

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

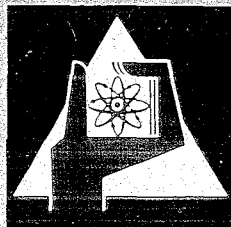
September 1970

KFK 1211

Institut für Reaktorbauelemente

Beobachtungsfenster aus synthetischem Saphir  
(Leukosaphir) in Hochdruckgefäßen

H. Schmidt



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

September 1970

KFK 1211

Institut für Reaktorbauelemente

Beobachtungsfenster aus synthetischem Saphir  
(Leukosaphir) in Hochdruckgefäßen.

- Erfahrungen mit Saphir-Druckscheiben beim Einsatz in gesättigter Wasser-Dampf-Atmosphäre hohen Druckes; Beschreibung einer Sicherung gegen Bersten -

von

H. Schmidt

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG MBH., KARLSRUHE



### Zusammenfassung:

Das Studium der Vorgänge des direkten Stoff- und Wärmetausches beim Eindispersieren von Gas in Flüssigkeit macht für die Kenntnis der geometrischen Abläufe Zeitdehneraufnahmen erforderlich. Solche Untersuchungen werden im System Wasser - Dampf bis zu Betriebsdrücken von rund 200 at durchgeführt. Als Schaugläser finden dabei Scheiben aus synthetischem Saphir (Leukosaphir) Verwendung. Der Versuchsbetrieb zeigt, daß trotz guter Resistenz gegen Druck, Temperatur und angreifendes Medium einige Scheiben der Beanspruchung nicht standhalten, wobei in recht weitem Druckbereich unterschiedliches Bruchverhalten beobachtet wird.

Der erste Teil des Berichtes beschäftigt sich mit der Charakteristik des farblosen Korundes. Für eine gegebene geometrische Anordnung wird das Bruchverhalten des Saphirs diskutiert; eine neue Scheibengeometrie wird vorgeschlagen und über deren Erprobung berichtet.

Im zweiten Teil wird für eine gegebene konstruktive Ausführung eine Berechnung der beim Bersten auftretenden Kräfte durchgeführt. Über die Wahl einer geeigneten Sicherung und deren Erprobung im Versuch wird berichtet.

## Abstract

High speed pictures are required for a study of the phenomena of direct material and heat exchange during the disperison of a gas in a liquid so that the geometrical events can be followed. Investigations of this type are performed in the water-steam system at operating pressures up to some 200 atm. The sight glasses in this case are panes of synthetic sapphire (leucosapphire). Experiments have shown that some panes do not stand up to the stress despite good resistance to pressure, temperature, and the attacking medium, the rupture behavior observed varying over a rather wide range of pressures.

The first part of the report deals with the characteristics of colorless corundum. For a given geometrical setup the rupture behavior of the sapphire is discussed. A new disk geometry is suggested and its testing is reported.

In the second part, the forces occuring during bursting are calculated for a given design. The choice of a suitable safety device and its experimental testing are reported.

## Inhaltsverzeichnis:

1. Einführung
2. Charakteristiken des farblosen Korundes (Leukosaphir)
  - 2.1 Symmetrie und Ausbildung der Kristalle
  - 2.2  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Kristallzüchtung
  - 2.3 Die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Kristallstruktur
  - 2.4 Eigenschaften des  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Kristalls
3. Konstruktive Ausführung von Saphir-Druckfenstern
  - 3.1 Aufnahme der Saphirscheibe im Flansch (geometrische Anordnung)
  - 3.2 Bruchverhalten des thermisch und mechanisch beanspruchten Saphirs
  - 3.3 Reaktion der Saphirscheibe auf schnelle Druckentlastung
  - 3.4 Diskussion und Erprobung einer neuen Geometrie
4. Berechnung der Kräfte einer Dampf-Wasser-Expansion bei gegebener Geometrie

---

  - 4.1 adiabate, reibungsfreie Strömung
  - 4.2 adiabate, reibungsbehaftete Rohrströmung
  - 4.3 maximaler Massenstrom
  - 4.4 Ausströmen mit kritischem Massenstrom, Expansionslinie im Naßdampfgebiet
  - 4.5 Diskussion der Ergebnisse
5. Wahl einer geeigneten Schutzvorkehrung (Berstsicherung)
  - 5.1 Umlenkung des optischen Strahlenganges
  - 5.2 Strahlengangführung durch Lichtleitkabel
  - 5.3 Sicherung mit Verbundglasscheiben
  - 5.4 Erprobung im Versuch, Diskussion der Ergebnisse
6. Literaturverzeichnis
7. Diagramme, Tabellen





## 1. Einführung

Das Studium der Flüssigkeitsbegasung mittels nach oben gerichteter Düsen erfordert eine eingehende optische Beobachtung. Will man die Vorgänge bei der Begasung vollentsalzten Wassers von Sättigungszustand mit Heißdampf bis zum kritischen Druck hin untersuchen, so fällt die Wahl eines geeigneten Druckfensters nicht schwer, da nur noch der syntetische Saphir gute Resistenz gegen das angreifende Medium zeigt. - In den Versuchsstand sind diese Scheiben so eingesetzt, daß sie unter Innendruck gegen Klingerit dichten. Der Innendruck wird mit einer elektrischen Widerstandsheizung durch Hochheizen der Behälterwand aufgebracht, wobei das Wasser, je nach eingestellter Heizleistung, einen bestimmten Sättigungszustand einnimmt. Die Temperatur- und Druckaufgabe erfolgt also gleichzeitig; der Beharrungszustand wird mit einer Temperaturänderung von ca.  $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  angefahren. Die Einbauweise der Saphirscheiben in den Druckbehälter verhindert ein Abschrecken der Saphiraußenphase durch Zugluft.

Konstruktion und Scheiben wurden im Warmversuch (Versuch unter Betriebsbedingungen) bis 230 at und im Kaltversuch (Abdrücken des versuchsbereiten Behälters) bis 300 at erprobt. In 150 - 200 Betriebsstunden wurden gute Erfahrungen bezüglich des Einsatzes dieser Saphirscheiben gesammelt; der Betriebsdruck betrug mehrfach bis zu 150 at bei zugehöriger Sättigungstemperatur.

Ausgangspunkt der hier beschriebenen Untersuchungen ist das plötzliche Bersten einer Scheibe während eines Versuches bei 130 at/ $330 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Da als Berstursache Bedienungsfehler oder äußere Einflüsse auszuschließen sind, gilt es, über den Einsatz der Saphirdruckfenster und über die Wahl einer geeigneten Berstsicherung etwas eingehendere Überlegungen anzustellen.

## 2. Charakteristiken des farblosen Korundes (Leukosaphir)

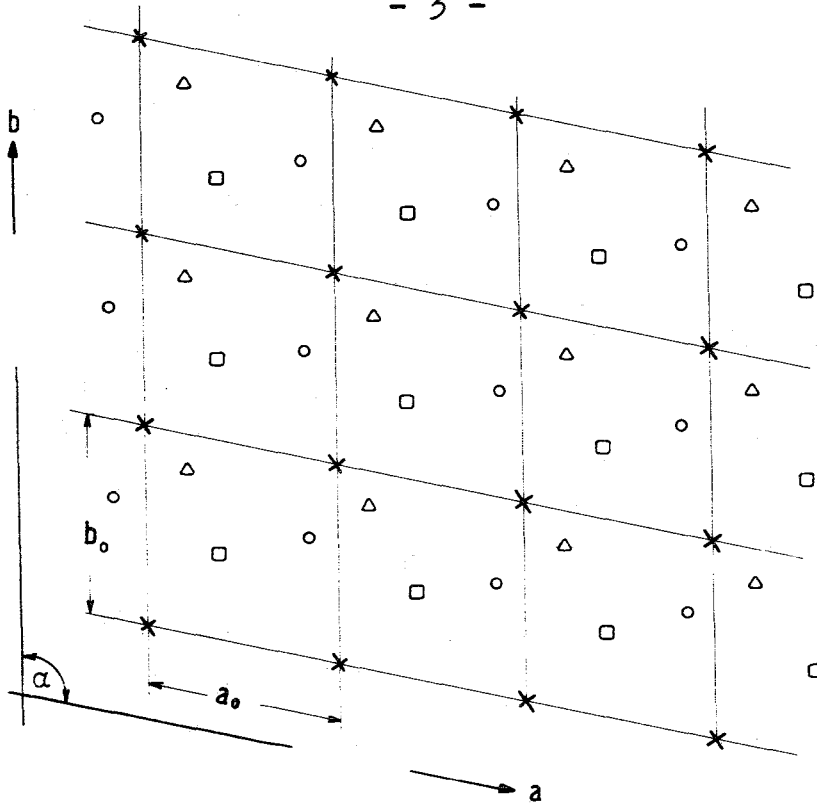
### 2.1 Symmetrie und Ausbildung der Kristalle

Kristalle sind feste Körper mit dreidimensional periodischer Anordnung der Elementarbausteine. Diese Bausteine, Ionen, Atome, Moleküle sind in Form einer Gitterstruktur angeordnet. Neben der Richtungsabhängigkeit der physikalischen Eigenschaften haben die Kristalle die Eigenschaft, bei gleichmäßiger Stoffzufuhr in verschiedenen Richtungen eine unterschiedliche Wachstumsgeschwindigkeit zu besitzen.

