

**Inhaltsverzeichnis**

**Inhaltsverzeichnis ..... 1**

**1. Einleitung ..... 3**

**2. Channeling ..... 4**

    2.1. Der Channeling-Effekt ..... 4

        2.1.1. Das Kontinuummodell ..... 6

        2.1.2. Der axiale Channeling-Effekt ..... 7

        2.1.3. Der planare Channeling-Effekt ..... 7

        2.1.4. Das Oberflächen-Channeling ..... 8

**3. Berechnung der Kurvenform des Spiegels ..... 11**

**4. Aufbau ..... 13**

    4.1. Der Kristall ..... 13

        4.1.1. Ermittlung der Stufenrichtung auf der Waferoberfläche ..... 13

        4.1.2. Bearbeitung des Wafers ..... 17

    4.2. Anforderungen an die Biegevorrichtung ..... 17

        4.2.1. Der piezoelektrische Effekt ..... 18

        4.2.2. Ansteuerung der Piezo-Stellelemente ..... 19

    4.3. Experiment- und Piezohalterung ..... 19

    4.4. Die Befestigung des Silizium-Streifens ..... 21

        4.4.1. Untere Halterung ..... 21

        4.4.2. Obere Halterung ..... 24

    4.5. Gesamtaufbau ..... 25

**5. Erste Messungen ..... 26**

    5.1. Test der Auflageflächen ..... 26

    5.2. Test der Fokussierung mit Laserlicht ..... 27

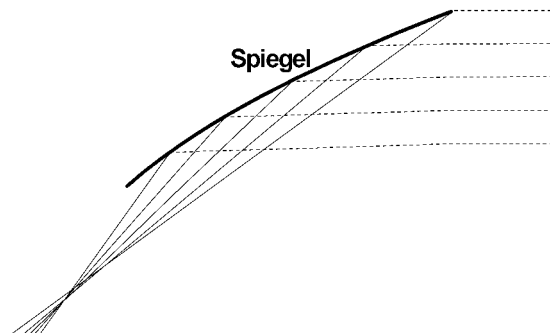
## **Inhaltsverzeichnis**

<b>6. Geplante Experimente mit der Strahlfokussierung .....</b>	<b>35</b>
6.1. Test der Strahlfokussierung am $\alpha$ -Strahl .....	35
6.2. Lokale Bestrahlung von Quarz.....	36
6.3. Pinnen von Versetzungen.....	37
<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>37</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>39</b>
Technische Daten .....	39
Piezo-Stellelemente .....	39
D/A-Karte.....	43
Netzteil und Verstärker .....	43
Beschreibung der erstellten Computer-Programme .....	43
Programm zur Berechnung von Strahlenverlauf und Spiegelform .....	43
Programm zur Piezo-Steuerung .....	44
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>46</b>
<b>Danksagung.....</b>	<b>47</b>

## 1. Einleitung

Die vorliegende Arbeit basiert auf einem Vorschlag von Herrn Prof. Dr. K. Maier und beschreibt den Aufbau und erste Tests einer Strahlfokussierung.

Mittels des Oberflächen-Channeling soll dabei der  $\alpha$ -Strahl von der gebogenen Oberfläche eines Silizium-Einkristalls reflektiert und auf einen Strichfokus gebündelt werden. Der Vorteil dieser Art der Fokussierung besteht in der Unabhängigkeit der Fokussierung von Energie und Teilchenart<sup>1</sup>.



**Abbildung 1: Diese Skizze zeigt die Fokussierung an einem gebogenen Spiegel, wie sie in dieser Arbeit benutzt wird**

Damit ein  $\alpha$ -Teilchen an der Oberfläche reflektiert wird, muss der Einfallswinkel zur Oberfläche kleiner als der kritische Winkel sein. Dieser kritische Winkel, auch Lindhard-Winkel genannt, liegt für 56 MeV  $\alpha$ -Teilchen und einen Spiegel aus Silizium, bei  $\phi=0,0044^\circ$ . Durch die geringe Größe dieses Winkels ist es nötig, die Biegung des Kristalls mit einer Genauigkeit von mehr als  $0,1\mu\text{m}$  einstellen zu können.

Um diese Genauigkeit zu erreichen wurden zum Biegen des Kristalls Piezo-Stellelemente eingesetzt. Zusätzlich ermöglichen die Piezo-Stellelemente eine Regelung der Biegung während sich die Apparatur im Vakuum befindet. Bei der Befestigung des Silizium-Kristalls an den Piezo-Stellelementen war zu berücksichtigen, dass ein seitliches Verbiegen des Kristalls verhindert wird, um eine Fokussierung zu ermöglichen.

Im Folgenden soll zunächst auf den Effekt des Channelings näher eingegangen werden. Die anschließenden Kapitel befassen sich mit der Apparatur, ihrem Aufbau und den ersten Tests.

---

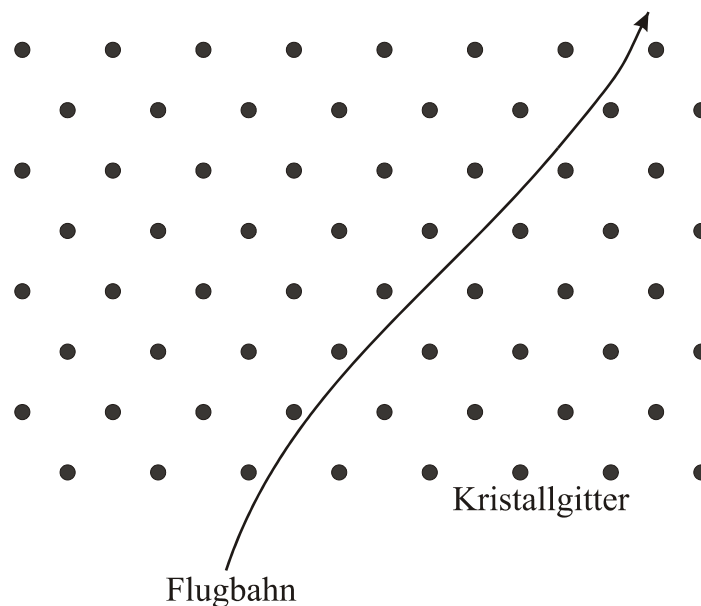
<sup>1</sup> nur die Bedingung des kritischen Winkels muss erfüllt sein (siehe 2.1.2 und 2.1.3).

# Channeling

## 2. Channeling

### 2.1. Der Channeling-Effekt

Beim Channeling-Effekt (Gitterführungseffekt) können Ionen durch Vielfachstreuung sehr tief in einen Kristall eindringen. Die Kristallachsen und Ebenen wirken mit ihren Coulomb-Potentialen dabei wie Kanäle für die eingestrahelten Ionen. Ist der Winkel zwischen Flugbahn und Kristallachse zu groß, so kann der Channeling-Effekt nicht mehr auftreten. Dieser Grenzwinkel, ab dem der Channeling-Effekt nicht mehr auftreten kann, wird „kritischer Winkel“ genannt.



**Abbildung 2: Beim Channeling-Effekt wird das Teilchen durch viele Kleinwinkelstreuungen mit den Atomen des Kristalls in dem Kanal zwischen den Kristallebenen gehalten**

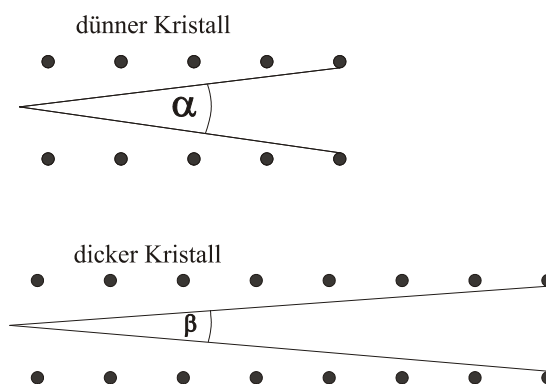
Der Channeling-Effekt wurde erstmals 1912 von Stark [STA12] vorhergesagt, nach dem durch Laue [LAU12] im selben Jahr der regelmäßige Aufbau von Kristallen nachgewiesen worden war. Das von ihm vorgeschlagene Experiment zur Untersuchung des Effektes wurde jedoch damals nicht durchgeführt<sup>2</sup>. Erst nach 1960 begann die weitere Untersuchung dieses Effektes und 1962 sagten Robinson und Oen [ROB63] voraus, dass Kupferatome in Kupfer „channeln“ würden, wenn sie in Richtung einer Gitterebene in den Kristall eingestrahlt werden. Diese Vorhersage des Effektes beruhte auf einer Computersimulation dieses Experiments.

---

<sup>2</sup> eventuell auf Grund der Wirren des 1. Weltkriegs [MOR73]

## Channeling

Thompson und Nelson haben 1963 die Transmission von Protonen einer Energie von 50keV durch eine Goldfolie gemessen [NEL63]. Dabei zeigte sich, dass der Transmissionsstrom stark ansteigt, sobald der Winkel des einfallenden Protonenstrahls zu einer kristallographischen Ebene kleiner als der „kritische Winkel“ von  $7^\circ$  wird [MOR73]. Dieser kritische Winkel hängt dabei von dem Kristallmaterial, der Ionenart und der Energie der Ionen ab, aber nicht von der Dicke des Kristalls (siehe 2.1.2. und 2.1.3.). Daraus folgt direkt, dass es sich bei dem Channeling-Effekt nicht einfach nur um den Effekt eines „offenen“ Kanals handelt, denn in diesem Falle müsste der kritische Winkel und die Intensität der Transmission mit der Dicke abnehmen.



**Abbildung 3: Der "offene" Kanal, d.h. der Öffnungswinkel eines Kanals unter dem eine direkte Transmission stattfinden kann, nimmt mit der Dicke der Probe ab**

Verschiedene Theorien führten in der Folgezeit zum besseren Verständnis des Channeling-Effekts. Die bekannteste ist die Theorie von Lindhard (1965) der zeigte, dass man die Wirkung innerhalb des Kristalls mit einem kontinuierlichen Potential beschreiben kann.

# Channeling

## 2.1.1. Das Kontinuummodell

Die Wechselwirkung eines Ions mit einem Kristallatom kann durch ein Potential  $V(r)$  beschrieben werden. Für dieses Potential existieren mehrere Näherungen (Lindhard, Moliere [MOL47], und Bohr [BOH48]). Im Folgenden soll aber nur noch auf die bekannteste und in dieser Arbeit benutzte Näherung, die Lindhardnäherung, eingegangen werden.

Das Lindhard-Standard-Potential:

$$V(r) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \left( 1 - \frac{r}{\sqrt{r^2 + C^2 a^2}} \right) \quad (1)$$

$Z_1$ : Kernladungszahl des Ions

$Z_2$ : Kernladungszahl des Kristallatoms

$e$ : Elementarladung

$C$  ist ein anpassbarer Parameter ( $\sim \sqrt{3}$ )

$a$  ist der Abschirmradius der Elektronen; normalerweise gilt:

$$a = 0,4685 \cdot \left( Z_1^{\frac{2}{3}} + Z_2^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ \AA} \text{ für ein teilweise ionisiertes Atom und}$$

$$a = 0,4685 \cdot Z_2^{-1/3} \text{ \AA} \text{ für ein vollständig ionisiertes Atom.}$$

Klassisch unterscheidet man beim Channeling zwischen zwei Effekten:

- dem axialen Channeling-Effekt, bei welchem die Ionen an den Kristallachsen reflektiert werden und dem
- planaren Channeling-Effekt, bei welchem die Ionen an Kristallebenen reflektiert werden.

Beide Effekte können beim Channeling auftreten und unterscheiden sich durch die Form des betrachteten mittleren Potentials, welches ein Ion im Kristall erfährt.

Auf die beiden unterschiedlichen Effekte soll nun im einzelnen eingegangen werden.

## 2.1.2. Der axiale Channeling-Effekt

Für das mittlere Potential, welches ein Ion im Abstand  $\rho$  von einer Kristallachse erfährt gilt:

$$U(\rho) = \frac{1}{d} \int_{-\infty}^{\infty} dz V(\sqrt{z^2 + \rho^2}) \quad (2)$$

,wobei  $d$  der Abstand der Kristallatome in der Kristallachse und  $V(r)$  ist das Potential aus (1) ist.

Aus den Formeln (1) und (2) ergibt sich das „Standard Kontinuum Potential“:

$$U(\rho) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{d} \ln[(Ca/\rho)^2 + 1]$$

Innerhalb dieses Potentials muss das Ion gefangen bleiben, damit der Channeling-Effekt stattfinden kann. Fällt das Ion zu steil in den Kanal ein, so kommt es aus dem Bereich, in dem der Channeling-Effekt stattfindenden kann, heraus und wird weggestreut. Ein direktes Maß hierfür ist der kritische Winkel nach Lindhard.

Für eine Bewegung entlang der Kristallachse ergibt sich für den kritischer Winkel:

$$\Psi = \sqrt{\frac{2Z_1 Z_2 e^2}{d \cdot E}}$$

$E$  ist die Energie des eingestrahnten Ions.

## 2.1.3. Der planare Channeling-Effekt

Für den planaren Channeling-Effekt gilt eine ähnliche Bedingung, nur dass in diesem Fall das kontinuierliche Potential von einer Kristallebene erzeugt wird.

$$W(y) = (Nd_p) \int_{-\infty}^{\infty} 2\pi dr V(r^2 + y^2) \quad (3)$$

$y$  ist der Abstand des Ions von der Kristallebene  
 $Nd_p$  ist die Anzahl von Atomen pro Fläche in  $\text{\AA}^2$   
 und  $V(r)$  bezeichnet wieder das Potential aus (1).

