

# 1.Zwischenbericht

zum

BMFT-Verbundprojekt  
"Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung  
frequenzanaloger Sensoren"

Teilvorhaben  
"Entwicklung der technologischen Grundlagen  
mit dem Schwerpunkt Silicium-Mikromechanik"

Förderkennzeichen 13 AS 01180

Berichtszeitraum: 1.7.-31.12.1989

Robert Bosch GmbH  
Postfach 106050  
7000 Stuttgart 10

Projektleiter: Dr.J. Schweikhardt

## Inhalt:

### Zielsetzung

#### Zusammenfassung

- Stand der Arbeiten
- Geplanter Fortgang der Arbeiten

#### Einzeldarstellung:

1. Ergebnisse der Literatur- und Patentrecherche
2. Anisotropes Ätzen in KOH
3. Laserbearbeitung von Silicium

## Zielsetzung:

Die Bedeutung des Projektes für RB liegt in der Erweiterung des technologischen Spektrums miniaturisierter Sensoren, die auch in einer ungünstigen Umgebung wie z. B. im Automobil eingesetzt werden können. Im Kraftfahrzeug gibt es vielfältige störende Einflüsse zu beachten wie die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV).

Als Entwicklungsziel nach Abschluß des Projektes ist ein Kraftsensor vor allem auch für größere Kräfte und ein resonanter Silicium-Membran-drucksensor angestrebt.

Es gilt, daß Frequenzen wesentlich störsicherer übertragen werden können als analoge elektrische Signale wie z. B. Spannung oder Strom. Zudem lassen sich Frequenzen mit großer Genauigkeit messen, wobei die mögliche Genauigkeit allerdings mit der zur Verfügung stehenden Meßzeit gekoppelt ist. Bei frequenzanalogen Sensoren, deren Eigenfrequenz von der Meßgröße abhängt, können Analog-Digital- bzw. Spannungs-Frequenz-Wandlung und die damit verbundenen Probleme der Zuverlässigkeit, der Ansprechzeiten und der Kosten entfallen. Durch die Miniaturisierung mit Hilfe mikromechanischer Technologien eröffnen sich Möglichkeiten zur Integration der Resonanzsensoren mit einer mikroelektronischen Informationsverarbeitung zu einem Mikrosystem.

Vorteile der frequenzanalogen Sensoren sind außer der besseren Genauigkeit und Auflösung als bei analogen Sensoren auch die geringere Drift und der geringere Leistungsbedarf.

RB wird im Rahmen seines Teilprojektes den Schwerpunkt der Arbeiten auf die Entwicklung der Technologie zur Herstellung mikromechanischer Resonatoren aus einkristallinem Silicium legen.

Im Gegensatz zu Sensoren aus Quarz ist bei denen aus Si eine Fremd-anregung nötig. Die Schwingungen sollen durch piezoelektrische Schichten aus z. B. ZnO angeregt werden. Die Abscheidung solcher Schichten auf Silicium wird bei dem Forschungsinstitut der FFMU erarbeitet.

Eine Aufgabe dabei ist, eine hohe Güte des Schwingers zu erreichen, damit eine hohe Auflösung erreicht wird. Ein Sensor muß deshalb mit kleinen Amplituden betrieben werden. Außerdem ist eine Temperaturkompensation nötig, da die Temperatur zumindest nicht mit der erforderlichen Genauigkeit konstant gehalten werden kann. Ein Ausweg besteht in einem zweiten Schwinger ohne Belastung als Referenz.

## Zusammenfassung:

### Stand der Arbeiten:

- Es wurde die Literatur und die weltweite Patentlage recherchiert.
- Die Meßtechnik zur Bestimmung der Ätztiefe wurde auf ihre Eignung überprüft (Genauigkeit und Messung größerer Flächen).
- Begonnen wurde mit der Untersuchung anisotrop in Kaliumhydroxid geätzter Silicium-Strukturen auf ihre Eigenschaften, insbesondere der Gleichmäßigkeit über eine Struktur und über einen ganzen 4"-Wafer.
- Es wurde untersucht, ob und wie ein Nd/YAG-Laser zur Strukturierung und zur Herstellung von Durchgangslöchern in Silicium-Wafern eingesetzt werden kann.

### Geplanter Fortgang der Arbeiten:

- Nach der Auswertung der mit Laser gebohrten Löcher soll die Justierung des Lasers für kleinstmögliche, senkrechte Durchgangslöcher verbessert werden.
- Zum Einsatz für die Versuche zur doppelseitigen Belichtung wird eine Maske mit konzentrischen Ringen entworfen und hergestellt. Die doppelseitige Belichtung wird dann durch zwei getrennte Belichtungen mit dazwischen liegendem Laserbohren und Reinigung der Löcher erreicht.
- Für den Einsatz des Prinzips als Sensor wird an der Auslegung und und an der Dimensionierung weitergearbeitet. Dazu müssen verschiedene Modellen und Grundstrukturen und ihre Schwingungsfrequenzen untersucht werden.
- Als erste Grundstrukturen sollen doppelseitig geätzte Stimmgabeln und Membranen hergestellt werden.

## Einzeldarstellung:

### 1. Ergebnisse der Literatur- und Patentrecherche

#### 1.1 Literaturrecherche

Es wurde eine On-line-Literaturrecherche über das Fachinformationszentrum Technik durchgeführt. Dabei wurden die folgenden deutschen und englischen Suchbegriffe verwendet:

Sensor oder Transducer oder Meßwertaufnehmer  
und (Silicium oder Quarz)  
und (frequenzanalog oder resonant oder Schwingungs-...)  
oder  
sensor or transducer  
and (silicon or quartz)  
and (resonator or resonant or vibrating or frequency output).

Für das Material Silicium ergaben sich insgesamt nur 61 zutref-



fende Quellen, wovon sich 18 speziell auf Drucksensoren bezogen (Abbildung 1). Bei Quarz ergaben sich 187 Treffer, was zeigt, daß auf dem Gebiet der frequenzanalogen Sensoren ein Vorsprung der Quarztechnologie vorhanden ist.

