

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

Förderkennzeichen 13 AS 01180

Berichtszeitraum: 1.1. bis 30.6.1991

*MotoMeter AG
Daimlerstraße 6
7250 Leonberg*

*Projektleiter: Dr. J. Erlewein
Bearbeiter: W. Hartig*

Überblick

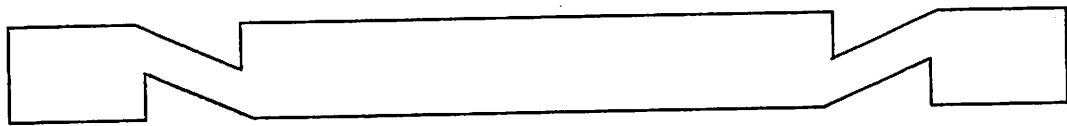
1. Konzept Druckmembran und deren Ankopplung
 - 1.1. Stand Januar 91
 - 1.2. Vereinfachung für die Mustererstellung
 - 1.2.1. Vom Ätzwinkel unabhängige Stege
 - 1.2.2. FEM Simulation
 - 1.3. Anregung einer Biegeschwingung in der Quarzmembran
 - 1.3.1. X-Schnitt
 - 1.3.2. Y-Schnitt
 - 1.3.3. Z-Schnitt
 - 1.3.4. AT-Schnitt
2. Biegeschwinger aus AT-Schnitt
 - 2.1. Quarzstruktur
 - 2.2. Elektrodenkonfiguration
 - 2.3. Anordnung im 6er Nutzen
3. Herstellung des Sensorelementes
 - 3.1. Maskenerstellung
 - 3.2. Belackung
 - 3.2.1. mit Standard-Chuck
 - 3.2.2. mit Silizium-Chuck
 - 3.2.3. mit Zusatz-Abdeckung
 - 3.3. Belichtung
 - 3.4. Au/Cr Ätzung
 - 3.5. Anisotropes Quarzätzen
 - 3.5.1. Ätzraten
 - 3.5.2. Ätzwinkel
 - 3.5.3. Maskenkorrektur
 - 3.6. Elektrodenstrukturierung mit YAG-Laser
4. Aufbau des Musters
 - 4.1. Befestigung des Sensorelements
 - 4.2. Signalabgriff
5. Ausblick
 - 5.1. Optimierung der Membranstruktur
 - 5.2. Optimierung der verschiedenen Herstellungsprozesse
 - 5.3. Aufbau- und Verbindungstechnik
 - 5.4. Anregeschaltung und Auszählelektronik

1. Konzept Druckmembran und deren Ankopplung

1.1 Stand Januar 1991

Die wesentlichen Kennzeichen der zuletzt vorgestellten Struktur (z.B. Flächendehnungsschwinger aus GT-Schnitt) waren:

- a. - schräge Stege mit speziellen Winkeln (erforderlich für optimale Druckempfindlichkeit), die sich durch die Ätzstoppebenen ausbilden
- b. - doppelseitiges Ätzen zur Erzeugung der schrägen Stege
- c. - die niederste Resonanzfrequenz hat die Biegeschwingung mit ca. 67 kHz
- d. - der Grundmode der Longitudinalschwingung hat ca. 382 kHz
- e. - einfache Elektrodenform



Seitenansicht der strukturierten Membran

Bei der angestrebten zügigen Realisierung ergeben sich folgende Probleme:

- zu a.
 - * Es sind nicht alle Ätzstoppwinkel bei Quarz bekannt (hoher Experimentieraufwand!).
 - * Zur Erzeugung bestimmter Stegwinkel muß ein noch unbekannter Quarzschnitt gewählt werden. (Sonderschnitt)
 - * Die piezoelektrische Anregbarkeit schränkt die Auswahl weiter ein.
 - * Rein symmetrische Ätzstrukturen sind im hexagonalen Quarzkristall fast nicht erzeugbar.
- zu b.
 - * Positionierprobleme (hoher Experimentieraufwand).
 - * Probleme beim Belackern von quadratischen Blanks auf der im Hahn-Schickard-Institut (HSI) vorhandenen Lackschleuder.
- zu c.
 - * Die Grundbiegeschwingung ist häufig leichter anregbar als eine Longitudinalschwingung des gleichen Körpers.
 - * Tiefe Frequenzen sind elektrisch leichter zu verarbeiten.

1.2. Vereinfachung für die Mustererstellung

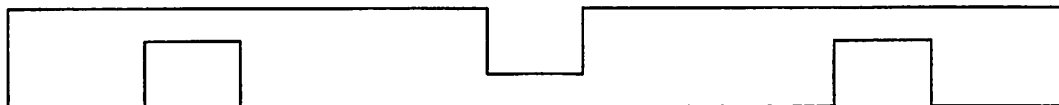
1.2.1. Vom Ätzwinkel unabhängige Stege

Funktion der schiefen Stege:

Der dünne schiefe Steg koppelt den unstrukturierten Membranteil "außermittig" an den Rand an (siehe Seitenansicht). Dadurch ergibt sich schon bei einer geringen Druckbelastung auf die Membran durch einen "Kniehebeleffekt" (die Membranmitte wird dabei geometrisch durch einen sehr flachen Winkel an den Rand angekoppelt) eine große mechanische Spannung an den Membranrändern.

Diese wiederum bewirkt die gewünschte Resonanzfrequenzverschiebung.

Eine von den Ätzstoppebenen unabhängigerere Struktur mit ähnlichem "Kniehebeleffekt" zeigt das folgende Bild.



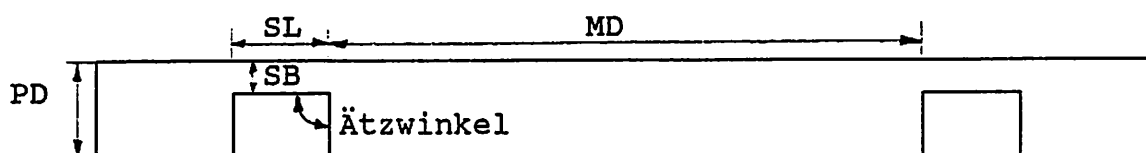
Die Ätzgraben sind hier mit senkrechten Wänden gezeichnet, könnten aber auch beliebig anderst geformt sein. Wichtig ist nur wieder die "außermittige" Ankopplung der Membran mittels dünner Stege an den Rand. Um den Aufwand der doppelseitigen Strukturierung zu umgehen, kann zur weiteren Vereinfachung die Strukturierung der Membranmitte weggelassen werden.

1.2.2. Optimierung durch FEM Simulation

Zur Dimensionierung der Ätzstruktur wurden 2dim. FEM-Modelle erstellt, deren Konturen einem rotationssymmetrischen Körper entsprachen. Dieses Vorgehen verringert Rechenzeit und Modellierungsaufwand. Die Simulationsergebnisse zeigten, daß mit jeder der oben genannten Vereinfachungsstufen eine Verringerung der Empfindlichkeit einhergeht. Durch die Variation der verschiedenen geometrischen Formen und Abmessungen wurde eine Struktur ermittelt (bezogen auf einen rotationssymmetrischen Schnitt), die gekennzeichnet ist durch

- zwei einseitige Ätzgraben mit nahezu beliebigen Ätzwinkeln:

Steglänge (SL)	= 200 μm
Stegbreite (SB)	= 40 μm
Membrandurchmesser (MD)	= 6000 μm
Plattendicke (PD)	= 125 μm



- für die Auswertung genügende große relative Frequenzschiefe $\Delta f / f$ bei max. zulässiger Bruchspannung (siehe 2. Statusbericht MotoMeter)

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{730 \text{ Hz}}{21832 \text{ Hz}} = 0,033$$

In der Plattenebene können die Ätzgraben in 2 parallelen Reihen, als Rechteck oder als Quadrat ausgeführt werden. Die 3dim. FEM-Simulationen ergaben, daß eine volle Umrandung der Membran durch einen quadratförmigen Graben die höchste Druckempfindlichkeit besitzt. Verwendet man eine kreisförmige Grabenstruktur, so vermeidet man die Spannungsspitzen in den Ecken.

