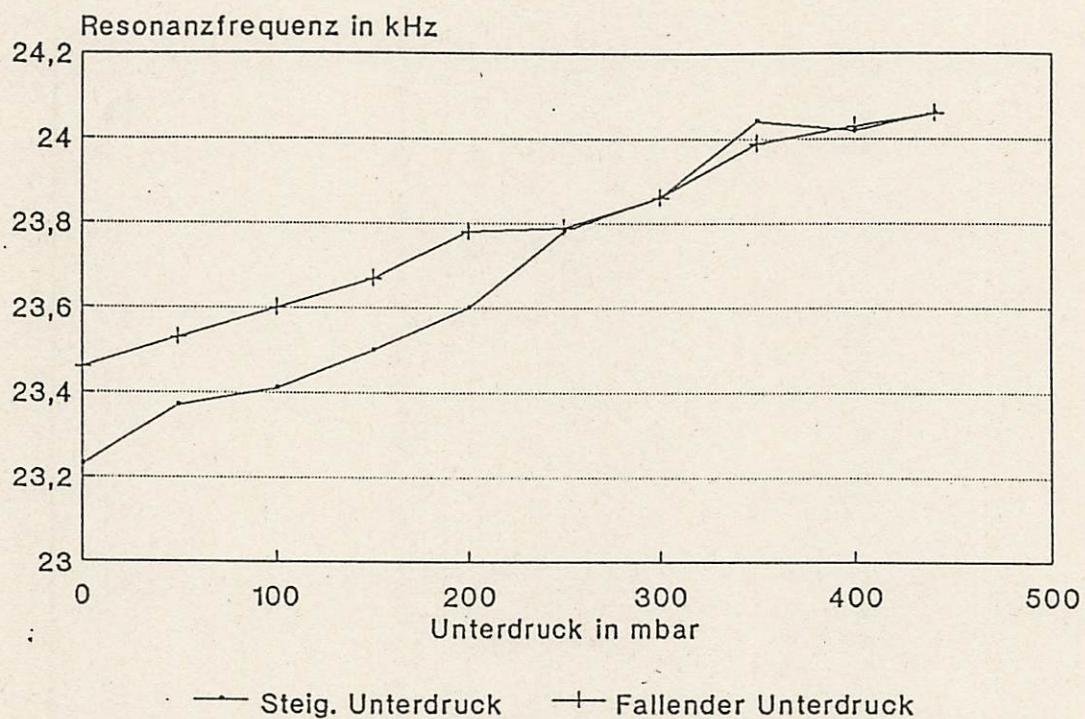
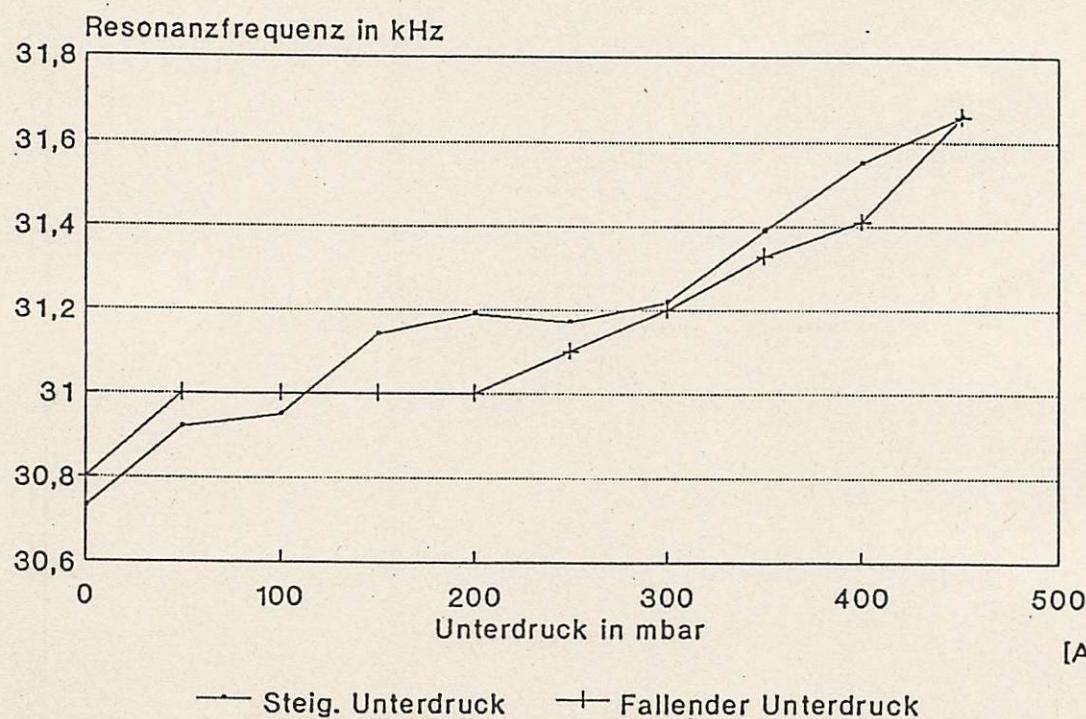
[Abb. 15]



