

2.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: 1.1.-30.6.1990

**Robert Bosch GmbH
Postfach 106050
7000 Stuttgart 10**

Projektleiter: Dr.J. Schweikhardt

Inhalt:

Zusammenfassung:

- Stand der Arbeiten
- Geplanter Fortgang der Arbeiten

Einzeldarstellung:

1. Bearbeitung von Silicium mit Nd/YAG-Laser
 - 1.1 Größe von Laserlöchern
 - 1.2 Treffgenauigkeit
 - 1.3 Justierung des Lasers auf senkrechten Einfall
 - 1.3.1 Meßverfahren
 - 1.3.2 Erreichte Genauigkeit
2. Photothermische Anregung einer resonanten Struktur
 - 2.1 Laboraufbau
 - 2.2 Erste Ergebnisse
3. Verfahren zur Ätzung verschieden tiefer Strukturen
 - 3.1 Prinzip der Entkopplung von Ätzzeit und Äztiefe
 - 3.2 Vorversuche an früher geätzten V-Gräben
 - 3.3 Vorteile und Voraussetzungen des Verfahrens
4. Sensorstrukturen
 - 4.1 Maskenlayout
 - 4.2 Erste Ergebnisse
5. Herstellung freitragender Strukturen aus Siliciumnitrid
6. Auslegung von Sensorstrukturen
 - 6.1 Grundschwingung von Biegebalken
 - 6.2 Zugempfindlichkeit von Biegebalken

Zusammenfassung:

Stand der Arbeiten:

- Die Laserbearbeitung mit dem Nd/YAG-Laser wurde weiterverfolgt. Die Treffsicherheit von Strukturen ist für eine doppelseitige Belichtung mit Standardanforderungen ausreichend. Allerdings schränkt die Abweichung des Laserstrahles aus der Senkrechten die Anwendung stark ein.
- Ein Meßplatz zur Bestimmung der Eigenfrequenz von resonanten Sensoren mit Anregung durch ein 3 mW-Laserdiode wurde aufgebaut. Erste Ergebnisse zeigen die prinzipielle Funktionsfähigkeit.
- Ein Verfahren zum Herstellen verschieden tiefer Strukturen mit nur einer Maske wurde erarbeitet. Erste Ergebnisse, bei denen einzelne Technologieschritte noch nicht darauf abgestimmt waren, zeigen, daß dieses Ziel unter bestimmten Voraussetzungen erreicht werden kann.
- Durch Unterätzen von Maskenstrukturen können sehr feine freitragende Strukturen aus Siliciumnitrid gewonnen werden, die z. B. nur 5 µm breit, 0,14 µm dick und 6 mm lang sind und die auch nach einer Ätzzeit von 5 Stunden noch nicht gerissen sind.

- Mit einem Layout, das auf obiges Verfahren ausgerichtet war, wurden einerseits Grundsatzversuche durchgeführt, andererseits auch erste Sensorstrukturen hergestellt. Die nicht dünner geätzten eingespannten Biegebalken haben jedoch eine für Meßzwecke zu hohe Eigenfrequenz.

Geplanter Fortgang der Arbeiten:

- Laserbearbeitung
 - oo Schneiden von schwingfähigen Zungen
 - oo Doppelseitige Belichtung mit Markierungslöchern
- Photothermische Anregung und Resonanzmessungen
 - oo Membrane, Zungen, Balken
 - oo Veränderung des Aufbaus zur Reduzierung der Wechselwirkung zwischen Laserdiode und Meßgerät
- Zweiseitiges Ätzen mit Maske
- Herstellen von Sensorstrukturen mit Eigenfrequenzen im kHz-Bereich
- Sensorstrukturen zur Beschichtung mit Zinkoxid
- Doppelseitig geätzte Stimmgabel
- Membranätzen mit Epischicht und Ätzstopp
- Trockenätztechnik: Einsatz des reaktiven Ionenätzens

Einzeldarstellung:

1. Bearbeitung von Silicium mit Nd/YAG-Laser

1.1 Größe von Laserlöchern

Ziel der Laserbearbeitung ist einerseits, Durchgangslöcher mit hoher Präzision zu bohren, um eine Photomaske für die Vorderseite zu einer für die Rückseite zu justieren. Andrerseits können mit dem Laser auch direkt Strukturen wie Zungen und dünne Biegebalken herausgeschnitten werden.

Voraussetzung für die Versuche war, das vorhandene Laser-Steuerprogramm für Widerstandsabgleich so zu modifizieren, daß eine freie Programmierung möglich wurde. Damit konnten dann Laserimpulse einzeln oder genau abgezählt an vorgegebenen Koordinaten auf die Probe gegeben werden. Die Impulsdauer konnte zwischen $1 \mu\text{s}$ und $10 \mu\text{s}$ die Wege und Fahrgeschwindigkeiten frei gewählt werden. Einzig die Energie der Impulse kann nur von Hand an einem Drehpotentiometer der Stromversorgung über die mittlere Leistung des Lasers beeinflußt werden.

Zur genauen Justierung wird angestrebt, die Durchgangslöcher so klein und reproduzierbar wie möglich zu machen. Der Lochdurchmesser ist deshalb eine wesentliche Größe. Abb. 1 und Abb. 2 zeigen die Abhängigkeit der Lochdurchmesser von der Energie auf Vorder- und Rückseite von $525 \mu\text{m}$ dicken 4"-Siliciumwafern, wobei jeweils 100 Impulse verwendet wurden.

Der Einfluß der Impulsdauer spielt nach Abb. 3 nur eine sehr untergeordnete Rolle, da der Laserimpuls keine Sinusform hat, sondern am Anfang eine hohe Spitze mit nachfolgendem langsamem Abfall besitzt, dessen Dauer im Wesentlichen die Gesamtimpulsdauer bestimmt.

Abb. 4 zeigt, daß bereits mit dem ersten Impuls die Größe des Eintrittsloches vorgegeben wird, und alle folgenden Pulse stets genau in dieses vorhandene Loch hineinwirken und tiefer bohren. Die Schwankung der Meßwerte ist statistischer Natur, da verschiedene Löcher vermessen wurden, die unabhängig voneinander entstanden.

Beim Erzeugen eines Loches durch nichtreaktives, rein thermisches Aufschmelzen und Verdampfen entstehen rund um das gebohrte Loch Aufwürfe, die bei den weiteren Prozeßschritten stören. Sie können, wie die Abb. 5 zeigt, zu einem Teil bereits in wässriger Lösung mit Ultraschall entfernt werden. Vollständig gereinigt kann mit Ätzlösungen werden, die möglichst isotrop die Lochform verrunden. Es kommen verschieden flußsäurehaltige Ätzlösungen in Frage. In der Abbildung ist eine Probe nach Reinigungsätzen mit einer Mischung aus HF und NH_4F dargestellt.

1.2 Treffgenauigkeit

Die Genauigkeit, mit der Löcher in einem vorgegebenen Muster gebohrt werden können, wurde an vorgeätzten Proben getestet, da dort die Strukturen auch bei schlechten Betrachtungsbedingungen am Laser klar zu erkennen waren. Abb. 6 zeigt Ergebnisse beim Zielen auf das Zentrum von Ätzpyramiden mit etwa $250 \mu\text{m}$ Kantenlänge und beim Zielen in eine $130 \mu\text{m}$ breite V-Ätznut. Zusätzlich sind die rückseitigen, kleinen Austrittsöffnungen mit einem Durchmesser von nur $30 \mu\text{m}$ dargestellt. Es zeigt sich, daß die

Treffgenauigkeit ausschließlich von der Betrachtungsoptik und der Einstellmöglichkeit der Probe auf einem x-y-Tisch am Laser abhängt. Die erreichten Abweichungen können nicht genau angegeben werden, liegen aber deutlich unter insgesamt 20 μm .

Ein besonderes Problem bei Einsatz zur doppelseitigen Belichtung von Laser-Markierungslöchern bildet dabei die Betrachtung von dünnen Photolackstrukturen auf polierten Siliciumproben mit den einfachen Optiken über die Videoeinrichtung am Laser.

1.3 Justierung des Lasers auf senkrechten Einfall

1.3.1 Meßverfahren

Um eine Markierung doppelseitig verwenden zu können, muß sie mit einer möglichst kleinen Winkelabweichung senkrecht zur Probenoberfläche angefertigt werden. Der Versatz der Laserlöcher vorne zu hinten wurde über zwei Methoden bestimmt:

a. Winkelmessung über Kantenabstand:

Es wurden Löcher in der Nähe von gut gesägten, senkrechten Kanten gebohrt und der Abstand der Ein- und Austrittslöcher von der Kante genau vermessen. Dabei wurden je 5 Löcher entlang von zueinander senkrechten Kanten verwendet und so die Winkelanteile und daraus der Gesamtwinkel bestimmt.

b. Winkelmessung über Probendrehung um 180°:

Auf einer Probe werden in einem für die Auswertung im Mikroskop geeigneten Abstand zwei Löcher gebohrt. Sie geben auf Vorder- und Rückseite eine bei schräg einfallendem Strahl parallel verschobene Bezugslinie vor. Nach dem Drehen der Probe um 180° werden in kleinem Abstand zu den bisherigen Löchern je ein weiteres Loch gebohrt. Aus der Messung ihrer Koordinatendifferenzen, orientiert an der Bezugslinie, im Vergleich von vorne zu hinten kann der Winkel berechnet werden, um den der Laserstrahl aus der Senkrechten abweicht.

1.3.2 Erreichte Genauigkeit

a. Justierung auf senkrechten Einfall:

Bei der besten bisher erreichten Justierung bleibt eine Winkelabweichung von der Senkrechten von 1,7°. Bei 4"-Wafern der Dicke 525 μm bedeutet dies eine Verschiebung des Markierloches auf der Waferrückseite um 15 μm . Damit ist also bei einer doppelseitigen Belichtung nur eine Genauigkeit von besser $\pm 15 \mu\text{m}$ erreichbar.

b. Lochgröße:

Bei Durchgangslöchern sind folgende Werte erreicht worden:
oo Kleinstes Durchmesser Eintrittsöffnungen: 45 μm
oo Kleinstes Durchmesser Austrittsöffnungen: 10 μm .

c. Reproduzierbarkeit

Bei dem vorhandenen Nd/YAG-Abgleichlaser stellt die Reproduzierbarkeit ein besonderes Problem dar. Die erreichte Justierung war nicht stabil. Dies bedeutet, daß die vorhandene Laserkonstellation nur begrenzt verwendbar ist, und die An-

wendungsmöglichkeiten eingeschränkt sind.

2. Photothermische Anregung einer resonanten Struktur

2.1 Laboraufbau

Zur photothermischen Anregung resonanter, mikromechanischer Strukturen wurde eine Einrichtung aufgebaut, die in der Prinzipskizze Abb. 7 dargestellt ist. Zur Schwingungsanregung der Probe dient das Licht einer Laserdiode, die über einen Frequenzgenerator moduliert werden kann. Die gegenwärtig verwendete Laserdiode hat eine Wellenlänge von 780 nm und eine maximale Ausgangsleistung von 3 mW. Die vorhandene Ansteuerung erlaubt einen Frequenzbereich von 50 Hz bis 70 kHz. Die photothermisch, d. h. über lokale Erwärmung und damit ungleichförmige Ausdehnung, erzeugte angeregte Schwingung der Probe wird über ein Laserfokus-Abstandsmeßgerät erfaßt.

Der Laserstylus RM600 von Firma Rodenstock kann Abstände durch Nachregeln seines Objektives auf Brennweitenabstand bis zu Frequenzen von 1 kHz absolut und sehr genau messen (Meßbereich bis $\pm 300 \mu\text{m}$). Für höhere Frequenzen wird der "Adjust Mode" eingesetzt, bei dem das Objektiv des Meßgerätes nicht mehr bewegt, sondern das Fokusfehlersignal über Photodioden direkt ausgewertet wird. Der auf $\pm 8 \mu\text{m}$ eingeschränkte Meßbereich ist dann bis 350 kHz verwendbar. Damit ist dieses Gerät für den in Frage kommenden Bereich gut geeignet, da ja einerseits nur kleine Auslenkungen erreichbar sind, und andererseits auch nur Auslenkungen deutlich kleiner als die Dicke des resonanten Elementes erwünscht sind, um die Linearität und eine verzerrungsfreie Schwingungsanregung zu gewährleisten. Die Auswertung muß über einen Spektralanalysator erfolgen, da im Ausgang des Laserstylus verschiedene Frequenzen auftreten und Störeinstrahlungen bei den Messungen an der unteren Erfassungsgrenze des Gerätes von den Meßsignalen unterschieden werden müssen.

2.2 Erste Ergebnisse

Es wurden erste, vorläufige Messungen an Membranen, Balken und freien Zungen durchgeführt, die Folgendes erbrachten:

- Resonante Strukturen können auf die beschriebene Weise angelegt und gemessen werden. Dies konnte an dünnen Zungen mit allerdings undefinierter Form gezeigt werden. Jedoch sind bisher keine Resonanzfrequenzen bestimmt worden. Es gelten noch starke Einschränkungen der Methode.
- Ein im Layout auch vorgesehener ungedünnter Balken benötigt eine zu hohe Anregungsenergie und besitzt eine Resonanzfrequenz von über 100 kHz, was mit der vorhandenen Ansteuerung nicht zu bewältigen ist.
- Die meisten der für die Versuche bisher zur Verfügung stehenden Membranen waren für die Anregung mit der schwachen Laserdiode zu dick.
- Die Absorption des anregenden Lichtes spielt eine wichtige Rolle: Bei einer Wellenlänge von 780 nm beträgt der Absorptionskoeffizient von Silicium nur $1,2 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$, d. h. bei einer Materialstärke von $10 \mu\text{m}$ werden nur 70 % des Lichtes absorbiert und 30 % gehen durch die Probe. Bei dem bisherigen

Meßaufbau strahlt dieses Licht direkt in das Meßgerät, das mit der gleichen Wellenlänge arbeitet. Die photothermische Methode im nahen Infrarotbereich hat deshalb einen engen Rahmen, denn bei kleinen Dicken ist die Absorption klein, bei großen Dicken dafür die notwendige Anregungsenergie groß.