## Channeling

Aus den Gleichungen (1) und (3) folgt das Lindhard-Standard-Potential für planares Channeling:

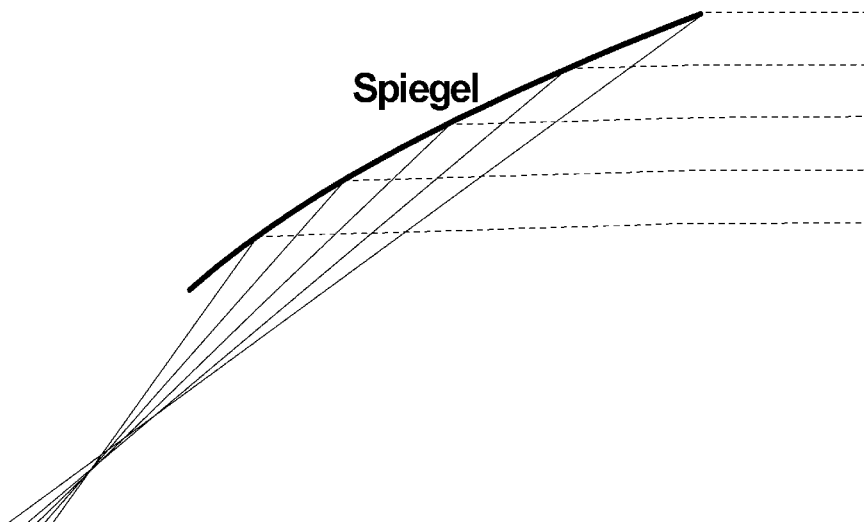
$$W(y) = 2\pi Z_1 Z_2 e^2 (Nd_p) a \left[ \sqrt{(y/a)^2 + C^2} - y/a \right]$$

Für die Bewegung eines Ions entlang einer Kristallachse gilt damit ein kritischer Winkel von:

$$\phi = \left( \frac{2\pi Z_1 Z_2 e^2 (Nd_p) a}{E} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

### 2.1.4. Das Oberflächen-Channeling

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein  $\alpha$ -Strahl mittels Oberflächen-Channeling fokussiert werden. Dabei dient ein gebogener Kristall als fokussierender Spiegel für den  $\alpha$ -Strahl. In Abb.4 ist das Prinzip der Fokussierung an einem gebogenen Spiegel zu sehen. Im Falle eines parallelen einfallenden Strahls handelt es sich bei der Spiegelform um die Form einer Parabel.



**Abbildung 4: Skizze zur Fokussierung eines  $\alpha$ -Strahls, durch einen gebogenen Spiegel**

Die Reflexion des  $\alpha$ -Strahls an der Kristalloberfläche findet dabei nach dem Prinzip des Oberflächen-Channeling statt. Bei dem Oberflächen-Channeling handelt es sich um den Effekt des planaren Channelings; mit dem Unterschied, dass der Strahl nur einmal von einer Ebene reflektiert wird, während es sich beim planaren Channeling um eine



Mehrfachreflektion zwischen zwei Kristallebenen handelt. Die Bedingung des kritischen Winkels (4) gilt also auch für den Fall des Oberflächen-Channelings.

Wird der Strahl in Richtung einer Kristallachse der Oberfläche eingestrahlt, so kann es passieren, dass der Strahl durch den planaren Channeling-Effekt tief in den Kristall eindringt, was anschließend zu einer ungewollten Erhitzung und Beschädigung dieses Kristalls führen kann.

Durch eine gekrümmte Form der Oberfläche kann man also einen Ionenstrahl fokussieren. Die dabei einzuhaltenden Lindhardwinkel für einen  $\alpha$ -Strahl finden sich in der folgenden Tabelle für verschiedene Energien und Materialien:

	E /MeV	$Nd_p / \text{\AA}^2$	a /\AA	$\phi [^\circ]$
Si [100]	56	0,0678	0,194	<b>0,044</b>
	40	0,0678	0,194	<b>0,052</b>
	28	0,0678	0,194	<b>0,063</b>
Au [111]	56	0,1389	0,109	<b>0,113</b>
	40	0,1389	0,109	<b>0,133</b>
	28	0,1389	0,109	<b>0,159</b>
Ge [100]	56	0,0625	0,148	<b>0,056</b>
	40	0,0625	0,148	<b>0,066</b>
	28	0,0625	0,148	<b>0,079</b>

**Tabelle 1: Die Größe des kritischen Winkels  $\phi$  für verschiedene Energien der Ionen und verschiedene Kristallarten, zusätzlich angegeben sind der Abschirmradius a und die Atomdichte im Gitter**

Man kann deutlich den Einfluss des gewählten Kristallmaterials auf den einzuhaltenden kritischen Winkel erkennen. Für diese Diplomarbeit wurde Silizium als Kristallmaterial gewählt, da große Wafer<sup>3</sup> mit einer besonders hohen Oberflächengüte, welche für das Oberflächen-Channeling erforderlich ist, aus Serienproduktionen erhältlich sind. Eine Gold- oder Germaniumoberfläche entsprechender Größe wäre teurer und zeitaufwändiger und im Zeitrahmen dieser Diplomarbeit nicht möglich gewesen.

---

<sup>3</sup> Eine dünne Halbleiterkristallscheibe, deren Oberfläche einer Kristallebene entspricht. Wafer werden u.a bei der Herstellung von Prozessoren. verwendet.

## Channeling

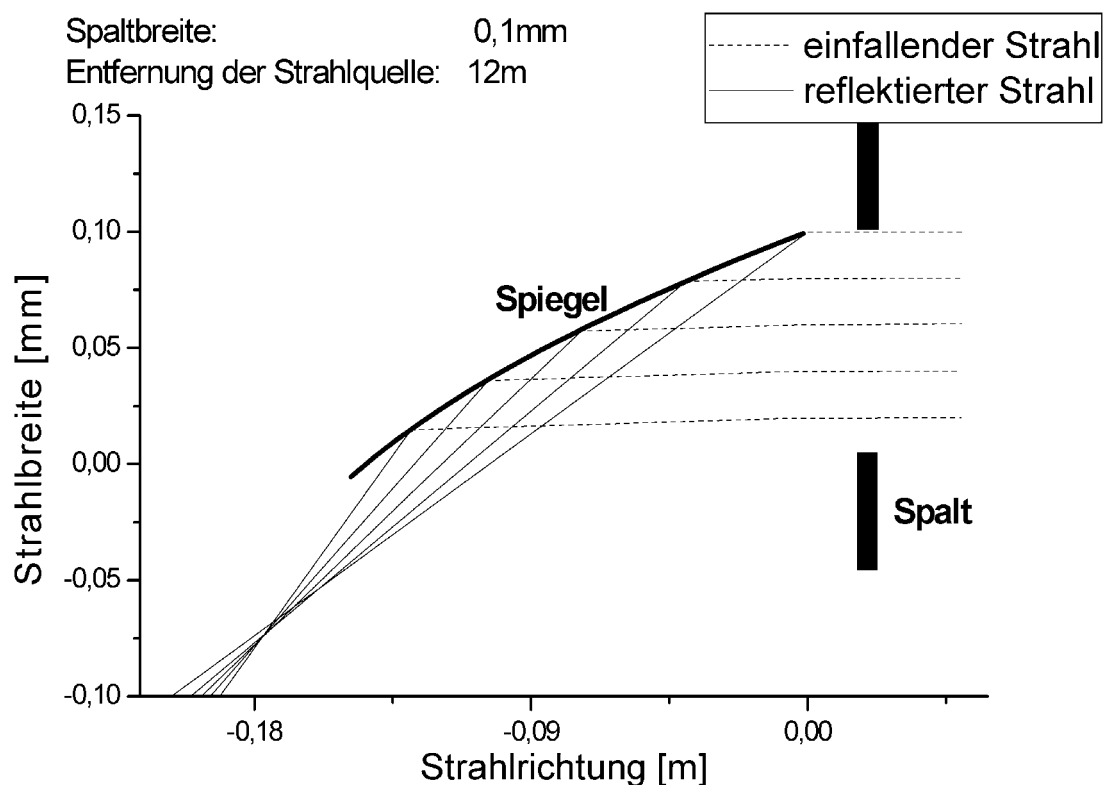
Der Vorteil der Fokussierung mit Hilfe des Oberflächen-Channelings liegt darin, dass die Form des Kristalls, bei der eine Fokussierung stattfindet, von der Energie und der Ionenart unabhängig ist, lediglich der Lindhardwinkel muss beachtet werden. Hat man beispielsweise eine Kurvenform für einen 56MeV  $\alpha$ -Strahl gefunden, so kann diese Form auch für verschiedene Energien z.B. eines Protonenstrahls genutzt werden, wenn die Bedingung

$$\phi_{\alpha,50\text{MeV}} > \phi_{\text{Ion,E}} \quad (\text{mit } \phi \text{ aus (4)})$$

erfüllt wird.

## 3. Berechnung der Kurvenform des Spiegels

Um die optimale Kurvenform zu ermitteln wurde ein Computer-Programm<sup>4</sup> entwickelt, welches, nach Eingabe des Lindhardwinkels, der Strahldicke und der Position des Fokus, die benötigte Form des Spiegels ermittelt. Zusätzlich zu diesen Parametern kann noch die Divergenz des Strahls und die Breite der Strahlquelle angegeben werden. Das Programm gibt dem Benutzer anschließend Spiegelform und Strahlverlauf aus. Im folgenden Bild kann man einen berechneten Strahlverlauf bei einem kritischen Winkel von  $0,047^\circ$  (d.h.  $56\text{MeV } \alpha$  auf Silizium) erkennen. Der einfallende Strahl hatte dabei eine Breite von  $0,1\text{mm}$  und die simulierte Strahlquelle einen Abstand von  $12\text{m}$  zum Spiegel und eine Breite von  $0,5\text{mm}$ . Nur durch die unterschiedliche Einteilung der Diagrammachsen ist es möglich, die schwache Krümmung des Spiegels zu erkennen.

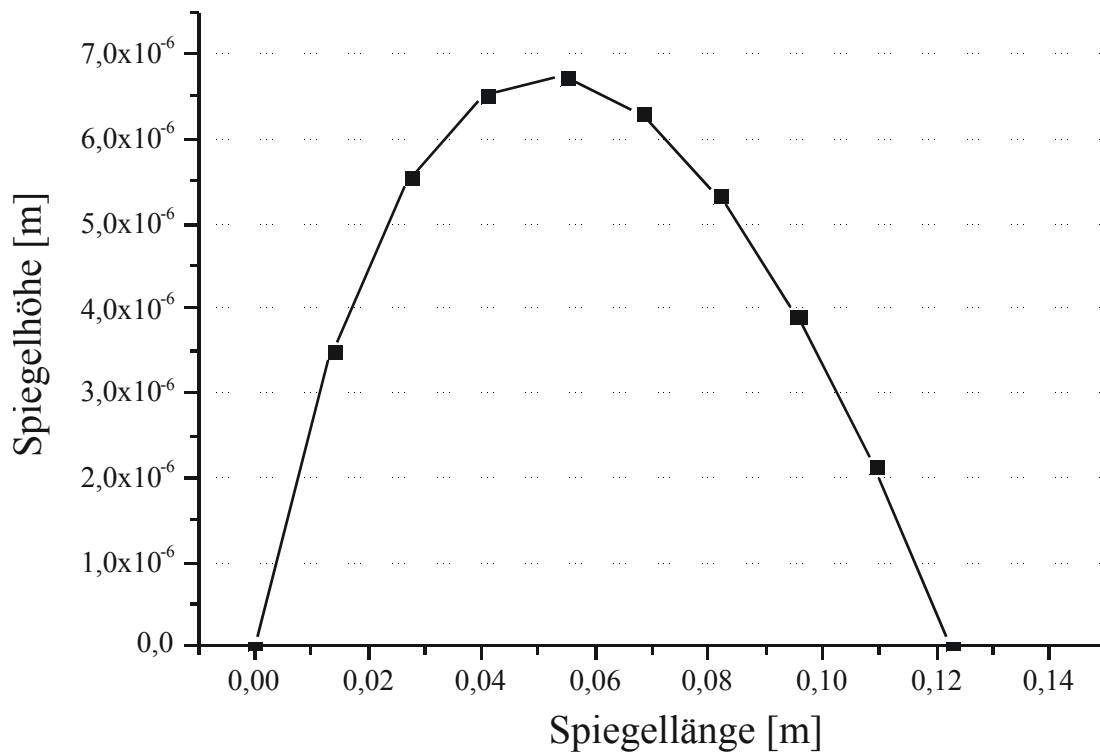


**Abbildung 5: Berechnete Spiegelform und Strahlverlauf für einen  $56\text{MeV } \alpha$ -Strahl, der an einem Silizium-Kristall reflektiert wird. Die Quelle des Ionenstrahls liegt in einer Entfernung von  $12\text{m}$  und hat eine Breite von  $1\text{mm}$**

<sup>4</sup> für nähere Erläuterungen: siehe Anhang

## Berechnung der Kurvenform des Spiegels

Um die geringe Krümmung des Spiegels zu verdeutlichen, ist im folgenden eine auf die Horizontale gedrehte Spiegelform zu sehen. Die Form des Spiegels weicht in der Mitte nur um  $6,6\mu\text{m}$  von der Gerade ab.



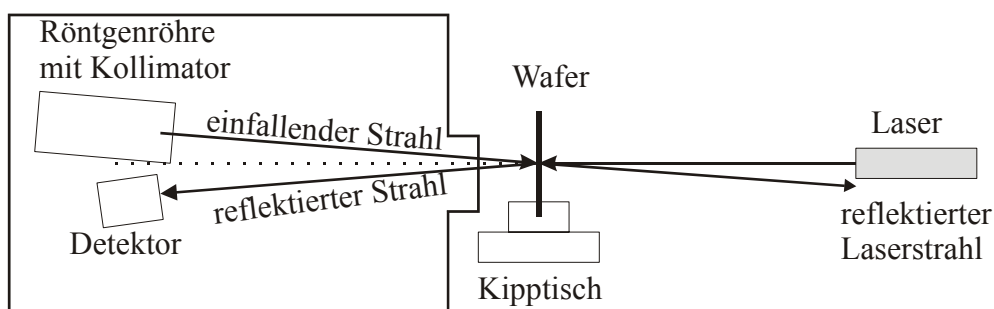
**Abbildung 6: Die auf die Horizontale gedrehte Spiegelform. Die maximale Entfernung zwischen Spiegel und der Horizontalenachse beträgt  $6,6\mu\text{m}$**

## 4. Aufbau

### 4.1. Der Kristall

Für den Aufbau standen als Kristall Silizium-Wafer zur Verfügung, die eine Dicke von  $625\mu\text{m}$  haben und deren Oberfläche ungefähr der [100]-Ebene entspricht. Da die Oberfläche nicht genau der [100]-Ebene entspricht, sondern diese leicht gegen die Oberfläche geneigt ist, entsteht dadurch eine treppenförmige Oberfläche. Deren Stufen auf der Oberfläche sind optisch nicht zu erkennen, können aber bei der Fokussierung des  $\alpha$ -Strahls stören und zu einer Erwärmung des Siliziums führen, wenn der Strahl auf eine Stufenvorderkante trifft. Um diesen Effekt zu verhindern muss die Lage und Richtung dieser Stufen bekannt sein. Zu diesem Zweck ist ein Silizium-Wafer in Stuttgart am Max-Planck-Institut für Materialforschung orientiert worden.