## 1.2 Patentrecherche

Über die Firma ORBIT in USA wurde in der von der britischen Derwent Publications Ltd. erstellten Patentdatenbank mit den gleichen Suchwörtern wie bei der Literatur recherchiert. Dabei wurden nur 14 Patente zu Siliciumsensoren gefunden. Dazuhin konzentrieren sich diese Patente auch auf wenige Anmelder (sechs Anmeldungen von J.C. Greenwood von der Firma STC Technology Ltd. in Harlow, GB). Bei einer ergänzenden Suche in der Datenbank JAPIO, die die nur in Japan angemeldeten Patente erfaßt, waren fünf von sechs Treffern sehr eng verwandte Patente von Firma Yokogawa Electric Corp. Abbildung 2 zeigt die Zusammenstellung, wobei die älteren Patente in der Datenbank WPI und die neueren, seit 1981 erfaßten, in der Datenbank WPIL enthalten sind.

Bei Quarz ergab die allgemeine Datenbank 19 zum Thema passende Quellen. Dazu kamen in der Datenbank JAPIO sechs Treffer, davon drei von Firma Toyo Communication Equipment Co. Ltd., zwei von Sumitomo Bakelite Co. Ltd. und einer von Hitachi Ltd. Die geringe Anzahl der genannten Quarzpatente kommt offensichtlich von der Beschränkung auf angemeldete Sensoren, während die weltweit laufenden Aktivitäten zur Technologie damit nicht vollständig erfaßt wurden.

## 2. Anisotropes Ätzen in KOH

Ausgehend von der vorhandenen Silicium-Ätztechnik mit KOH wurden spezielle Fragen behandelt. Die Grundsatzversuche im Projekt sollen dazu dienen, die spezifischen Technologieschritte zur Herstellung von Membranen, Zungen, Stegen für frequenzanaloge Sensoren zu erarbeiten.

### 2.1 Meßverfahren für Ätztiefe

Die Ätztiefe wird optisch gemessen. An einem Mikroskop sind in allen drei Koordinaten induktive Wegaufnehmer installiert. Während die Verschiebungen in der Ebene des Mikroskoptisches mit dem Fadenkreuz und den digitalen Anzeigen der Wegaufnehmer gemessen werden können, wird die Ätztiefe aus dem Betrachtungsabstand gewonnen. Die Differenz der Fokussierung auf ungeätzte Oberfläche und auf geätzte Struktur ergibt die Ätztiefe (Abbildung 3).

An zwei Wafern mit je zwölf geätzten Vertiefungen wurden statistische Versuche zur Meßgenauigkeit des Verfahrens durchgeführt. Es wurden je Wafer und Ätzschritt 40 Werte gemessen. Statistisch ausgewertet wurde rechnerisch und grafisch auf Bosch-Kontrollkarten mit Wahrscheinlichkeitsnetz. Daraus ergab sich, daß die Standardabweichung der Meßwerte nahezu unabhängig von der Ätztiefe und damit fast allein durch das Meßverfahren gegeben war. Der Variationskoeffizient nahm demzufolge mit der Ätztiefe ab. Die durch die Meßanordnung erreichbare Genauigkeit liegt bei einer Standardabweichung von  $s = 2,5 \mu\text{m}$  bei Ätztiefen bis über  $500 \mu\text{m}$ .

## 2.2 Ätzergebnisse

Für die Versuche wurden einseitig polierte, (100)-orientierte 4"-Siliciumwafer verwendet. Die Ätzversuche in 30 % KOH bei 85 °C zeigten von Beginn an bis zum Durchätzen des Wafers eine konstante Ätzgeschwindigkeit von 94  $\mu\text{m}/\text{h}$  in die Richtung senkrecht zur Oberfläche.

Die für die anisotropen Ätzeigenschaften wichtigen {111}-Ebenen haben eine zwar sehr viel kleinere, aber durchaus meßbare Ätzrate, die bei genaueren Aufgaben und tiefen Ätzungen durchaus von Bedeutung sein kann. Bei den durchgeführten Ätzversuchen wurde eine Maske standardmäßig am Waferflat orientiert und es zeigte sich dann eine laterale Unterätzung an der Maskenkante von 8,25  $\mu\text{m}$  in 310 Minuten. Auf eine <111>-Richtung umgerechnet wären dies 6,74  $\mu\text{m}$ . Diese Unterätzung entspräche einer Ätzrate von 1,3  $\mu\text{m}/\text{h}$ . Wegen der stets vorhandenen Fehlorientierung von Maske zu Kristallrichtung bedeutet dies eine Obergrenze der Ätzrate unter diesen Bedingungen für die <111>-Richtung. Es wurde also ein nominelles Anisotropieverhältnis der Ätzraten ( $\langle 100 \rangle / \langle 111 \rangle$ ) = 72,4 erreicht.

Stark fehlorientierte Strukturen oder Bögen mit kleinem Radius werden innerhalb kurzer Zeit sehr stark unterätzt und bilden neue, kleinere Strukturen, deren Begrenzungen sich durchgehenden {111}-Ebenen annähern.

Wafer werden nach dem Sägen geläppt und zur Reinigung und Beseitigung von neugebildeten gestörten Schichten geätzt. Bei einseitig polierten Wafers zeigt die Rückseite noch die starke Ätzstruktur. Beim Membranätzen besteht die Gefahr, daß eine nicht kratzerfreie Rückseite trotz Passivierung mit Siliciumnitrid zu Löchern in den geätzten Strukturen führt. Durchätzungen bieten andererseits die Möglichkeit, optisch die Gesamtwafertiefe zu bestimmen, die nach den Spezifikationen des Herstellers bei dieser für die Mikroelektronik weniger bedeutenden Größe um 20  $\mu\text{m}$  schwanken darf, was nach unseren Messungen auch ausgenutzt wird.