In der weiteren Arbeit werden deshalb Anregung und Messung optisch getrennt und die Lichtabsorption über dünne, aufgesputterte Metallschichten, z. B. aus Aluminium, verbessert werden müssen. Dazu kommt der zu untersuchende Einfluß der Siliciumnitridschicht auf den Proben.

3. Verfahren zum Ätzen verschieden tiefer Strukturen

Um in einem Durchgang verschiedene tiefe Strukturen zu ätzen, wurde ein Verfahren entwickelt, das dies mit einer speziellen Ätzmaske über die gezielte Ausnutzung der Unterätzung erreichen kann.

3.1 Prinzip der Entkopplung von Ätzzeit und Ätztiefe

Abb. 8 stellt den Ablauf im Prinzip dar. Es wurden zur Verdeutlichung Zahlenwerte als Rechenbeispiele gewählt, die für Ätzverhältnisse gelten, die bisher zwar nicht verwendet wurden, aber über Vorversuche erreichbar wären. Über Beschichtung, Belichtung und Trockenätzen wird auf den Wafer eine Ätzmaske aus Siliciumnitrid für das anisotrope Naßätzen aufgebracht, die in den gewünschten Bereichen eine spezielle Feinstruktur aufweist, die aus dünnen Streifen oder einem Gitter besteht. Ihre Funktion wird in den folgenden Phasen deutlich. Ein durchgeführtes Beispiel ist dann in Kapitel 4 dargestellt.

In Phase I herrschen überall gleiche Verhältnisse. Es wird über die gesamte Probe in gleicher Art anisotrop geätzt.

In Phase II tritt ein "Ätzstopp" in den kleinen Strukturen auf; nur in den großen Öffnungen der Maske ätzt die Lauge mit der großen Geschwindigkeit weiter.

In Phase III sind die feinen Strukturen wegen der nicht zu vernachlässigenden Ätzgeschwindigkeit in <111>-Richtung unterätzt. Der Zeitpunkt für den Beginn dieser Phase wird durch die Breite der Maskenstreifen und die Unterätzgeschwindigkeit bestimmt. Auch in diesen, bisher durch "Ätzstopp" gehemmten Bereichen wird ab jetzt das "normale" anisotrope Ätzen in <100>-Richtung fortgesetzt, allerdings ist die Ätzfront hinter der in den größeren Öffnungen her.

Nach Einebnen unter den Feinstrukturen bilden sich in Phase IV auf dem Wafer zwei oder mehr Ätzfronten unterschiedlicher Tiefe aus. Damit ist das gewünschte Ziel erreicht. Es können also Durchgangslöcher neben Membranen oder andere Strukturen erzeugt werden.

3.2 Vorversuche an früher geätzten V-Gräben

Abb. 9 zeigt die Ergebnisse der Vorversuche zum Einebnungsverhalten an geätzten V-Gräben. Nach 2,5 Stunden Ätzdauer bleiben von ursprünglich 159 µm Grabentiefe noch 2 µm Rauhtiefe übrig. Sie wurde mit dem Oberflächenabtastgerät Dektak II gemessen. Dies zeigt den guten Einebnungseffekt beim Ätzen freiliegender

Kanten oder Spitzen.

3.3 Vorteile und Voraussetzungen des Verfahrens

- Entkopplung von Ätzzeit und Äztiefe
- Verschieden tiefe Ätzstrukturen
 - oo nur eine Ätzmaske
 - oo nur ein Ätzdurchgang
 - oo mehrere Abstufungen möglich
 - oo kein lokal differenzierendes Ätzstoppverfahren nötig
- Erste Versuche zeigten die prinzipielle Machbarkeit
 - oo Erzeugung von Membranen neben durchgeätzten Löchern
 - oo Erste Ergebnisse an Maske FAS1 (Kapitel 4)

Voraussetzungen für die Durchführung:

- Bei Maskenherstellung für Photolithographie:
 - oo feine Linien über größere Längen herzustellen, z. B. 2,5 µm breit, 6 mm lang
 - oo Lichtblitze beim Herstellen der Chrommaske im Pattern Generator müssen genau aneinander anschließen und dürfen z. B. nicht verdreht sein.
- Ätzmaskierung sehr reproduzierbar herzustellen:
 - oo Naßchemie mit ihren Unterätzungen vermeiden
 - oo Bei Trockenätzzeit keine Sicherheitszuschläge
- Starke Abhängigkeit der Ätzraten von der Orientierung auf dem Wafer
 - oo Kristallographische Orientierung des Waferflats muß sehr reproduzierbar mit nur kleinen Toleranzen sein
 - oo Ätzmaske sehr genau und reproduzierbar zum Waferflat und damit zur kristallographischen Orientierung des Wafers aufzubringen
 - oo Unterätzrate muß bereits für die Erstellung des Layouts genau bekannt sein.

4. Sensorstrukturen

4.1 Maskenlayout

Abb. 10 zeigt das Layout FAS1 in der Übersicht, wobei die Feinstruktur in diesem Maßstab nicht zu erkennen ist. Im oberen Teil sind zur Herstellung von Membranen Quadrate mit verschiedenen Feinstrukturen vorgesehen. Im unteren Teil sind Sensorstrukturen mit 0,4 mm breiten Biegebalken ebenfalls mit und ohne Feinstruk-

tur zu erkennen. Dabei handelt es sich um ein Layout für einen Kraftsensor, bei dem zwei äußere Träger zur Abstützung und Stabilisierung vorhanden sind und ein mittlerer, sehr dünner, empfindlicher schwingender Biegebalken das eigentliche Sensorelement bildet (siehe auch Abb. 19).

Zur Trennung der verschiedenen Teile in einer Richtung sind lange Gräben zum Durchätzen vorgesehen, damit mit der Wafersäge nur in der anderen Richtung getrennt werden muß.

Dieses Muster in der $0,14 \mu\text{m}$ dicken Maskierschicht wurde auf polierte und unpolierte Oberflächen aufgebracht. Es zeigte sich, daß feine Strukturen im Bereich weniger Mikrometer auf unpolierten Flächen wegen der Höhenunterschiede keine gleichmäßige Breite besitzen, nicht ausreichend haften und damit unbrauchbar werden.

Abb. 11 zeigt den Ansatz des Biegebalkens mit und ohne Feinstruktur vor dem Ätzen in KOH: 0,4 mm breit, einmal ohne Feinstruktur, einmal mit 5 Streifen je $2,5 \mu\text{m}$ breit, Periode $100 \mu\text{m}$, und einmal mit entsprechender Gitterstruktur.

Abb. 12 zeigt die gleiche Stelle nach dem Beginn des Ätzens (0,5 h) und macht einige Probleme der Herstellung solch feiner Strukturen mit Standardverfahren sichtbar, wie sie bereits oben angesprochen wurden.

In Abb. 13 und Abb. 14 ist die Feinstruktur auf den Quadraten zu sehen. Es handelt sich dabei um Rasterlinien mit $2,5 \mu\text{m}$ oder $5 \mu\text{m}$ Breite in einem Raster von $100 \mu\text{m}$ bzw. $200 \mu\text{m}$. Dabei werden auch die Grenzen der Machbarkeit mit 1:1-Masken sichtbar. Die feinen Linien in der Ätzmaske gehen teilweise nicht mehr durch.

Wegen der genannten Probleme wurde das Ätzverhalten bei feinen Linien nur bis 0,5 h bzw. 1,5 h dokumentiert (Abb. 15). Nach dieser Zeit war das Gitter vollständig unterätzt und die Fläche darunter gut eingeebnet. Eine Betrachtung nach längerer Ätzzeit war nicht mehr sinnvoll, da dann nur noch Reste des Gitters vorhanden waren.

Beispielhaft ist in den Abb. 16 und 17 bei unterschiedlicher Vergrößerung dargestellt, wie sich bei einem Gitter aus breiteren Linien ($5 \mu\text{m}$) die Ätzpyramiden ausbilden, das Muster dann unterätzt und die Fläche darunter eingeebnet wird. Die Aufnahmen wurden nach Ätzzeiten von 0,5 h bis 6,0 h im Mikroskop aufgenommen.

Die Struktur der unterätzten Flächen wurde genauer untersucht (Abb. 18). Im Vergleich zu einer frei geätzten Fläche bleibt die ursprüngliche Gitter- bzw. Streifenstruktur noch sichtbar, insbesondere im reflektierten Licht, auch wenn die Welligkeit der Flächen sehr klein ist. Sie erscheint in den mikroskopischen Aufnahmen mit Interferenzkontrast deutlich überhöht.

4.2 Erste Ergebnisse

Abb. 20 zeigt erste fertig geätzte Proben nach 5 h 50 min in KOH (30 %, 85 °C). Ein wie oben beschriebenes Element eines Kraftsensors mit in diesem Fall allerdings noch ungedünntem mittleren Balken wurde teils herausgeätzt teils gesägt. Es sind also 3 Balken, je 0,4 mm breit und 6 mm lang, wobei der mittlere Biegebalken als schwingendes Sensorelement zu denken ist. In dünn

geätztem Zustand würde der dieser Balken bei einer Dicke von z. B. 20 μm etwa 1 % der Zugkraft aufnehmen. Bei einer Eigenfrequenz von etwa 5 kHz hätte das Sensorelement als Ganzes dann eine Zugempfindlichkeit von etwa 350 Hz/N (siehe Kapitel 6).

Als Drucksensorstruktur wurden 8 Membranen vorgesehen. Unter den feineren Strukturen sind die Membrane wegen der noch nicht angepaßten Technologie durchgeätzt wie bei den Flächen ohne Feinstruktur. Bei der größeren Struktur sind Membrane mit einer Dicke von 18 μm bis 44 μm stehengeblieben. Daraus ergeben sich rechnerisch Grundschwingungen von 7,4 kHz bis 18 kHz.

5. Herstellung freitragender Strukturen aus Si-Nitrid

Abb. 20 zeigt Beispiele von freitragenden Strukturen. Trotz Ätzen in heißer KOH, Spülen und Trocknen in einer Trockenschleuder bleiben die Feinstrukturen der Siliciumnitridmaske relativ gut erhalten. So ist z. B. ein 6 mm langer Streifen zu sehen, der 5 μm breit und nur 0,14 μm dick ist. Bei entsprechend sorgfältiger Behandlung können also lange freitragende Strukturen auch aus sehr dünnem Siliciumnitrid zuverlässig hergestellt werden.

6. Auslegung von Sensorstrukturen

6.1 Grundschwingung von Biegebalken

Für die Biegeschwingungen von Stäben mit konstantem Querschnitt gilt bei freier Schwingung:

$$\text{Eigenfrequenz } f_n = k_n^2 \cdot [(E \cdot I_y) / (\sigma \cdot A)]^{1/2} / (2\pi \cdot l^2)$$

Länge des Stabes l

Querschnittsfläche A (in der x-z-Ebene)

Axiales Flächenträgheitsmoment I_y

Biegeschwingung mit Auslenkung in z -Richtung

Elastizitätsmodul $E = 1,69 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$ für Längsrichtung des Balkens

Dichte $\sigma = 2,3 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ für Si

Eigenwerte der Schwingungsgleichung k_n

Für einen beidseitig eingespannten Balken gilt näherungsweise für die ersten drei Werte:

$$k_0 = 4,730, k_1 = 7,853, k_2 = 10,996$$

Berücksichtigung des trapezförmigen Ätzquerschnitts beim anisotropen Ätzen:

$$I_y = (b + h/\sqrt{2}) \cdot h^3/12$$

Breite oben b

Dicke des Wafers bzw. des geätzten Balkens h

Die zugehörige Querschnittsfläche beträgt $A = (b + h/\sqrt{2}) \cdot h$. Daraus folgt, daß das Verhältnis von I_y zu A und damit die Eigenfrequenz nicht mehr von der Breite oben abhängig ist. Es ergeben sich dann auch die gleichen Eigenfrequenzen wie beim Stab mit rechteckigem Querschnitt.

Für die erste Grundfrequenz erhält man also näherungsweise

$$f_0 = 8,811 \cdot 10^6 \text{ mm/s} \cdot h/l^2$$

Die Eigenfrequenz der freien Biegeschwingung eines beidseitig eingespannten Balkens ist also proportional zur Dicke und umgekehrt proportional zur Länge im Quadrat.

Für den interessierenden Bereich sind Werte in Abb. 21 graphisch aufgetragen.

Ein geätzter Balken der Dicke 525 μm und der Länge 6 mm hat danach eine erste Resonanzfrequenz von 128,5 kHz.

6.2 Zugempfindlichkeit von Biegebalken

Als Näherungslösung für kleine Kräfte F kann gelten:

$$df/dF = f_0 \cdot 0,118 \cdot l^2/(h^2 \cdot A \cdot E)$$

Für die gleichen Annahmen wie oben folgt daraus für rechteckige Querschnitte:

$$df/dF = 6,152 \text{ mm}^3 \text{ Hz/N} \cdot l/(h^2 \cdot b)$$

Für die trapezförmigen Ätzquerschnitte:

$$df/dF = 6,152 \text{ mm}^3 \text{ Hz/N} \cdot l/[h^2 \cdot (b + h/\sqrt{2})]$$

Die Zugempfindlichkeit eines beidseitig eingespannten schwingenden Balkens ist also proportional zum Kehrwert der Dicke im Quadrat und zum Kehrwert der Breite oben, versehen mit einer Korrektur für den Ätzquerschnitt.