#### 4.1.1. Ermittlung der Stufenrichtung auf der Waferoberfläche



**Abbildung 7: Stuttgarter Apparatur zur Ermittlung der Kristallebenenrichtung. Röntgenröhre und Detektor sind im festen Winkel zueinander angebracht. Der Laser liegt genau auf der Winkelhalbierenden zwischen Röntgenröhre und Detektor**

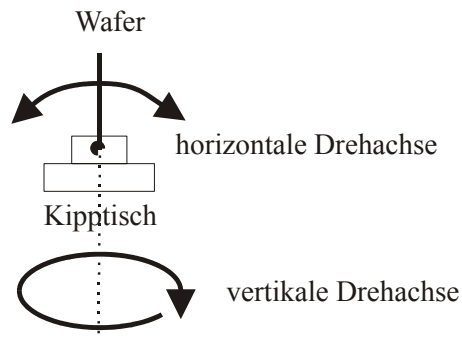
Der Aufbau der Stuttgarter Apparatur besteht aus einer Röntgenröhre, die weiße Röntgenstrahlung emittiert, einem energiedispersiven Ge-Detektor und einem Laser. Nachdem die Röntgenstrahlung einen Kollimator durchlaufen hat, wird diese an dem Kristall unter Bragg-Bedingung<sup>5</sup> reflektiert und fällt auf den unter festem Winkel montierten Detektor.

<sup>5</sup>  $2d \cos \vartheta = \lambda$ ;  $d$  ist der Gitterabstand des Siliziums,  $2\vartheta$  ist der Winkel zwischen der Röhre und dem Detektor;  $\lambda$  ist eine Wellenlänge der benutzten Röntgenstrahlung.

## Aufbau

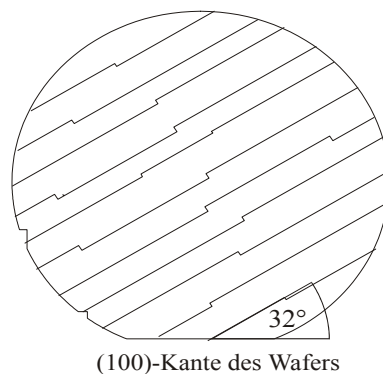
Der Laser, der genau auf der Verlängerung der Winkelhalbierenden zwischen Röhre und Detektor angebracht ist, dient zur Feststellung der Normalen der optischen Oberfläche. Um eine, zur Kristalloberfläche senkrechte Einfallrichtung des Lasers zu erreichen, wird der Wafer so orientiert, dass der Laserstrahl in sich selbst zurückreflektiert wird.

Anschließend dreht man den Wafer mit Hilfe des Kipptisches so, dass das 1. Maximum der Braggreflexion in den Detektor zurückstrahlt, d.h. die [100]-Richtung liegt genau in Richtung des einfallenden Laserlichts. Durch die Messung des Drehwinkels kann direkt auf die Richtung der Stufen geschlossen werden. Der Wafer kann mit Hilfe des Kipptisches um zwei senkrecht zueinander stehende Achsen mit einer Genauigkeit von  $0,02^\circ$  gedreht werden.



**Abbildung 8: Es existieren zwei Drehachsen um die der Wafer gekippt werden kann**

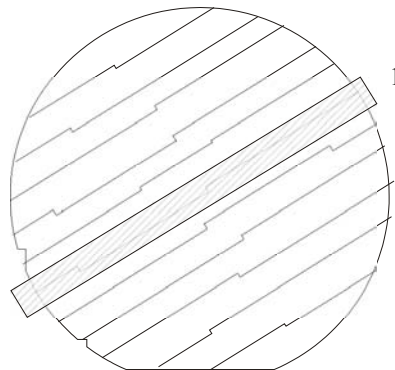
Der untersuchte Silizium-Wafer musste  $0,16^\circ$  um die horizontale und  $0,10^\circ$  um die vertikale Achse gedreht werden, um die Röntgenstrahlen in den Detektor zu reflektieren. Dabei war der Wafer so auf dem Kipptisch befestigt, dass die 100-Markierungskante des Wafers parallel zur Tischoberfläche lag. Aus den oben angegebenen Winkeln ergibt sich ein Stufenwinkel von  $32,0^\circ \pm 3,2^\circ$  gegenüber der 100-Kante (Der angegebene Fehler entsteht durch die Ungenauigkeit in der Winkelbestimmung).



**Abbildung 9: Skizze des Wafers mit Stufen. Unten befindet sich die Markierung der (100)-Achse, die in einem Winkel von  $32^\circ$  zu den Stufen liegt**

Insgesamt gibt es mehrere Möglichkeiten die Richtung der Bestrahlung mit  $\alpha$ -Teilchen zu wählen. Im folgenden werden drei Möglichkeiten näher untersucht:

1.

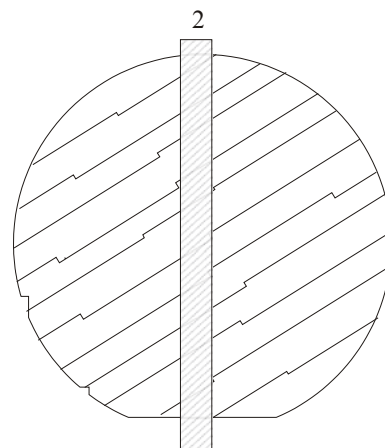


**Abbildung 10: Schnittkanten des Silizium-Streifens parallel zu den Stufenkanten des Wafers**

Eine Möglichkeit besteht darin einen Streifen so aus dem Wafer zu sägen, dass die Schnittkante parallel zu den Stufen liegt.

Die Stufenkanten laufen jedoch nicht gerade über die Waferoberfläche, sondern haben, wie in Abbildung 9 zu sehen, auch Knicke, die zu einem Eindringen der Ionen in den Kristall und zum Abspattern führen können.

2.

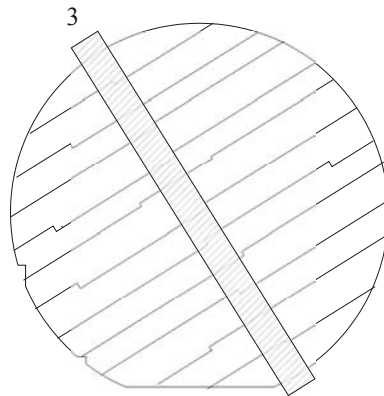


**Abbildung 11: Schnittkante des Silizium-Streifens schräg zu den Stufenkanten**

Schneidet man den Wafer schräg zur Stufenkante, so fällt der Nachteil, den man bei einem parallelen Schnitt hat, weg. Nur bei extremer Abweichung von der erwarteten Stufenform kommt es noch zum Eindringen des Strahls in den Silizium-Streifen.

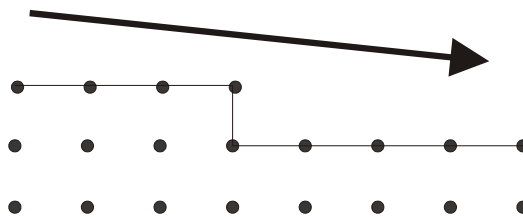
## Aufbau

3.



**Abbildung 12: Für den Wafer wurden die Schnittkanten des Silizium-Streifens senkrecht zu den Stufenkanten gewählt**

Die sicherste Möglichkeit, um Strahlenschäden zu vermeiden besteht jedoch darin, den Silizium-Streifen senkrecht zu den Stufenkanten aus dem Wafer zu sägen. Dabei muss der Si-Streifen so eingebaut werden, dass der Ionenstrahl nicht gegen die Stufenvorderfronten strahlt.



**Abbildung 13: gewünschte Strahlrichtung bei einer senkrecht zur Papierebene verlaufenden Stufe**

Achtet man jetzt noch darauf, dass die Schnittkante nicht mit einer Kristallachse übereinstimmt (um Channeling in den Kristall zu vermeiden), so erhält man eine Strahlrichtung, welche die Möglichkeit der Erzeugung von Strahlenschäden im Silizium minimiert.

Für den vermessenen Wafer wurde deshalb die Schnittrichtung wie in 3. gewählt.



## 4.1.2. Bearbeitung des Wafers

Entsprechend der obigen Überlegungen wurde aus dem Wafer ein Streifen von 1cm Breite in einem Winkel von  $32^\circ$  zur (100)-Markierung des Wafers gesägt.

Beim Sägen des Wafers mit einer Diamantdrahtsäge zerbrach dieser jedoch. Da die Bruchkanten nicht parallel zur Sägekante lagen, blieb kein Teilstück, welches lang genug für den Einbau in die Strahlfokussierung gewesen wäre, übrig.

Da ein Test der gesamten Apparatur am  $\alpha$ -Strahl im Rahmen dieser Diplomarbeit zeitlich nicht mehr möglich war, wurde beschlossen, die Apparatur nur mit Hilfe eines Laserstrahls zu testen. Dadurch konnte problemlos der zerbrochene Wafer durch einen unvermessenen ersetzt werden, da die Stufen für Licht kein Hindernis darstellen ( $\lambda_{\text{Licht}} \gg \text{Stufe}$ ). Dieser Wafer wurde einfach entlang der [100]-Richtung zersägt um störende Bruchkanten zu vermeiden.

Der ausgesägte Waferstreifen hat eine Breite von 12 mm und eine Länge von  $\sim 120$  mm.

## 4.2. Anforderungen an die Biegevorrichtung

Die Anforderung an die Vorrichtung zum Biegen des Kristalls ist eine  $\mu\text{m}$ -genaue reproduzierbare Einstellung der Biegung. Da die gesamte Form nur um  $6,6\mu\text{m}$  von der Form einer Geraden abweicht, wird zum Biegen des Wafers auf Piezo-Stellelemente zurückgegriffen.

Der Vorteil der Piezo-Stellelemente besteht in der genauen Regelbarkeit ihrer Ausdehnung in Abhängigkeit einer angelegten elektrischen Spannung. Die Genauigkeit der Ausdehnung hängt dabei nur von der Genauigkeit der angelegten elektrischen Spannung und dem Ausgleich der Hysterese der Piezos ab. Der Fehler, der durch die Hysterese entstehen kann, lässt sich verhindern, indem man den Ausgangszustand für die einzelnen Piezo-Stellelemente definiert<sup>6</sup>. Zusätzlich lassen sich Piezo-Stellelemente auch im Vakuum betreiben und können währenddessen gesteuert werden.

Eine rein mechanische Biegeapparatur benötigt dagegen zu viel Platz und ist, während sie sich im Vakuum befindet, nicht zugänglich.

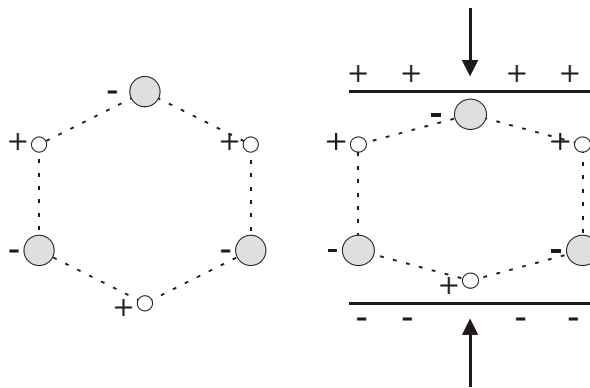
---

<sup>6</sup> Das Steuerprogramm fährt dazu das Piezo-Stellelement, vor Veränderung der Höhe, in den Grundzustand zurück.

## Aufbau

### 4.2.1. Der piezoelektrische Effekt

Schneidet man aus einem Quarzkristall eine Platte senkrecht zu einer polaren Achse heraus und übt Druck auf diese Platte aus, so baut sich zwischen den beiden Plattenseiten eine elektrische Spannung auf. Dieser sogenannte piezoelektrische Effekt wurde 1880 von Pierre Curie und Jaques Curie nachgewiesen und tritt bei Isolatoren auf, welche eine polare Achse besitzen [KLE90]. Die Umkehrung dieses Effektes, der reziproke piezoelektrische Effekt, bewirkt bei Anlegen einer elektrischen Spannung an die Quarzseiten das Ausdehnen bzw. Zusammenziehen des Quarzes.



**Abbildung 14: Die Veränderung der Ladungsverteilung unter Druck führt zu dem Aufbau einer elektrischen Spannung zwischen den beiden Flächen**

Auf diesem Effekt beruht auch die Funktionsweise von Piezo-Stellelementen. Durch Anlegen einer äußeren Spannung kann man die Länge der Piezo-Stellelemente verändern. Typische Piezo-Stellelemente, die meistens aus Quarz, Bariumtitanat oder Turmalin bestehen, erreichen eine Längenänderung von bis zu 200µm bei Spannungen im Regelfall zwischen 100V und 1000V.

Die in diesem Experiment benutzten Piezo-Stellelemente aus Bariumtitanat besitzen einen Hub von 20µm und sind speziell für die Anwendung im Vakuum gebaut worden. Insgesamt werden in diesem Aufbau sechs Piezo-Stellelemente benutzt, d.h. die Form des Silizium-Streifens kann durch bis zu sechs Stützstellen definiert werden. Die Stellelemente sind mit einer Kraft von 150N vorgespannt und können insgesamt mit einer Kraft von 1000N drücken. Die möglichen Kräfte der Piezo-Stellelemente übersteigen die notwendige Kraft zum Verbiegen des Silizium-Streifens um viele Zehnerpotenzen.

Als Versorgungsspannung benötigen die Piezo-Stellelemente eine Spannung von bis zu –150V. Dadurch, dass alle Piezo-Stellelemente aus verschiedenen Scheiben aus Bariumtitanat zusammengesetzt werden, hat jeder Piezo seine individuelle maximale Ausdehnung und Hysteresekurve (siehe Anhang).

### 4.2.2. Ansteuerung der Piezo-Stellelemente

Gesteuert werden die sechs Piezo-Stellelemente mit einer D/A-Karte die Spannung von 0 bis 10V ausgeben kann und deren Signal anschließend mit sechs Verstärkern auf 0 bis –150V verstärkt wird. Die D/A-Karte hat dabei eine Auflösung von 12bit<sup>7</sup>, d.h. bei einem maximalen Hub von 20µm ergibt sich eine Auflösung von 9nm.