1.3. Anregung einer Biegeschwingung in der Quarzmembran

1.3.1. X-Schnitt:

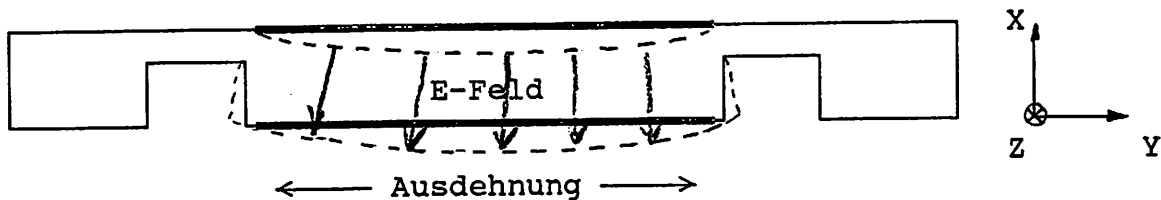
Ein senkrechtes E-Feld in X-Richtung durch die Membran bewirkt aufgrund des piezoelektrischen Effekts eine Dehnung in der Membranebene in Y-Richtung. Da diese Membran nun außermittig am Rand festgehalten ist, dehnt sich der obere Teil der Membran nicht so stark aus wie der untere. Daraus entsteht eine Membrandurchbiegung nach unten.

Vorteil:

Ganzflächige einfache Elektroden

Nachteile:

geringe Ätzrate; Sonderschnitt; teuer

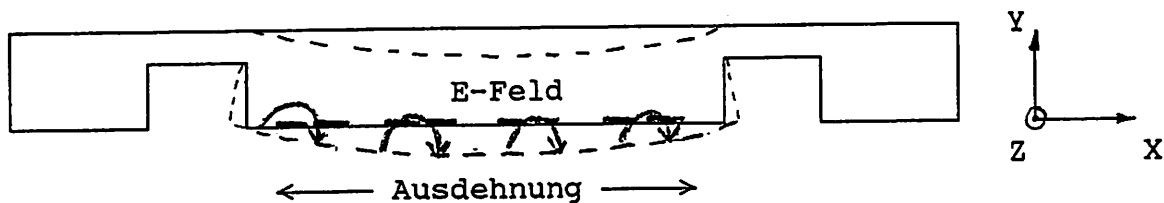


1.3.2. Y-Schnitt:

Ein Elektrodenstreifenmuster erzeugt in der unteren Hälfte der Membranebene ein E-Feld in X-Richtung. Dieses E-Feld bewirkt durch den piezoelektr. Effekt (in dieser unteren Membranebenenhälfte) eine Ausdehnung in gleicher Richtung. Aus dieser einseitigen Ausdehnung und der außermittigen Einspannung des Randbereiches resultiert ebenfalls eine Membrandurchbiegung.

Nachteile:

geringe Ätzrate; Sonderschnitt; teuer; aufwendiges Elektrodenmuster; geringer Wirkungsgrad des Piezoeffekts



Das dazugehörige Elektrodenmuster für eine quadratische Membran ist in Abb.1 dargestellt.

1.3.3. Z-Schnitt:

Berücksichtigt man die volle Steifigkeitsmatrix des Quarz, so stellt man fest, daß eine durch den piezoelektrischen Effekt erzeugte Dehnung in der X-Richtung durch eine gleichzeitig erzeugte Stauchung in der Y Richtung kompensiert wird. Deshalb ist der Z-Schnitt bei einer Membran-Biegeanregung durch den piezoelektrischen Effekt nicht geeignet.

1.3.4. AT-Schnitt:

Ein AT-Quarzschnitt wird gewöhnlich als Scherschwinger eingesetzt [Abb.2.a]. Dabei befindet sich auf jeder Plattenseite nur eine Elektrode. Legt man auf jeder Plattenseite jedoch 2 aneinander grenzende Elektroden an, so ergeben sich durch den piezoelektrischen Effekt zwei gegenläufige Scherbewegungen die zu einer Durchbiegung der Platte führen [Abb.2.b]. Die Verformung einer Platte im Grundbiegemodus besitzt 2 Wendepunkte [Abb.2.c]. Um diese Verformung in einem AT-Schnitt anzuregen, benötigt man die in Abb.2.d dargestellte Elektrodenkonfiguration.

Vorteile:

- gängiger Quarzschnitt, in quadratischen 1.5" Blanks erhältlich.
- AT-Schnitt hat zweitgrößte Ätzrate
- einfache Elektrodenform (mit Laser realisierbar)
- keine doppelseitige Photolithographie notwendig
- günstiges Temperaturverhalten

2. Biegeschwinger aus AT-Schnitt

2.1. Quarzstruktur

Um die Elektroden zwischen den Ätzgräben ansteuern zu können, ist es zweckmäßig, wenn der umlaufende Ätzring eine Unterbrechung (Übergang) hat. Eine Drahtbefestigung auf der Membran würde die Schwingung vermutlich zu sehr dämpfen. Eine Bondverbindung wäre denkbar, steht MotoMeter z.Zt. jedoch nicht zur Verfügung. Für die ersten Muster wurden 2 verschiedene Übergänge realisiert [Abb.3].

Form (a.) hat einen genau kreisrunden Ätzgraben mit 2 rechtwinkligen Knickstellen an denen jedoch Spannungsspitzen auftreten. Deshalb wurden bei der Form (b.) diese Ecken abgerundet. Die so entstandene Ellipse könnte sich jedoch nachteilig auf die Empfindlichkeit bzw. Frequenzänderung bei Druckbelastung auswirken.

2.2. Elektrodenkonfiguration

Die mit einem YAG-Laser erzeugte Lasernaht (c.) teilt die obere und untere Goldschicht des Quarzblanks gleichzeitig in die zur Anregung erforderliche Elektrodenkonfiguration (siehe 1.3.4). Durch die zusätzlichen Lasernähte (d.) wird die störende Kondensatorfläche außerhalb der Membran abgetrennt. Die Anschlußpads sind über die Übergänge mit den Anregeelektroden auf der Membran verbunden.

2.3. Anordnung im 6er Nutzen

Abb.4 zeigt die Ätzmaske für den gesamten Quarzblank. Sobald die endgültige Verbindungstechnik und die Form der Anschlußelektroden festgelegt ist, könnte auch eine höhere Ausnutzung erfolgen.

3. Herstellung des Sensorelementes

3.1. Maskenerstellung

- Layout mit CAD erstellt.
- Ausplotten mit Elektrostatik-Plotter direkt auf DIN A1
- 1:1 Photoabzug auf hartem Filmmaterial um die geringe Schwärzung des Elektrostatik-Plotters auszugleichen
- 1:10 Verkleinerung auf High-Resolution-Plate

3.2. Belackung [Abb.5]

3.2.1. Mit Standard-Chuck

Durch die Zentriefugalkraft wird der Photoresist auf dem Blank nach außen geschleudert. Dabei kommt es zu einer Ansammlung des Resists am gesamten Blankrand. Diese Aufwerfung ist nur durch eine höhere Drehzahl (4000 1/min) verringerbar. Ein Teil des über den Rand hinausgeschleuderte Resist wird von den rotierenden Ecken des quadratischen Blanks eingeholt und lagert sich auf deren Ober- und Unterseite ab. Diese Ablagerungen bereiten Probleme

- beim Softbake auf dem Heiz-Chuck (ungleichmäßige Erwärmung)
- bei der Rückseitenbelackung (Positionierung)
- im Maskaligner (Bruchgefahr)
- beim Entwickeln durch ungleichmäßige Resist-Schichtdicke

3.2.2. mit Silizium-Chuck

Ein vom HSI entwickelter Silizium-Chuck brachte eine deutliche Verbesserung in Bezug auf die ungleichmäßige Resist-Schichtdicke, zeigte jedoch noch Schwächen durch das Unterkriechen von Resist zwischen Quarz und Si. Dies behindert die Trennung des Quarzblanks vom Silizium.