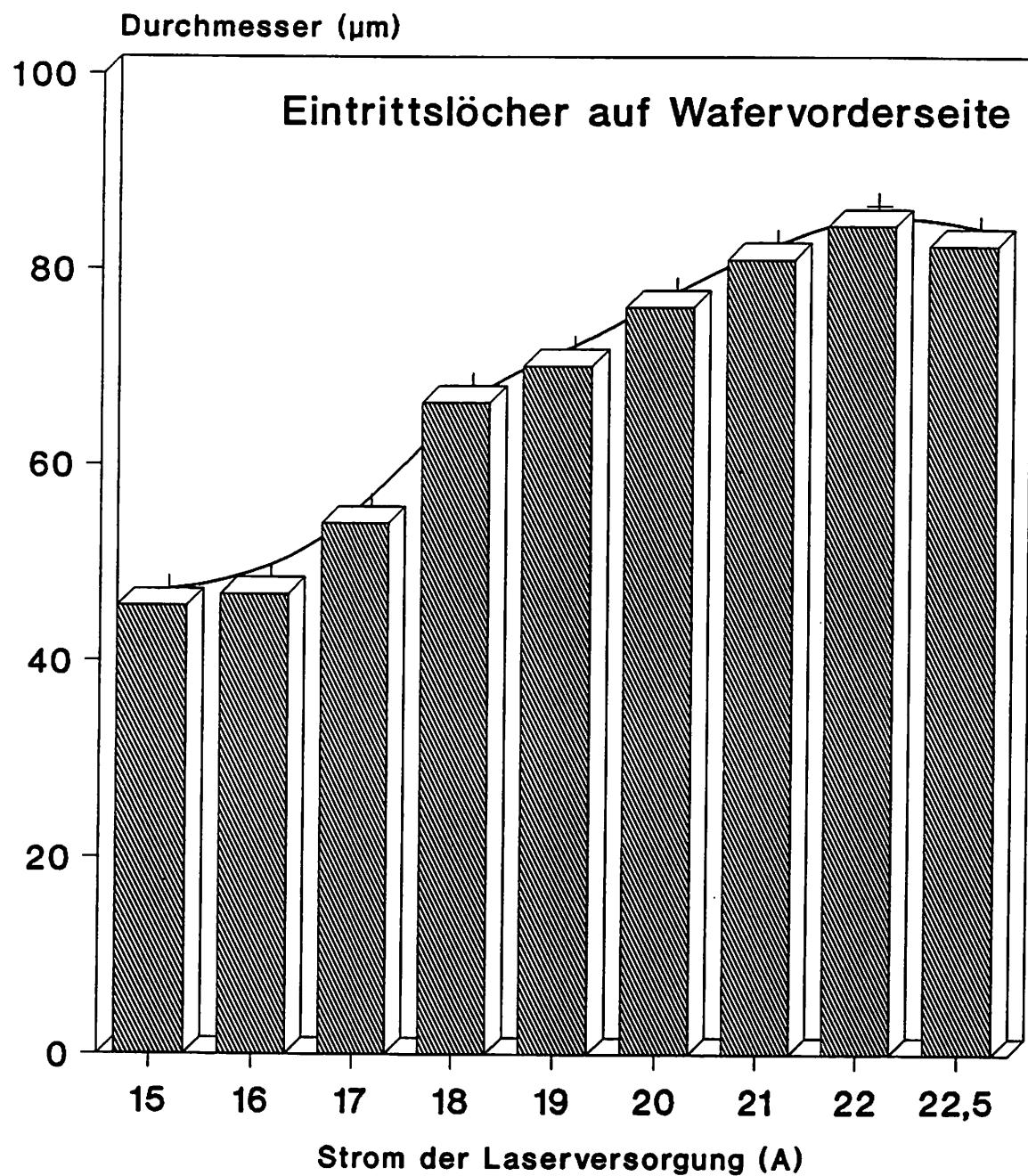
Für den interessierenden Bereich sind Werte in Abb. 22 graphisch aufgetragen.

Ein geätzter Balken der Dicke 525 μm und der Breite 0,4 mm hat danach eine Ansprechempfindlichkeit von 28,9 Hz/N.

Die relative Empfindlichkeit, d. h. die prozentuale Veränderung der Resonanzfrequenz pro Kraft ist proportional zu Länge im Quadrat und umgekehrt proportional zur Breite multipliziert mit der Dicke hoch 3.

Bei der Auslegung einer Sensorstruktur sollte die relative Empfindlichkeit zwar auch mit berücksichtigt werden. Da aber Frequenzen und ihre Veränderungen sehr genau absolut gemessen werden können, dürfte eine große Frequenzänderung pro Meßgrößenänderung der wesentliche, zu optimierende Parameter sein.

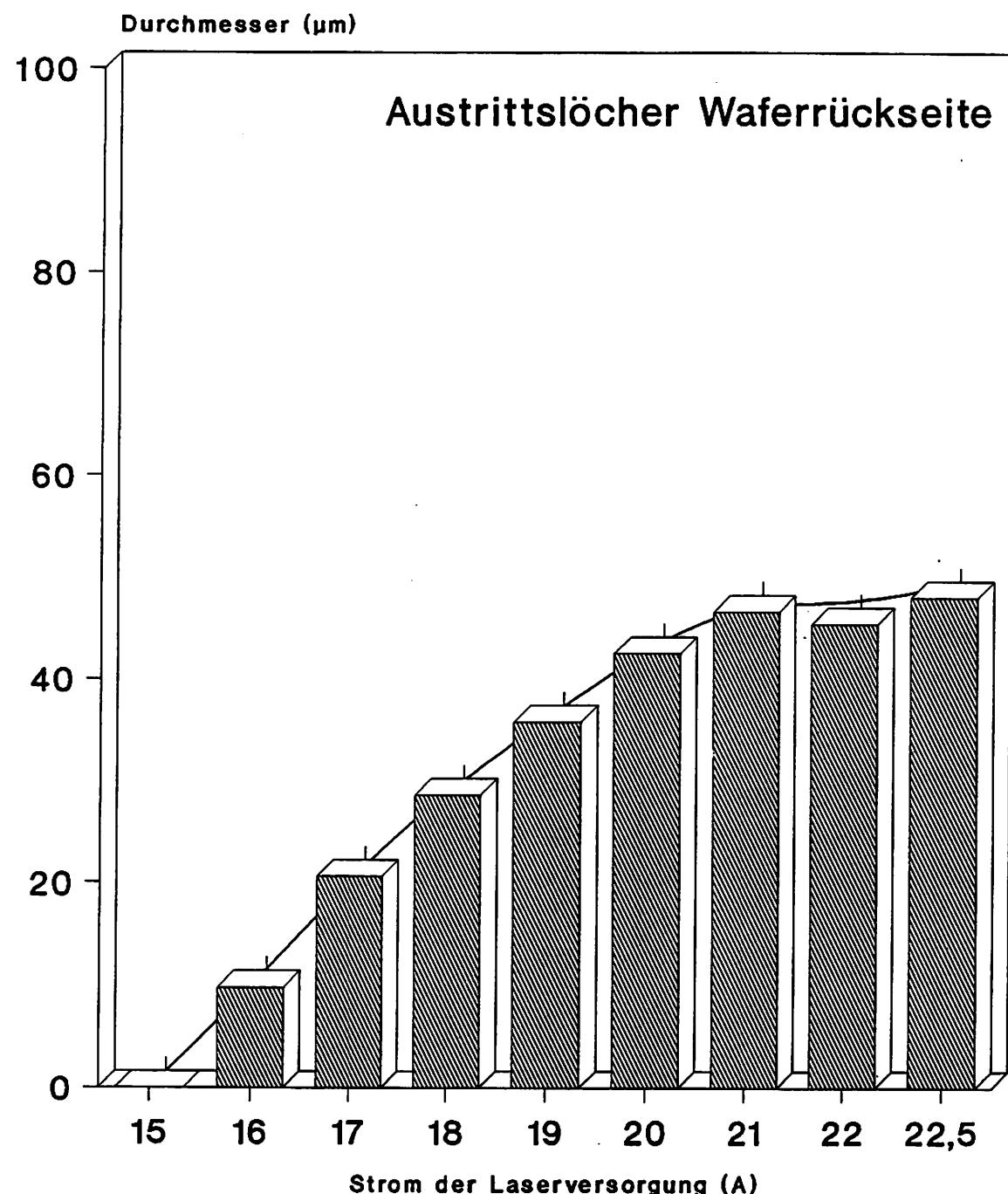
Laserlöcher abhängig von der Energie (Jeweils 100 Pulse mit Nd/YAG-Laser)



RB/ZWD/Schweikhardt 25.6.1990

Abb. 1

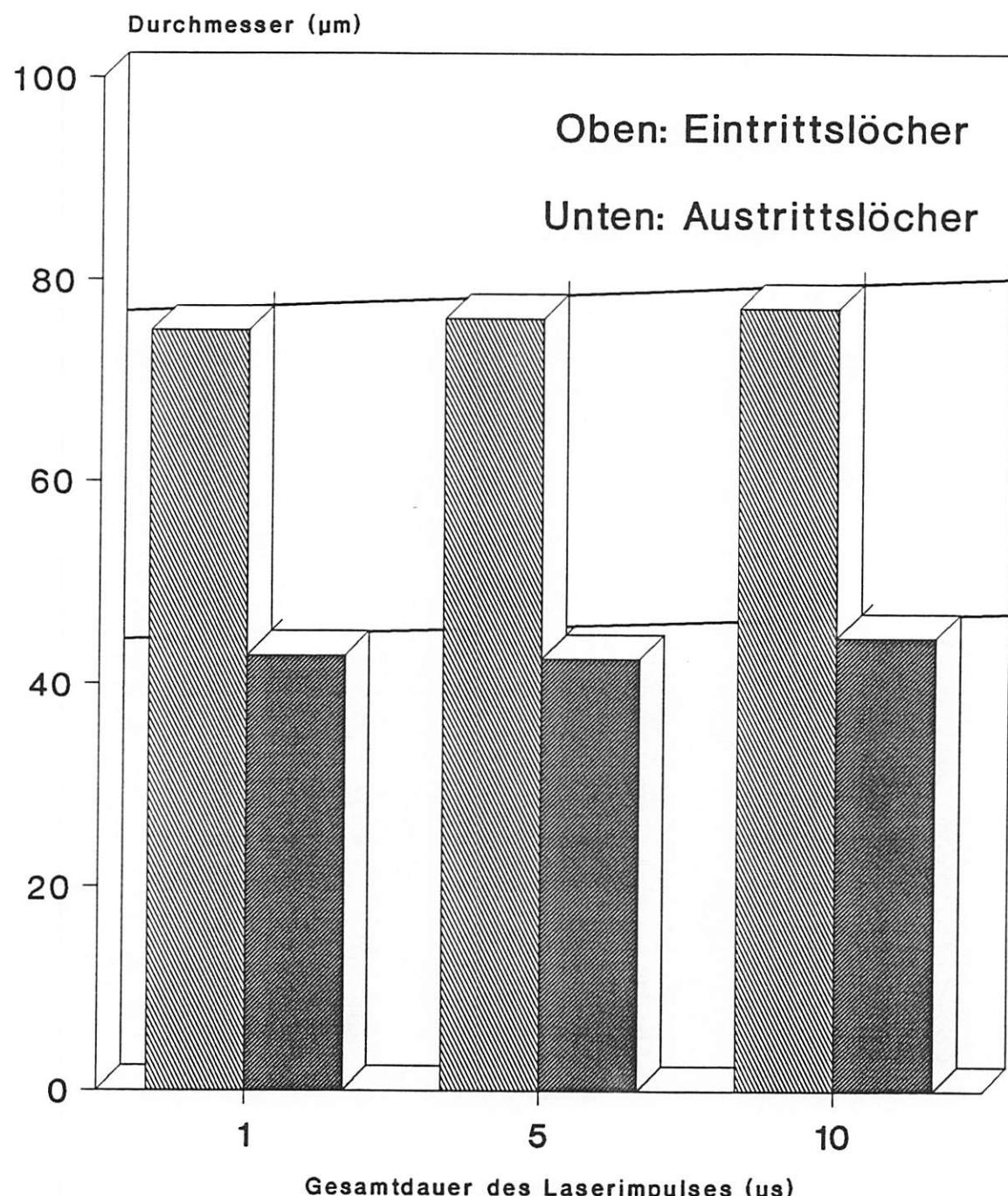
Laserlöcher abhängig von der Energie (Jeweils 100 Pulse mit Nd/YAG-Laser)



RB/ZWD/Schweikhardt 25.6.1990

Abb. 2

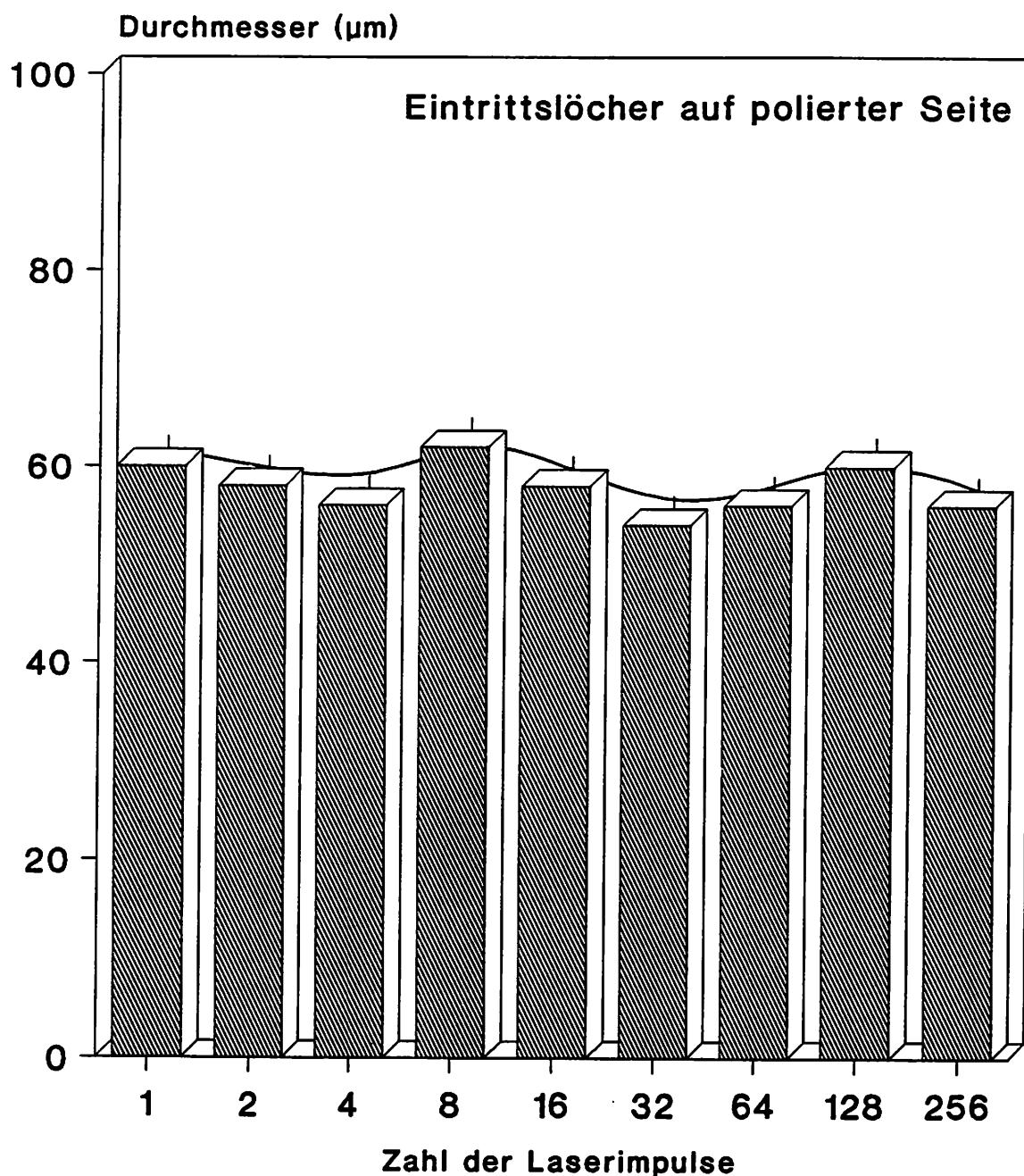
Laserlöcher abhängig von der Pulsdauer (Jeweils 100 Pulse mit Nd/YAG-Laser)