Zur Ansteuerung wurde ein Computer-Programm geschrieben<sup>8</sup>, welches eine einfache Einstellung der Biegeform ermöglicht. Zusätzlich bietet es die Möglichkeit, die Fehler der Hysterese durch Herunterfahren der Piezo-Stellelement in den Grundzustand, auszugleichen. Eingestellte Formen können mit diesem Programm gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder geladen und verwendet werden. Ein Vergleich zwischen verschiedenen Formen wird dadurch erleichtert.

### 4.3. Experiment- und Piezohalterung

Das Experiment wird vollständig auf einem Molybdän-Block mit einer Dicke von 50mm aufgebaut. Die Dicke des Materials sorgt für eine gute Stabilität des Aufbaus und schützt vor Verbiegungen der gesamten Apparatur, denn Verbiegungen der gesamten Platte (Länge: 200mm) um bereits wenige µm würden die Möglichkeit einer Strahlfokussierung verhindern. Für die Grundplatte wurde als Material Molybdän verwendet, da es einen ähnlich niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten hat wie das Silizium. So können bei thermischer Ausdehnung Spannungen zwischen Wafer und Grundplatte verhindert werden.

Andere Materialien mit ähnlichem thermischen Ausdehnungskoeffizienten wie z.B. Arsen oder Porzellan wurden auf Grund ihrer schlechteren Bearbeitbarkeit nicht verwendet.

---

<sup>7</sup> für die technische Daten: siehe Anhang.

<sup>8</sup> nähere Erläuterungen: siehe Anhang.

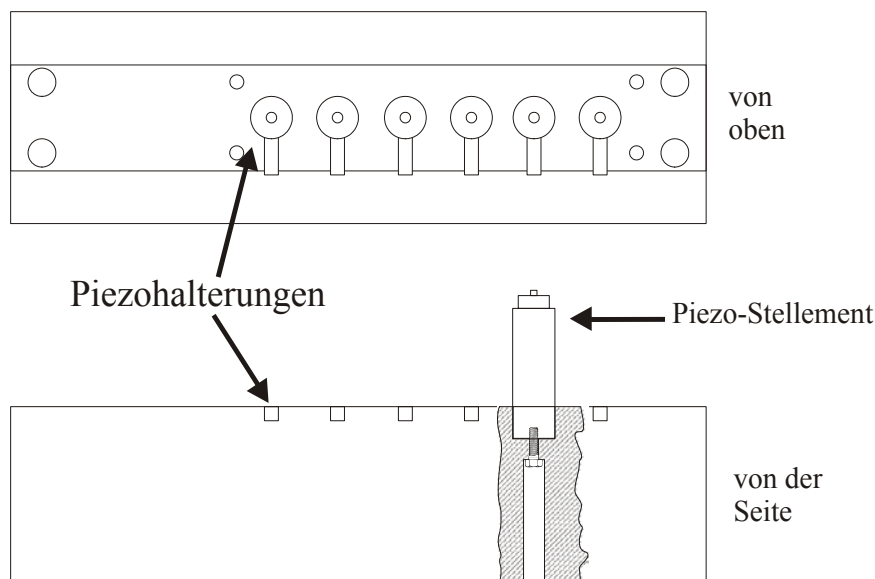
## Aufbau

Stoff	Längenausdehnungskoeffizient [ $10^{-6}/K$ ]
Silizium	4,2
Molybdän	5,4
Arsen	4,7
Porzellan	4..5
Aluminium	23
Invar	1,5
Stahl	11..16

**Tabelle 2: Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Materialien; Arsen und Porzellan haben einen ähnlichen Ausdehnungskoeffizienten wie Silizium, sind allerdings schlecht bearbeitbar**

Die Grundplatte ist so aufgebaut, dass die Piezo-Stellelemente leicht in den Molybdän-Block versenkt und mit einer Schraube von unten fest im Block verankert werden können. Dies ermöglicht eine gut definierte Auflagefläche der Piezo-Stellelemente. Die Piezo-Stellelemente besitzen hierfür bereits ein Gewinde in ihrer Auflagefläche.

Unterschiede in der Länge der Piezo-Stellelemente werden durch unterschiedlich dicke Unterlegscheiben ausgeglichen, die unter die Piezo-Stellelemente gelegt werden. In der folgenden Skizze erkennt man den Molybdän-Block mit den Bohrungen für die Befestigung der Piezo-Stellelemente und zusätzlichen Bohrungen für die Befestigung eines Kollimatorspaltes und des Molybdän-Blocks in der Vakuumapparatur.



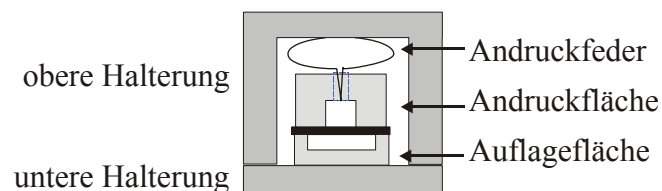
**Abbildung 15: Molybdän-Block mit Piezohalterungen**

#### 4.4. Die Befestigung des Silizium-Streifens

Bei der Befestigung des Silizium-Streifens ist zu beachten, dass dessen Form durch die Ausdehnung der Piezo-Stellelemente fest definiert sein muss.

Des weiteren darf dieser nicht seitlich gebogen werden, und die Auflagepunkte des Wafers dürfen nicht bereits in der Nulllage der Piezo-Stellelemente Höhenunterschiede von mehreren  $\mu\text{m}$  aufweisen.

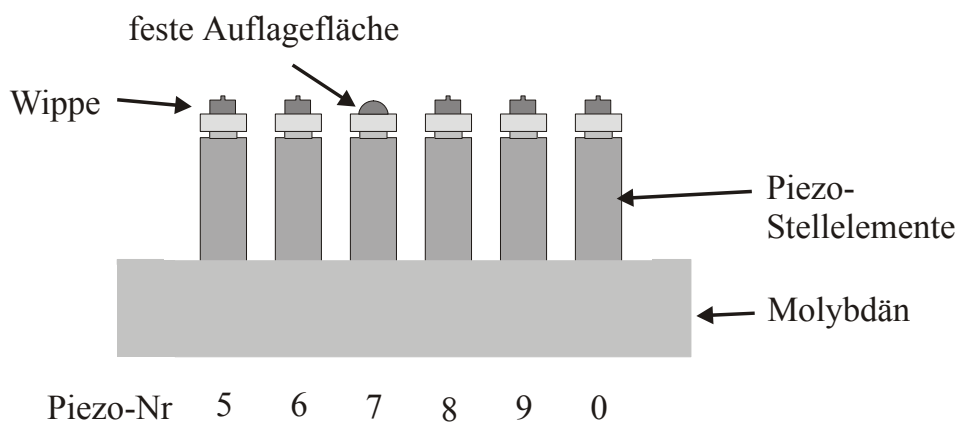
Der Silizium-Streifen wird dafür auf eine untere Halterung gelegt und von einer oberen Halterung mittels Federkraft auf die untere gedrückt. Die Position der unteren Halterung, und damit die Ausdehnung der Piezo-Stellelemente, definiert damit die Position des Silizium-Streifens an den sechs Stützstellen.



**Abbildung 16: Skizze der Halterung in Strahlrichtung. Die obere Halterung drückt mit Federkraft den Silizium-Streifen auf die Auflagefläche**

##### 4.4.1. Untere Halterung

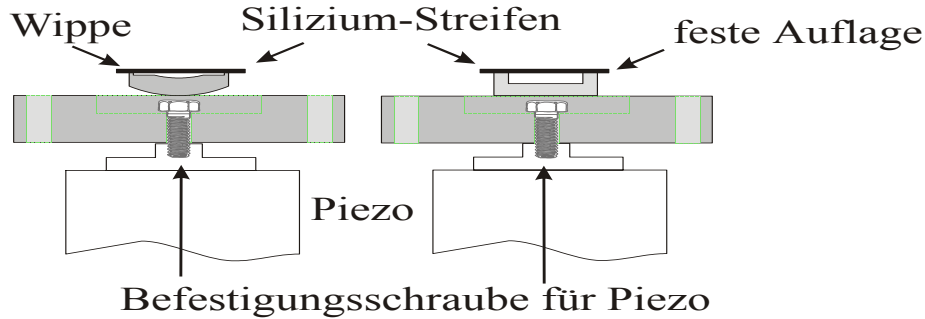
Die untere Halterung dient der definierten Auflage des Silizium-Streifens. Um die seitliche Verbiegung des Streifens zu vermeiden, was eine undefinierte Reflexion zur Folge hätte, gibt eine der Auflageflächen die horizontale Lage des Silizium-Streifens vor. Die anderen fünf Auflageflächen sind als Wippe aufgebaut und können sich nach der festen Auflagefläche richten. Eine definierte, nicht verkippte Auflage ist so gewährleistet.



**Abbildung 17: Skizze des Aufbaus mit Position der Wippen und der festen Auflage**

## Aufbau

Die Auflageflächen wurden auf eine Befestigungskonstruktion gelegt, die das Anbringen an die Piezo-Stellelemente ermöglicht und zusätzlich zur Befestigung der oberen Halterung (s.u.) dient.



**Abbildung 18: Wippe und feste Auflagefläche auf der Befestigungskonstruktion in Strahlrichtung**

Um eine möglichst gleichmäßige Null-Lage des Silizium-Streifens zu erreichen, wurde die Höhe der einzelnen Auflageflächen an die Höhe der unteren Halterungen angepasst. Dazu wurde die untere Befestigungskonstruktion an den Piezo-Stellelementen festgeschraubt und diese am Molybdänblock befestigt. Die Reihenfolge der Piezo-Stellelemente orientiert sich an der Serien-Nummer der Stellelemente. Alle Elemente der Halterungen sind mit der letzten Ziffer der Seriennummer markiert worden, um einen immer gleichen Aufbau zu ermöglichen. Die feste Auflagefläche befindet sich auf dem Piezo mit der Nummer 7.

Nach dem Zusammenbau dieser Teile wurde die Höhe der sechs Befestigungskonstruktionen mittels einer  $\mu\text{m}$ -Messuhr auf einer Richtplatte vermessen und so deren unterschiedliche Höhen ermittelt.

Piezo-Nr.	5	6	7	8	9	0
Höhe[ $\mu\text{m}$ ]	-170	-160	-20	-10	-20	0

**Tabelle 3: Die Höhenunterschiede der Befestigungskonstruktion relativ zur Höhe von Piezo Nr.0. Die Genauigkeit der Messung lag bei  $10\mu\text{m}$**

An diesen Messdaten orientierte sich anschließend die Konstruktion der Auflageflächen. Die feste Auflagefläche bildet dabei die Grundhöhe auf welche die Höhen der Wippen angepasst wurden.

Die Wippen wurden aus fünf Aluminium-Bogensegmenten gebaut. Die Höhe wurde mit einer Fräse auf die gewünschte Höhe reduziert und anschließend mit einem feinen Schmirgelpapier nachkorrigiert. Die größte Ungenauigkeit bestand dabei in der Messung der Höhe mit einer digitalen Schieblehre. Diese ermöglicht nur eine Genauigkeit von  $10\mu\text{m}$ . Die Auflageflächen wurden ebenfalls mit der letzten Ziffer der Serien-Nummer versehen.

Nach dem Zusammenbau und der Auflage des Silizium-Streifens wurden die Wippen und die feste Auflage an der Befestigungskonstruktion festgeklebt und somit in Ihrer Position fixiert. Die Auflageflächen liegen somit immer in einer Ebene und können nicht mehr gegeneinander verkippen.

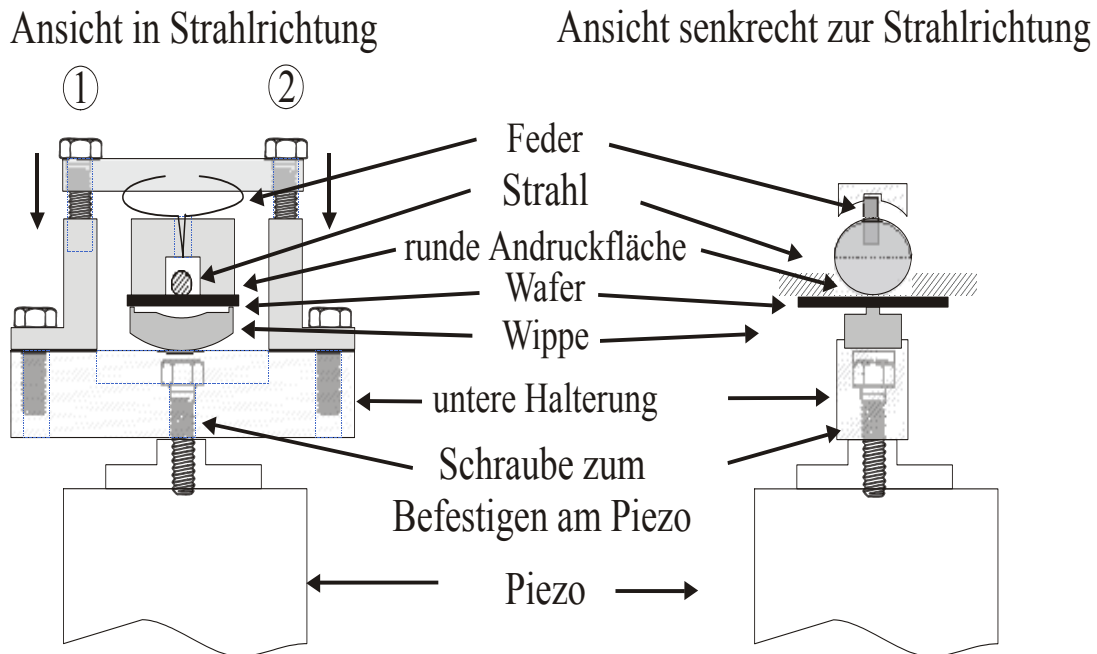
Eine nochmalige Vermessung der Auflageflächen wurde nicht mehr durchgeführt, um eine Verkratzung und Verbiegung zu vermeiden. Stattdessen wurde durch Ausdehnen einzelner Piezos überprüft, ob der Silizium-Streifen überall aufliegt. (siehe 5.1.).