Die charakteristischen Eigenschaften der Kristalle gehen auf bestimmte Regelmäßigkeiten in der Anordnung der Gitterbausteine zurück, so auch das Wachstum in Form von Polyedern. Diese Regelmäßigkeit richtet sich nach Symmetriegesetzen. Die verschiedenen geometrischen Kombinationen der Symmetrieelemente führen zu einer Einteilung der Kristalle in 32 Kristallklassen, die in 7 Koordinatensysteme unterteilt sind, welche der analytischen Beschreibung des Gitters in Bezug auf Gitterpunkte und Netzebenen dienen. Dieser Klassifizierung lassen sich 230 Raumgruppen zuordnen.

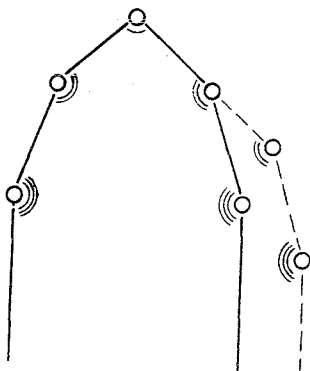
Ausgehend von einem zweidimensionalen Modell, für dessen verschiedene Gitterbausteine die hier gewählten Symbole stehen sollen, lassen sich folgende allgemeingültige Definitionen finden.

Das Gesamtmotiv wiederholt sich in a-Richtung nach der Länge  $a_0$ , in b-Richtung nach der Länge  $b_0$ . Man spricht im zweidimensionalen System von der Translationsrichtung a und b und der Translationsperiode (Translationsbetrag)  $a_0$  und  $b_0$ . Im dreidimensionalen System kommt eine dritte Translationsrichtung c hinzu. Die kleinsten Translationsperioden bezeichnet man als Elementarperioden und den von ihnen aufgebauten Raum als Elementarzellen.



Jede gedachte Richtung ist im allgemeinen verschieden mit Atomschwerpunkten besetzt; dadurch sind zwangsläufig die vektoriellen Eigenschaften (z.B. Lichtausbreitung, Kompressibilität, Härte, usw.) in verschiedenen Richtungen des Kristalls verschieden. Dieses Verhalten bezeichnet man als die Anisotropie des Kristalles.

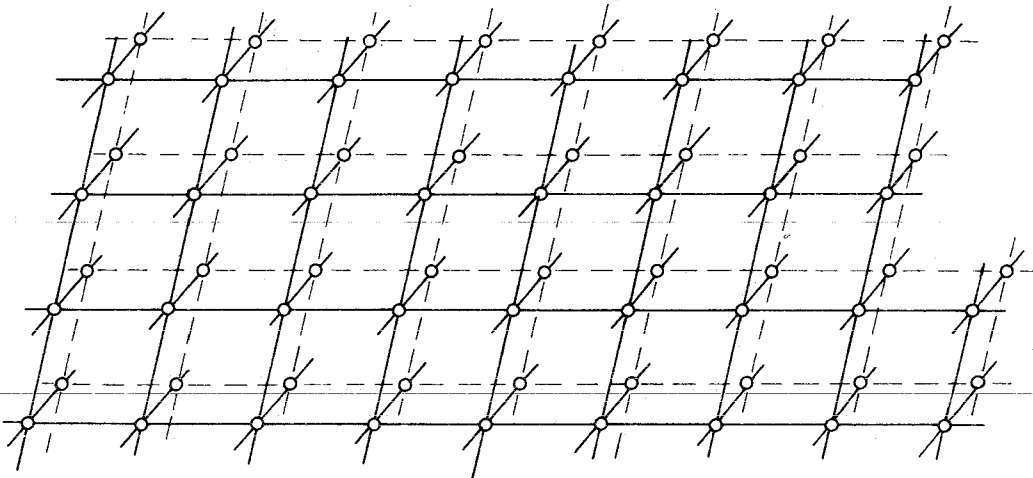
Kristalle sind von ebenen Flächen begrenzt; bei gleicher Kristallart sind die Winkel zwischen analogen Flächen bei gleichem Druck und Temperatur gleich (sog. Gesetz der Winkelkonstanz). Der Flächengröße kommt dabei keine Bedeutung zu.



Gleiche Winkel, aber unterschiedliche Fläche; gestrichelte Linie stellt sog. Kristallverzerrung dar.

Kristallflächen sind zweidimensional periodisch mit atomaren Teilchen besetzte Ebenen (sog. Netzebenen) und Kristallkanten sind eindimensional periodisch besetzte Geraden (sog. Gittergeraden).

Durch unendlich oft wiederholte Translation eines Punktes in drei nicht komplanaren Richtungen erhält man ein Punktgitter, das wegen seiner im allgemeinen Fall von  $90^\circ$  abweichenden drei Achsenneigungen als triklinen Translationsgitter bezeichnet wird.



Zu jedem Gitterpunkt gehören 8 in diesem Punkt zusammenstoßende Elementarzellen; somit ist nur  $1/8$  eines Gitterpunktes einer Elementarzelle zuzuordnen, d.h. aber, bei 8 Gitterpunkten pro Elementarzellen: jede Elementarzelle enthält einen Punkt.

Die Elementarperioden verschiedener Richtungen sind im allgemeinen verschieden groß ( $a_0 \neq b_0 \neq c_0$ ); die Winkel der Kanten der Elementarzellen bezeichnet man wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Winkel } a \wedge b &= \gamma \\ \text{Winkel } a \wedge c &= \beta \\ \text{Winkel } b \wedge c &= \alpha \end{aligned}$$

Durch Translation eines Punktes bei willkürlicher Wahl der 3 Winkel zwischen den Translationsrichtungen und der drei Translationsbeträge erhält man noch 6 weitere Gitter, somit 7 sog. einfache primitive Gitter.

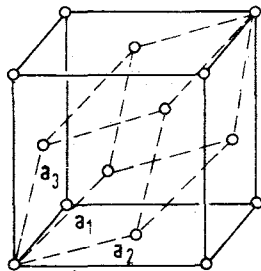
Kristallsystem	Elementarperioden auf den kristallographischen Achsen	Von den Achsen eingeschlossene Winkel
triklin	$a_0 \neq b_0 \neq c_0$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
monoklin	$a_0 \neq b_0 \neq c_0$	$\alpha = \gamma = 90^\circ; \beta \neq 90^\circ$
orthorhombisch	$a_0 \neq b_0 \neq c_0$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
tetragonal	$a_0 = b_0 \neq c_0$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
hexagonal und trigonal	$a_0 = b_0 \neq c_0$	$\alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$
rhomboedrisch	$a_0 = b_0 = c_0$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ; \alpha_R =$ Rhomboeder-Winkel
kubisch	$a_0 = b_0 = c_0$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

Außer diesen Gittern gibt es noch 7 weitere Kristallgitter, die sog. mehrfach-primitiven Gitter.

Wenn z.B. die drei Translationsrichtungen jeweils einen Winkel von  $60^\circ$  einschließen und die Translationsbeträge in allen drei Richtungen gleich sind, dann ergibt sich ein rhomboedrisches Punktgitter mit dem Rhomboederwinkel  $\alpha_R = 60^\circ$ . Man kann aber aus diesem speziellen Gitter eine größere Zelle von Würfelform herausgreifen, indem man das rhomboedrische Punktgitter auf das kubische Kristallsystem bezieht. Diese kubische Elementarzelle enthält nun außer auf den 8 Eckpunkten noch jeweils in der Mitte der sechs Würfel­flächen einen translatorisch äquivalenten Gitterpunkt; sie ist somit allseitig flächenzentriert.

Jeder Punkt auf den Flächen ist zwei Elementarzellen gemeinsam, also in Bezug auf eine Elementarzelle nur  $1/2$  wert; somit  $6 \times 1/2 = 3$  Punkte. Mit  $8 \times 1/8$  Eckpunkten bekommt

diese Elementarzelle den Inhalt von 4 identischen Punkten. Eine rhomboedrische Elementarzelle mit  $\alpha_R = 109^\circ 28' 28''$  kann man in ein kubsich raumzentriertes Gitter in ähnlicher Weise einordnen; dabei erhält die Elementarzelle 2 identische Gitterpunkte.



Man sieht also, daß hier im Gegensatz zu den einfach primitiven Punktgittern, außer an den Ecken der Elementarzellen, noch weitere Punkte vorhanden sind. Auf diesem Wege kann man durch Translation eines Punktes in 14 Translationsgruppen unterscheiden, in die sog. Pravais-Gitter:

P (primitives), triklines, monoklines, rhombisches, tetragonales, kubisches oder hexagonales Gitter,

R (rhomboedrisches) Gitter

I (innenzentriertes) rhombisches, tetragonales oder kubisches Gitter,

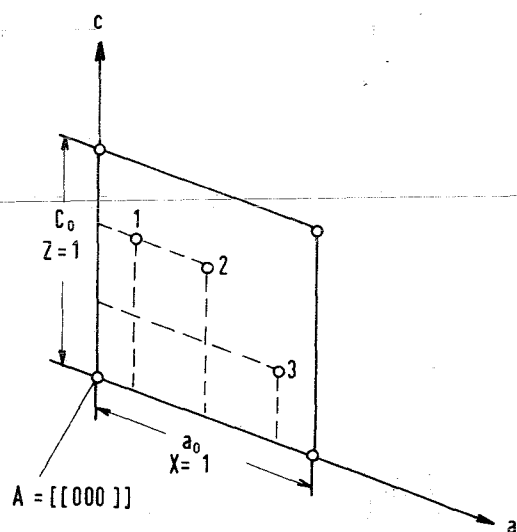
F (allseitig-flächenzentriertes) rhombisches oder kubisches Gitter,

C (flächenzentriertes) monoklines oder rhombisches Gitter.