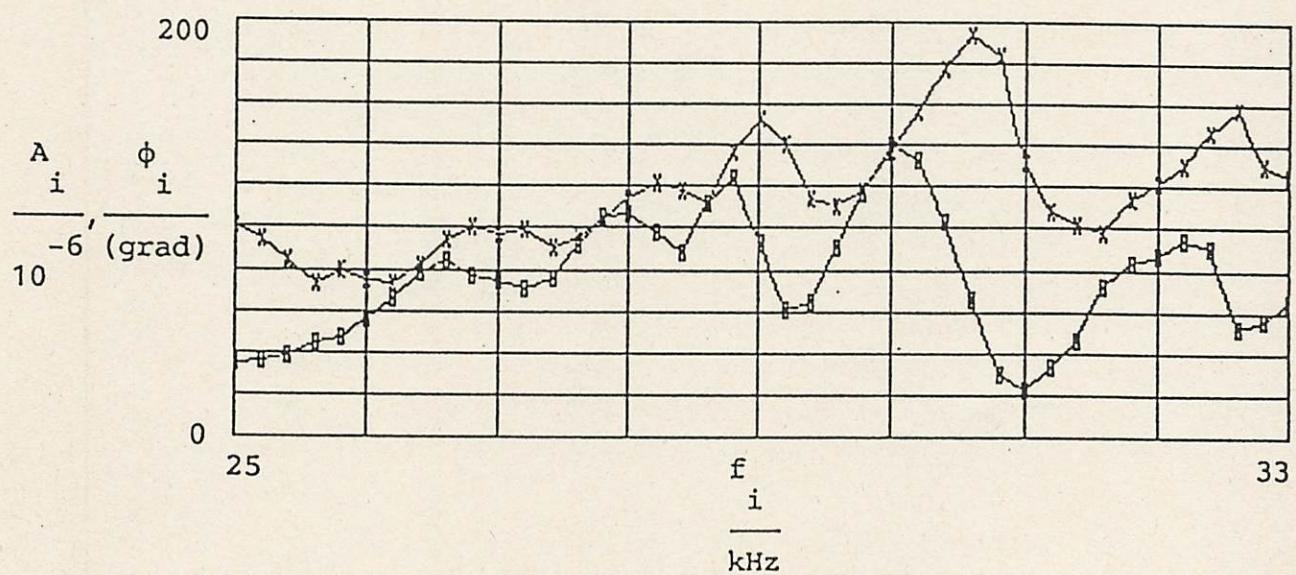
[Abb. 16]



[Abb. 17]

Druckempfindlichkeit AT7 G-K
6mm Kreisdurchmesser; 50 um StegDruckempfindlichkeit AT7 i
4/6mm Langloch; 50 um Steg

[Abb. 18]



[Abb. 19]