## Aufbau

### 4.4.2. Obere Halterung

Die obere Halterung ist so konstruiert, dass der Silizium-Streifen zusammen mit der unteren Halterung mittels einer Drei-Punkt-Auflage befestigt ist. Durch leichte Federkraft wird von oben eine runde Fläche, mit Aussparung für den  $\alpha$ -Strahl, gegen den Wafer gedrückt. Das zentrierte Anbringen der Feder ermöglicht der Andruckfläche eine leichte Verkippung und somit eine Anpassung an die festgelegte Lage des Silizium-Streifens (siehe Abb.19). Bei dem gesamten Aufbau muss darauf geachtet werden, dass das Silizium sehr spröde und zerbrechlich ist; zu starker Druck kann den Streifen zerbrechen.

Der Bereich der Halterungen (in diesem Fall mit Wippe) sieht folgendermaßen aus:



**Abbildung 19: Gesamtkonstruktion einer Halterung mit Wippe; durch Anziehen der Schrauben (1) und (2) kann die Andruckkraft des Silizium-Streifens erhöht werden**

Je nach gewünschter Druckkraft können die Schrauben (1) und (2) entsprechend angezogen werden.



#### 4.5. Gesamtaufbau

Der Gesamtaufbau besteht aus einem Molybdänblock auf dem die Piezo-Stellelemente mit dem Silizium-Streifen befestigt sind, sechs Spannungsverstärkern und einem Rechner mit einer D/A-Karte.

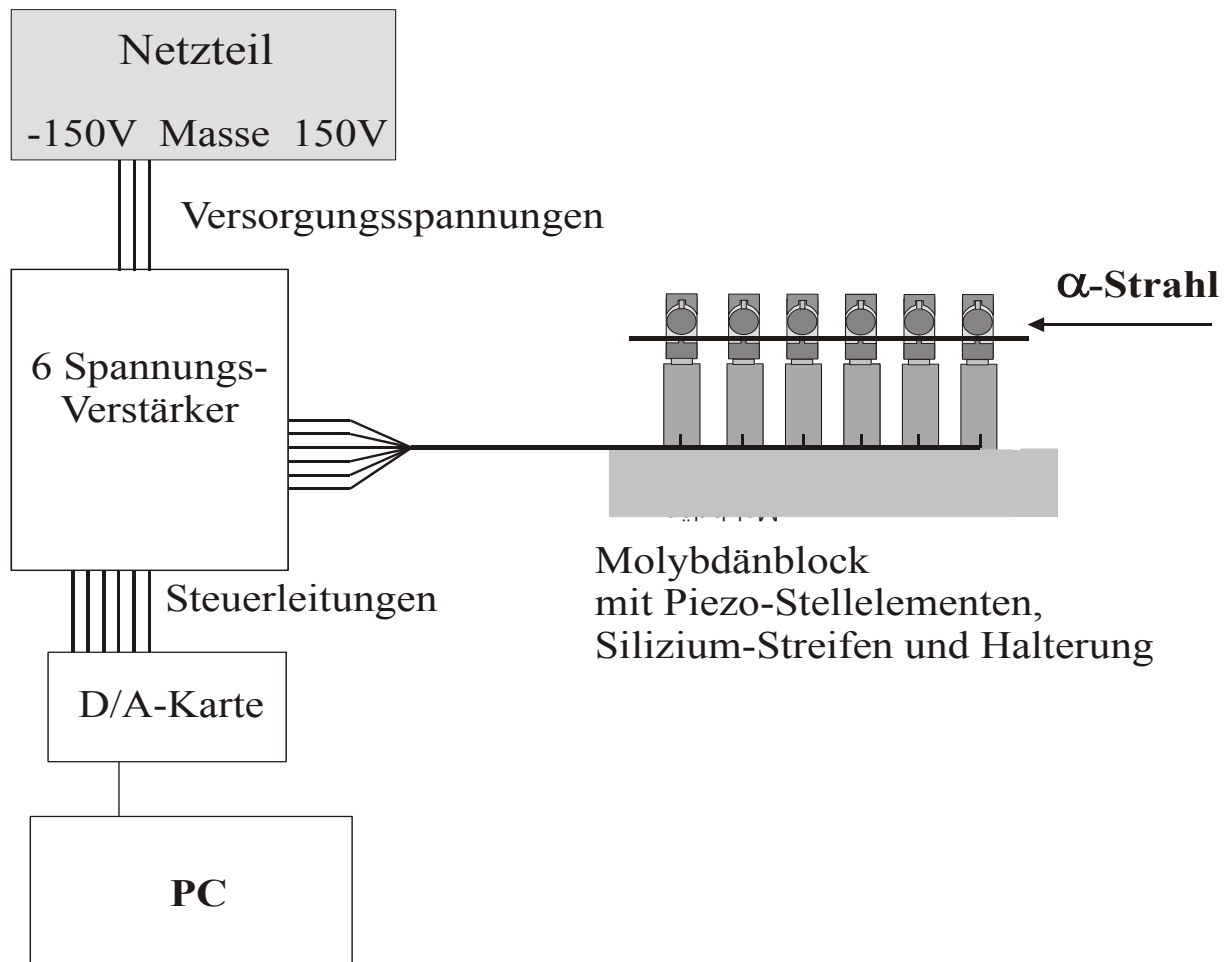


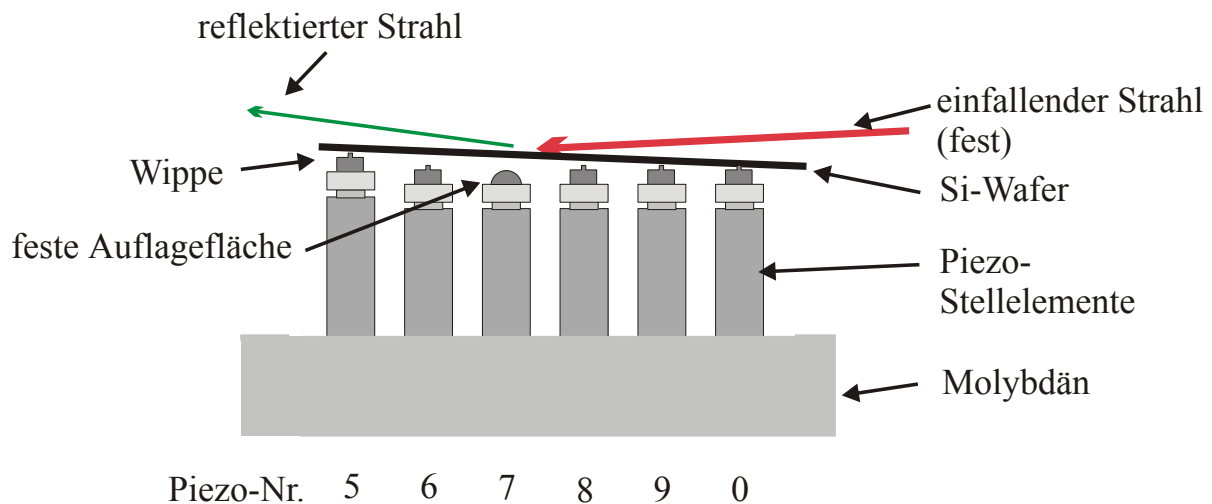
Abbildung 20: Gesamtaufbau des Experiments

# Erste Messungen

## 5. Erste Messungen

### 5.1. Test der Auflageflächen

Vor der Befestigung der oberen Halterungen wurde der Aufbau im Hinblick auf den Kontakt des Silizium-Streifens mit den Auflageflächen getestet. Dazu wurde der Silizium-Streifen lose auf die Auflageflächen gelegt und in einem Winkel von einigen Grad mit einem Laser bestrahlt. Die Reflektion des Lasers wurde an einer 20m entfernten Wand markiert. Durch das Anlegen von elektrischer Spannung an einzelne Piezo-Stellelemente und das Beobachten des reflektierten Laserstrahls, kann überprüft werden, ob alle Auflageflächen Kontakt zum Wafer haben. Wird einer der drei Piezos, die näher beim Laser liegen, gestreckt, so sollte der Punkt des reflektierten Laserlichtes an der Wand nach unten wandern, bei den anderen nach oben. Je weiter innen der Piezo liegt, desto größer sollte der Kippwinkel des Silizium-Streifens sein.



**Abbildung 21: Durch Ausdehnen eines Piezo-Stellelements (in diesem Fall Nr.5) ändert sich der Einfallswinkel des Lasers und der reflektierte Laserpunkt an der Wand verändert seine Position. Die Ausdehnung des Piezo-Stellelements ist in dieser Abbildung stark überzeichnet**

Piezo-Nr.	5	6	7	8	9	0
Höhenänderung [mm]	9	12	15	0	-12	-6

**Tabelle 4: Die Höhenänderungen des Laserpunktes bei Bewegung der Piezo-Stellelemente zeigen das erwartete Verhalten (bis auf Nr.8)**

Die gemessenen Auslenkungen haben gezeigt, dass der Piezo-Nr.8 keinen Kontakt hatte. Die Auflagefläche wurde deshalb mit einer 20  $\mu\text{m}$  dicken Folie etwas erhöht. Eine anschließende Wiederholung der Messung ergab, dass nun alle Auflageflächen Kontakt zum Silizium-Streifen hatten. Piezo-Nr.8 erzeugte nach Korrektur eine Höhenänderung des reflektierten Laserpunktes von  $-14\text{mm}$  bei maximaler Ausdehnung (vgl. Tabelle 4).

### 5.2. Test der Fokussierung mit Laserlicht

Um die Fokussierungsfähigkeit der Apparatur zu testen, wurde ein weiterer Test mit einem Laserstrahl aufgebaut. Durch die gute Reflektionsfähigkeit des Wafers für Licht kann ohne viel Aufwand die Fokussierung außerhalb des Vakuums getestet werden. Auch die Stufen auf einem Wafer stellen kein Problem für Licht dar, weshalb die Bedingung an die Güte der Kristalloberfläche nicht so ausschlaggebend wie für einen  $\alpha$ -Strahl ist. Als Laser wurde für diesen Test ein handelsüblicher Laserpointer benutzt.

Laser und Strahlfokussierung wurden auf einer gemeinsamen Schiene befestigt. Um den Winkel des einfallenden Laserlichts zu verändern, wurde dieser auf einem kippbaren Tisch montiert. Die Breite des einfallenden Laserstrahls kann durch den Abstand einer beweglichen Blendkante zu dem Silizium-Streifen eingestellt werden. Dazu ist die Blendkante an einem Goniometer befestigt, das sowohl eine Positions- als auch eine Winkeländerung erlaubt.

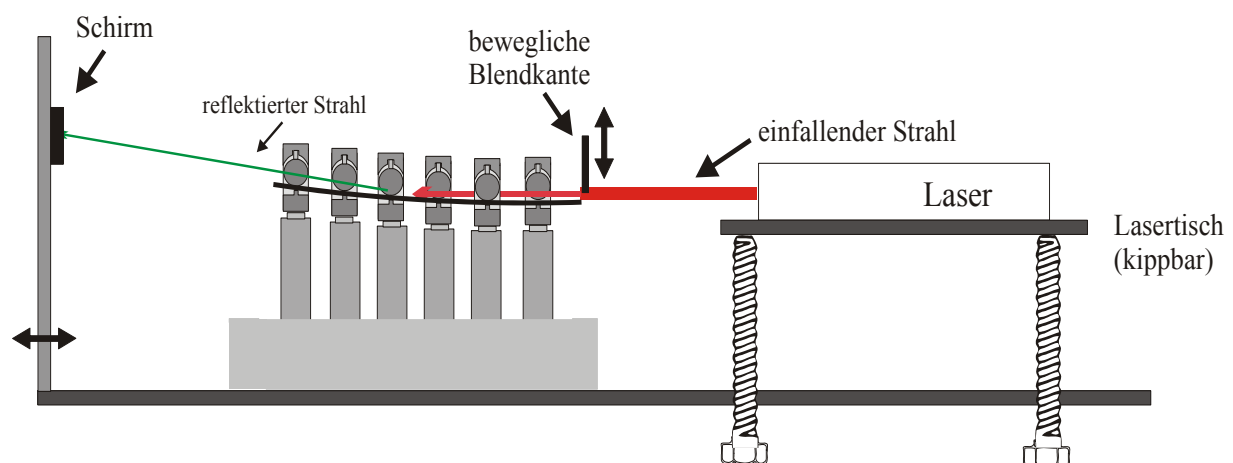


Abbildung 22: Skizze des Testaufbaus mit Laser; die Auslenkung der Piezostellelemente ist stark überzeichnet

## Erste Messungen

Bei Zusammenbau der Apparatur ist festgestellt worden, dass sich der Piezo-Nr.5 gelockert hatte und neu angezogen werden musste. Dies hatte zur Folge, dass sich die Auflagefläche für den Silizium-Streifen stark nach unten senkte. Da dieser Fehler durch den Hub des Piezo-Stellelementes nicht mehr ausgeglichen werden konnte, wurde bei diesem Piezo-Stellelement die obere Halterung weggelassen und dem Piezo-Stellelement die Möglichkeit genommen, den Silizium-Streifen zu berühren. Eine Unterlegung des Silizium-Streifens mit der erforderlichen Genauigkeit von einigen  $\mu\text{m}$  war an dieser Stelle aus zeitlichen Gründen nicht mehr möglich.

Nach Zusammenbau des Gesamtaufbaus und Anschluss der Piezo-Stellelemente an die Piezo-Steuerung wurde der Winkel des Laserstrahls so eingestellt, dass der Laserstrahl in einem Winkel von weniger als  $1^\circ$  auf den Silizium-Streifen fiel. Die Höhe der Ablendkante wurde so eingestellt, dass der Laser den gesamten Silizium-Streifen bestrahlte und nicht am Silizium-Streifen vorbei leuchtete.



**Abbildung 23: Begrenzung des Laserstrahls auf die gewünschte Dicke; der reflektierte Anteil wurde nicht mit eingezeichnet**

Um das Regeln und Verändern der Biegeform durch Verringern der möglichen Parameter zu vereinfachen wurde zusätzlich die obere Halterung von Piezo-Nr. 6 und Nr. 0 entfernt. Diese beiden Piezo-Stellelemente konnten im laufenden Test somit nur noch Druck auf den Silizium-Streifen ausüben und nicht mehr ziehen.