Die Gitter sind durch Translation eines Punktes entstanden, d.h., daß alle Gitterpunkte identisch sind und nur von den Schwerpunkten einer Atomart besetzt werden können. Die große Bedeutung dieser Gitter liegt nun darin, daß man sich jede noch so komplizierte, vielatomige Kristallstruktur durch parallele Ineinanderstellung mehrerer kongruenter Kristallgitter aufgebaut denken kann.

In der Elementarzelle nehmen die Atome bestimmte Lagen ein, die eindeutig durch ein Koordinatensystem angegeben werden können. Parallel zu den gedachten Kanten einer Elementarzelle laufen die kristallographischen Achsen a, b und c. Die auf die a-Achse bezogene Koordinate bezeichnet man mit x, die auf die b- und c-Achse bezogenen mit y und z. Der Koordinaten-Nullpunkt ist ein Eckpunkt der Elementarzelle. Die Koordinaten der einzelnen Atome (Punktkoordinaten) werden dadurch ermittelt, daß man sich zu den kristallographischen Achsen parallel laufende Ebenen durch die Punkte gelegt denkt und dann feststellt, welche Bruchteile der Koordinateneinheit abgeschnitten werden.

Beispiel:



Ebene b liegt in Zeichenebene.

Punkt 1:  $x = \frac{1}{6}$  ;  $y = 0$  ;  $z = \frac{2}{3}$

Symbol  $[\frac{1}{6} 0 \frac{2}{3}]$

Punkt 2:  $x = \frac{1}{2}$  ;  $y = 0$  ;  $z = \frac{2}{3}$

Symbol  $[\frac{1}{2} 0 \frac{2}{3}]$

Punkt 3:  $x = \frac{5}{6}$  ;  $y = 0$  ;  $z = \frac{1}{3}$

Symbol  $[\frac{5}{6} 0 \frac{1}{3}]$

Als Koordinatenanfangspunkt ist der Eckpunkt A der Elementarzelle gewählt; er ist mit jedem anderen Eckpunkt identisch.

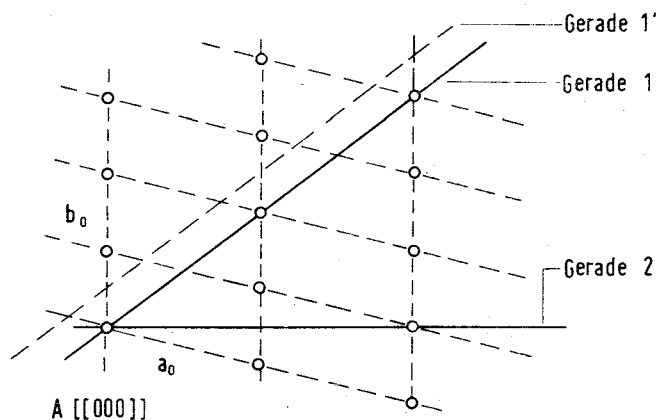
$$A = [[000]] = A' = [[001]]$$

somit  $[[000]] = [[001]]$

Ebenso ist in einer Kristallstruktur jede parallele Richtung identisch, man kann somit jede parallel verschieben, bis sie durch den Koordinatennullpunkt, d.h. den Schnittpunkt der

kristallographischen Achsen geht. Dann genügen zur eindeutigen Kennzeichnung ihrer Richtung die Koordinaten eines Punktes. Da das Verhältnis der Koordinaten eines jeden Punktes auf einer Geraden gleich ist, wird die Angabe der Richtung durch das in die kleinstmögliche ganze Zahl gebrachte Koordinatenverhältnis gemacht. Als Symbol dient  $(uvw)$ .

Beispiel:



Gerade 1: Auf der a-Achse:  $u = 1$   
 Auf der b-Achse:  $v = 0$   
 Auf der c-Achse:  $w = 2$

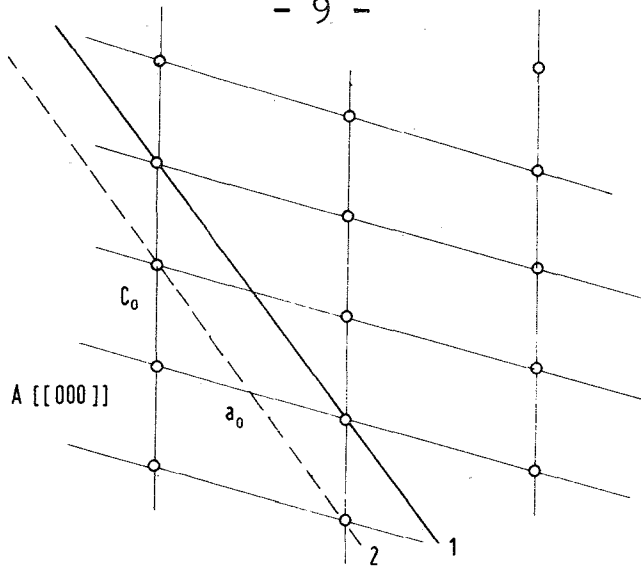
somit Richtungssymbol  $[102]$

Gerade 2: Richtungssymbol  $[201]$   
 Richtungssymbol der a-Achse  $[100]$

Im hexagonalen Kristallsystem besitzt die c-Achse das Richtungssymbol  $[0001]$ , weil man dort zur Steigerung der Übersichtlichkeit und Anschaulichkeit zu  $a = a_1$  und  $b = a_2$ , die den Winkel  $\gamma = 120^\circ$  bilden, in der gleichen Ebene noch eine dritte Achse  $a_3$ , ebenfalls unter  $120^\circ$  zu  $a_1$  und  $a_2$  verwendet.

Eine Fläche ist in einem Koordinatensystem durch die sog. Achsenabschnitte gegeben. Die kristallographischen Achsenabschnitte werden in den jeder Achse zukommenden natürlichen Maßeinheiten, den Identitätsperioden  $a_0$ ,  $b_0$  und  $c_0$  gemessen. Als Beispiel diene ein einfach-primitives monoklines Gitter.





b-Richtung stehe senkrecht auf Zeichenebene.

Die Fläche 1 schneidet folgende Achsenabschnitte ab:

auf der a-Achse	1 Einheit
auf der b-Achse	$\infty$ Einheiten
auf der c-Achse	2 Einheiten

Die Fläche 2 schneidet die Einheiten  $1/2, \infty, 1$  ab. Es ist aufgezeigt, daß es in jedem Kristallgitter eine Schar unendlich vieler, paralleler Netzebenen gibt, die sich leicht durch das Verhältnis der Achsenabschnitte kennzeichnen lassen, denn  $1 : \infty : 2 = 1/2 : \infty : 1$ .

Das Verhältnis der Achsenabschnitte genügt völlig, um die Lage einer Fläche im Bezug auf das Achsenkreuz eindeutig zu beschreiben. In der Kristallkunde benutzt man nun das reziproke Verhältnis, um eine Netzebene bzw. Kristallfläche zu beschreiben, wobei man den kleinsten ganzzahligen reziproken Abschnitt auf der a-Achse mit h, auf der b-Achse mit k und auf der c-Achse mit l bezeichnet.

Man läßt dann das Verhältniszeichen (:) weg und schreibt dafür eine runde Klammer. Somit erhält man das Symbol für die Flächenindizes (h k l)

$$1/1 : 1/\infty : 1/2 = 2/1 : 1/\infty : 1/1 = 2 : 0 : 1 \hat{=} (2 0 1)$$

Negative Achsenabschnitte werden durch ein über die jeweilige Ziffer gesetztes Minuszeichen kenntlich gemacht. Man muß streng zwischen dem Verhältnis der Achsenabschnitte und dem sog. Achsenverhältnis unterscheiden; letzteres gibt das Verhältnis der Längen oder der Identitätsperioden  $a_0 : b_0 : c_0$  an.

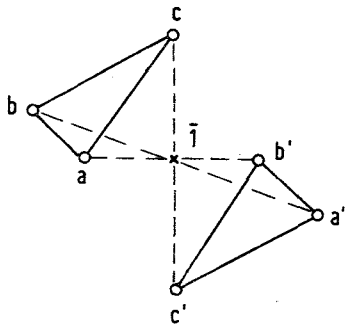
Das Achsenverhältnis wird in der Form  $\frac{a_0}{b_0} : 1 : \frac{c_0}{b_0}$  angegeben und als  $a : 1 : c$  geschrieben.

Es ist kein Verhältnis rationaler Zahlen, denn z.B. beim rhombischen Kristallsystem des  $\text{Ba SO}_4$  ist  $a_0 = 8,85 \text{ \AA}$ ,  $b_0 = 5,44 \text{ \AA}$  und  $c_0 = 7,13 \text{ \AA}$ ; demnach ist das Achsenverhältnis  $1,627 : 1 : 1,311$ .