## 2.3 Gleichmäßigkeit der Ätzung

### a. Gleichmäßigkeit über einen Wafer

In Abbildung 4 sind die je 10 mm x 10 mm großen Ätzöffnungen dargestellt, deren Gleichmäßigkeit vermessen wurde. Die Ätztiefen der zwei mittleren Spalten (1S und 2S) bzw. Zeilen (1W und 2W) wurden in Abbildung 5 aufgetragen, um systematische Ätzgeschwindigkeitsunterschiede in Abhängigkeit von der Waferlage in der Ätzlösung zu erhalten. Die Auftragung zeigt, daß keine signifikanten Unterschiede auftreten. Die Gesamtschwankung der Meßwerte betrug dabei 4,8  $\mu\text{m}$ , also nur 1,1 % vom Mittelwert. Über alle Werte gerechnet ergab sich nach einer Ätzzeit von 4,5 h eine mittlere Ätztiefe von 423,7  $\mu\text{m}$  mit einer Standardabweichung von 3,1  $\mu\text{m}$  und einem Variationskoeffizient von 0,7 %.

### b. Ebenheit einer geätzten Membran

Vermißt man eine einzelne Membran, so zeigt sich bei einer nicht durch Ätzstopp vorgegebenen Fläche eine gewölbte Ätzfront. Abbildung 6 zeigt den optisch gemessenen Verlauf über die Fläche nach 5 Stunden 10 Minuten. Noch deutlicher wird die Einkerbung am Rand durch die stark überhöhte Darstellung

eines Stufenmeßgerät (Sloan Dektak II) gezeigt (Abbildung 7). Wegen der großen Ätztiefe kann damit jedoch nicht der ganze Verlauf der Ätzung dargestellt werden (Meßgrenze 65  $\mu\text{m}$ ). Die Randeinkerbung im Vergleich zur Membranmitte beträgt 9 bis 12  $\mu\text{m}$  und damit etwa 2 bis 3 % der Ätztiefe.

### 3. Laserbearbeitung von Silicium

Ziel des Lasereinsatzes ist sowohl die Möglichkeit, mit Laser-ätzen spezielle Strukturen herzustellen und Stege zu durchschneiden, als auch mit dem Laser Löcher in einen Wafer zu bohren, um damit Durchgänge zu schaffen oder sie als Justiermarken für zweiseitige Belichtung einzusetzen. Als Vorarbeit dazu wurde untersucht, ob ein Nd/YAG-Laser dafür geeignet ist und wie er für pyrolytisches Bearbeiten von Silicium eingesetzt werden kann.

#### 3.1 Absorption von Laserlicht in Silicium

Für Arbeiten an dem Projekt steht ein gepulster Neodym/Yttrium-Aluminium-Granat-Laser (Nd/YAG) mit einer Wellenlänge von 1 064 nm, entsprechend 1,165 eV, und einer auf Dauerstrich umgerechneten Maximalleistung von 18 W zur Verfügung.

Die Bandkante für den indirekten Übergang von Si beträgt bei Raumtemperatur 1,126 eV, entsprechend 1 101 nm, der Absorptionskoeffizient für Nd/YAG-Laser ist also sehr gering. Bei Raumtemperatur erreicht er für reines Silicium nur ca. 10,5  $\text{cm}^{-1}$ . Dies bedeutet, daß in einem Wafer der Dicke 525  $\mu\text{m}$  etwa 40 % der eingestrahlten Energie absorbiert werden. Die damit verbundene Erwärmung führt zu einer Erhöhung des Absorptionskoeffizienten. Der Verlauf der optischen Absorption von reinem Silicium in der Nähe der Bandkante bei verschiedenen Temperaturen ist in Abbildung 8 zu sehen.

Temperaturabhängigkeit des Absorptionskoeffizienten (nach Bäuerle):

$$\alpha = \alpha_0 \cdot \exp(T/T_0)$$

Bei Annahme von  $\alpha_0 = 10 \text{ cm}^{-1}$  und einem Temperaturanstieg in die Nähe des Schmelzpunktes von 1 412 °C erhält man mit  $T/T_R = 1\,650 \text{ K}/300 \text{ K}$  ein  $\alpha$  von 2 450  $\text{cm}^{-1}$ . Nach dem Lambertschen Gesetz ist damit die eingestrahlte Lichtintensität bereits innerhalb 19  $\mu\text{m}$  auf 1 % abgesunken.

Die Ursachen für erhöhte Absorption liegen in zwei Bereichen:

- Die Absorption ist primär abhängig von der Größe der Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband, die eine ziemlich lineare Abnahme mit steigender Temperatur besitzt.
- Starke Einflüsse erzeugen aber auch freie Ladungsträger, das Gitter mit seinen Gitterfehlern, Verunreinigungen, Ladungsträger von Verunreinigungen und Gitterfehlern und die Dotierung.

Die verschiedenen Einflüsse tragen zusammen dazu bei, daß der YAG-Laser zum Bearbeiten von Silicium geeignet ist.

### 3.2 Laserleistung

Die maximale Leistung des Lasers beträgt auf Dauerstrich umgerechnet 18 W. Bei einer maximalen Pulsfolgefrequenz von 1 500 Hz, bei der die Pulshöhe noch nicht abnimmt, und einer Pulslänge von 70 bis 150 ns ergäbe sich für Rechteckpulse ein Puls zu Pause-Verhältnis über 1 : 4 000. Diese Pulse müssen damit zur Erreichung der 18 W Dauerleistung eine Höhe von über 72 kW haben. Berücksichtigt man die sehr spitze tatsächliche Pulsform, so beträgt die Spitzenleistung also weit über 100 kW. In unserem Fall wurde mit 400 Hz gearbeitet. Mit diesen Überlegungen ist zu verstehen, warum auch bei kleinen Absorptionskoeffizienten noch ein beträchtlicher Effekt zu erzielen ist.

Die Bohrlöcher dieser Vorversuche wurden im Handbetrieb mit Nachfokussieren vor jedem Loch erzeugt. Es genügte jeweils ein Daumendruck auf den Handauslöser, d. h. also etwa 0,1 s entsprechend 40 Impulse. In einigen Picosekunden wird also die Energie übertragen und das Material lokal erhitzt.