Durch Einstellung der Position des beweglichen Schirms relativ zum Silizium-Streifen kann die Entfernung des Fokus zum Streifen frei gewählt werden. Die Abbildung des Fokus auf diesem Schirm konnte mit einem Mikroskop mit großer Brennweite betrachtet werden. Das benutzte Mikroskop<sup>9</sup> erreicht eine 40-fache Vergrößerung.

---

<sup>9</sup> Leica GZ6

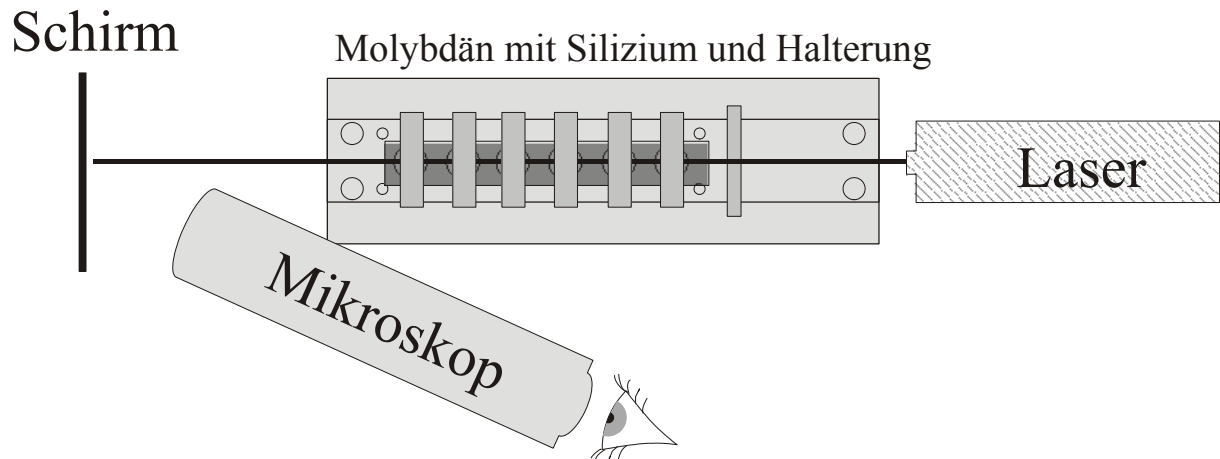


Abbildung 24: Aufsicht auf Aufbau mit Mikroskop

Das Problem bei einem Test der Strahlfokussierung mit Laserlicht besteht in der Entstehung von Beugungsbildern an den Kanten des Kollimators.

Bei einer Spaltbreite von 0,5mm und einer Wellenlänge von 650nm bedeutet dies, dass das erste Minimum unter einem Winkel von  $0,075^\circ$  erscheint. Da dieser Winkel im Bereich des kritischen Winkels für unser Experiment liegt, lässt sich der Fokus nie ohne Interferenzen mit Licht einstellen. Zusätzliche Interferenzen entstehen durch die unterschiedlichen Weglängen, welche die Laserstrahlen durch die Fokussierung zurücklegen. Diese Interferenzen beeinflussen allerdings nicht die Breite des Fokus sondern nur seine Struktur.

Bei Veränderung der Spannung an den fünf Piezo-Stellelementen kann man nun direkt die Veränderung des Laserfokus und der Beugungsbilder beobachten. Auf diese Weise kann ein ca. 1mm breiter Laserstrahl auf weniger als 0,1mm fokussiert werden. Ein kleinerer Fokus ließe sich auf Grund der Beugungserscheinungen nicht erreichen.

Der Schirm und damit der Fokus hatte bei diesen Aufnahmen eine Entfernung von ungefähr 116mm zum Silizium-Streifen.

In den folgenden drei Bildern erkennt man den mittels einer Videokamera aufgenommenen Fokus. Dazu wurde ein Okular durch eine Mattscheibe ersetzt und diese gefilmt.

## Erste Messungen



**Abbildung 25: Bestmögliche Einstellung des Fokus mit einer Videokamera aufgenommen**

	angelegte Spannung [V]
Piezo-Nr.6	0,0
Piezo-Nr.7	-104,81
Piezo-Nr.8	-71,08
Piezo-Nr.9	-109,09
Piezo-Nr.0	-4,36



**Abbildung 26: reflektierter Laser bei vollständig ausgedehntem Piezo-Nr.7. Die anderen Piezo-Stellelemente hatten die gleiche Ausdehnung wie in Abb. 25**

	angelegte Spannung [V]
Piezo-Nr.6	0,0
Piezo-Nr.7	-150,0
Piezo-Nr.8	-71,08
Piezo-Nr.9	-109,09
Piezo-Nr.0	-4,36

## Erste Messungen



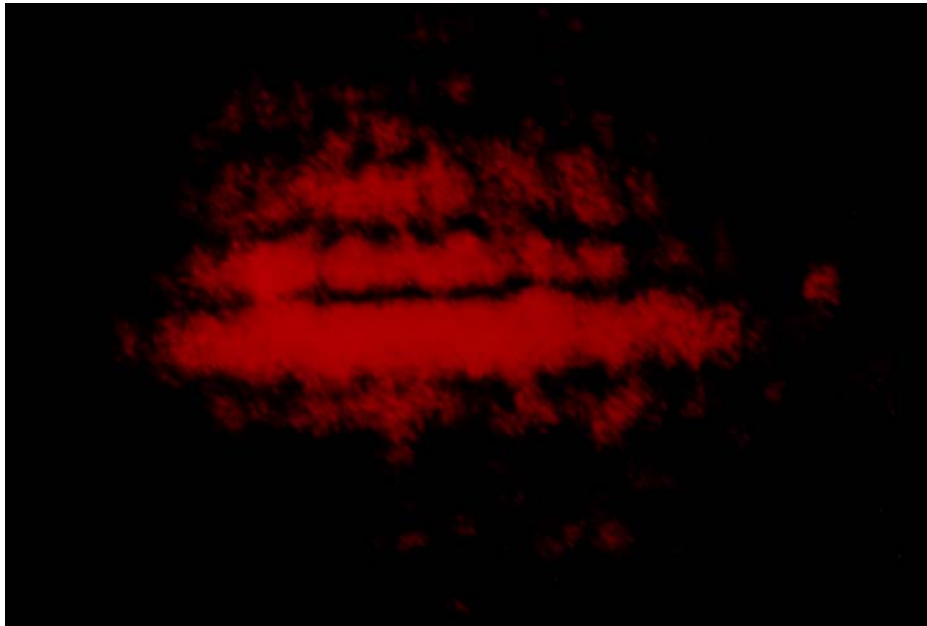
**Abbildung 27: reflektierter Laser bei vollständig zusammengezogenem Piezo-Nr.9. Die anderen Piezo-Stellelemente hatten die gleiche Ausdehnung wie in Abb. 25**

	angelegte Spannung [V]
Piezo-Nr.6	0,0
Piezo-Nr.7	-104,81
Piezo-Nr.8	-71,08
Piezo-Nr.9	-0,0
Piezo-Nr.0	-4,36



## Erste Messungen

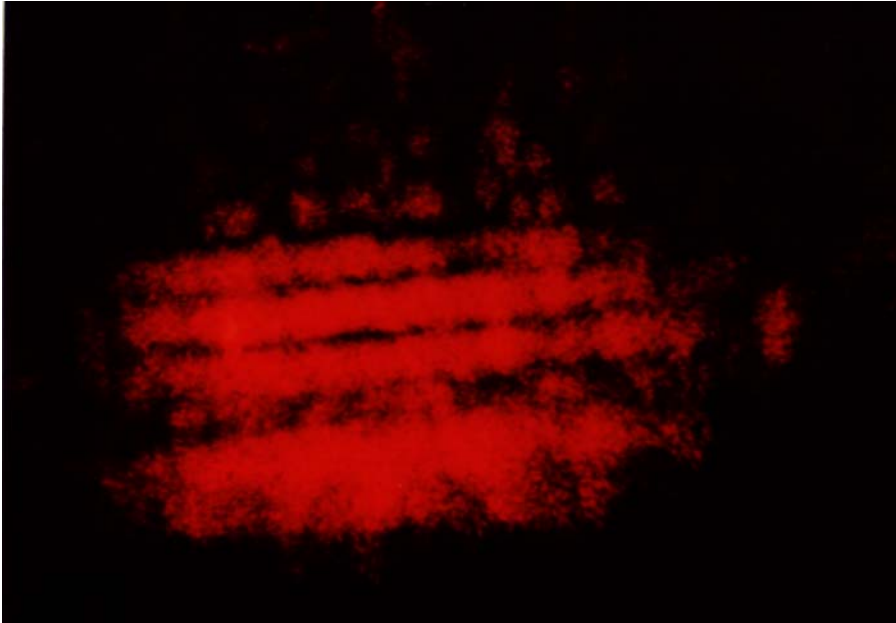
Zusätzlich zu den Aufnahmen mit der Videokamera wurden noch Aufnahmen mit einer analogen Photokamera gemacht. Dazu wurde das entfernte Okular des Mikroskops wieder eingesetzt.



**Abbildung 28: Foto mit teilweise optimierter Einstellung. Die Kamera wurde für dieses Foto direkt auf das Okular aufgesetzt**

	angelegte Spannung [V]
Piezo-Nr.6	0,0
Piezo-Nr.7	-10,07
Piezo-Nr.8	-0,37
Piezo-Nr.9	-69,65
Piezo-Nr.0	-0,0

## Erste Messungen



**Abbildung 29: Foto einer schlechten Fokussierung. Deutlich ist im unteren Bildrand das breite Hauptmaximum zu sehen. Die Gesamtintensität verteilt sich auf einen großen Bereich**

	angelegte Spannung [V]
Piezo-Nr.6	-21,57
Piezo-Nr.7	-69,65
Piezo-Nr.8	-0,0
Piezo-Nr.9	-119,86
Piezo-Nr.0	-59,58

Beim Verstellen der Piezo-Stellelemente im Rahmen dieses Tests trat keine seitliche Verbiegung des Silizium-Streifens auf und damit auch keine undefinierte Reflektion des Laserstrahls.

## 6. Geplante Experimente mit der Strahlfokussierung

### 6.1. Test der Strahlfokussierung am $\alpha$ -Strahl

Aus Zeitgründen war es nicht mehr möglich einen Test am  $\alpha$ -Strahl durchzuführen. Der geplante Aufbau soll hier aber trotzdem beschrieben werden.

Um die Strahlfokussierung am Bonner-Isochron-Zyklotron zu betreiben, wurde als Ort für das Experiment der Hochstromraum des Zyklotrons gewählt, da an diesem Strahlplatz eine maximale Strahlstrecke (~12m) ohne Einfluss von Fokussier- und Umlenkmagneten existiert. Dies ermöglicht einen gleichmäßigen Strahl und somit eine gute Fokussierung, die erheblich von der Form und Struktur des eingestrahelten Ionenstrahls abhängt.

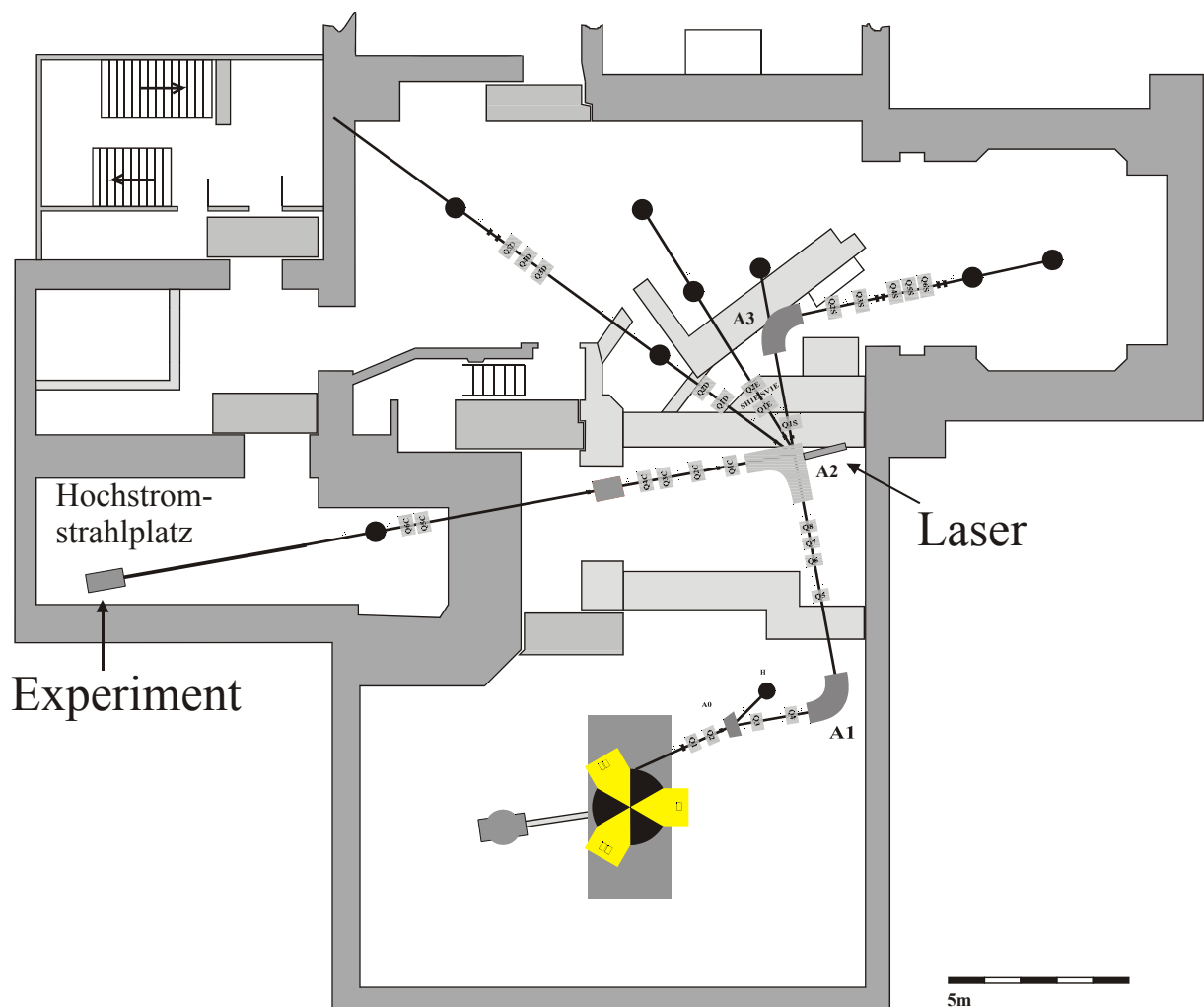


Abbildung 30: Skizze des Bonner-Isochron-Zyklotrons mit Experiment und dem Laser zur optischen Justage.