Es wurden mehrere Verbesserungsvorschläge diskutiert, die diese Mängel beheben sollen. Ob der solchermaßen modifizierte Silizium-Chuck eine Verbesserung bei der Quarzblankbelackung bringt, werden die Ergebnisse der weiteren Versuche zeigen.

3.2.3. mit Zusatzabdeckung

Mit den vorhandenen Abdeckhauben zum frühzeitigen Abfangen des fortgeschleuderten Resists konnten nach Niveauanpassungen zwischen Haube und Quarz brauchbare, jedoch keineswegs optimale Belackungen hergestellt werden.

3.3. Belichtung (Bruchgefahr)

Um die Maskenstruktur genau auf den Quarz abzubilden, müssen beide Teile möglichst dicht aneinandergebracht werden. Sind die Aufwerfungen des Resists zu hoch oder Ungleichmäßig, so kommt es dabei sehr leicht zum Bruch des Quarzblanks!

Laserparameter: Q-Switch-Frequenz = 8 kHz
Stromstärke = 13 A
Geschwindigkeit = 1 bis 20 m/sec

Probleme:

- Erhitzung (und Beschädigung?) des Quarz beim Goldverdampfen
- Geeignete Unterlage finden (wegen Verkratzen beim Auflegen des nächsten Quarzblanks durch das in die Unterlage eingebrannte Gold) z.B. Keramik, Glas, Plexiglas mit Löcher für Vakuuman-saugung. Abhilfe schafft eine Ultraschallreinigung nach jedem Strukturierungsvorgang.
- Kontaktbrückenbildung durch verdampftes Gold
- An obenliegenden schrägen Ätzkanten wird der von oben kommen-den Laserstrahl abgelenkt und durchtrennt somit die untere Goldschicht NICHT. ---> Kontaktbrücken!
- Das Geschwindigkeitsverhältnis zwischen X und Y-Achse des Lasers kann nur bestimmte ganzzahlige Werte annehmen. Die Koordination zwischen Geschwindigkeit und Verfahrsposition kann nur durch Eingriff in die Elektronik einigermaßen angepaßt werden. Deshalb ist der erzeugte Halbkreis z.B. noch etwas eckig.
- Bei Geschwind. > 5 mm/s tritt am Ende jeder gezogenen Geraden durch das Abbremsen des Positionierschlittens ein Zittern in der Lasernaht auf.

4. Aufbau des Musters [Abb.8]

4.1. Befestigung des Sensorelements

Damit nur die Membran schwingt, muß der Quarz am Rand des einge-ätzten ringförmigen Steges befestigt werden.

Dazu drucken wir mittels Siebdrucktechnik einen optischen UV-Kleber auf eine Glasplatte auf. Eine Beimischung von 18 μm dicken Glasfaserstücken stellt dabei einen definierten Abstand zwischen Glasplatte und Quarzsensorelement sicher.

Das Layout der Klebestellen wurde so entwickelt, das ein nahezu geschlossener Ring um den Ätzgraben herum gelegt ist, der einen schmalen Kanal zum Druckausgleich nach außen besitzt. Wenn in späteren Versionen der Druck direkt an die Membran angelegt wird, kann dieser Kanal entfallen.

4.2. Signalabgriff [Abb.9]

Dem oben vorgestellten Anregeprinzip zufolge müssen je 2 Signal-leitungen an die Ober- und Unterseite des Quarzblanks ange-schlossen werden.

Deshalb wurde als Grundträger eine Glasplatte gewählt, die mit einer leitfähigen ITO (Indium Tin Oxid) Schicht belegt ist. Mittels Photolithographie werden darauf die Leiterbahnen struk-turiert.

Vor dem Zusammenfügen von Glasplatte und Quarzelement wird nun auf die Goldkontakte des Quarzelementes ein Leitkleber und auf die Leiterbahnseite der Glasplatte das Siebdruck-Klebemuster aufgebracht. Die elektrische Verbindung muß deshalb gleichzeitig mit der mechanischen Verbindung erfolgen, da die unteren Gold-Elektroden nach dem Verbinden nicht mehr zugänglich sind.

5. Ausblick

Zunächst wollen wir in der Membran die Biegeschwingungen anregen als Nachweis für die Funktion des Konzeptes. Danach werden folgende Aufgaben in gemischter Reihenfolge in Angriff genommen.

5.1. Optimierung der Membranstruktur

- Stegbreite
- Stressarmer Übergang vom Rand zum unstrukturierten Membranteil
- günstige Laserschnittstruktur

5.2. Optimierung der verschiedenen Herstellungsprozesse

Verschiedene Quarzätzlösungen und Temperaturen testen, um eine optimal glatt geätzte Oberfläche zu erhalten. Man erwartet dadurch eine Verbesserung der Schwingungsgüte und eine Verringerung von Kerbwirkungen.

5.3. Aufbau und Verbindungstechnik

- Lotpaste; Leitpaste; Kleber
- Durchkontaktierung durch Quarz
- Bonden

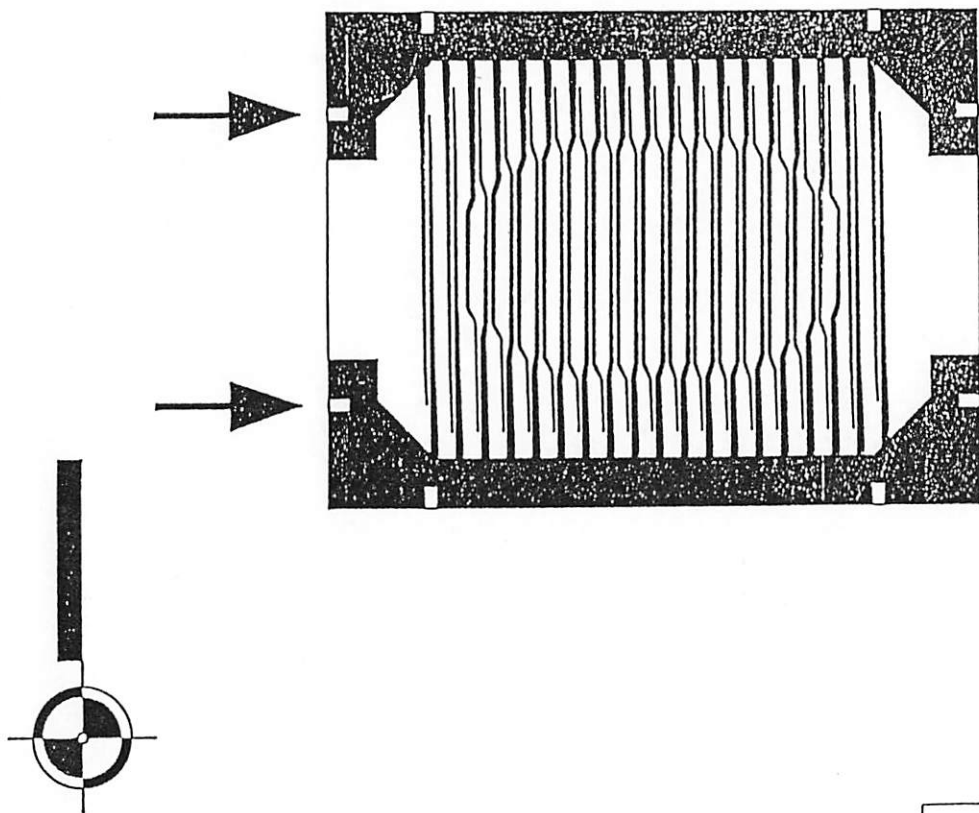
5.4. Anregeschaltung und Auszählelektronik