Bisher wurde von der Symmetrie der Kristalle nicht gesprochen, sondern nur von der dreidimensional unendlichen, periodischen Anordnung der Gitterbausteine. Die Regel im Reich der Kristalle ist aber eine bestimmte symmetrische Anordnung von Flächen bzw. von atomaren Schwerpunkten. Darin liegt auch das vektorielle Eigenschaftsverhalten begründet, das nicht in allen Richtungen verschieden ist, sondern daß es symmetrisch gleichwertige Richtungen und Flächen gibt, die sich gleich verhalten.

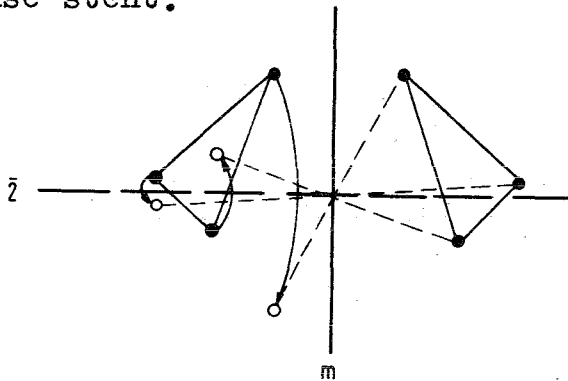
Man muß verschiedene Arten von Symmetrieoperationen unterscheiden, die eine Punktanordnung, eine Richtung oder eine Netzebene in eine identische, jedoch in anderer Lage befindliche überführen. Ein solches Symmetrieelement ist die Drehachse. Als ihre Zähligkeit ist die Anzahl der Drehoperationen definiert, die erforderlich ist, um eine Kristallfläche wieder zur Deckung zu bringen. Man kennt nur 1-, 2-, 3-, 4- und 6-zählige Drehachsen, d.h. die jeweilige Drehoperation besteht aus einer Drehung um  $360^\circ/n$ , wobei  $n = 1, 2, 3, 4$  bzw.  $6$  ist.

Die Drehinversionsachse liefert gekoppelte Symmetrieoperationen. Sie bringt z.B. einen Punkt mit sich selbst zur Deckung, wenn eine Drehung um  $360^\circ/n$  um eine Achse und außerdem eine Inversion um einen Punkt, den Symmetriepunkt, ausgeführt wird.



Drehung um volle  $360^\circ$ ,  
Inversion an einem Punkt:  
einzählige Drehinversions-  
achse identisch mit Symmetrie-  
zentrum (Symbol  $\bar{1}$ )

Eine zweizählige Drehinversionsachse ist identisch mit der Wirkung einer Spiegelebene (Symbol  $m$ ), die senkrecht auf der Achse steht.



Außerdem kennt man noch die drei-, vier- und sechs-zählige Drehinversionsachse.

Jedes dieser 10 Symmetrieelemente stellt nun eine Kristallklasse dar. Da nun auch Kombinationen der Symmetrieelemente möglich sind, erreicht man eine Zahl von 32 Kristallklassen. Die bisher besprochenen Drehachsen, Drehinversionsachsen, Symmetriezentren und Spiegelebenen werden am Makro-Kristall beobachtet. - Weitere Symmetrieelemente sind noch anzuführen, wenn man einen Kristall nicht als Kontinuum, sondern als homogenes Diskontinuum, somit seine atomare Bausteinanordnung betrachtet. Diese Betrachtungsweise ist in den sog. Raumgruppen definiert und klassifiziert.

Eine weitere theoretische Betrachtung wird kompliziert und vielschichtig durch eine Vielzahl von Symmetrien pro Kristallgitter und Kristallklasse und nicht zuletzt durch unterschiedliche Symbole und Bezeichnungsmethoden.

## 2.2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Kristallzüchtung

Das Bisherige soll lediglich zum besseren Verständnis bei der Behandlung von Kristallform und -struktur des Saphirs dienen.

Aluminiumoxid ist in mikrokristalliner, undurchsichtiger Form weiß. Der Schmelzpunkt liegt bei 2050° C. Kristallisiertes Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Korund) ist in reinem Zustand durchsichtig und farblos; geringe Mengen von anderen Metalloxiden verleihen dem Korund rote, blaue, gelbe oder grüne Farbe, die in mannigfaltigen Zwischentönen auftreten. Aluminiumoxid Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ist polymorph. Nur die α-Form (Tonerde, Korund, Rubin, Saphir) besitzt große Beständigkeit; diese Modifikation ist durch rhomboedrische Kristallsymmetrie gekennzeichnet.

Das β-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ist die bei sehr hohen Temperaturen beständige Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Modifikation. Sie bildet sich gelegentlich in Form dreieckiger, sich überlappender Kristallplatten bei langsamer Abkühlung von geschmolzenem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dabei scheint die Anwesenheit kleiner Mengen gewisser anderer Metalloxide wie MgO oder Na<sub>2</sub>O wesentlich zu sein.[1]

Die Umwandlung von α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in β-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> erfolgt bei 1500 - 1800 °C; sie ist anscheinend monotrop, denn die Rückwandlung des entstandenen β-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> läßt sich durch Erhitzen oberhalb oder unterhalb des Schmelzpunktes nicht erzwingen. Nach anderen Untersuchungen geht dagegen die Rückwandlung dann vor, wenn während des Erhitzens die Metalloxide entzogen werden [1]. Die β-Modifikation ist charakterisiert durch hexagonale Kristallsymmetrie, vorzügliche Spaltbarkeit nach der Basis, geringe Härte und schwach negative Doppelbrechung. Ein anderer Autor stellt keine gute Spaltbarkeit fest. Es gibt noch weitere Modifikationen, nämlich γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, δ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ρ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; da ihre Beziehung zur α-Modifikation unklar ist, sollen sie hier ausgeschieden werden.

Bei der Beschreibung der kristallographischen Eigenschaften der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Kristalle ist zunächst die hexagonale und rhomboedrische Kristallform zu erwähnen. Das  $\text{Al}_2\text{O}_3$  scheidet sich aus der Schmelze entweder in Rhomboedern oder bei Zusatz von  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ba CO}_3$  oder  $\text{Na CO}_3$  in Form dünner, sechseckiger Kristallblättchen aus. Da es sich bei der Saphirherstellung (Leukosaphir, farblos) um extra reines, feinstpulverisiertes  $\text{Al}_2\text{O}_3$  als Ausgangsprodukt handelt, genügt es, bei der Betrachtung der Kristallstruktur das Interesse auf die rhomboedrische  $\alpha$ -Modifikation zu legen, denn der Saphir kristallisiert aus der Schmelze in dieser Form.

Das Achsenverhältnis, also das Verhältnis der Längen der Identitätsperioden beträgt  $c : a = 1 : 0,7325$ , gemessen am natürlichen und künstlichen Rubin und  $c : a = 1 : 0,7321$  gerechnet.

Die Kristallform des  $\beta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  ist hexagonal, das Achsenverhältnis lautet  $c : a = 1 : 4,002$ . Der Elementarkörper enthält 12 Molekel  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; der Atomgitteraufbau ist ungewiß. Man nimmt an, daß der Elementarkörper 1 Na-, 23 Al- und 35 O-Atome enthält. Die Atome im Gitter sind wahrscheinlich so angeordnet, daß parallel der Basis 4 Ebenen mit O-Atomen liegen und dazwischen verteilt die Al-Atome angeordnet sind. Die Anordnung wiederholt sich spiegelbildlich, wobei die Bindung über die Spiegelebene durch O-Tetraeder mit den Na-Atomen hergestellt wird. Diese Bindung ist schwach, womit die gute Spaltbarkeit erklärt wäre.

Wie schon wiederholt erwähnt, sind unsere Beobachtungsfenster aus synthetischem, farblosem Saphir gefertigt. Ausgangsprodukt dieses sogenannten Leukosaphirs ist extra reines, feinstpulverisiertes  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , das nach zwei Methoden erschmolzen werden kann.

Zur Herstellung von  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  - Kristallen ist als erstes das Verneuil-Verfahren (Flammenschmelz-Verfahren) zu erwähnen, das darauf beruht, daß feinstes Aluminiumoxidpulver, hergestellt aus reinstem Aluminiumalaun durch thermische Zersetzung bei 1000 - 1100 °C, in einer Knallgasflamme in einem Muffelofen erschmolzen wird. In den Ofen ragt senkrecht von unten ein feuerfester Stift, auf dem das auftreffende Pulver zu einer kleinen Kugel zusammengeschmolzen wird. Weiteres auftreffendes Pulver wird ebenfalls geschmolzen, und es bildet sich unter gleichzeitiger Keimauslese ein Stiftchen aus Korund, der Fuß des entstehenden Steins. Bei vermehrter Pulverzufuhr und gleichzeitig vergrößertem Flammenkegel wächst eine Birne von 10 - 20 mm Durchmesser und einer Höhe von 50 - 60 mm. Die Daten lassen erkennen, daß in senkrechter Richtung die Wachstumsachse der Schmelzbirne liegt. Erfahrungsgemäß liegt in einem Winkel von 50 - 80 ° zur Wachstumsachse die optische Achse der Birne. Die Ebenen, in denen Birnenachse und optische Achse liegen, bilden bevorzugte mechanische Spaltflächen, beispielsweise genügt schon das Abbrechen der Birnenspitze, um die Schmelzbirne in ihrer Längsrichtung (Wachstumsrichtung) in zwei Hälften zu zerlegen.