### 3.3 Bohren von Löchern durch einen Silicium-Wafer

Es wurde Proben von der polierten und von der nicht polierten Seite her beschossen. Dabei waren die Proben auf beiden Seiten mit Si-Nitrid beschichtet. Der Einfluß der Maskierschicht  $\text{Si}_3\text{N}_4$  auf die Absorption kann dabei vernachlässigt werden, da sie im Bereich von 1  $\mu\text{m}$  Wellenlänge ziemlich gut durchlässig ist.  $\alpha$  liegt vermutlich im Bereich von  $10 \text{ cm}^{-1}$ . Dazuhin ist die Schicht mit 0,14  $\mu\text{m}$  sehr dünn. (Der Schmelzpunkt von Si-Nitrid liegt bei 1 900 °C.)

Die Abbildungen 9 und 10 zeigen in Silicium-Wafern der Dicke 525  $\mu\text{m}$  gebohrte Löcher, aufgenommen mit Licht- und Rasterelektronenmikroskop. Insbesondere die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen zeigen, daß der Laserstrahl bei diesen Versuchen nicht senkrecht auf die Probe traf und von einer Abweichung von ca. 30° auszugehen ist. Die größeren Eintrittsöffnungen haben Durchmesser von rund 60  $\mu\text{m}$ , die Austrittsöffnungen auf der anderen Seite 35  $\mu\text{m}$ .

Bei der von uns gewählten Betriebsart wird das verdampfte bzw. herausgeschleuderte Material rund um das Loch niedergeschlagen. Es sitzt dort aber nur locker auf der Unterlage und kann mit den üblichen Ätzlösungen als Reinigungsmittel leicht wieder entfernt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, daß in dem gebohrten Loch sehr leicht zu ätzende Ebenen freiliegen, so daß sich auch das Loch und seine Außenkante sehr schnell vergrößern. Abbildung 11 zeigt Löcher und ihre Umgebung nach 5 Minuten in heißer KOH.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, daß YAG-Laserlöcher zur ausreichend genauen Justierung von Vorder- zu Rückseite eines Si-Wafers verwendet werden können. Voraussetzung ist eine genaue Justierung des Lasers nach Lage des Einschußloches und des genau senkrechten Auftreffwinkels und eine folgende, angepaßte Reinigung der Lochumgebung.

# Frequenzanaloge Sensoren

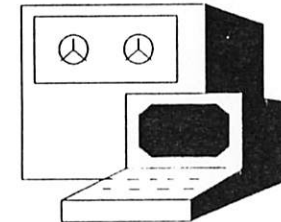
## Basis Silicium

<u>Aufteilung</u>	<u>Zahl der Quellen</u>
Allgemeine Veröffentlichungen	40
speziell: Drucksensoren	18
Beschleunigungssensoren	1
Dampfsensoren	2
	-----
Summe der verwendbaren Quellen	61
Mikromechanik allgemein (nicht frequenzanaloge Sensoren)	17
Doppelangabe ZDE - INSPEC	8
Unbrauchbare Quellenangaben	24
	-----
Summe der erhaltenen Quellen	110