Abbildungs-Übersicht

- 1 Elektrodenmuster für Y-Schnitt
- 2 Biegeschwingungsanregung im AT-Schnitt
- 3 Strukturiertes Quarz-Sensorelement mit Lasernaht
- 4 Ätzmaske für 6er Nutzen auf 1,5" Blank
- 5 Lackschleuderbelackung
- 6 Kreisring Teststruktur
- 7 Ätzwinkel und Unterätzungen beim AT-Schnitt
- 8 Aufbau des Musters
- 9 Kleberahmen und ITO-Leiterbahnstruktur

Unser Dank gilt dem HSI Stuttgart, in dessen Laborräumen die chemischen Arbeiten von uns durchgeführt wurden und besonders Herrn Dipl.-Ing.J.Wagner für die großzügige Bereitstellung seiner Unterlagen zur Quarztechnologie.

[Abb. 1]

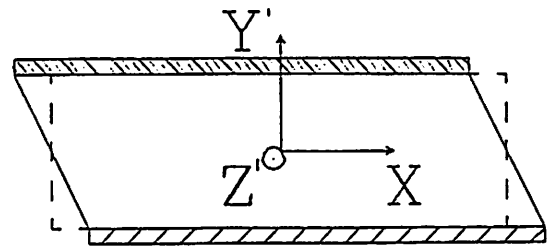


PLOT-Hinweise:
 Stift #3 = 0,18 mm
 Stift #1 = 0,35 mm
 Stift #2 = 0,5 mm

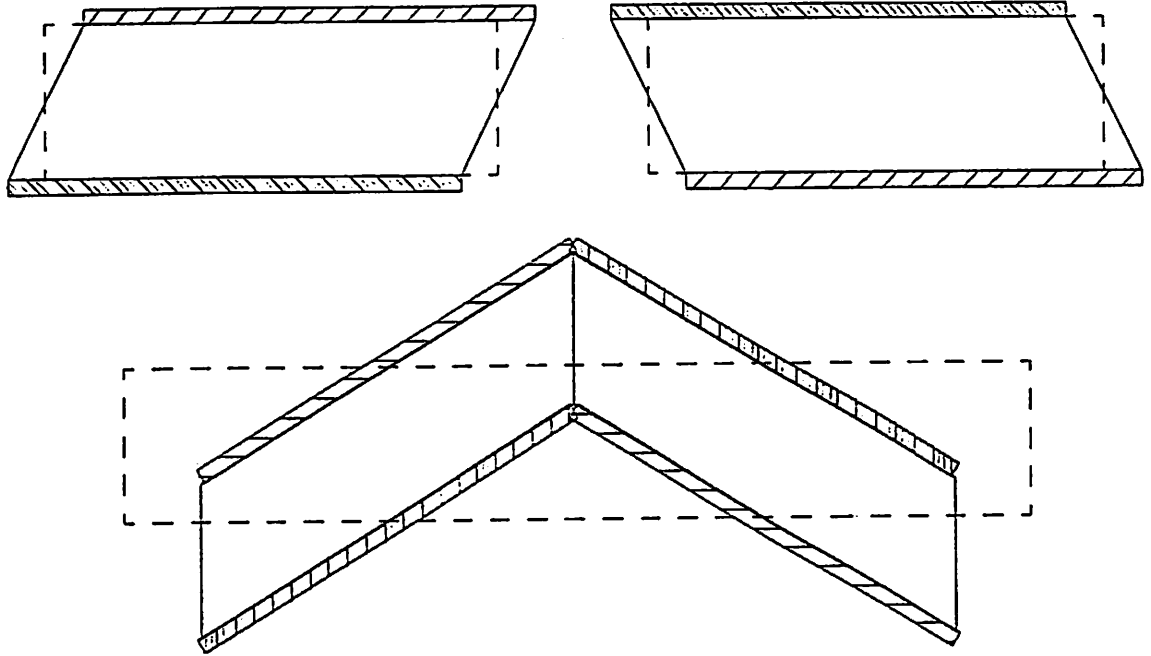
				Allgemeintitel		Maßstab Maßstab		M 10:1	
					Datum	Name		Frequenzanaloger Drucksensor FAS1 Kontaktierung freie Seite *** ENTWURF ***	
				Bearb.	16.04.91	Herzog			
				Gepr.					
				Norm					
						MotoMeter TVV2 Hartig / Herzog		\\MOTO\FAS1E.DWG	
0	Entwurf 2	17.04.91	He					Blatt	
Zust.	Änderung	Datum	Name					Bl.	

Biegeschwingungsanregung im AT - Schnitt

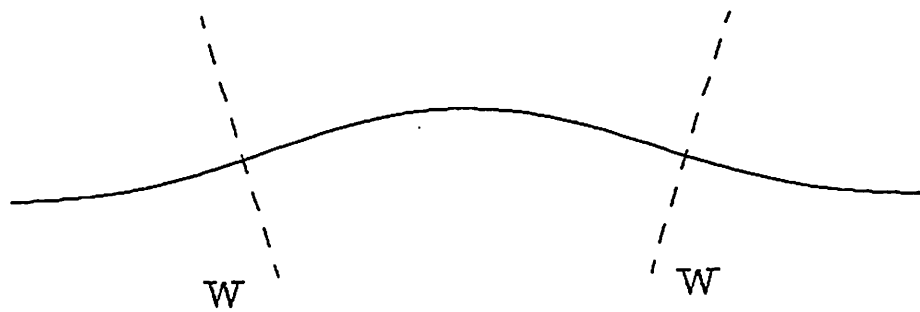
a.



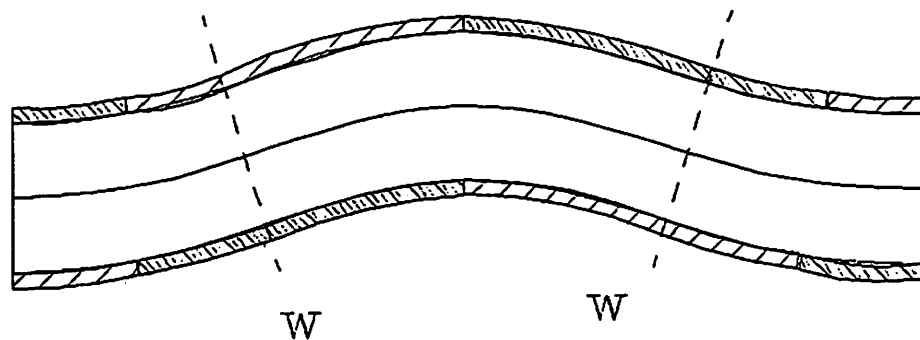
b.