Nach einer amerikanischen Angabe [6] lassen sich scheiben- (diskus)- und glockenförmige Saphirkristalle bis zu einem Durchmesser von 12 cm im Flammenschmelzverfahren herstellen. Das wird erreicht, indem dem Kristall während seines Wachstums im Muffelofen neben einer Rotation um die vertikale Achse noch eine Oszillation längs einer horizontalen Achse auferlegt wird. Ist die Amplitude größer als der Durchmesser der Flamme, wächst der Kristall in Plattenform, bei kleinerer Amplitude wächst er in Glockenform.

Das Flammenschmelzverfahren gilt als die Herstellungsart der synthetischen Korunde. Sie führt bei Anwendung üblicher Methoden zu kleinen Saphirgeometrien, die vorzugs-

weise in der Uhren- und Lagersteinindustrie Verwendung finden.

Große Geometrien werden nach einem anderen Verfahren, mittels Kristallzucht aus der Schmelze gewonnen. Aus der Vielzahl der bekannten Methoden der Kristallzucht aus der Schmelze ist hier das Ziehverfahren zu beschreiben, denn einmal wird es in der Literatur als fabrikmäßige Herstellungsart von Kristallen für optische Zwecke geschildert, zum anderen sind nach Angabe des Herstellers die von uns verwendeten Saphire auf diese Weise gefertigt.

Die Kristallzucht aus der Schmelze läßt sich nur auf solche Stoffe anwenden, die erstens unzersetzlich schmelzbar sind und zweitens auch eine gewisse Überhitzung vertragen, denn die Temperatur der in einem beheizten Tiegel befindlichen Schmelze liegt eindeutig oberhalb der Schmelztemperatur. - Ein beispielsweise mit Preßluft gekühlter Stab wird in die Schmelze eingetaucht. Um die gekühlte Spitze bildet sich eine Kalotte von radial verlaufenden Kristalliten. Nach einigen erfahrungsbedingten Kunstgriffen wächst dann an den polykristallinen Kristallkörpern ein einkristalliner Körper in Form eines Diskus an. Ist dieser Einkristallkörper bis auf wenige mm an die Tiegelwand herangewachsen, wird der Kühler angehoben bis der Kontakt mit der Schmelze unterbrochen ist; Stab-Kühlung und Tiegelheizung werden abgestellt. Nach dem Erstarren der Restschmelze im Tiegel wird der Kristall vom Halter gelöst und im Tiegel abgesetzt. Der abgedeckte Ofen kühlt langsam (über Nacht) ab, um Wärmespannungen im Kristall zu vermeiden. Das erzeugte Produkt ist ein sog. Rohling, das Material der Saphirdruckfenster. Dieses Verfahren hat gegenüber den anderen, nicht beschriebenen Herstellungsarten aus der Schmelze, beispielsweise dem Gradientverfahren, das ist das Durchziehen der Schmelze mit einem Temperaturgradienten konstanter Geschwindigkeit, verschiedene Vorteile.

Im Ziehverfahren ist die Schmelze oben kälter als unten, da der Kristall von oben nach unten wächst, findet eine dauernde Durchmischung der Schmelze statt, was die unvermeidliche Anhäufung der Verunreinigungen in der Kristallisationszone vermeidet. Weiterhin ist der Temperaturgradient an der Kristallisationszone von den thermischen Eigenschaften und Dimensionen des Tiegels unabhängig und seine Größe läßt sich in weiten Grenzen regulieren. Die Herstellung von orientierten Kristallen, z.B. Lage der optischen Achse senkrecht zur Scheiben(Diskus)-Ebene, läßt sich zumindest theoretisch leicht durch das richtungsorientierte Aufkitten eines Keimkristalles an die Spitze des gekühlten Ziehstabes verwirklichen. Da der Kristall die Tiegelwand nicht berührt, besteht das Problem des Anhaftens und des HerauslöSENS aus dem Tiegel nicht, außerdem werden die Kristalle nicht verspannt.

Als wesentlicher Nachteil dieser speziellen Herstellungsmethode ist die schwierige Kontrolle und Abstimmung der Temperatur von Impfkristall und Schmelze bei Beginn der Kristallisation zu nennen.

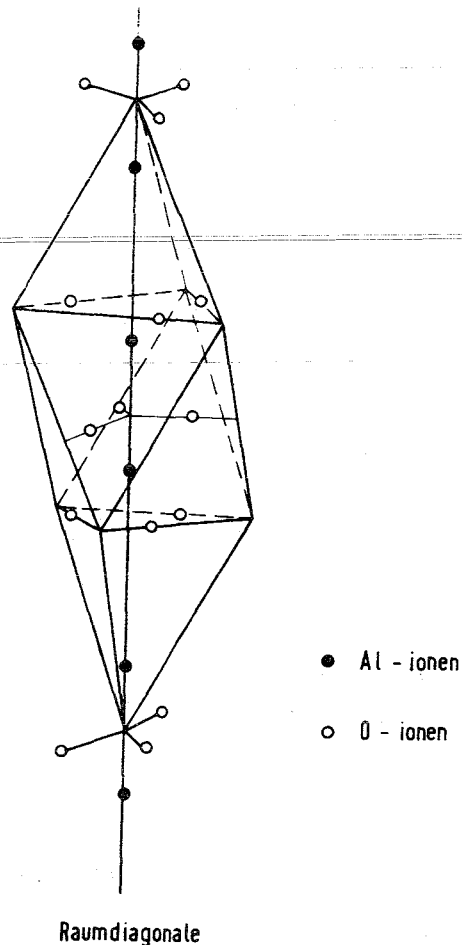
Daneben bestehen noch andere Schwierigkeiten, die ganz allgemein bei der Kristallzüchtung aus der Schmelze bestehen. Beispielsweise wird der Kristallisationsvorgang durch das Auftreten von Wärmekonvektionsströmungen, die die Schmelze in Bewegung bringt, gestört. Auch ist die Schmelze in Nähe des Erstarrungspunktes verhältnismäßig zähflüssig, dadurch wird der ordnungsgemäße Einbau der Partikel in das Kristallgitter erschwert. Dies wird beim Ziehverfahren durch den hohen Temperaturgradienten an der Kristallisationszone abgeschwächt. Eine weitere Schwierigkeit bereitet die sprunghafte Volumenverminderung beim Übergang von dem schmelzflüssigen in den festen Zustand. Dadurch kommt es oft im wachsenden Kristall zur Bildung von unzähligen, mikroskopisch kleinen Hohlräumen, da diese wegen der großen Viskosität



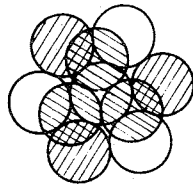
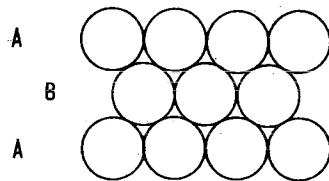
der Schmelze nicht ausgefüllt werden. Diese Hohlräume äußern sich durch milchige Trübungen im Kristall. - Nach einem kurzen Einblick in die Herstellungsmethoden künstlicher Saphire nun einiges zu der Kristallstruktur.

### 2.3 Die $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Kristallstruktur

Der Saphir, also die  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  Modifikation, besitzt ein rhomboedrisches Kristallgitter. Die Kantenlänge des Elementar-Rhomboeders beträgt 5,12 Å, der Achsenwinkel  $\alpha = 55^\circ 17'$ , die Parameter für O lauten  $u = 0,105$ ,  $v = 0,303$ . Der Kristall wird der Raumgruppe  $R \bar{3}c$  zugeordnet.

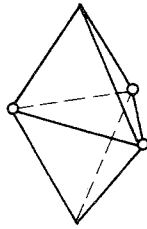


Die Skizze zeigt die Anordnung der Atome im Elementarkörper, der demnach zwei Molekel  $\text{Al}_2\text{O}_3$  enthält. Das Gitter ist aus O-Ionen aufgebaut, die mit geringer Verzerrung in einer hexagonal dichtesten Kugelpackung angeordnet sind und deren größte Lücken durch Al-Ionen besetzt sind. Erklärend sei hierzu gesagt, daß man von der Vorstellung einer Kugelschüttung ausgeht; die dichteste Anordnung der Kugeln (dichteste Kugelpackung) sieht wie folgt aus:



///  $\hat{=}$  O-Ionen im Gitter

Je zwei Al- und drei O-Ionen bilden im Gitter eine symmetrische Dreieck-Bipyramide.



Der minimale Abstand zweier O-Atome beträgt  $2,495 \text{ \AA}$ , der mittlere Abstand eines Metallatoms von den O-Atomen ist  $1,92 \text{ \AA}$ . Die Abstände sind nicht konstant, demnach sind die Atome im Gitter nicht genau kugelsymmetrisch angeordnet.