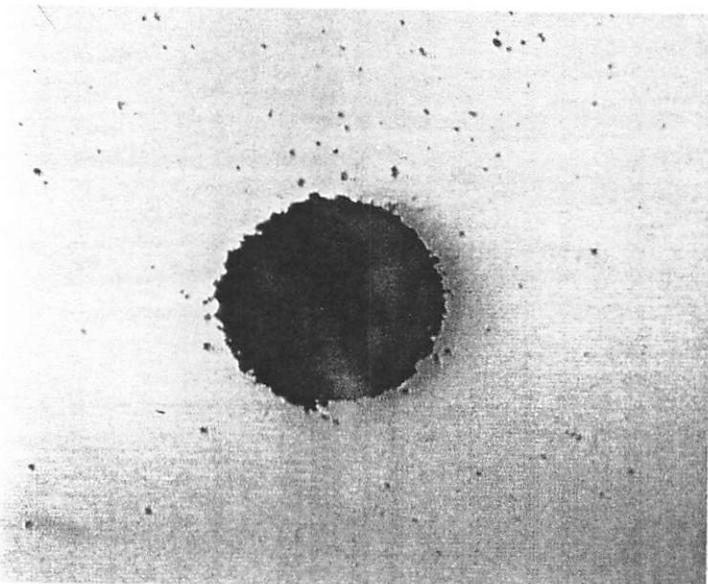
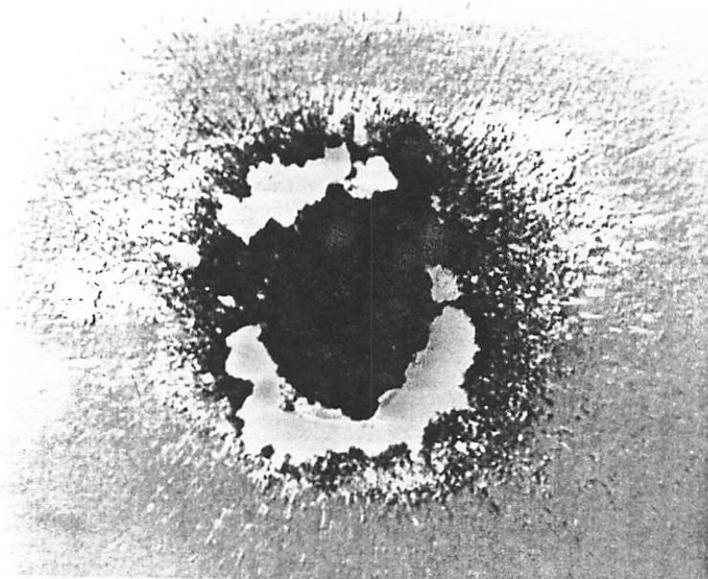
RB/ZWD/Schweikhardt 25.6.1990

Abb. 3

Laserlöcher abhängig von der Pulszahl (Pulse mit Nd/YAG-Laser, 14,5 A)

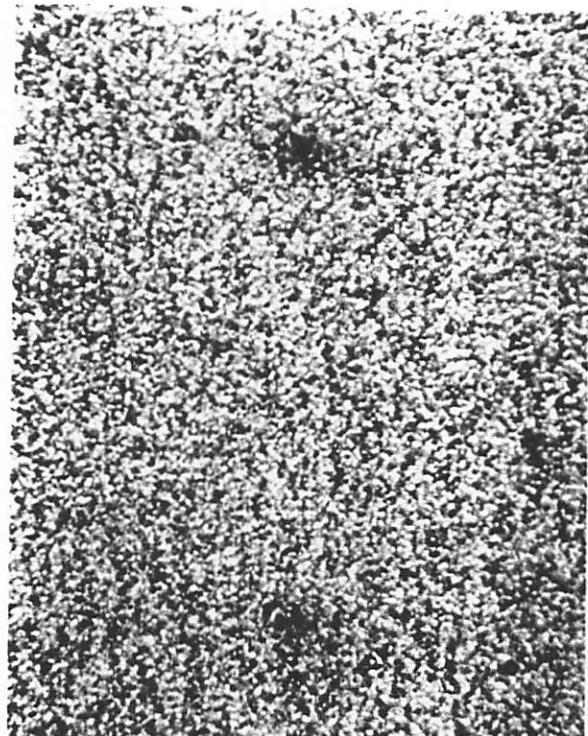
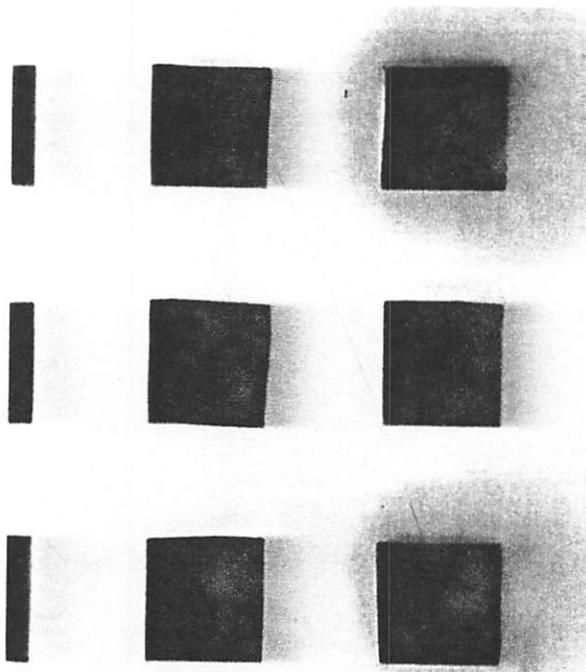


RB/ZWD/Schweikhardt 27.6.1990

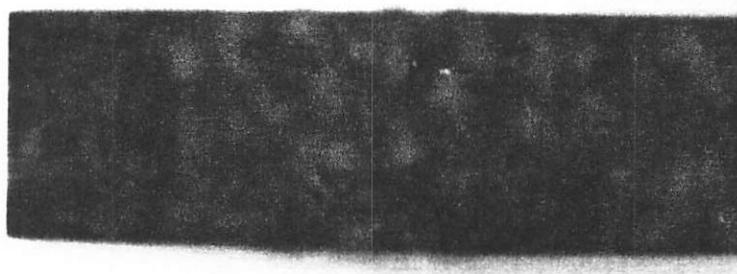
a Reinigung in Ultraschallbad**b Zusätzliche Reinigung: 15 min in Ätzlösung HF/NH₄F****Probe 3 Loch 4****100 µm** 



Durchgangslöcher zur beidseitigen Justierung
Vorderseite und Rückseite



0,2 mm



Markierungsloch
in V-Nut

0,1 mm

Abb. 6

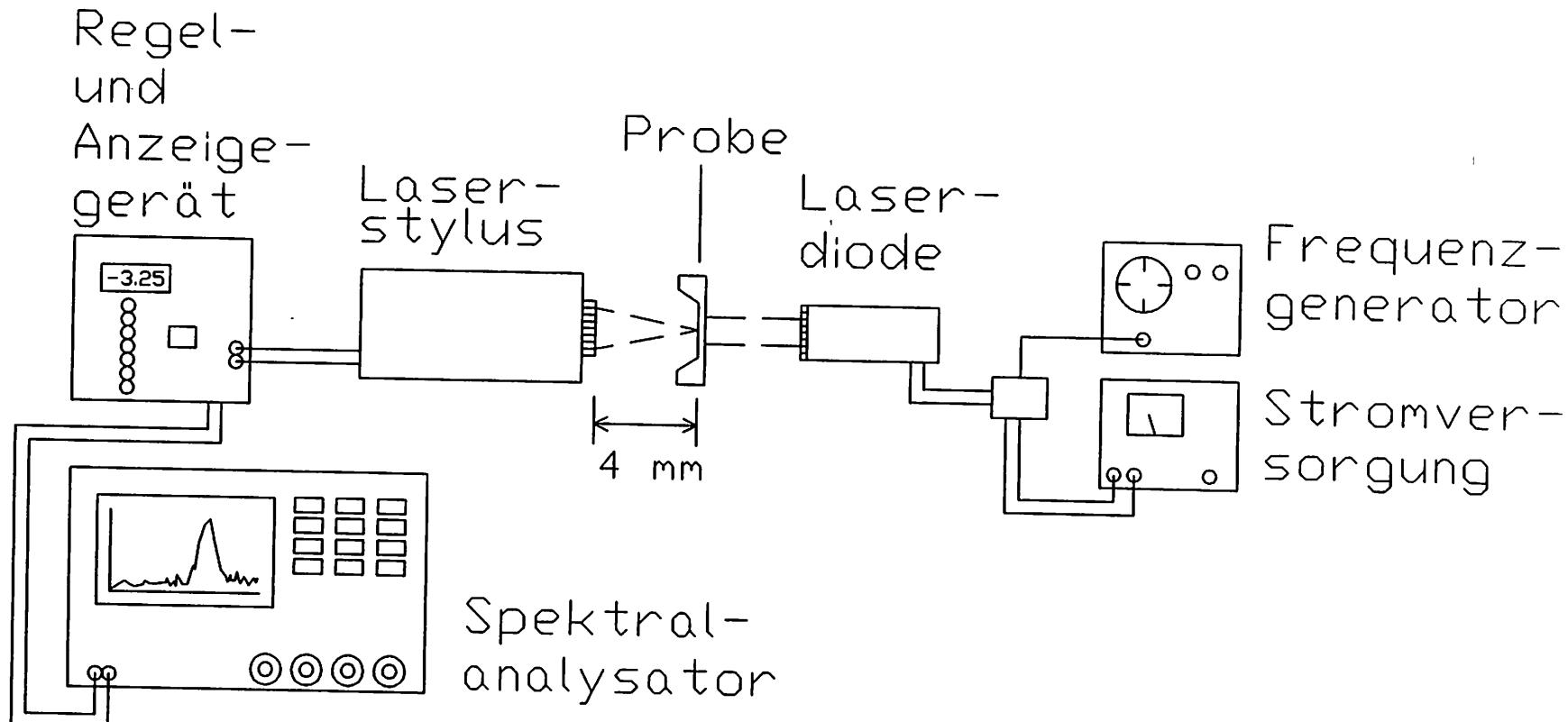


Abb. 7



Annahmen:

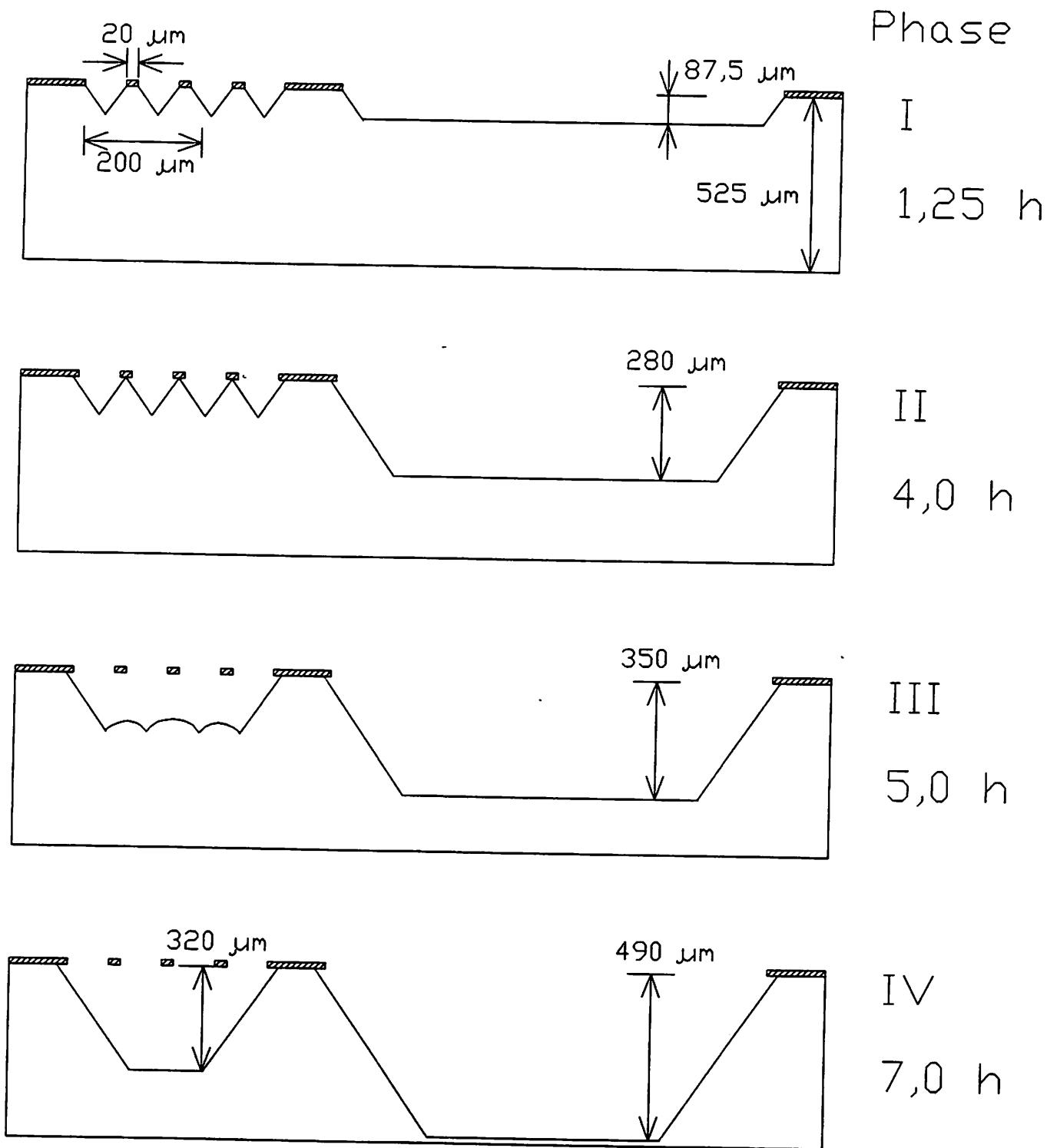
Ätzgeschwindigkeit 70 $\mu\text{m}/\text{h}$
Unterätzung lateral 2,5 $\mu\text{m}/\text{h}$ 

Abb. 8

Maskierung vorher entfernt

Ätzdauer 2,5 h, 85 °C

Periode der

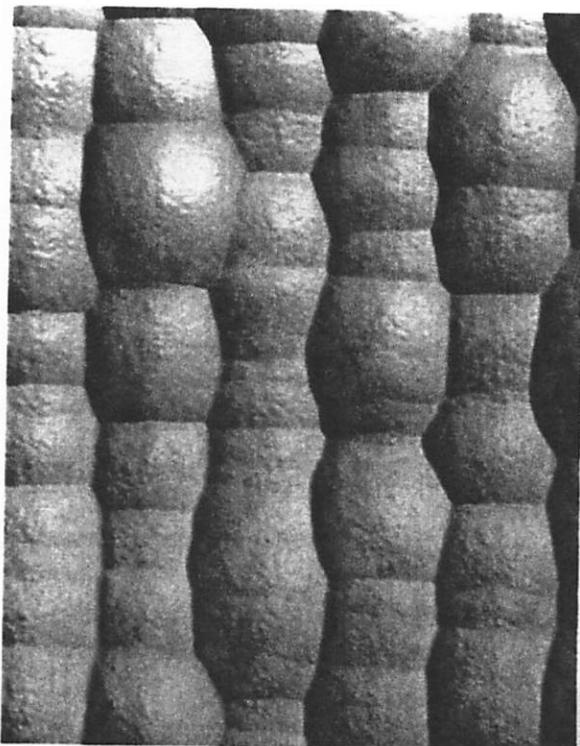
V-Gräben 0,250 mm

Breite der

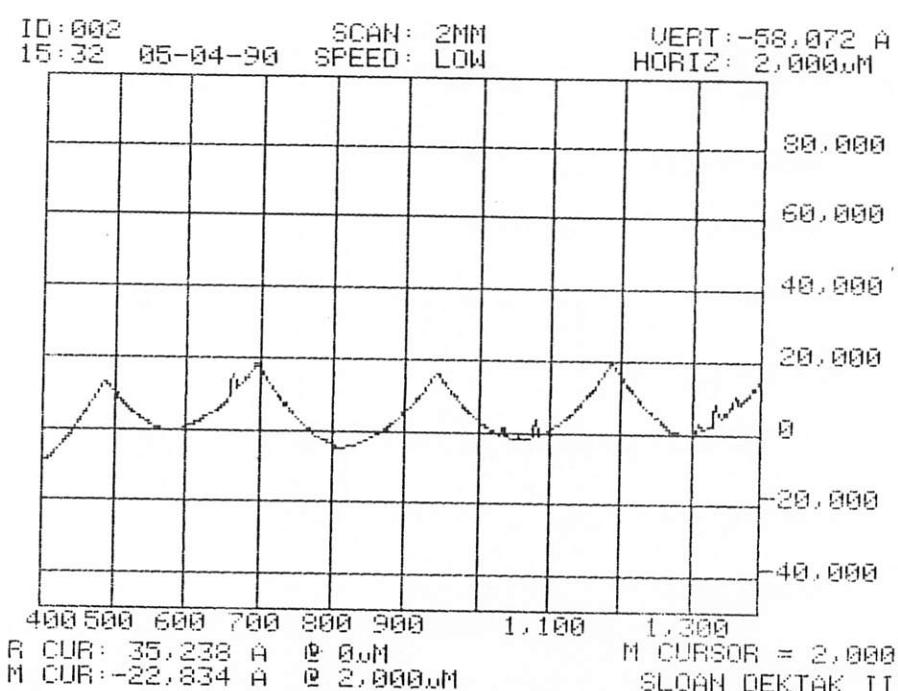
V-Gräben oben 0,225 mm

Stegbreite 0,025 mm

Tiefe 0.159 mm

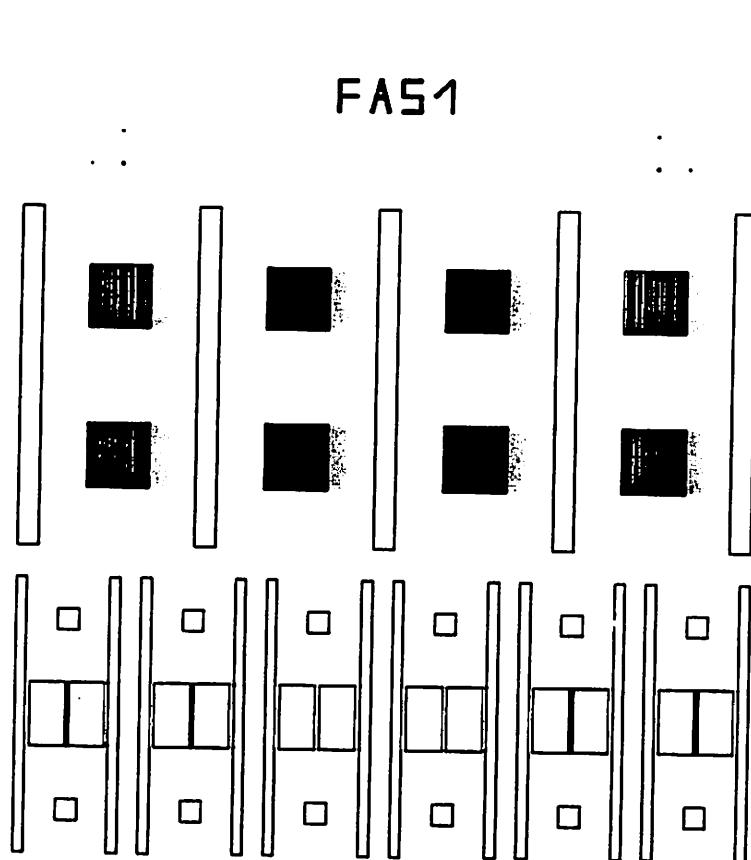


250 μ m





**5"-Maske FAS1 für 4"-Wafer
Erstellt mit Programm "Biene"**



BOSCH



ZWD

Frequenzanaloge Sensoren in Silicium

Ätzmaske für Sensorstreifen mit und ohne Feinstruktur

Tag

Streifenbreite insgesamt 400 µm

Raster 100 µm

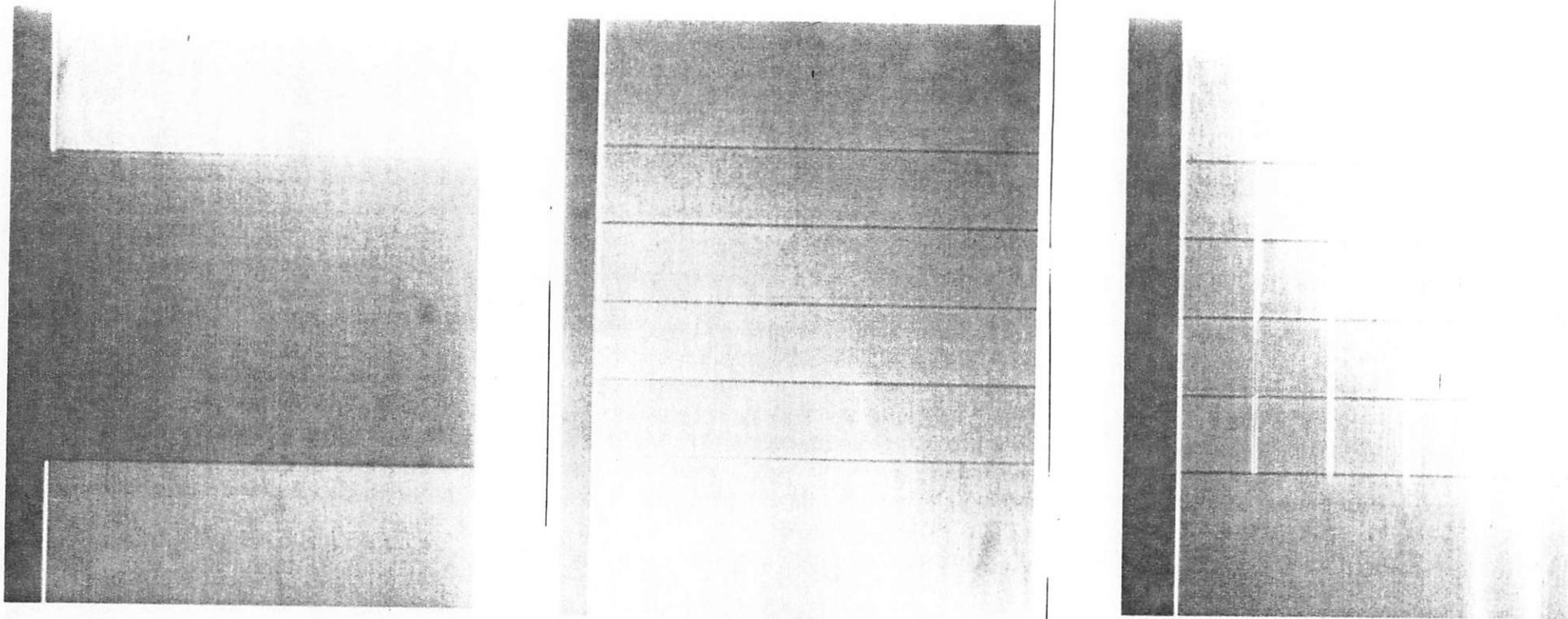


Abb. 11

BOSCH



ZWD

Ätzen von Silicium in KOH, 30 min
Sensorstreifen ohne und mit Feinstruktur

Tag

Streifenbreite insgesamt 400 µm

Raster 100 µm

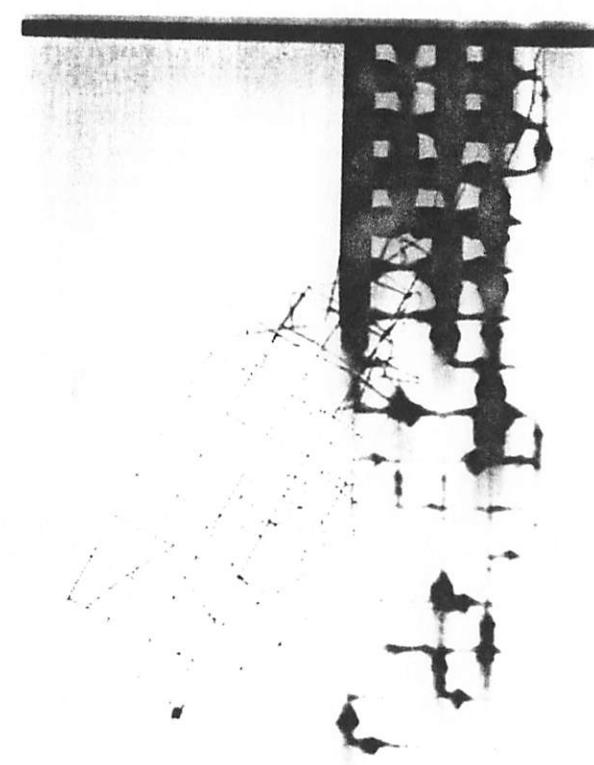
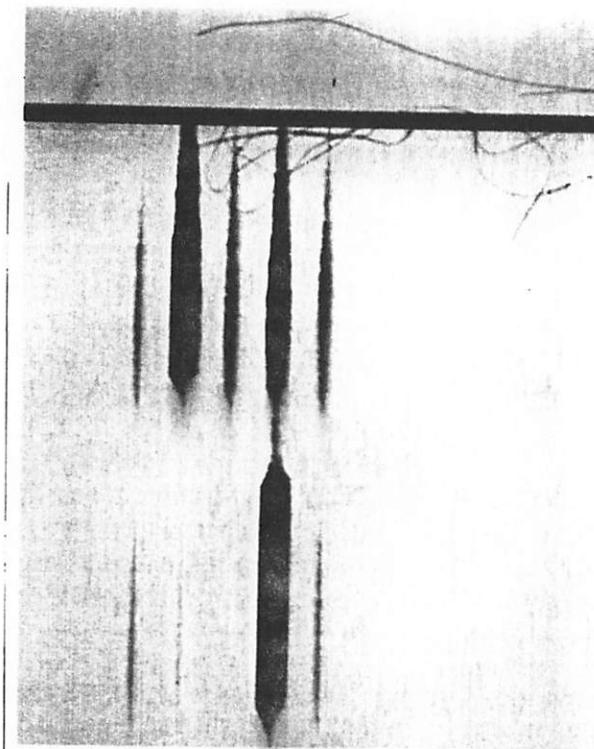
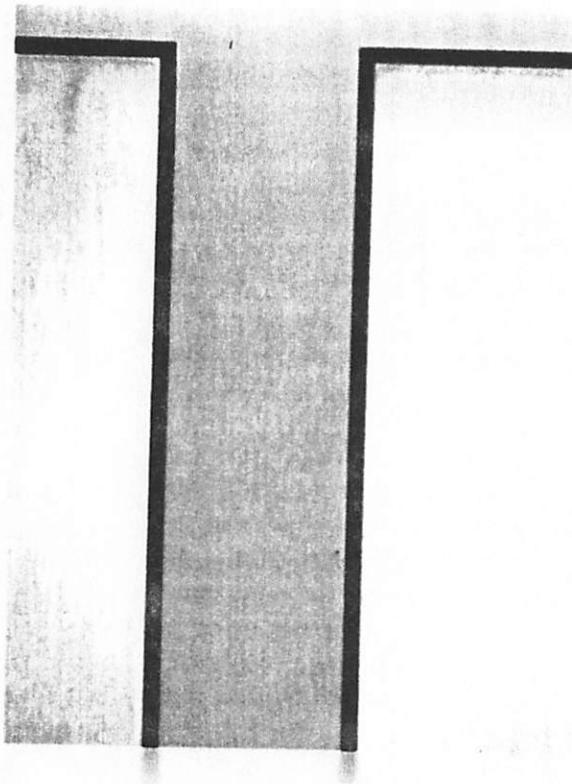