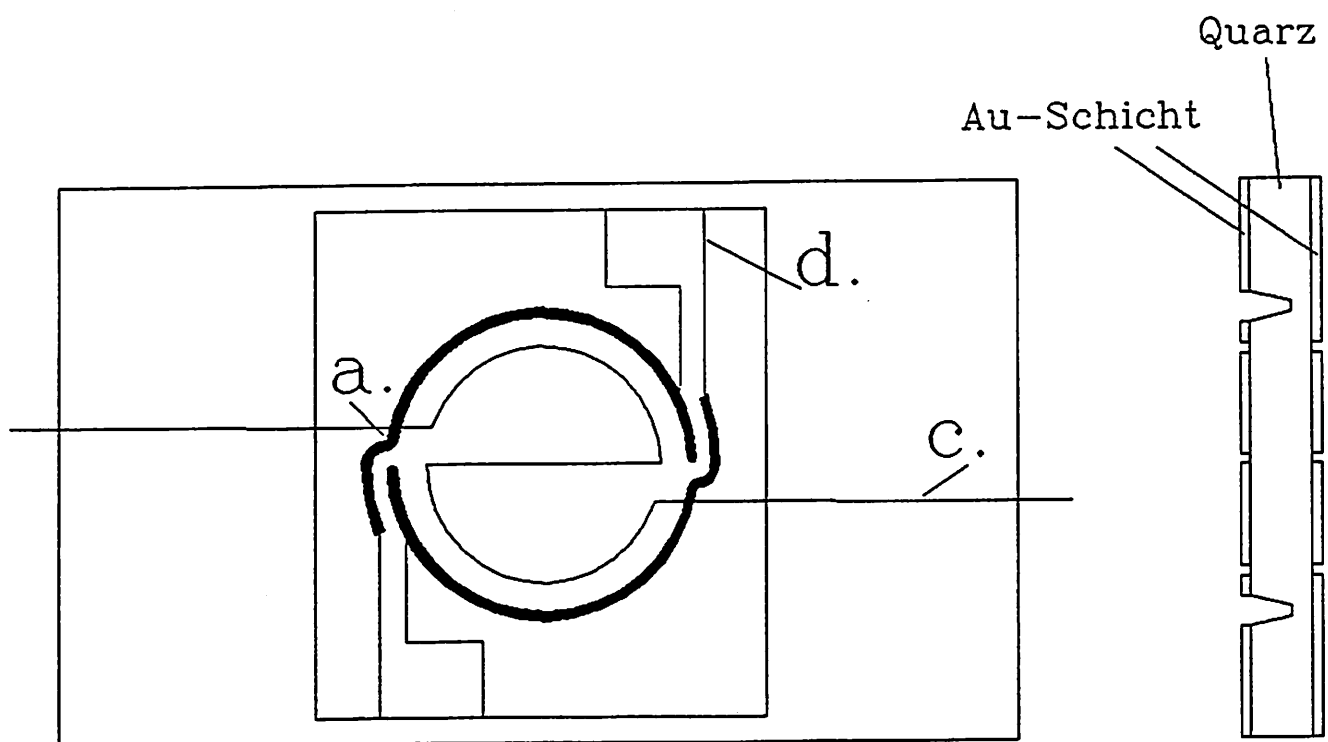
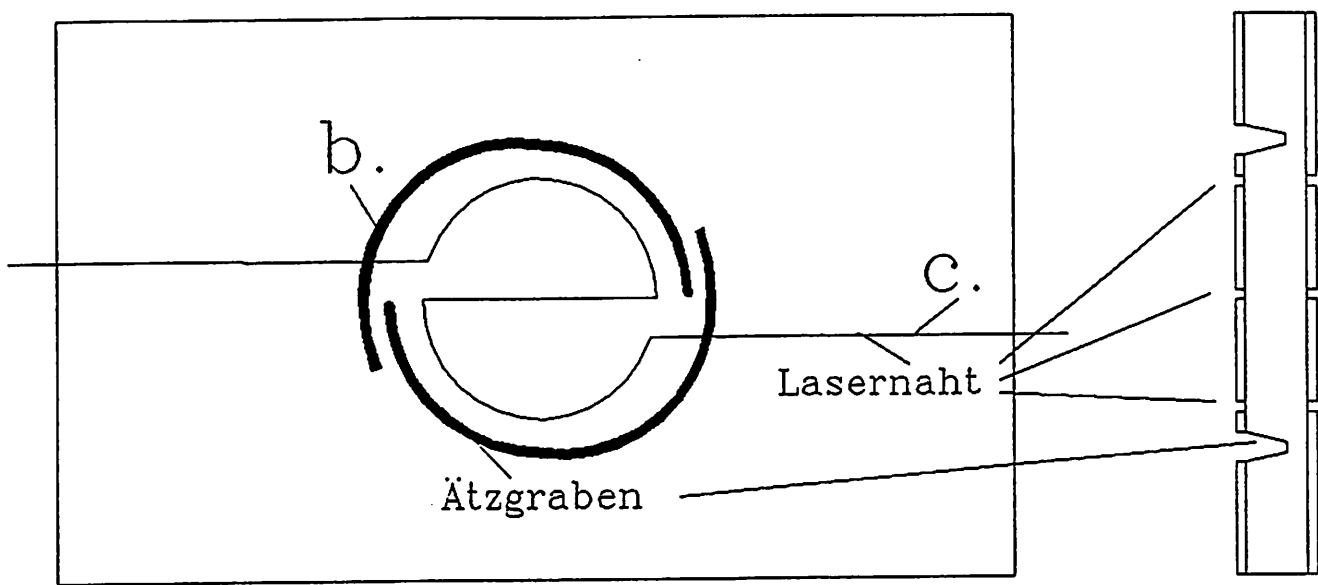
c.



d.