Das Symbol  $R \bar{3}c$  entspricht der Bezeichnung nach Hermann-Mauguin. Diese Kristallklasse bezeichnet man als trigonal, das R steht für rhomboedrisches Gitter,  $\bar{3}$  bedeutet dreizählige Inversionsdrehachse, c steht für Gleitspiegelebene. Drei Symmetrieebenen (Spiegelebenen) liegen in Richtung der Achsen. Senkrecht zur Hauptachse sind so viele zweizählige Drehachsen angeordnet, wie es der Zähligkeit der Hauptachse entspricht. Im Kristallstrukturmodell sind die in der Kristallmitte unter einem Winkel von  $120^\circ$  zueinander liegenden Achsen, auf denen jeweils ein Sauerstoff-Ion plaziert ist; sie halbieren den Winkel zwischen einer positiven und einer negativen kristallographischen Achse (siehe Seite 17 und 24).

Nachdem ein Überblick über die Anordnung der Ionen im Kristallgitter gegeben ist, läßt sich jetzt etwas über die physikalischen Eigenschaften sagen.

#### 2.4 Eigenschaften des $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Kristalls

Zwischen den Bausteinen wirken Bindungskräfte. Der Saphir setzt sich aus zwei Ionenarten zusammen (Al-Ion, O-Ion); er bildet somit ein heteropolares Gitter. Zwischen den Ionen entgegengesetzter Ladung wirken die Coulomb'schen Kräfte und zwischen den gleichartigen Teilchen die

Vander Waals'schen Kräfte, die viel schwächer als die Valenzkräfte sind. Da Kräfte und Anzahl der Bindungsarme nicht in allen Richtungen gleich sind, kommt es zur Ausbildung besonders starker aber auch besonders schwacher Ebenen im Kristall in Bezug auf ihren Zusammenhalt.

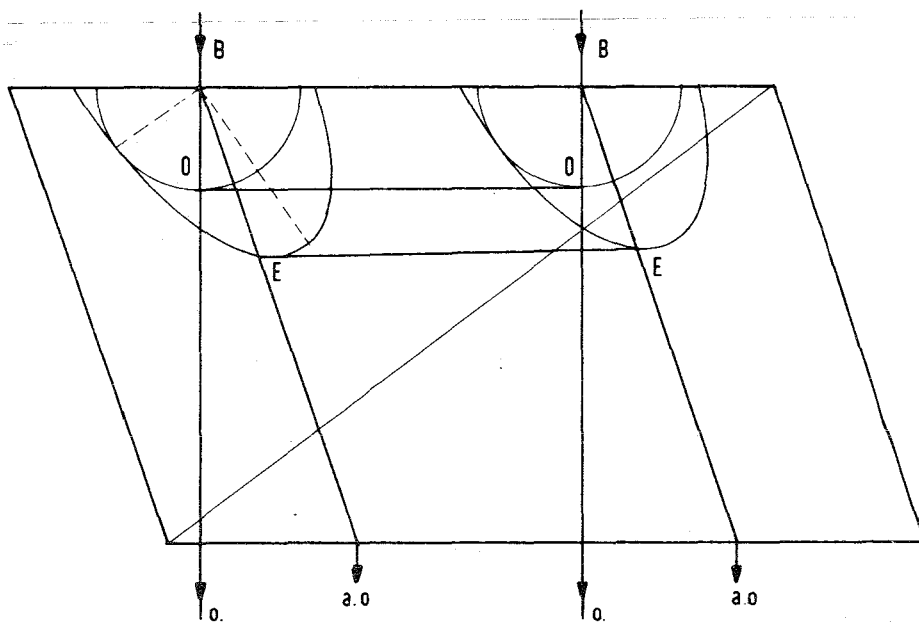
Unter Spaltbarkeit eines Kristalles versteht man die Eigenschaft, durch Einwirkung mechanischer, gerichteter Kräfte parallel einer oder mehrerer ebener Flächen teilbar zu sein. Je nach dem Widerstand des Kristalles gegen die Spaltung ist die Spaltfläche groß und glatt oder klein und unregelmäßig. Der Grad der Spaltbarkeit ist für Kristallographisch verschiedene Flächen verschieden, für jede bestimmte Fläche eines Kristalls aber gleich. Das Spalten eines Kristalls ist also ein Trennen parallel bestimmter Netzebenen und zwar vorwiegend solcher, senkrecht zu denen möglichst wenige und schwache Bindungen aufgehoben werden müssen.

Bei der Feststellung der Lage der Spaltflächen im Kristall macht man sich die Eigenschaft der Lichtausbreitung zu Nutzen, die darauf beruht, daß die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes in Kristallen richtungsabhängig ist. Das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit (genauer Phasengeschwindigkeit = der Weg, den ein Wellenberg in Zeiteinheit zurücklegt) im Vakuum ( $n = 1$ ) oder in Luft ( $n = 1,00029$ ) zu der Wellennormalen-Geschwindigkeit in einem Stoff wird Brechzahl genannt.

Nur in kubischen Kristallen ist die Brechzahl in allen Richtungen gleich, da die Lichtgeschwindigkeit in allen Richtungen gleich ist. Alle nichtkubischen Kristalle zerlegen die einfallende Lichtwelle in zwei linearpolarisierte Wellen jeweils halber Intensität. Ihre Schwingungsrichtungen stehen aufeinander senkrecht, die Geschwindigkeit beider Wellen ist unterschiedlich.

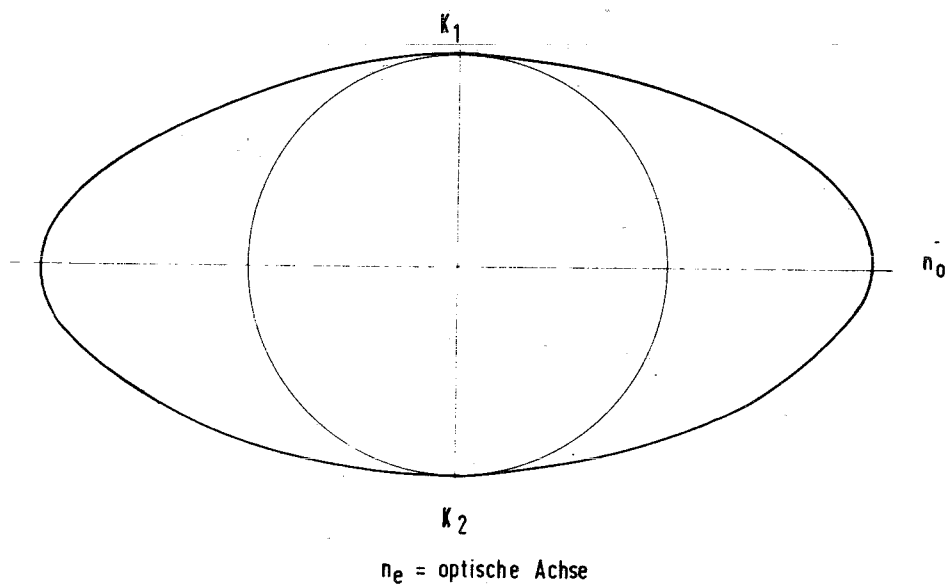
Bei trigonalen Kristallen breitet sich der eine Teil der Elementarwellen im Kristall nach allen Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit aus, der sog. ordentliche Strahl, der sich wie in einem isotropen Medium (kubische Kristalle) verhält. Der andere, außerordentliche Teil pflanzt sich nach verschiedenen Richtungen verschieden schnell fort. Laufen beide Wellen in einer Richtung gleich schnell fort, so bezeichnet man diesen Kristall als optisch: einachsig und diese Richtung als optische Achse. Ist in beliebiger Richtung die außerordentliche Elementarwelle schneller als die ordentliche, so bezeichnet man den Kristall als negativ einachsig; ist die ordentliche Elementarwelle schneller, als positiv einachsig.

Der Saphir ist ein negativ einachsiger Kristall, d.h. die Elementarwellen des außerordentlichen Strahles pflanzen sich schneller fort als die des ordentlichen Strahles, nur in Richtung der optischen Achse haben beide die gleiche Geschwindigkeit; auf die Wellenfläche bezogen, heißt das, das Ellipsoid umschließt die Kugel.