Abb. 12



Raster 0,1 mm bzw. 0,2 mm

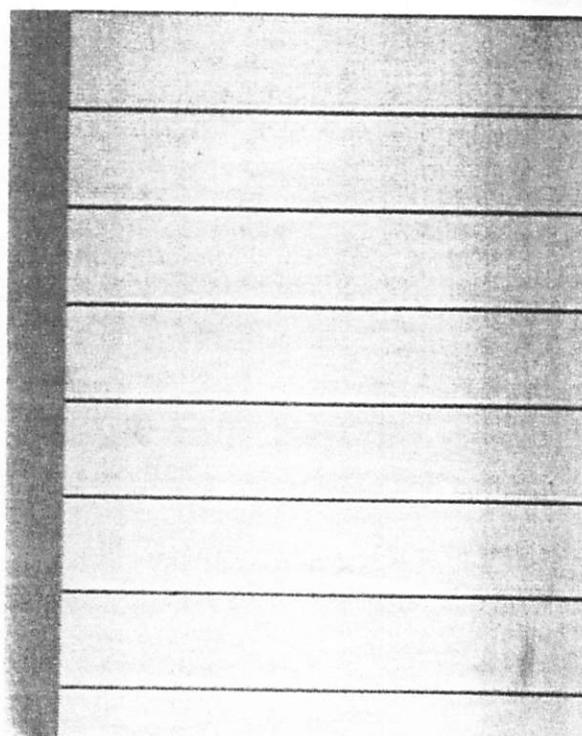
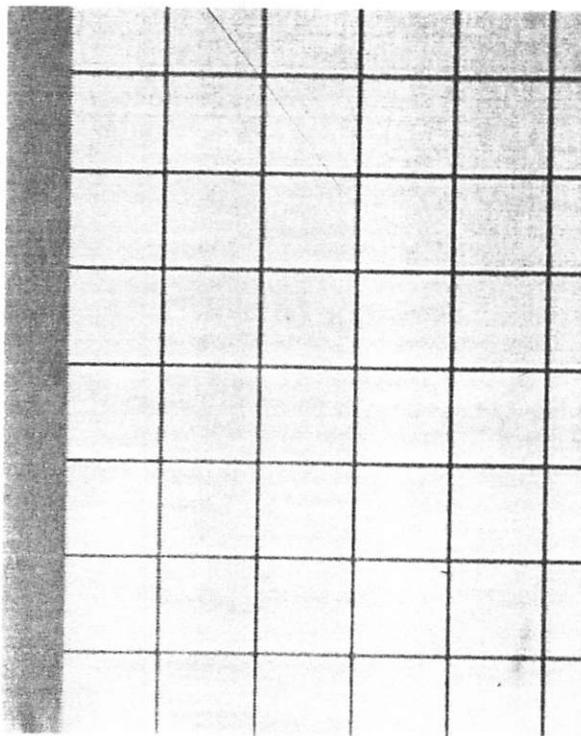
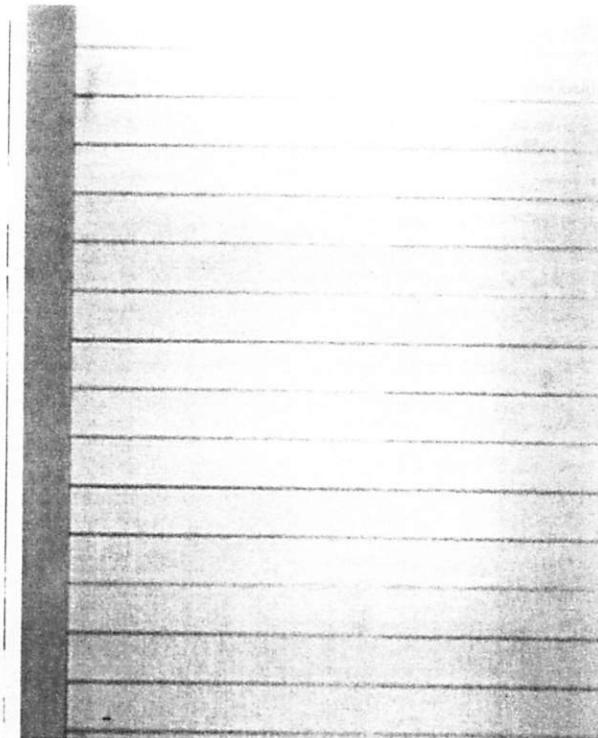
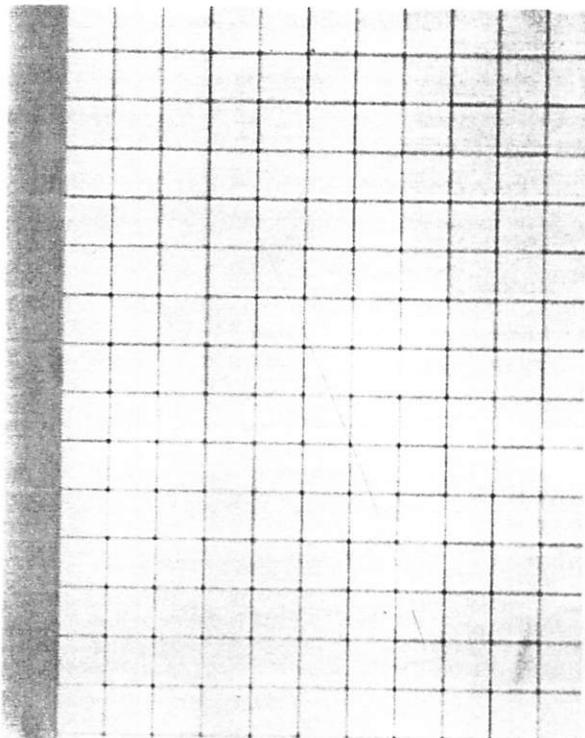


Abb. 13

BOSCH



ZWD

Frequenzanaloge Sensoren in Silicium
Feinstruktur in 6 mm x 6 mm-Quadranten

Raster 0,1 mm bzw. 0,2 mm

100 µm



20 µm

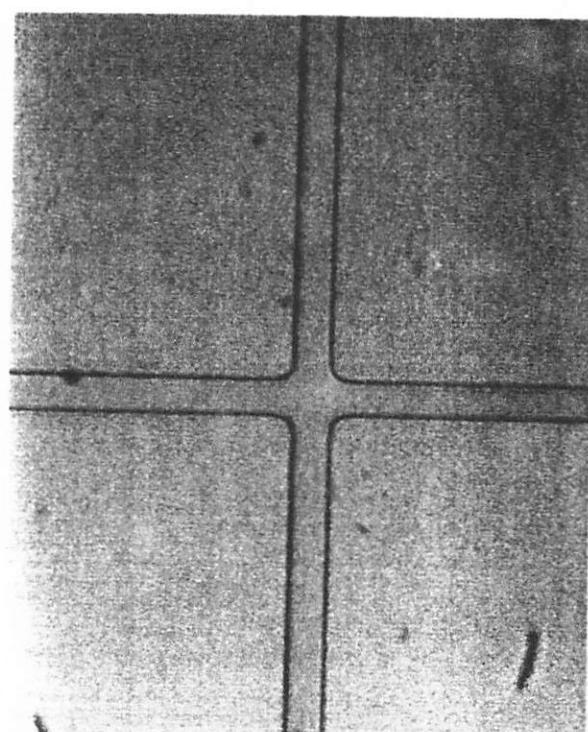
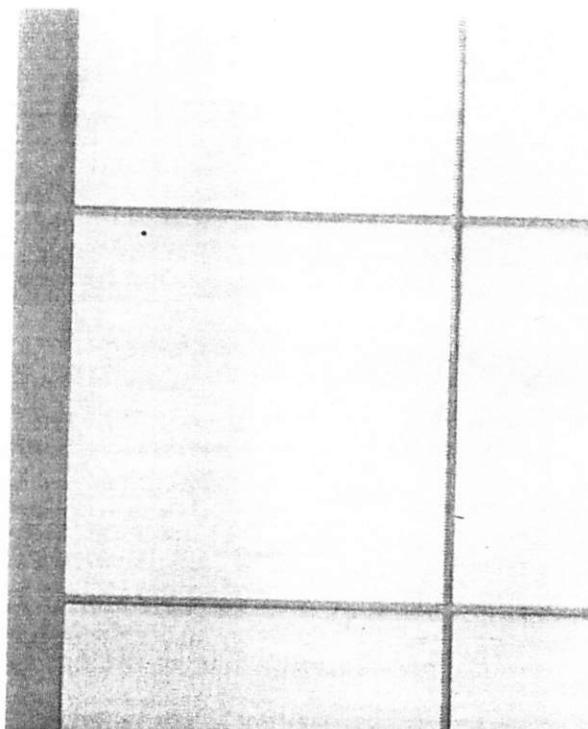
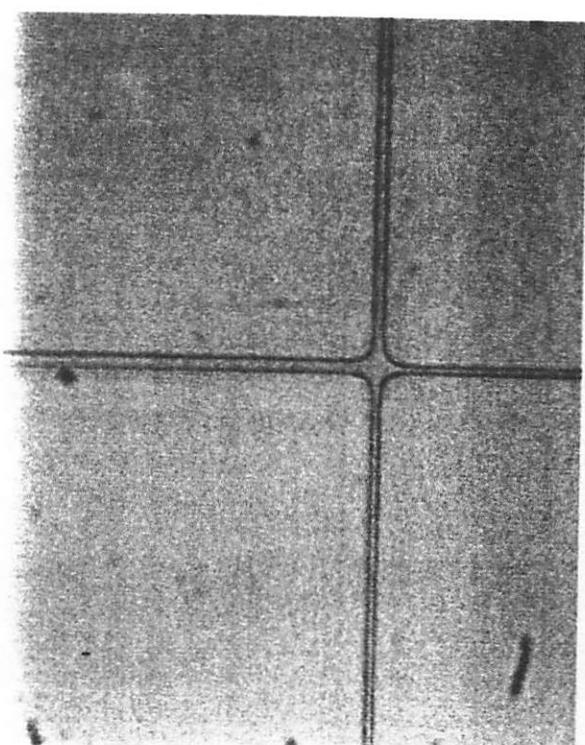
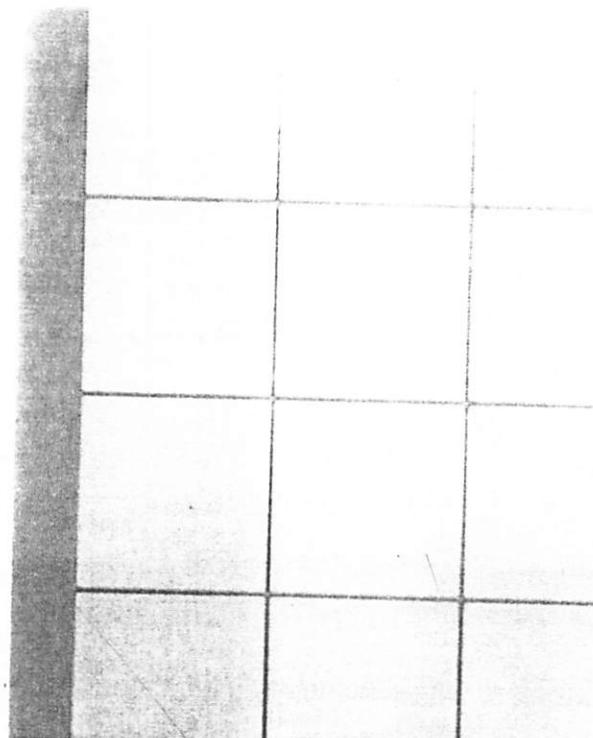
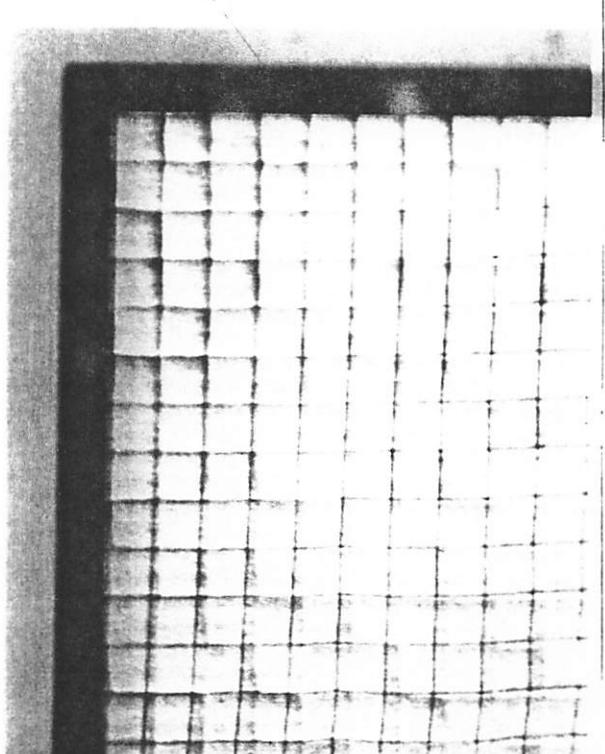
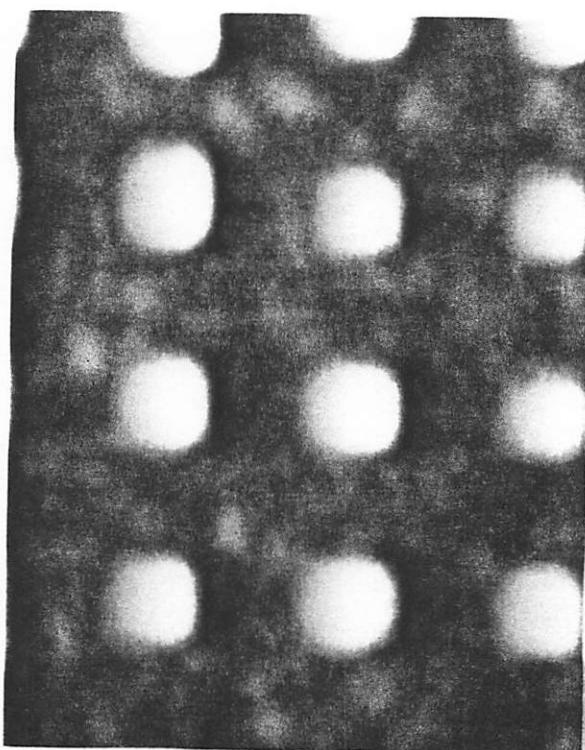
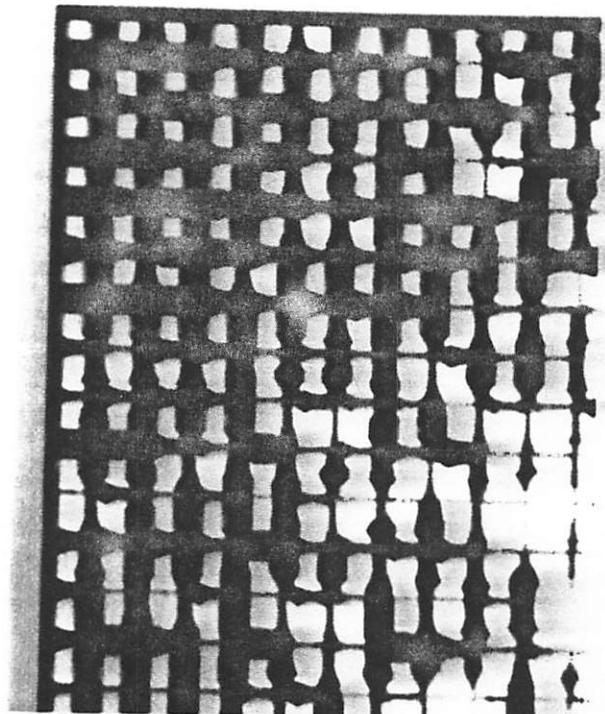