ZWD/Schweikhardt

Literaturrecherche ZDE und INSPEC

Juli 1989





# Frequenzanaloge Sensoren aus Silicium

## Patentrecherche

### Ergebnis

WPIL    WPI    JAPIO

Suchwörter: Sensor, Silicium,  
Resonator, Mikromechanik

Patente zum Projekt

13

1

6

Patente allgemein zur Mikro-  
mechanik

6

0

0

Unbrauchbare Patente

12

1

16

Summe der angegebenen Quellen

31

2

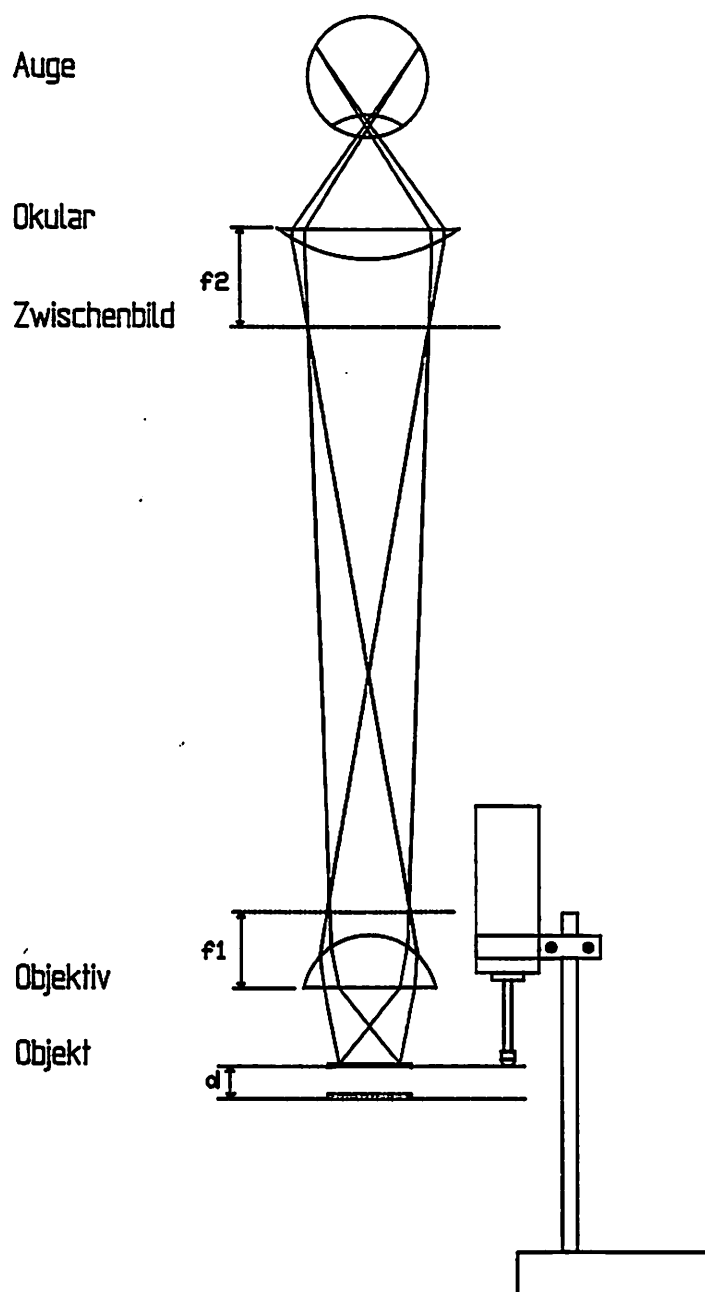
22

ZWD/Schweikhardt

Patentrecherche bei ORBIT

21.+23.11.1989

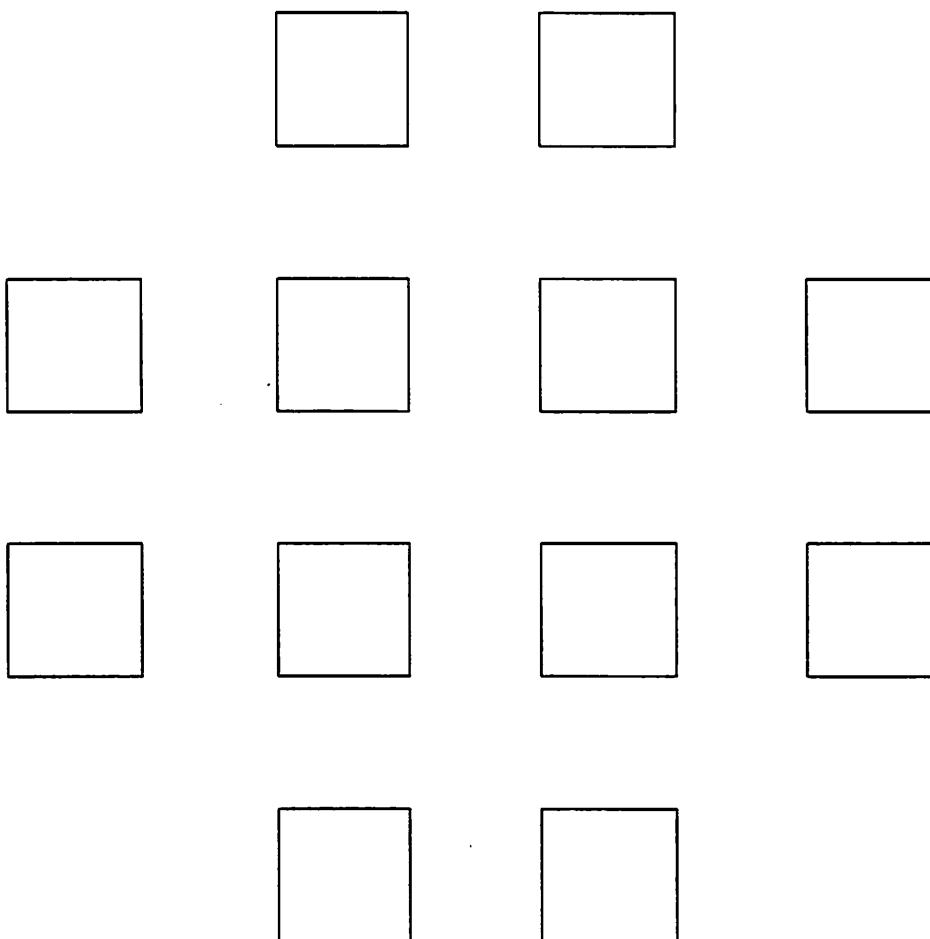






MEMBRAN

081189



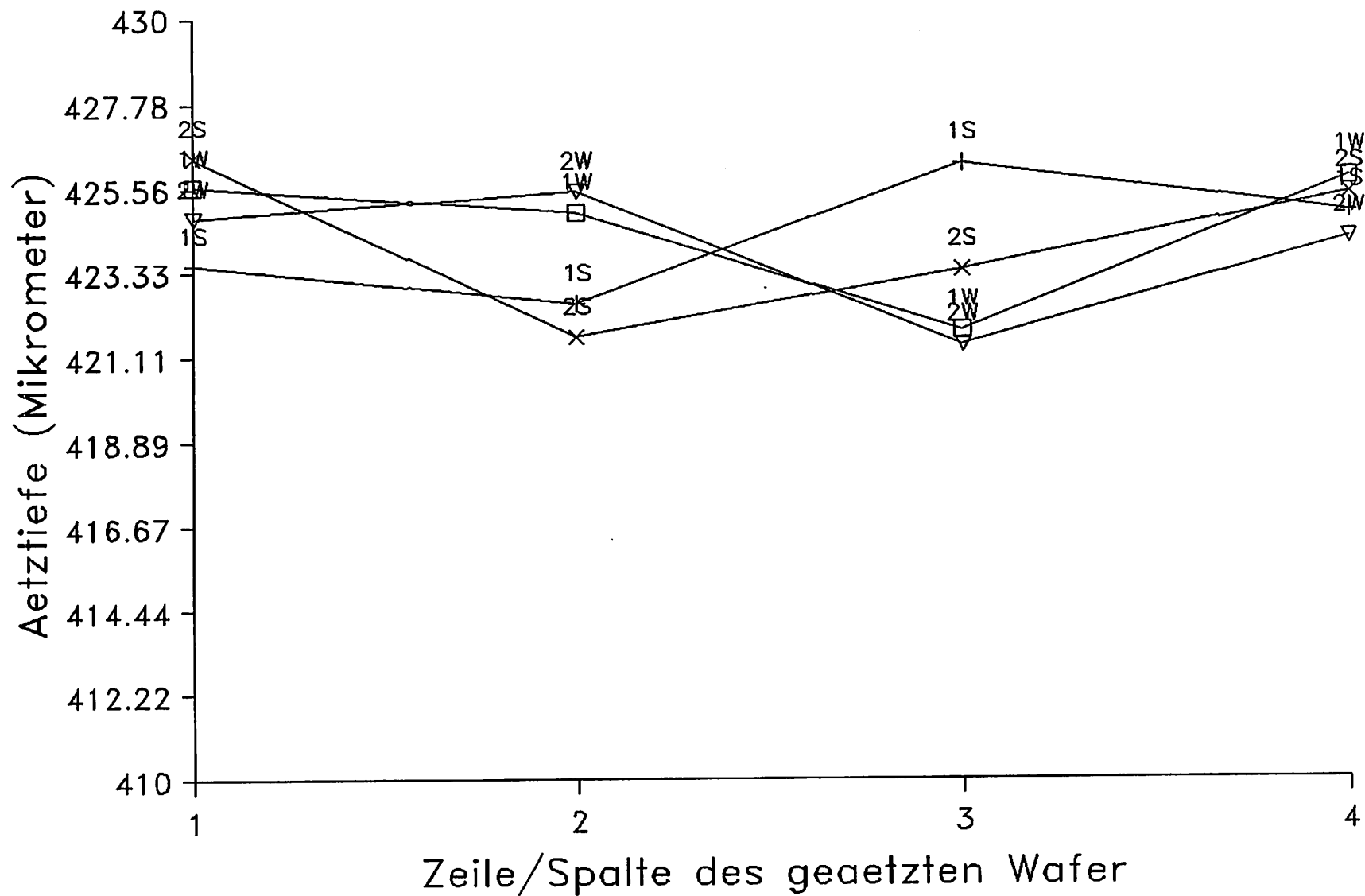
**BOSCH**

ZWD