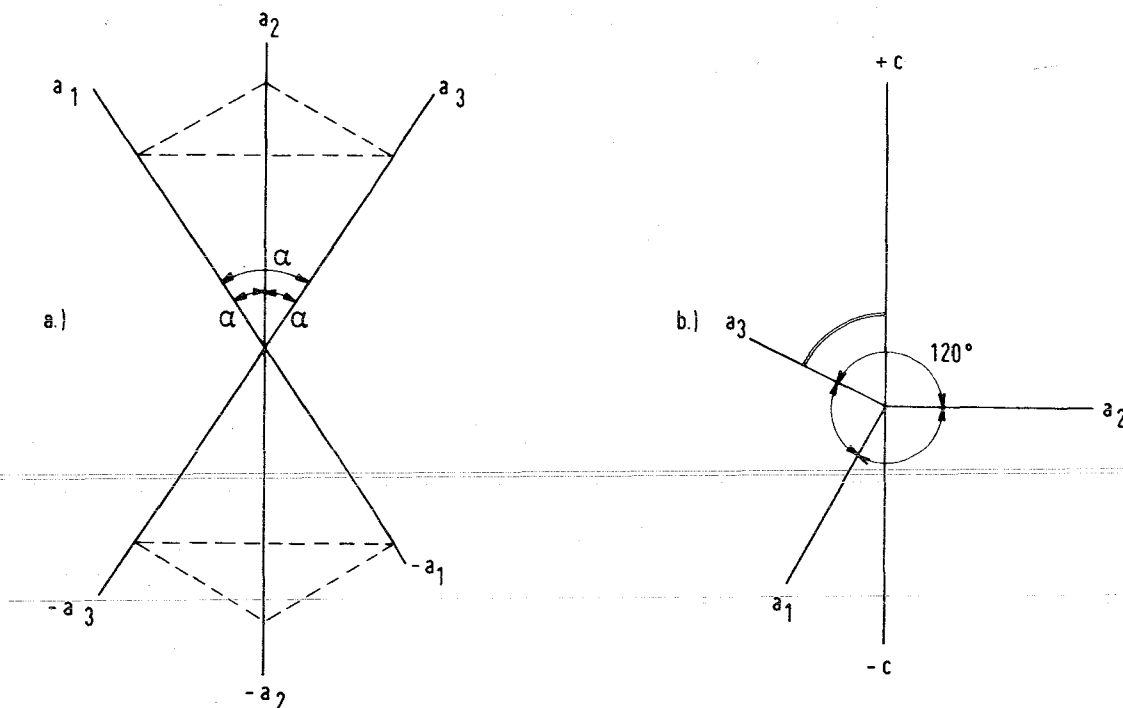
Das Licht fällt senkrecht auf die horizontale Rhomboederfläche. Zwischen B-B befindet sich ein Stück Strahlenfläche des ankommenden Lichtes, das in jedem Punkt der Strecke B-B in Elementarwellen zerlegt wird und somit eine zweischalige Strahlenfläche konstruiert. Die ordentlichen Elementarstrahlen breiten sich in Kugelform aus; die Strecke O-O ist die Wellenfront der Kugeln nach der Zeit  $t$ . Die Elementarwellen der außerordentlichen Strahlen zeigen sich hier als Ellipse und in ihrer Gesamtheit als Ellipsoid. Die Strecke E-E ist die einhüllende aller Ellipsoide nach der Zeit  $t$ .

Eine durch den Mittelpunkt des Ellipsoides gezogene Ebene (Diametralebene) ergibt eine Schnittellipse, die für den ditrigonalen Saphir die Form eines Kreises annimmt, womit das ganze Symbol zum Rotationsellipsoiden wird, das die Kugel umhüllt und in der Kristallhauptachse ( $K_1-K_2$ ) berührt. Man erhält somit folgende Indikatrix für den negativ optisch einachsigen Saphir.



Bei den optisch einachsigen Kristallen liegt stets die Rotationsachse der Indikatrix (ne) parallel der Kristallographischen c-Achse (= hexagonale, tetragonale, trigonale Hauptachse). Für den Saphir heißt das: optische Achse parallel trigonaler Hauptachse (kristallographische Haupt-(c-)Achse).

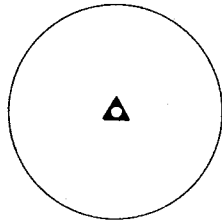
Das rhomboedrische Achsensystem wird im allgemeinen folgendermaßen angegeben (a):



Für trigonale Systeme ist es aber wenig zweckmäßig, als Koordinatensystem ein dreigliedriges Achsenkreuz zugrunde zu legen. Die dreizählige Symmetrie führt dazu, daß senkrecht zur Hauptachse (Drehachse = c-Achse) drei gleichwertige Achsen  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  mit dem Winkel von  $120^\circ$  zueinander eingeführt werden (b).

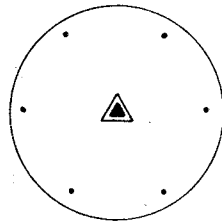
Der Saphir ( $Al_2O_3$ ) gehört der Kristallklasse  $\bar{3}m$  an, die man als ditrigonal skalenoedrische Klasse bezeichnet. Das Symbol  $\bar{3}m$  besagt:

$3 \equiv$  dreizählige Drehachse, Drehwinkel  $120^\circ \equiv$  trigonal.



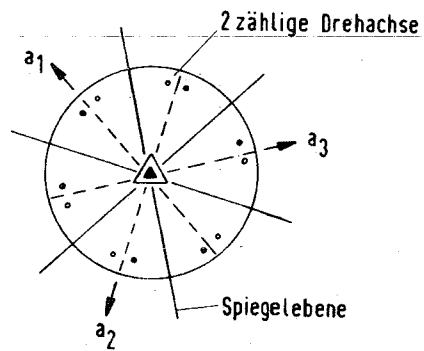
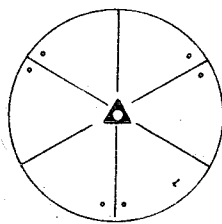
$\bar{3} \equiv$  dreizählige Inversionsdrehachse.

Spiegelung um einen Punkt, das Symmetriezentrum (Inversionszentrum) erzeugt aus einer Fläche eine zweite parallele Gegenfläche.

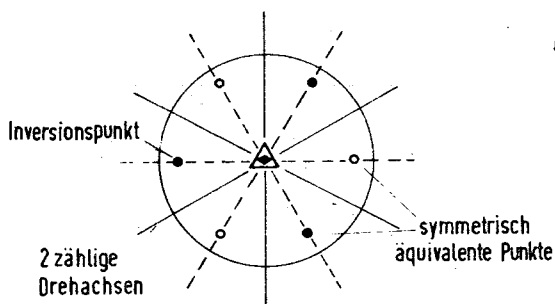


$\bar{3} m \equiv$  dreizählige Inversionsdrehachse und 3 Spiegelebenen.

In der Spiegelebene verhalten sich die Flächen spiegelbildlich symmetrisch.



Die kristallographische Hauptachse (c-Achse) stellt die dreizählige Inversionsdrehachse dar, durch die drei Spiegelebenen gehen.



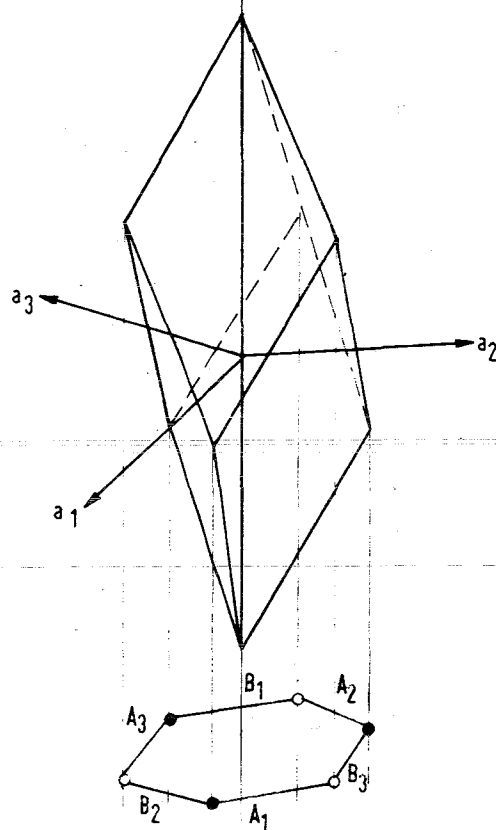
Spiegelebenen (siehe dazu Elementar-Rhomboeder, Seite 17).



Der druckbeanspruchte Saphir zeigt vorwiegend Spaltbarkeit nach dem Rhomboeder und Prisma. Die diesen Spalt-ebenen zuzuordnenden Subindiviuen haben dabei die speziellen Formen:

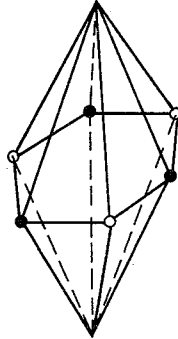
hexagonales Prisma ( $11\bar{2}0$ ) und  
hexagonale Dipyramide ( $11\bar{2}1$ ).

Zur Verdeutlichung ihrer Lage ist nochmals das rhomboedrische Kristallgitter skizziert.



Die Ebene ( $11\bar{2}0$ ) schneidet auf der  $a_1$ - und  $a_2$ -Achse jeweils die Strecke 1, auf der  $a_3$ -Achse in negativer Richtung die  $\frac{1}{2}$  ab; sie läuft parallel zur kristallographischen Hauptachse (Fläche  $A_1$ ). Durch Drehen um die dreizählige Drehachse ( $c-c$ ) entstehen die Flächen  $A_2$  und  $A_3$ . Die Spiegelung um das Inversionszentrum spannt die Flächen  $B_1, B_2$  und  $B_3$  auf.

Man erhält somit durch Drehen und Inversion der Fläche  $(11\bar{2}0)$  das hexagonale Prisma  $(11\bar{2}0)$ . Auf die gleiche Art entsteht aus der Ebene  $(11\bar{2}1)$  die hexagonale Dipyramide.



Die optische Achse liegt in der Spaltebene  $(11\bar{2}0)$  des Saphires, bei Druckbeanspruchung in Richtung der optischen Achse entstehen Scharen von Gleitflächen; die Prismenfläche ist somit als Fläche geringer Bindungskräfte aufzufassen. Eine Beanspruchung in Richtung der c-Achse ist somit zu vermeiden.