Abb. 14



Streifenbreite in der Ätzmaske lt. Layout 2,5 µm, Raster 100 µm

Ätzzeit oben: 0,5 h, unten: 1,5 h





Streifen in der Ätzmaske
aus Siliciumnitrid

Breite 5 µm

Raster 200 µm

Ätzzeit in KOH

oben rechts: 1,5 h

unten links: 2,5 h

unten rechts: 6,0 h

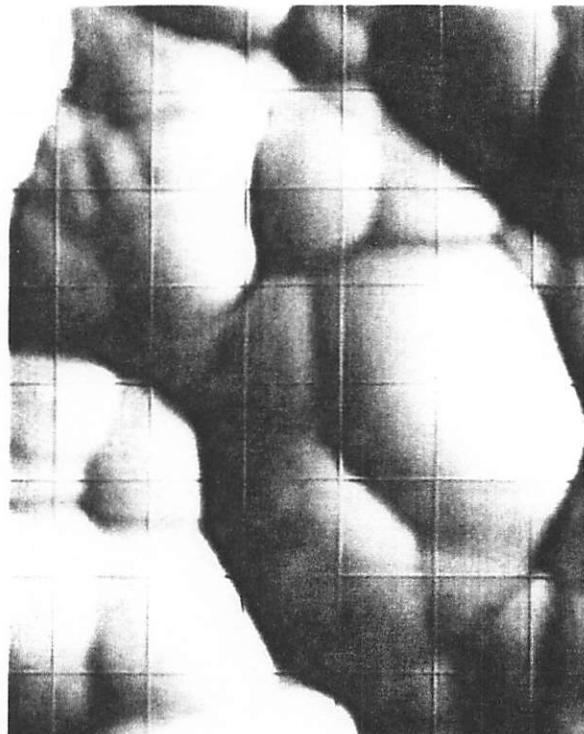
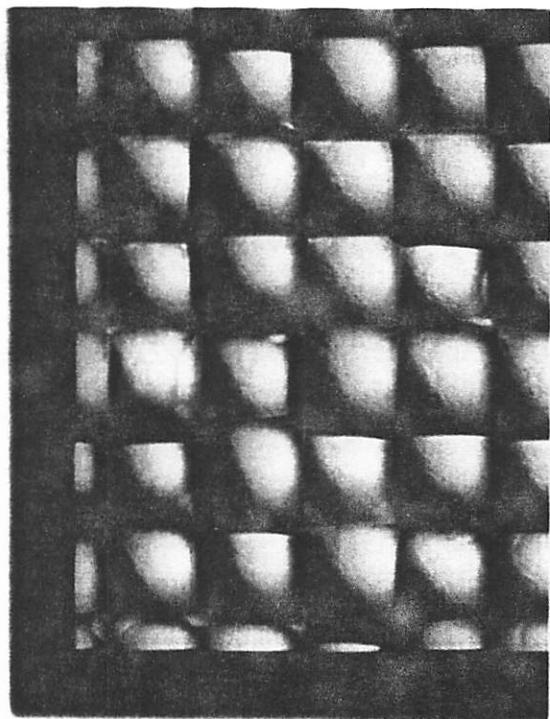
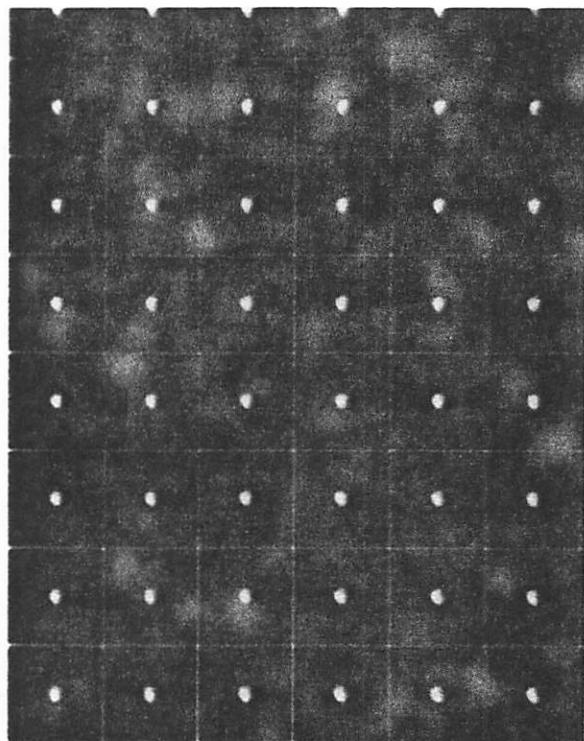


Abb. 16



Streifen in der Ätzmaske

aus Siliciumnitrid

Breite 5 µm

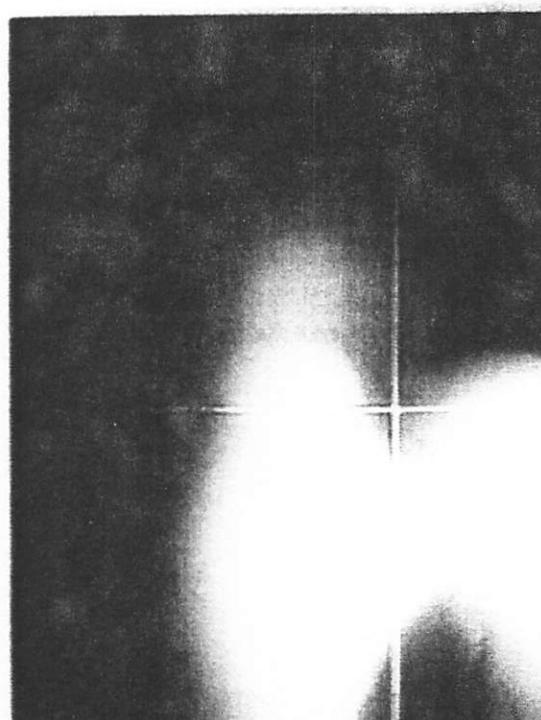
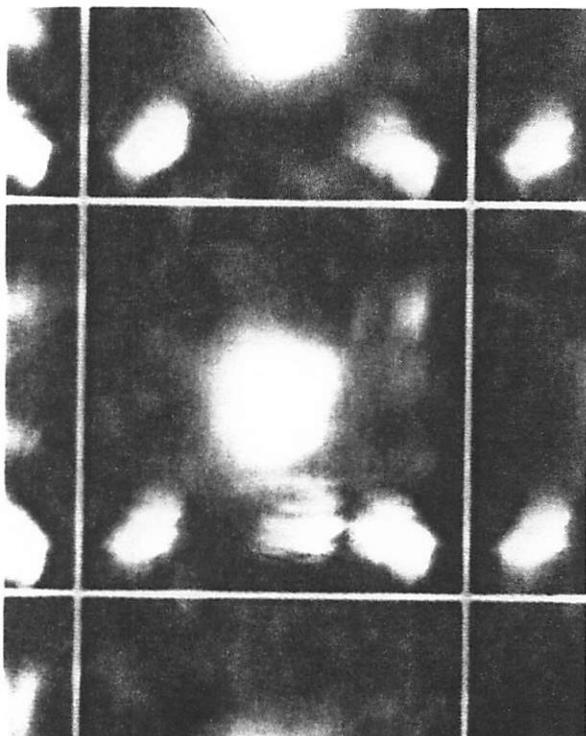
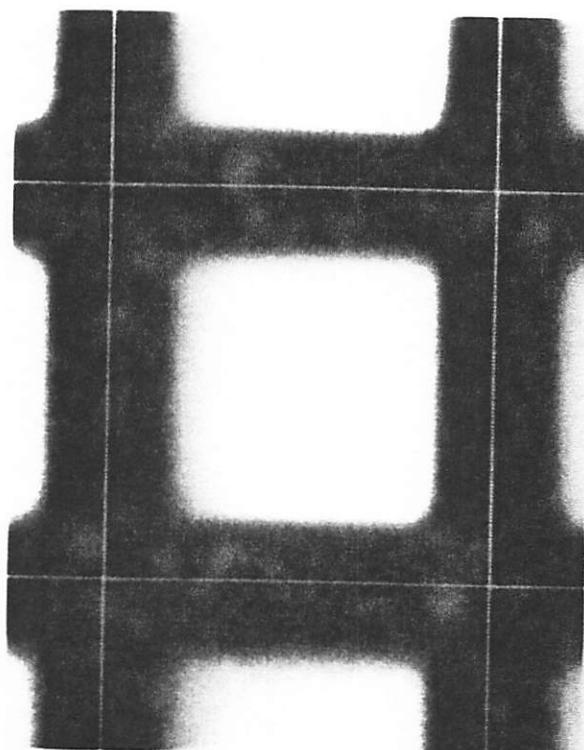
Raster 200 µm

Ätzzeit in KOH

oben rechts: 0,5 h

unten links: 1,5 h

unten rechts: 2,5 h



BOSCH



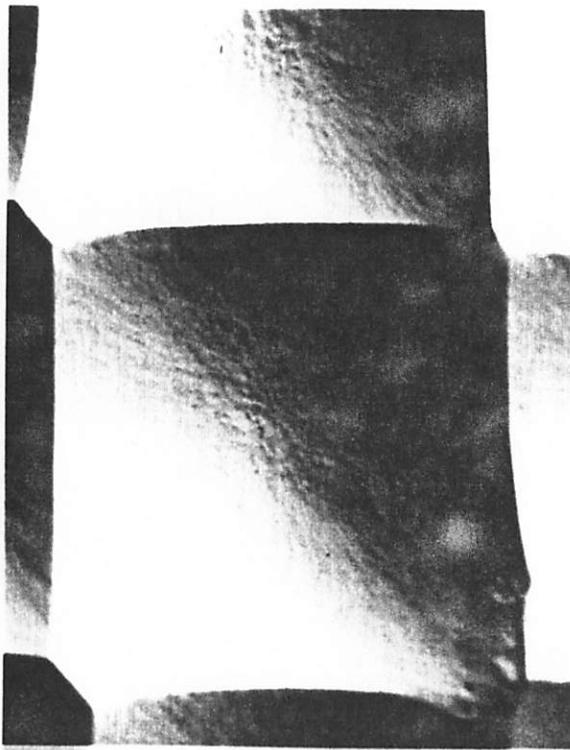
ZWD

Ätzen von Silicium in KOH

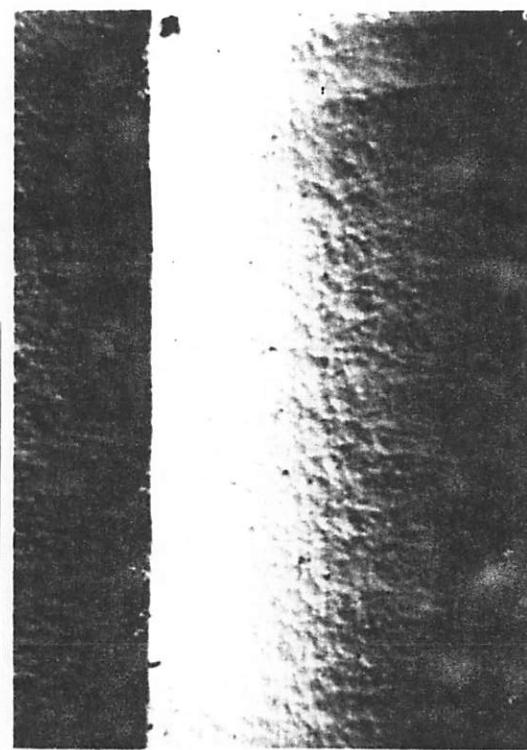
Oberfläche nach Unterätzung von Strukturen der Ätzmaske