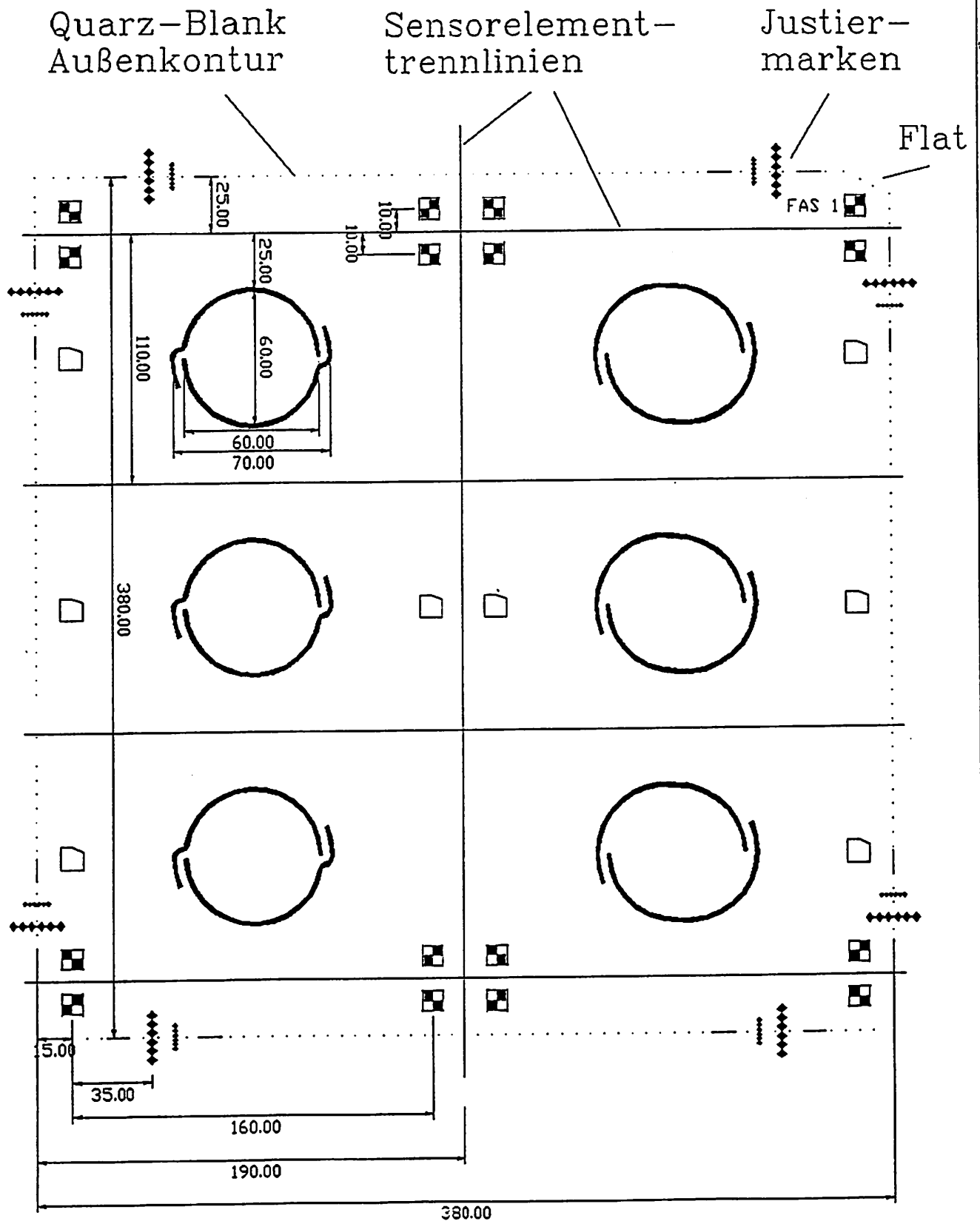


Quarz – Sensorelement



[Abb. 3]

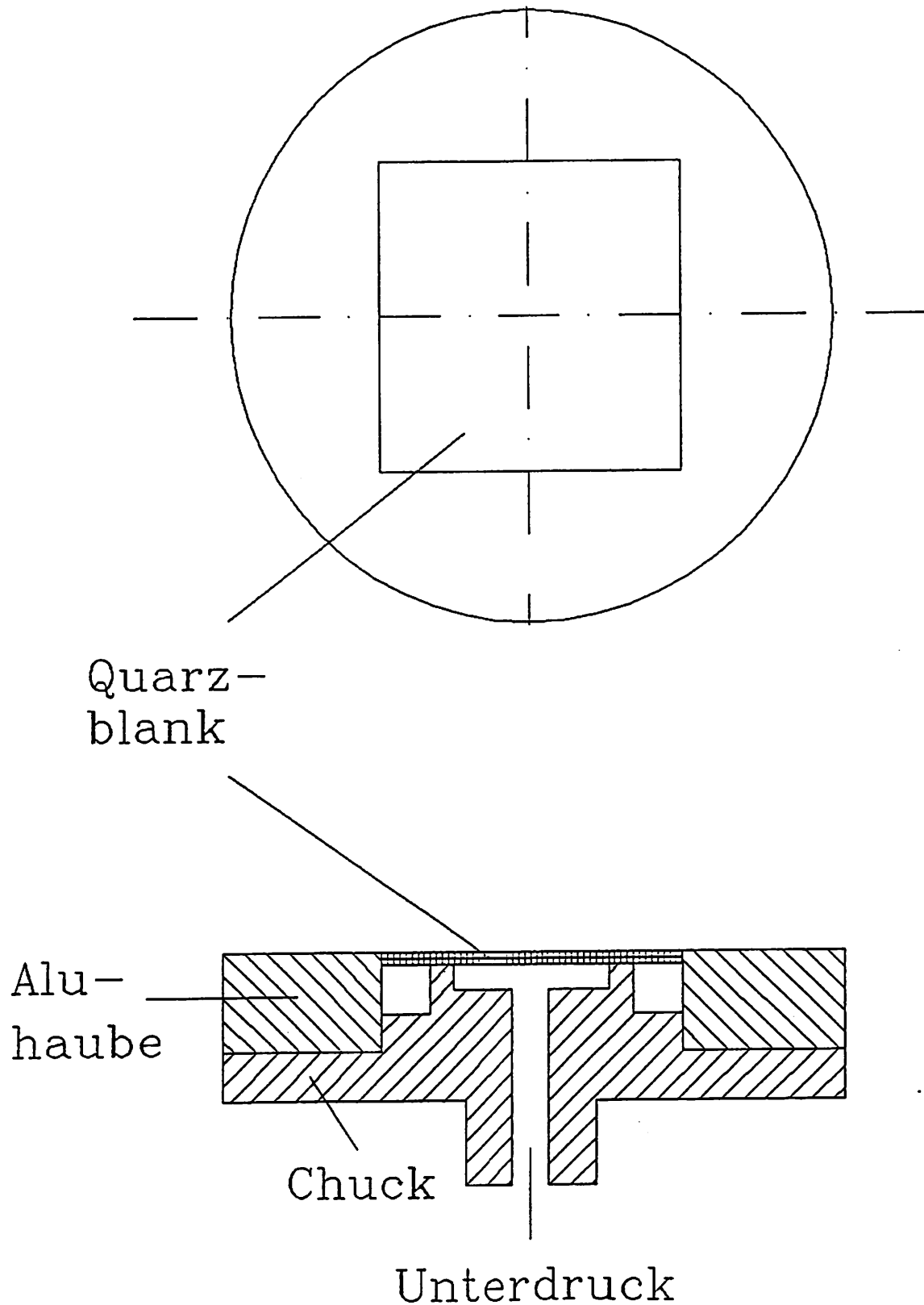
Ätzmaske für 1,5" Quarz-Blank



[Abb. 4]