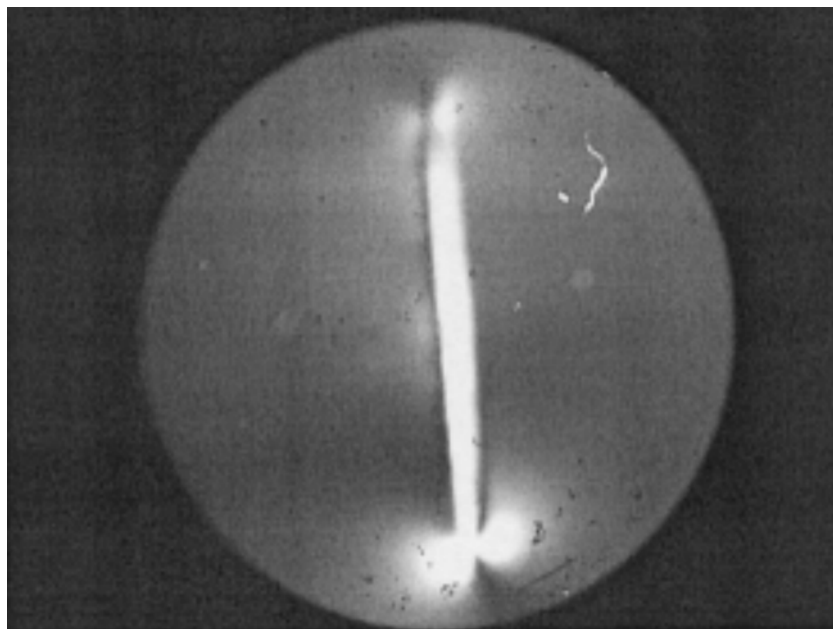
## Geplante Experimente mit der Strahlfokussierung

Um den gesamten Aufbau justieren zu können, soll auch hierbei auf einen Laser zurückgegriffen werden. Es wird jedoch statt eines Laserpointers auf einen stärkeren HeNe-Laser mit einer Leistung von  $>3\text{mW}$  zurückgegriffen. Dieser Laser soll direkt in Strahlrichtung am  $90^\circ$ -Umlenkmagneten A2 angebracht werden. Das entsprechende Fenster hierfür existiert bereits und die Halterung für den Laser befindet sich im Aufbau.

### 6.2. Lokale Bestrahlung von Quarz

Mit der Strahlfokussierung soll, z.B. die Änderung des Brechungsindex von Quarz nach Bestrahlung mit  $\alpha$ -Teilchen untersucht werden. Voruntersuchungen wurden bereits von Frau Dr. U. Männig, im Rahmen ihrer Doktorarbeit, mit einem  $100\mu\text{m}$  breiten  $\alpha$ -Strahl durchgeführt [MÄN00].

Die Strahlfokussierung ermöglicht durch ihre geringe Fokusbreite die Erzeugung von Strukturen innerhalb eines Quarzes, da in einem  $\mu\text{m}$ -Bereich Änderungen des Brechungsindex erzeugt werden können.



**Abbildung 31: Bild eines bestrahlten Quarzes unter Verwendung gekreuzter Polfilter [MÄN00]**

### 6.3. Pinnen<sup>10</sup> von Versetzungen

Soll die Versetzungsstruktur von Proben mittels TEM-Aufnahmen untersucht werden, sind diese Proben auf eine Dicke von unter 1µm zu reduzieren. Da sich bei dieser Reduzierung die Versetzungen von den vorhandenen Pinning-Zentren lösen können, müssen diese Versetzungen vorher zusätzlich gepinnt werden. Dies geschieht durch massives Einbringen von Leerstellen-Clustern, welche die Bewegung der Versetzungen verhindern.

Bisher werden diese Proben zum Pinnen am Reaktor mit Neutronen bestrahlt, was jedoch eine starke Aktivierung der gesamten Probe zu Folge hat.

Der Vorteil des Pinnens mit Hilfe der hier vorgestellten Strahlfokussierung besteht erstens in der geringen Größe des bestrahlten Volumens (⇒ kleinere gesamt Aktivität) und zweitens in der freien Wahl von Teilchenart und Energie. Durch die geschickte Wahl von Ionenart und Energie, kann das Entstehen von langlebigen Reaktionsprodukten vermieden werden. Am Bonner-Isochron-Zyklotron sind folgende Teilchen und dazugehörige Energien möglich:

Teilchenart	mögliche Energien [MeV]
p	7-14
d	14-28
<sup>4</sup> He <sup>2+</sup>	28-56
<sup>3</sup> He <sup>2+</sup>	21-43

Im Rahmen dieser möglichen Anwendungen der Strahlfokussierung, wird auch überlegt, den α-Strahl mit Hilfe einer dünnen Folie aus dem Vakuum austreten zu lassen. So kann der Fokus auch unter Atmosphärenbedingungen genutzt werden, um Proben zu bestrahlen, die man nicht einem Vakuum aussetzen will.

## Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass beim Verstellen der Piezo-Stellelemente kein seitliches Verbiegen des Silizium-Streifens auftrat und der entwickelte Aufbau die Fokussierung eines Laserstrahls, durch das Biegen eines Silizium-Streifens, ermöglicht.

Aus zeitlichen Gründen konnte ein Test am α-Strahl des Bonner-Isochron-Zyklotron nicht mehr stattfinden, dennoch zeigt der Test mit Laserlicht, dass der geplante Aufbau seine

---

<sup>10</sup> meint: Fixieren

## **Zusammenfassung**

Funktion erfüllt. Erst ein Test am  $\alpha$ -Strahl wird zeigen, welche Breite des Fokus erreicht werden kann.

## Anhang

### Technische Daten

#### Piezo-Stellelemente

Hersteller: Piezosysteme Jena GmbH

Produktbezeichnung: PA 16/12

Hub (10%) in  $\mu\text{m}$ : 16

Vorspannung: 150N

Max.Spannung: 150V

Max. Druckbelastung: 1000N

Steifigkeit: 65 N/ $\mu\text{m}$

Resonanzfrequenz: 25kHz

Kapazität (20%): 1,8  $\mu\text{F}$

Auflösung: 0,02nm

Abmessungen:

Durchmesser D: 12mm

Länge L: 35mm

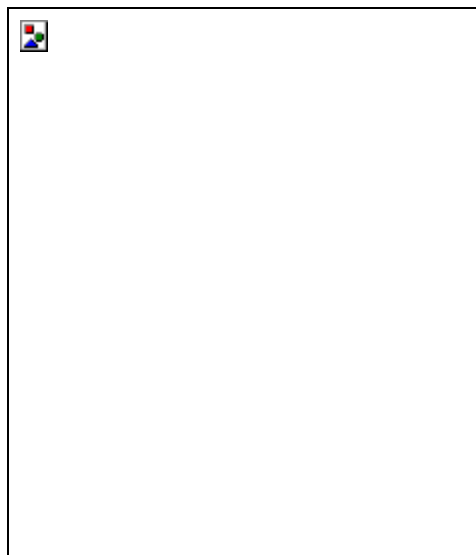


Abbildung 32: Skizze der benutzten Piezo-Stellelemente [JEN01]

# Anhang

Hysteresekurven der Piezo-Stellelemente:

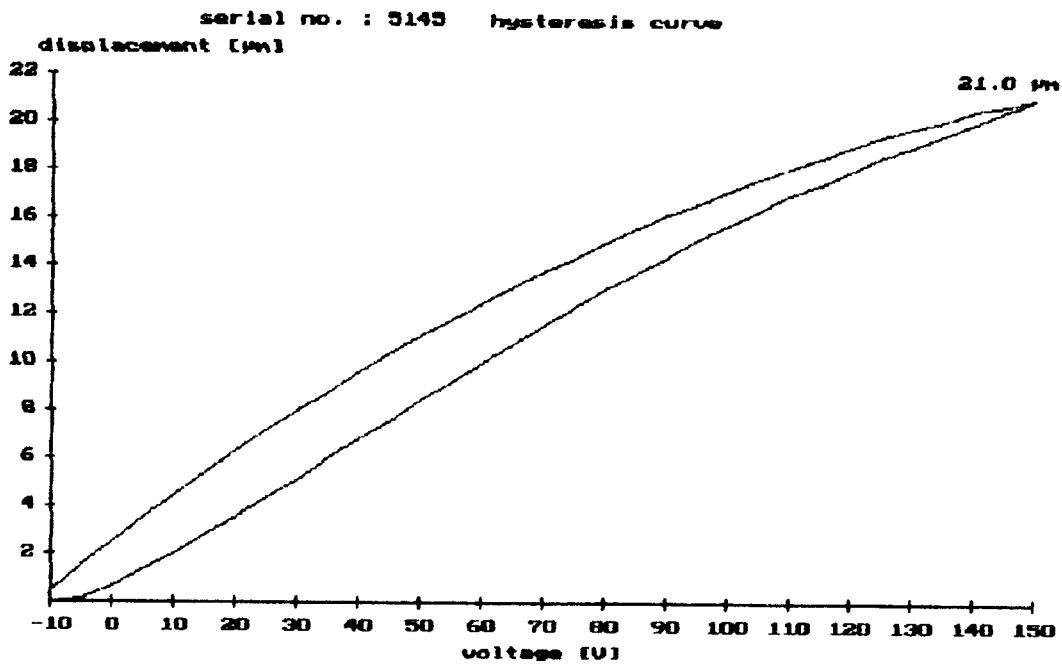


Abbildung 33: Hysteresekurve von Piezo-Nr.5.

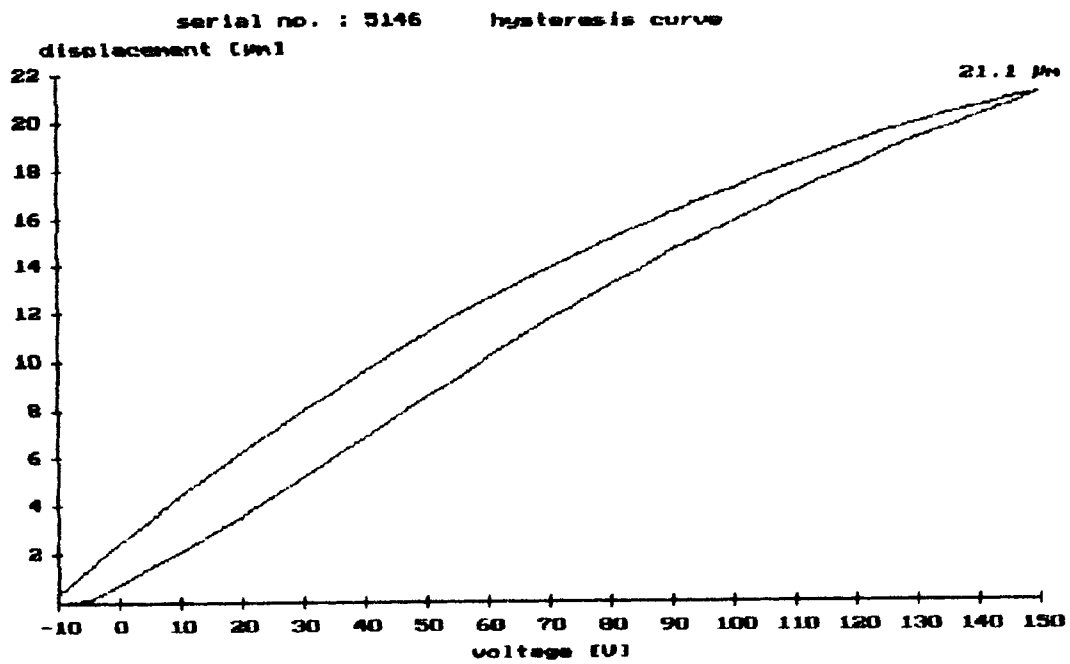


Abbildung 34: Hysteresekurve von Piezo-Nr.6.



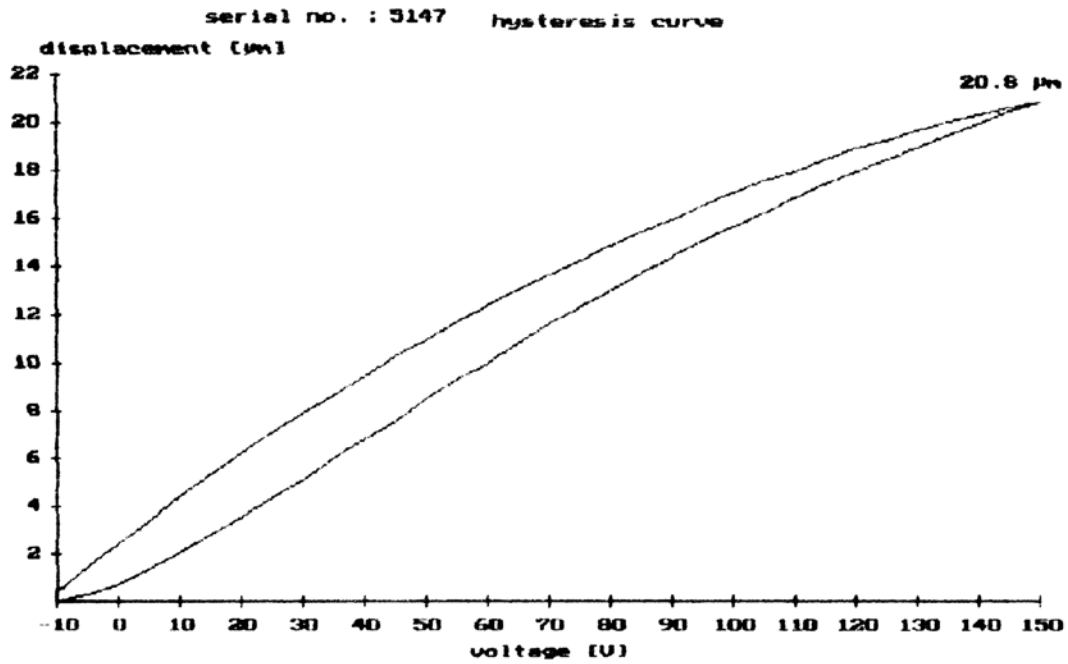


Abbildung 35: Hystereseurve von Piezo-Nr.7.