Ätzzeit 4 Std 30 Min, 30 % KOH bei 85°C

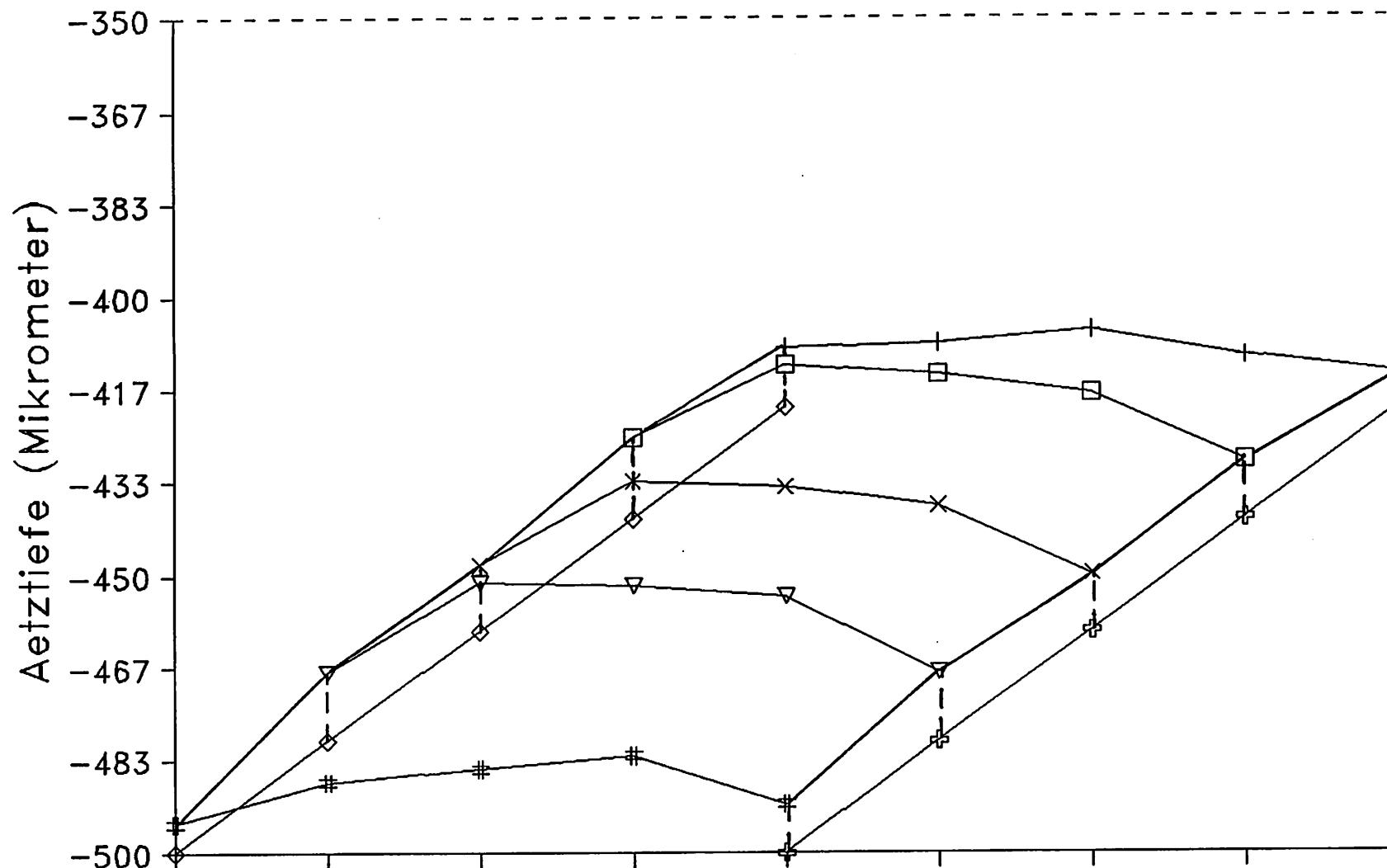
Messung über zwei 4"-Wafer





Ätzzeit 5 Std 10 Min, 30 % KOH bei 85°C

Membrane von 10 mm x 10 mm



Messung ueber die geätzte Membran

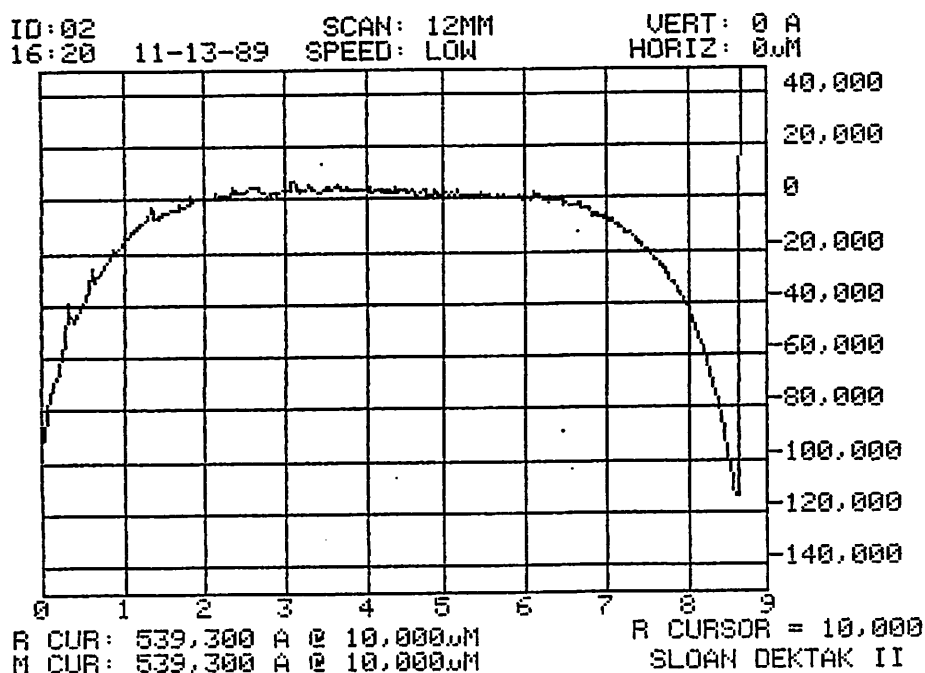
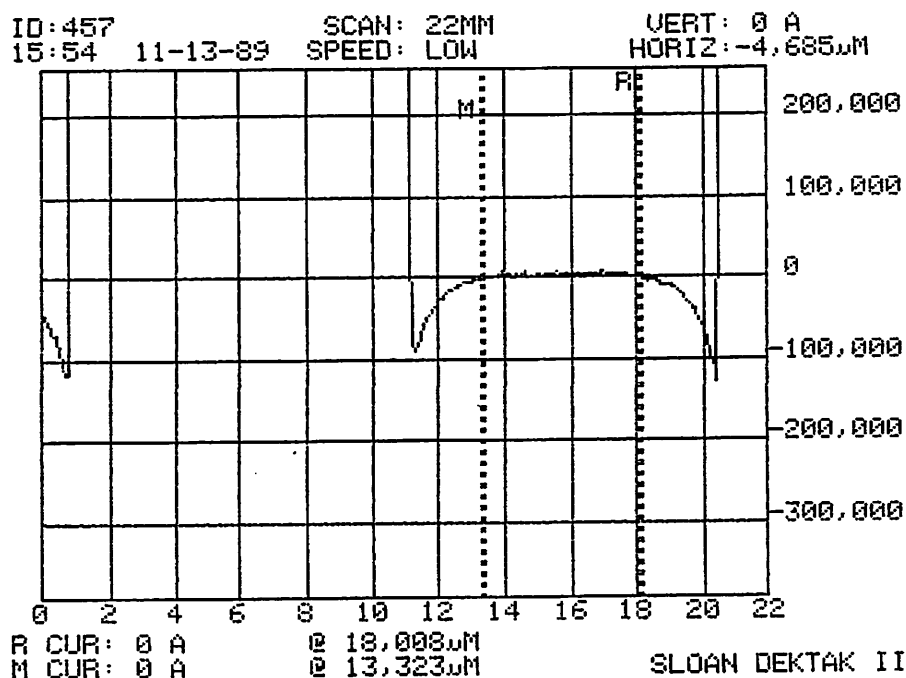