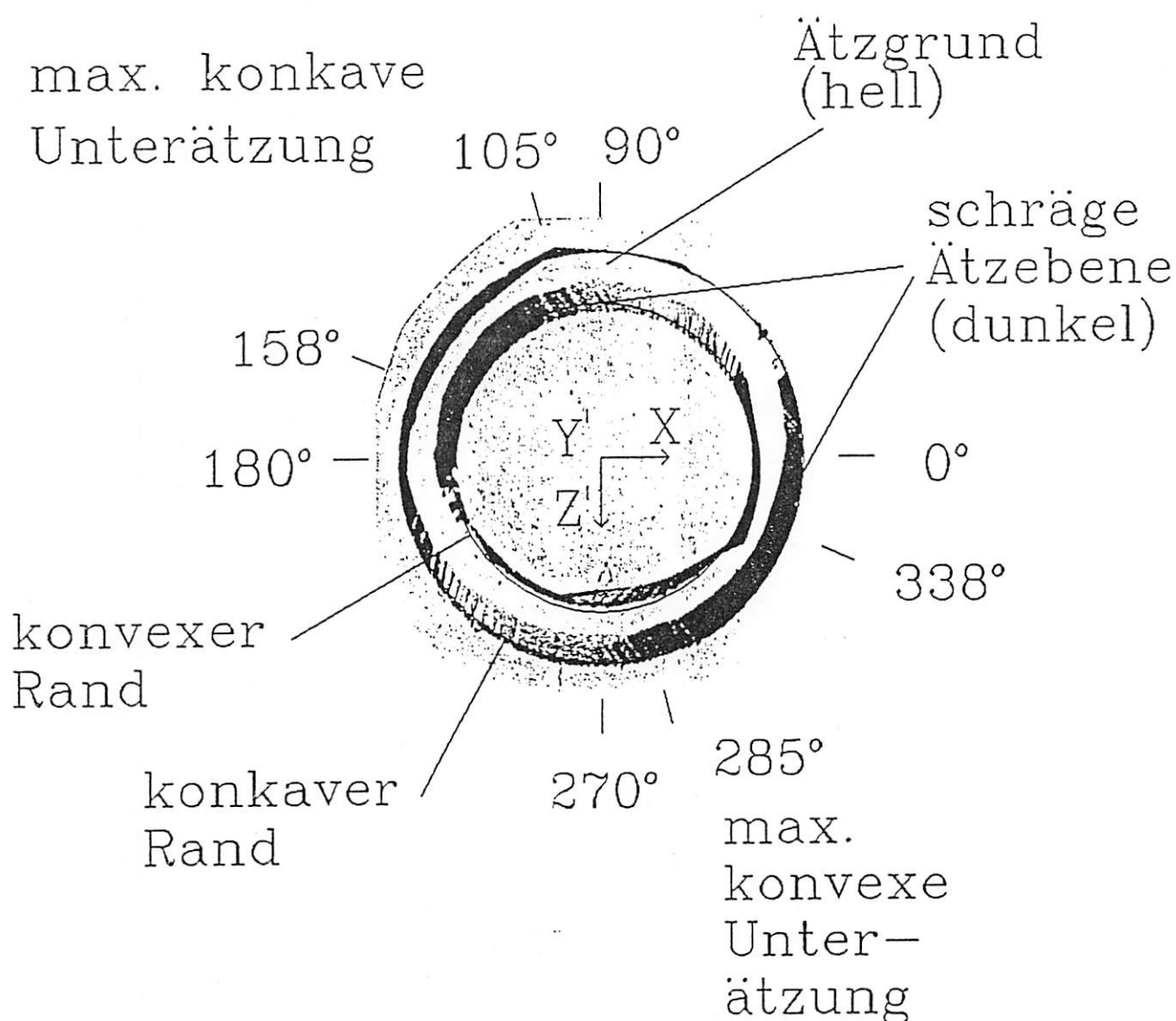
Belackung

auf Lackschleuder mit $n = 4000 \text{ 1/min}$



[Abb. 5]

Kreisring Teststruktur



Kreisringbreite: 200 μm

AT-Quarzschnitt

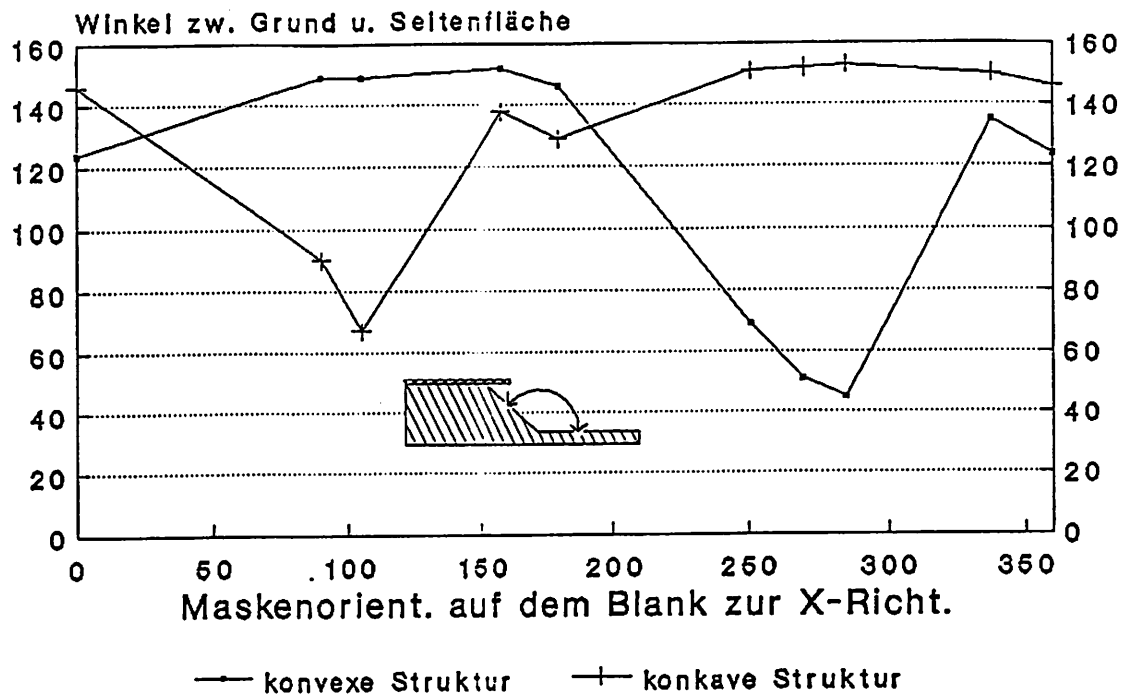
Ätzlösung: 48%HF:40%NH₄F (3:2)