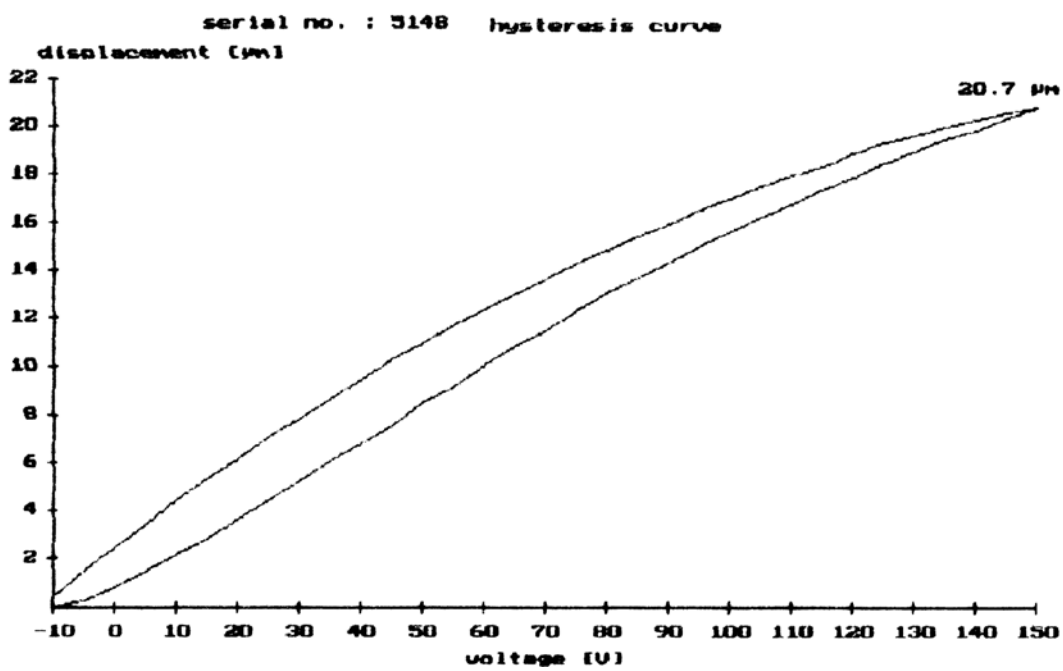


Abbildung 36: Hystereseurve von Piezo-Nr.8.

Anhang

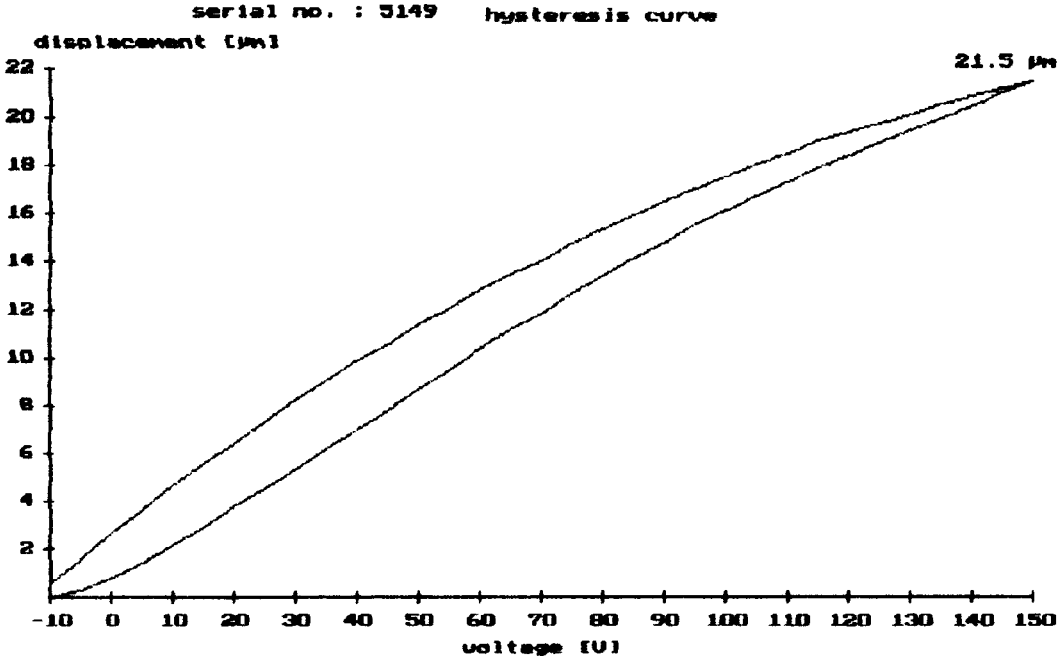


Abbildung 37: Hystereseurve von Piezo-Nr.9.

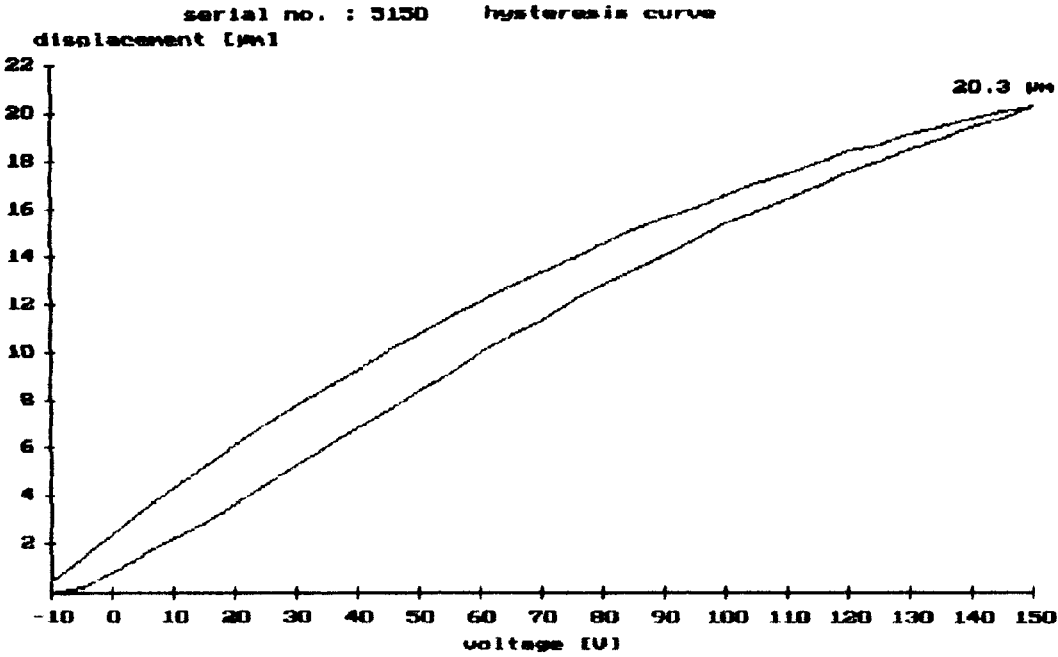


Abbildung 38: Hystereseurve von Piezo-Nr.0.

### D/A-Karte

Hersteller:	ADLINK Technology Inc.
Produktname:	PCI-6308V
Produktbeschreibung:	8 Kanal D/A Karte Auflösung: 12bit (11bit garantiert) 0V bis 10V oder -10V bis 10V Spannungsbereich 4 Digitaleingänge 4 Digitalausgänge Integrierte Spannungsversorgung mit $\pm 15V$ Ausgang

### Netzteil und Verstärker

Das Netzteil ist von der Elektronik-Werkstatt des ISKP<sup>11</sup> der Uni Bonn zusammengebaut worden. Es liefert nach Anschluss an das normale Stromnetz -150V, 150V, -15V und 15V Spannung und dient der Versorgung der sechs Spannungsverstärker.

Die sechs Spannungsverstärker sind von der Elektronik-Werkstatt des ISKP der Uni Bonn entworfen und von mir zusammengelötet worden.

Jeder der sechs Verstärker verstärkt die angelegte Spannung der D/A Karte (0V bis 10V) auf die Steuerspannung der Piezostellelemente (0V bis -150V).

### Beschreibung der erstellten Computer-Programme

#### Programm zur Berechnung von Strahlenverlauf und Spiegelform

Das Programm zur Berechnung von Strahlenverlauf und Spiegelform (STRAHLPOL.EXE) wurde von mir in der Programmiersprache Turbo Pascal geschrieben. Nach der Eingabe von Lindhardwinkel, Strahlquellenentfernung, Strahlquellendicke, Größe des Kollimatorspaltes und Position des Fokus berechnet das Programm die Form des Spiegels, indem es den Spiegel in viele Teilspiegel zerlegt und jeden Teilspiegel so dreht, dass der auftreffende Teilstrahl in den Fokus reflektiert wird. Das Programm gibt, unter Einhaltung des Lindhardwinkels, Strahlverlauf und Spiegelform aus.

---

<sup>11</sup> Institut für Strahlen- und Kernphysik der Universität Bonn

## Anhang

### Programm zur Piezo-Steuerung

Das Programm zur Piezo-Steuerung ist von mir in der Programmiersprache Delphi geschrieben worden. Es dient zur Regelung und Anzeige der Ausdehnungen der Piezo-Stellelemente. Des weiteren gibt das Programm die eingestellten Werte an die D/A-Karte weiter, die diese in Spannungen umwandelt.



**Abbildung 39: Die Programmoberfläche der Piezo-Steuerung**

Beschreibung der Bedienelemente:

Regler 1-6: Mit den sechs Reglern kann die Ausdehnung der Piezo-Stellelemente einzeln verändert werden. Es können Werte zwischen 1 und 4096 eingegeben werden (entspricht der Auflösung der D/A-Karte).

„Karte 0 setzen“: Setzt direkt alle Ausgangsspannungen der D/A-Karte auf Null.

Position:

Laden: Lädt eine gesicherte Piezo-Einstellung.

Sicher: Speichert eine gesicherte Piezo-Einstellung unter dem angezeigten Namen.

Hinzufügen: Fügt eine nach Angabe eines Namens eine Speichermöglichkeit hinzu.

Rename: Ändert den Namen einer gespeicherten Einstellung.

### Steuerung:

Karte in diesem Rechner: Die Karte wird direkt vom Programm gesteuert.

Karte über TCP/IP ansteuern: Die Karte befindet sich in einem anderen Rechner und kann über das Internet gesteuert werden. (Option noch nicht vollständig implementiert, dient der Steuerung während einer Strahlzeit)

keine Karte vorhanden: Dient nur der Simulation.

Shift: ermöglicht das Addieren und Subtrahieren von 1 und 10 bei allen Piezo-Stellelementen gleichzeitig

### Stauen:

Staut oder streckt eine eingestellte Form, ohne dass eine Regelung an den einzelnen Reglern nötig ist.

### Drehen:

Dreht die eingestellte Form um:

die Mitte,

die linke Kante oder

die rechte Kante

### Parabel:

Addiert oder subtrahiert eine Parabel definierbarer Größe zu der bereits eingestellten Grundform.

### Piezo-Refresh:

Das Programm fährt alle Piezos in ihre Grundstellung (0V) und regelt sie anschließend auf die eingestellte Höhe (Aufhebung der Hysterese).

### Auto-Refresh:

Bei Aktivierung wird jede Veränderung der Regler automatisch an die D/A-Karte weiter gegeben (ACHTUNG: es können Fehler durch die Hysterese entstehen).

### Beenden:

Das Programm wird beendet.

Die blauen Balken neben den Reglern zeigen die momentan anliegende Spannung an den Piezo-Stellelementen.

## Literaturverzeichnis

### Literaturverzeichnis

- [BOH48] Bohr, N., *Dansk. Vid. Selsk., Mat. Fys. Medd.*, 18, Nr.8 (1948).
- [GEM74] Gemmell, D.S., *Rev. Mod. Phys.* 46, 1 (1974).
- [JÜN81] Jünemann, G., *Kristallphysik mit positiven Pi-Mesonen*, Universität Stuttgart (1981).
- [KLE90] Kleber, Bautisch, Bohm, *Einführung in die Kristallographie*; Verlag Technik GmbH, (1990).
- [LAU12] von Laue M., *Historical Introduction to 'International Tables for X-Ray Crystallography'* Vol.1 Ed. N.F.M. Henry and K.Lonsdale, Kynoch Press, (1952).
- [MÄN00] Männig, U., *Defektuntersuchungen in Festkörpern mit der Bonner Positronen-Mikrosonde*, Uni Bonn (2000).
- [MOL47] Moliere, G., *Zeits. fur Nat.*, 2a, 133 (1947).
- [MOR73] Morgan, D.V., *Channeling*, John Wiley & Sons (1973).
- [NEL63] Nelson, R.S. und Thompson, M.W., *Phil. Mag.*, 8, 1677 (1963).
- [ROB63] Robinson, M.T. und Oen, O.S., *Phys. Rev.*, 132, 1385 (1963).
- [STA12] Stark, J., *Phys. Z.*, 13, 973 (1912).

### Bildnachweis

- [JEN01] Piezo system Jena GmbH, [http://www.piezojena.de/products/stack\\_pa\\_data.html](http://www.piezojena.de/products/stack_pa_data.html)
- [MÄN00] Männig, U., *Defektuntersuchungen in Festkörpern mit der Bonner Positronen-Mikrosonde*, Uni Bonn (2000) S.71.

## **Danksagung**

Ich danke insbesondere Prof. Karl Maier für die Ermöglichung dieser interessanten und lehrreichen Arbeit und für seine engagierte und persönliche Betreuung während des letzten Jahres.

Herrn Prof. Peter David danke ich für die Übernahme des Korreferates dieser Diplomarbeit.

Der gesamten „Gruppe Maier“ danke ich für die Unterstützung bei meiner Arbeit und die schöne Zeit, die ich währenddessen gehabt habe. Man konnte jeden aus der Gruppe bei Problemen um Rat fragen und daraus folgende Diskussionen waren immer sehr hilfreich.

Ich bedanke mich auch bei allen Festangestellten des ISKP, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre, bei der Gruppe Vianden für Bereitstellung der beiden Silizium-Wafer und beim Max-Planck-Institut-Stuttgart für die Orientierung des ersten Wafers.

Ebenfalls möchte ich mich bei meiner Familie und meiner Freundin Raphaële bedanken, ohne deren Unterstützung ich nie so weit gekommen wäre.

Ich bedanke mich bei allen die mir bei dieser Diplomarbeit geholfen haben.