Ätzdauer in 30%iger KOH bei 85 °C : 2,5 h; Raster 0,2 mm, Streifenbreite 5 µm

Unterätztes Gitter



unterätzte Streifen



freie Fläche

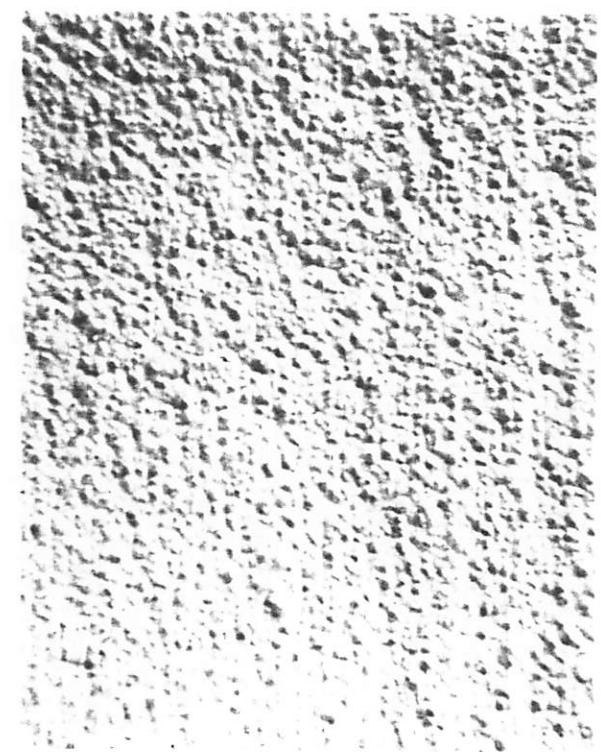


Abb. 18

BOSCH



ZWD

Frequenzanaloge Sensoren in Silicium Geätzte Sensorstrukturen

Tag

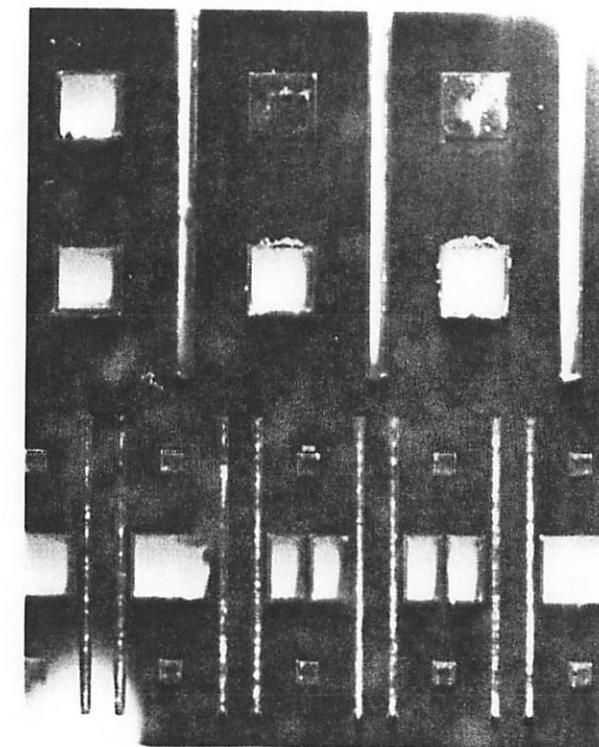
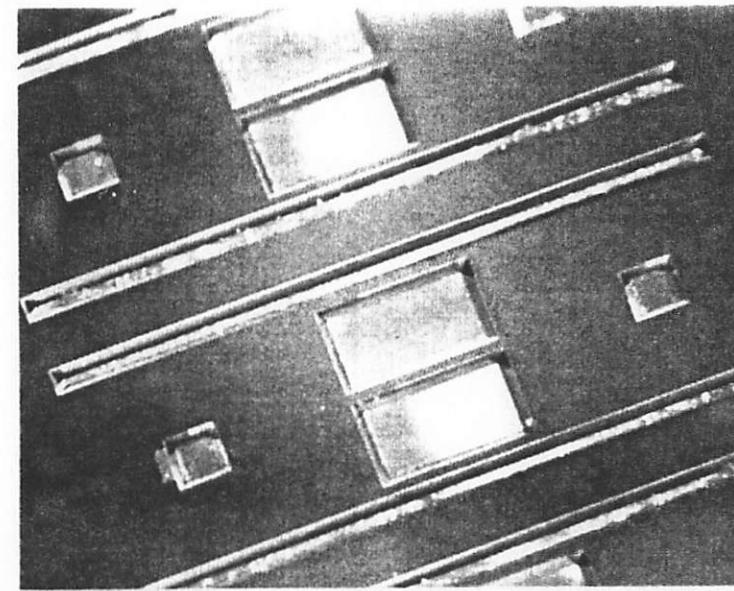
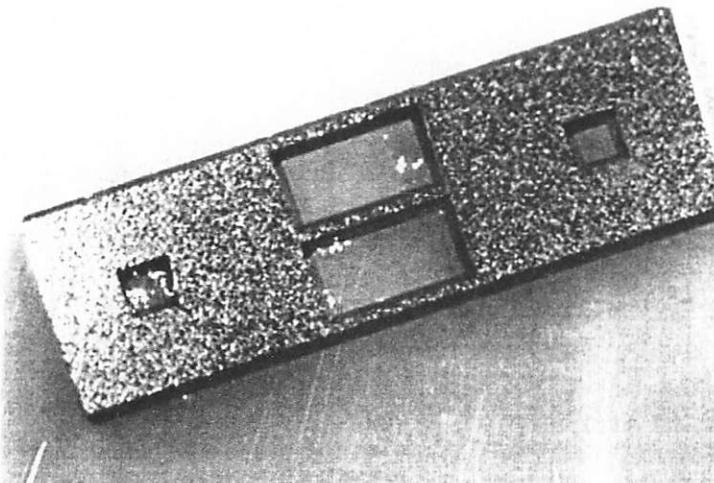
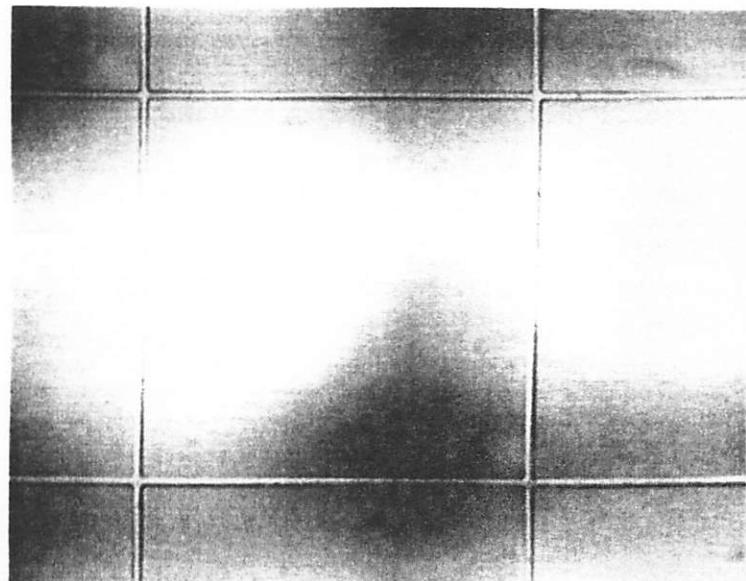


Abb. 19



Unterätzte Streifen
aus Siliciumnitrid
Streifenbreite 5 µm
Streifendicke 0,14 µm
Ätzzeit 2,5 h

Gitter mit
Raster 200 µm



Streifen 6 mm lang

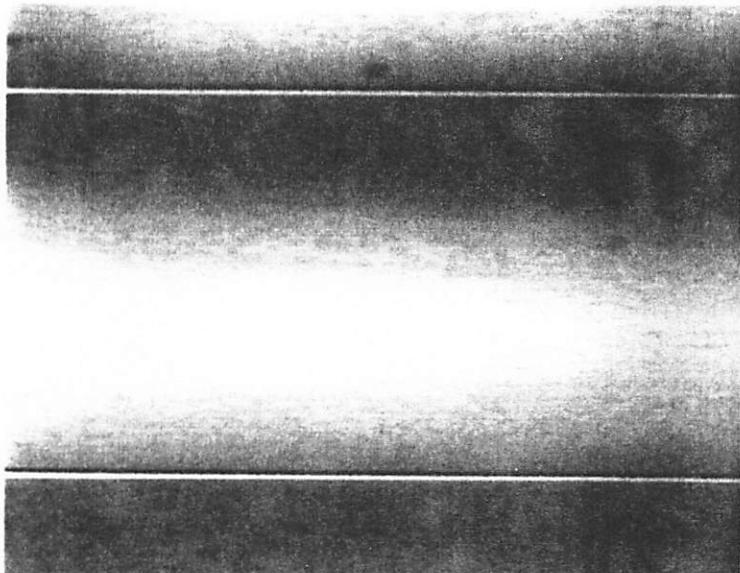
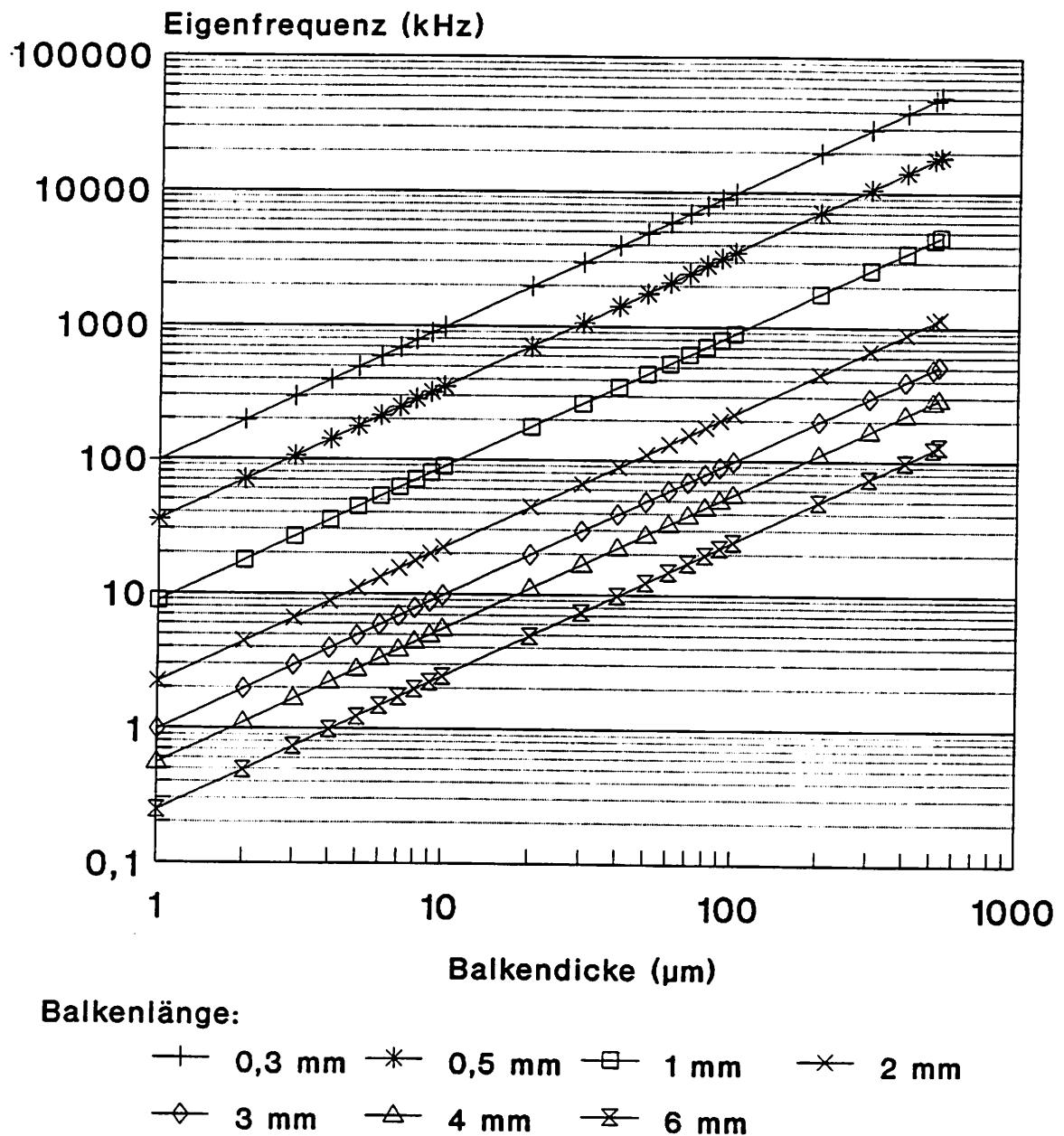


Abb. 20

Grundschwingung von Biegebalken Frequenzanaloge Sensoren in Si



Zugempfindlichkeit von Biegebalken Frequenzanaloge Sensoren in Si