Ätztemperatur: 80°

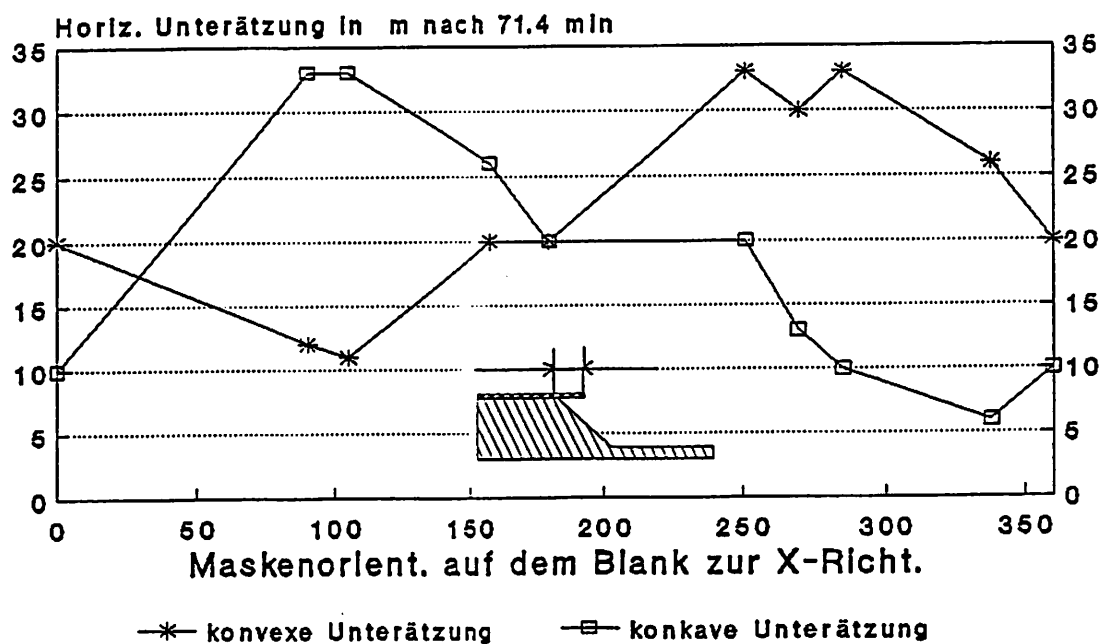
Ätzzeit: 79 min

Äztiefe: 95 μm

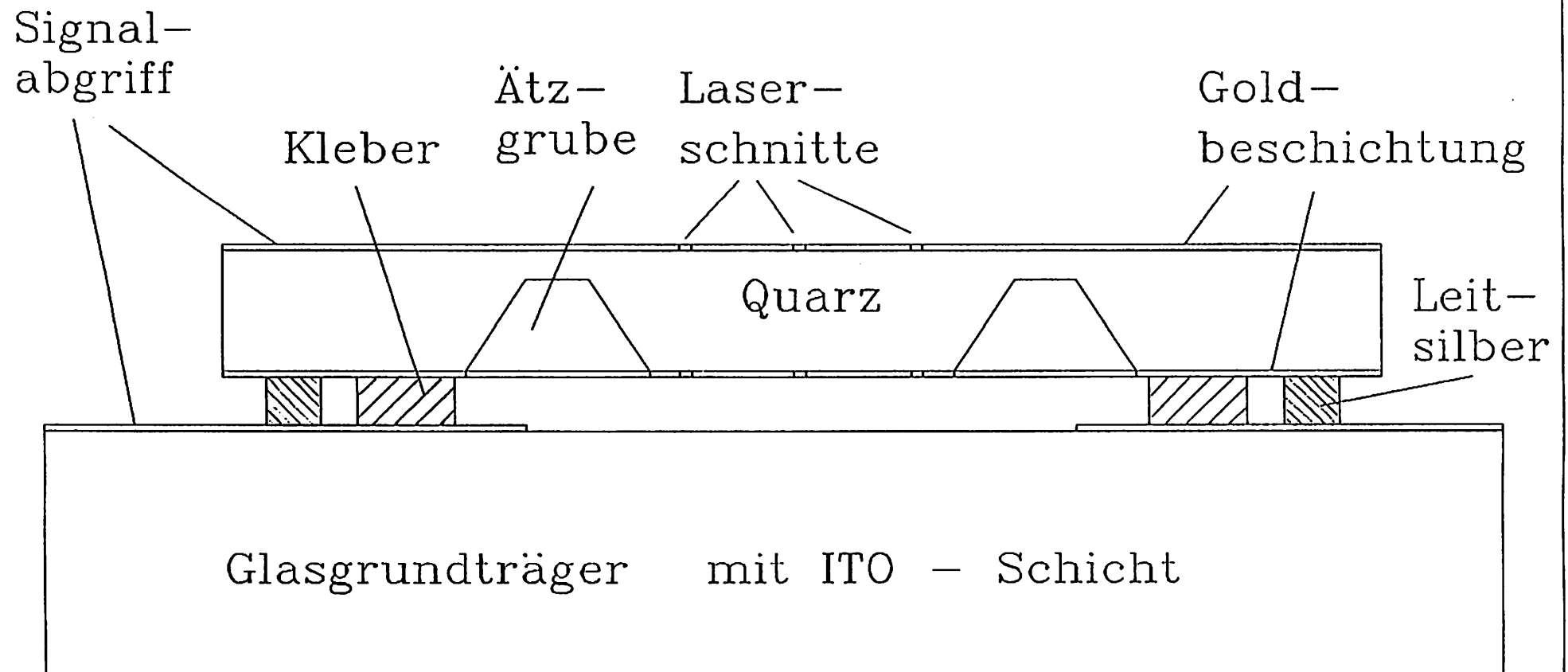
Ätzwinkel im AT-Schnitt



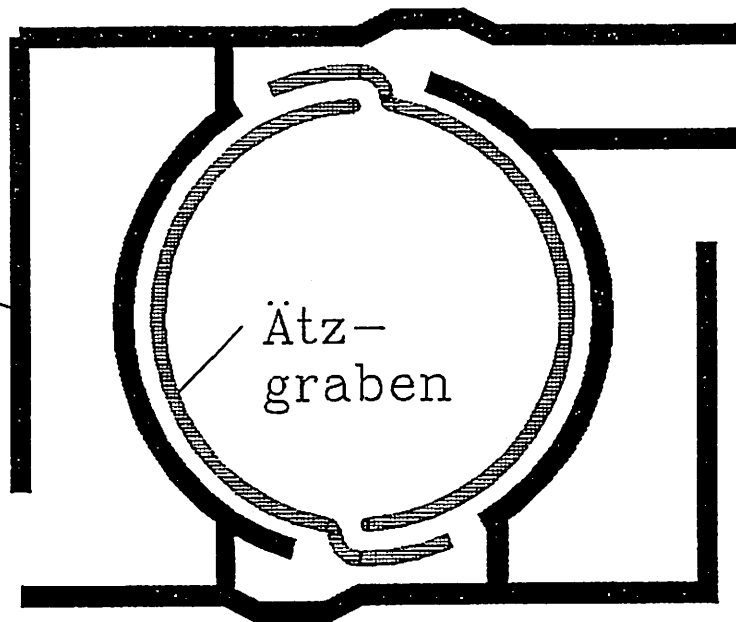
Horiz. Unterätzung im AT-Schnitt



Aufbau des Musters

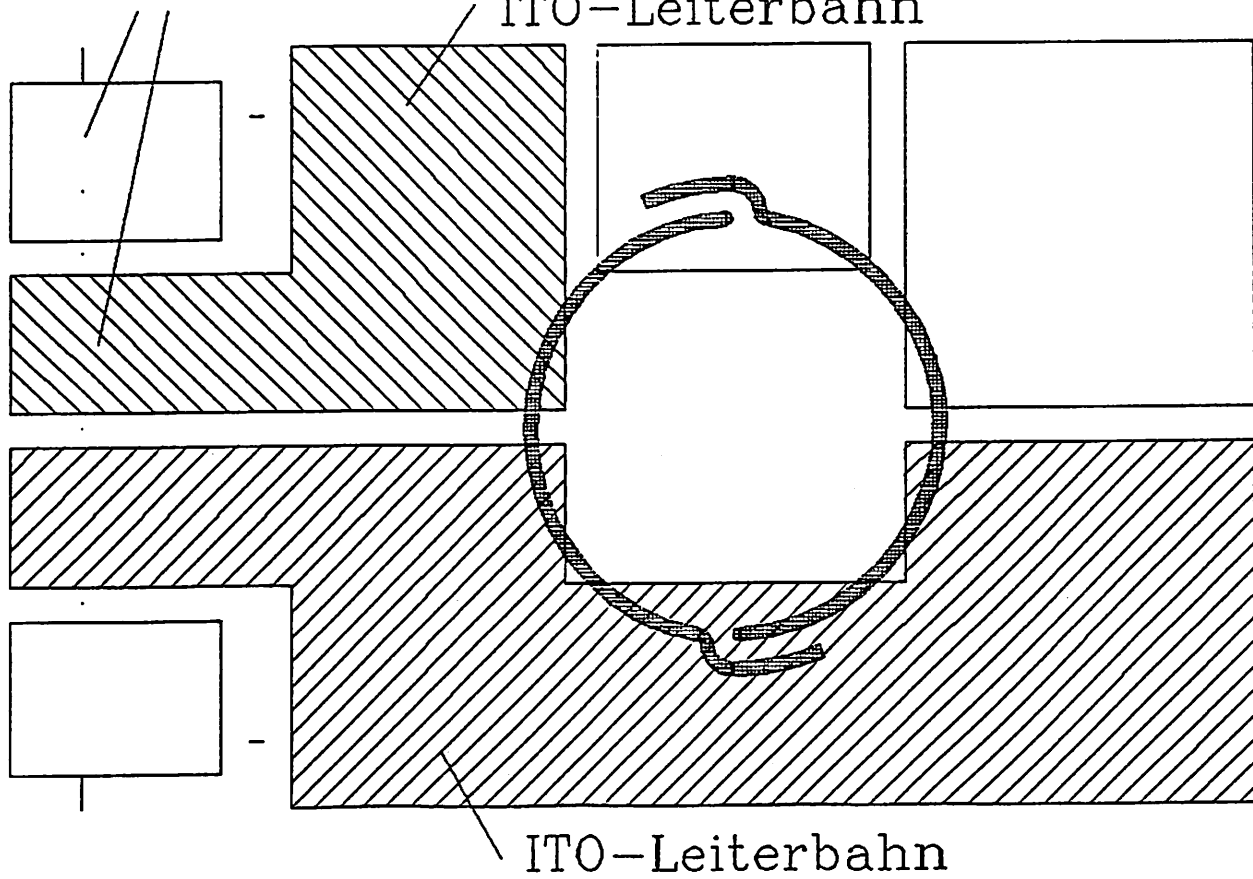


Klebe-
rahmen



Anschluß-
pads

ITO-Leiterbahn



[Abb. 9]