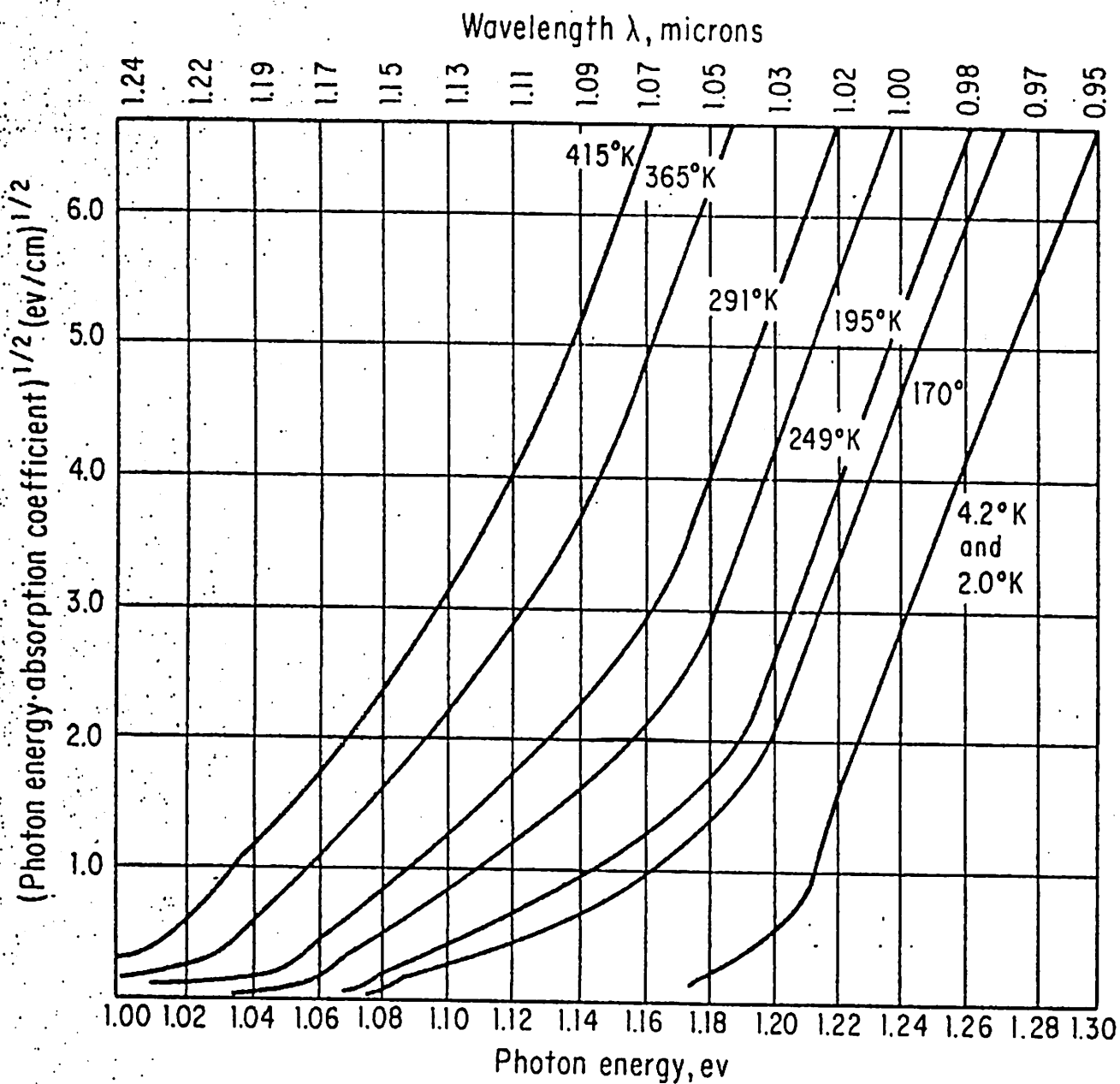
Ätzzeit 4 h 30 min

Probe FAS 2

Randeinkerbung 9  $\mu\text{m}$  bis 12  $\mu\text{m}$  = 2 % bis 3 % der Ätztiefe

( Mittelwert der Ätztiefe 423  $\mu\text{m}$  )

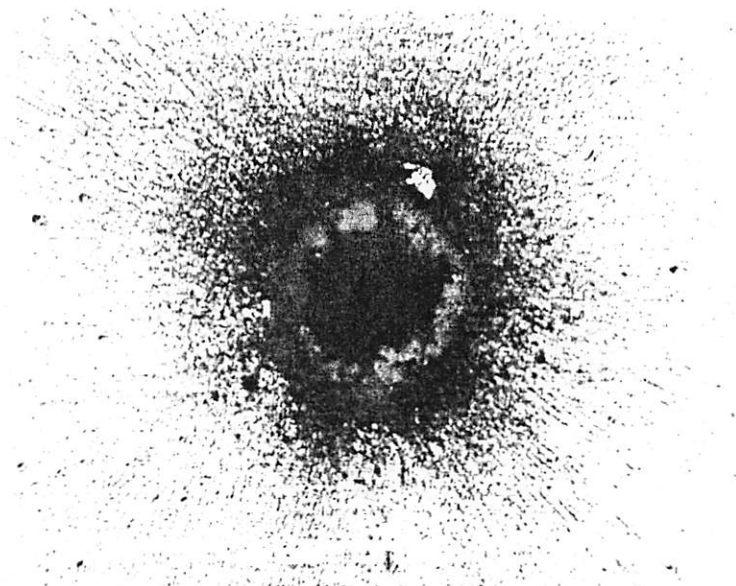




(Nach MacFarlan, McLean, Quarrington und Roberts)

Probe 3 Loch 4

Eintrittsöffnung



100 μm

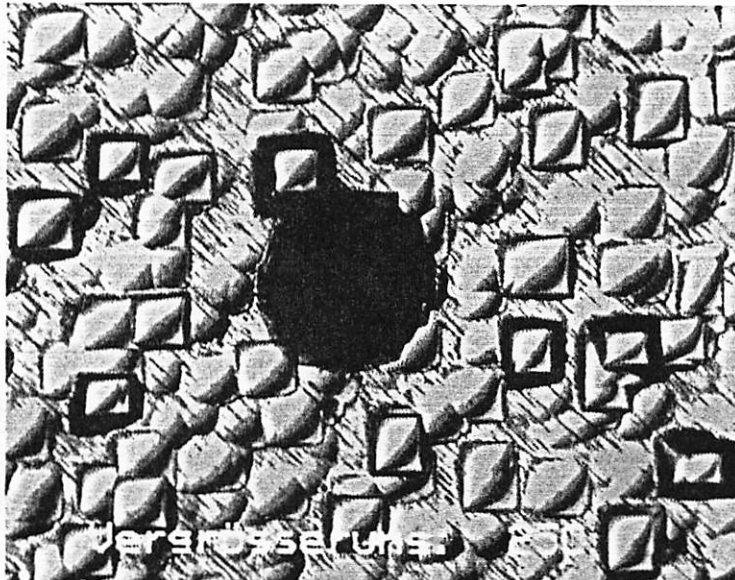
Austrittsöffnung



100 μm

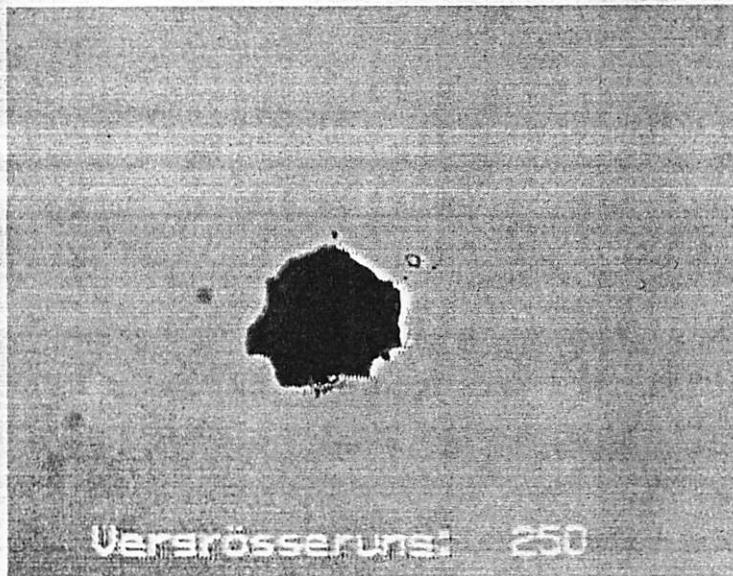
Probe 1 Loch 6

Eintrittsöffnung



100  $\mu\text{m}$

Austrittsöffnung



100  $\mu\text{m}$