Zur Feststellung der Lage der optischen Achse wird ein Polarisationsmikroskop benutzt. Der Polarisator erzeugt in einer Ebene schwingendes, also polarisiertes Licht. Der Analysator ist bezüglich der Lage seiner Hauptachse um  $90^\circ$  gegenüber dem Polarisator gedreht, d.h. er läßt das senkrecht zu seiner Polarisations Ebene schwingende Licht nicht durch. Im Okular des Mikroskopes beobachtet man eine ausgeprägte Dunkelstellung. Bringt man eine Saphirscheibe zwischen Polarisator und Analysator, so wird die Dunkelstellung zufolge der Doppelbrechung aufgehoben, nur in Richtung der optischen Achse bleibt diese Stellung erhalten, denn, wie oben ausgeführt, findet dort keine Doppelbrechung und keine Polarisation statt, so daß das Licht, das den Polarisator verläßt, in gleicher Ebene schwingend den Analysator trifft. Nach Vorschalten eines Kondensators und Betrachtung des Objektes ohne Okular läßt sich die Richtung der optischen Achse leicht bestimmen, da gleichzeitig verschiedene Richtungen im Kristall überprüft werden können.

### 3. Konstruktive Ausführung von Saphir-Druckfenstern

#### 3.1 Aufnahme der Saphirscheibe im Flansch

----- (geometrische Anordnung) -----

Der Versuchsstand besteht aus einem zylindrischen Druckbehälter von der Länge  $l = 600$  mm, der Außendurchmesser beträgt  $D = 220$  mm, die Innenbohrung (Versuchsraum) hat einen Durchmesser  $d = 100$  mm. Über die Behälterlänge verteilt sitzen in bestimmten Abständen 8 Spezialflansche, jeweils paarweise gegenüberliegend angeordnet. Diese Spezialflansche bilden die Aufnahme für die Saphirscheiben. Aussehen und Abmessungen sind der Zeichnung auf Seite 70 zu entnehmen.

Der zylindrische Teil des Flansches ragt fast bis zur Innenbohrung in den Druckbehälter hinein und nimmt dort die Saphirscheiben auf. Durch das weite Verlagern in das Behälterinnere wird eine optimale Temperaturbeaufschlagung der Saphire erzielt; ein Abschrecken der Saphiraußenphase durch Zugluft ist vermieden.

Unter Berücksichtigung der Betriebsdaten 230 at,  $400^{\circ}$  C sind die Druckscheiben zylindrisch ausgeführt. Ihre Dichtung erfolgt unter Innendruck. Leichtes Vorspannen mittels Tellerfedern ermöglicht einmal Dichtigkeit bei Atmosphärendruck, zum anderen einwandfrei zentrischen Sitz. Die Ausführung der Einspannvorrichtung in Form von Druckring, Tellerfedern und Ringmutter gewährleistet ein gleichmäßiges Aufbringen der Vorspannkraft und somit möglichst geringe Übertragung von Momenten auf die unter Last durchgebogene Saphirscheibe. Als Dichtungsmaterial findet 0,5 mm dicke Asbestringe (Klingerit) Verwendung. Dieses Material kann aufgrund seiner Weichheit und Nachgiebigkeit, im Gegensatz zu beispielsweise Silber, Unebenheiten der Dichtfläche und Durchbiegung der Saphirscheibe besser ausgleichen, wodurch eine Vergrößerung der tragenden Ringfläche bei unter Drucklast durchgebogenen Scheiben erzielt wird.

Bei der Dimensionierung der Scheiben kann auf keine Berechnungsunterlage zurückgegriffen werden, vielmehr ist man hier auf die empirisch gewonnenen Werte des Herstellers angewiesen. Eine Vorstellung über die mechanische Beanspruchbarkeit des synthetischen Saphirs, gültig für normale, nicht entspannte Rohrlinge, ohne Berücksichtigung der Lage der Hauptachse, vermitteln folgende Angaben:

Der Temperatureinfluß auf die Festigkeit des Saphirs ist bis  $500^{\circ}$  C zu vernachlässigen. Für einen Scheibendurchmesser von 30 mm ergeben sich folgende Scheibendicken in Abhängigkeit vom Druck:

P [at]	325	500	700	1600	2500	4000
s [mm]	6	7	7,6	11,0	14,0	16,0

Für 40 mm  $\varnothing$  und 330 at ist eine Scheibendicke von 8 mm, für 120 at bei gleichem Durchmesser eine Scheibendicke von 6 mm erforderlich. Bei 50 mm Durchmesser ergeben sich für die gleichen Drücke Scheibendicken von 10 mm bzw. 7 mm.

Für unsere maximalen Betriebsdaten von  $p = 230$  at,  $\delta = 400^{\circ}$  C, Medium vollentsalztes Wasser wurden die Saphirscheiben folgendermaßen dimensioniert:

Scheibendurchmesser: 40 mm  
Scheibendicke: 6 mm  
0,1 mm verrundet  
beidseitig planpoliert,  
freier Durchmesser 32 mm,  
somit 4 mm breite dichtende Ringfläche.

Auf eine bewußte Beeinflussung der Lage der optischen Achsen durch Ziehen mit Impfkristall wurde wegen des ca. 5-fachen Preises verzichtet.

### 3.2 Bruchverhalten des thermisch und mechanisch beanspruchten Saphirs

---

In den Prüfstand wurden Druckfenster aus synthetischem Saphir der beschriebenen Abmessung eingesetzt. Sie zeigen gute Resistenz gegen das angreifende Medium. Nach etwa 50 - 100 Betriebsstunden (druckabhängig) verlieren die Scheiben etwas von ihrer ausgezeichneten Durchsichtigkeit. Die Scheibenseite, die der Luft zugewandt ist, zeigte einen leicht grauen Belag, der durch eingebrannte Staubteilchen verursacht wird. Dieser läßt sich relativ leicht durch Polieren mittels eines mit Öl getränkten Filzes entfernen.

Aufwendiger wird das Beseitigen eines braunen Belages auf der Scheibeninnenseite. Da sich durch Polieren keine Verbesserung der Durchsichtigkeit erzielen ließ, wurde anfänglich Materialabtrag vermutet, was sich aber als nicht zutreffend erwies, vielmehr liegt das Problem in einer anderen Tatsache begründet. Auch auf der polierten Fläche befinden sich Polierriefen, in welchen Polierstaub verbleibt, da er sich durch Reinigen nicht entfernen läßt. Bei Beaufschlagung durch vollentsalztes Wasser oder Dampf von Sättigungstemperatur kommt es in den Polierriefen am Polierstaub zu Ablagerungen von wahrscheinlich kleinen Rostpartikeln (braune Farbe). Durch Reinigungsmittel läßt sich dieser Belag nicht entfernen, da diese offensichtlich nicht in die feinen Polierriefen eindringen können. Die Klarsicht kann deshalb nur mechanisch wieder hergestellt werden, was durch Abpolieren einer etwa 5  $\mu\text{m}$  dicken Schicht erreicht wird.

Man kann demnach feststellen, daß der Saphir bezüglich seiner Beständigkeit gegen das angreifende Medium ein sehr gutes Verhalten zeigt, ein Materialabtrag wurde im Gegensatz zu etwa gleich teuren Quarzgläsern nicht beobachtet, die bei einem etwa 30 minütigem Einsatz im Sattedampf von  $p = 130 \text{ at}$  infolge Materialabtrag völlig erblinden.

Weniger eindeutig ist die Beurteilung der Festigkeit der Saphirscheiben bei Druck- und Biegebeanspruchung unter Temperatur.

Da weder über den Werkstoff, noch über die geometrischen Abmessungen und Dichtungsprobleme Erfahrungen vorlagen, konnte auf Vorversuche nicht verzichtet werden. Nach erfolgreichem Test mit zunächst einer Saphirscheibe wurde zur vollständigen Bestückung des Versuchsbehälters zehn Druckfenster bestellt.

Zunächst erfolgte das Dichten der Scheiben mittels Silberlingen ( $d_a = 40$  mm,  $d_i = 32$  mm,  $s = 0,5$  mm) derart, daß das Silber unter Druck und Temperatur zu fließen beginnt und dadurch nach Erreichen einer satten Auflage, Dichtigkeit herstellt. Als entscheidender Nachteil dieser Dichtungsart erwies sich die Tatsache, daß mitunter erhebliche Drücke (ca. 50 [at] und Sättigungszustand) erforderlich waren, um Dichtigkeit herzustellen, was aber häufig überhaupt nicht gelang, da zwischenzeitig durch das zwischen Dichtung und Dichtflächen auf Atmosphärendruck expandierende Medium kleinste Nuten in den Silberdichtring eingebracht wurden. Dieser Vorgang ist aber beim Dichten von Saphirscheiben zu vermeiden.

Durch die Expansion des zwischen Saphir und Silber durchströmenden Wasser-Dampf-Gemisches wird beim Austritt in die Atmosphäre an dieser Stelle der Scheibe lokal Wärme entzogen. Es entstehen aufgrund des geringen Wärmeleitvermögens des Saphirs Wärmespannungen, die vom Material nicht mehr kompensiert werden können. Der Saphir spaltet über seine Scheibenfläche auf, wobei der Spalt die volle Scheibendicke durchsetzt. Dieser Vorgang wurde mehrfach direkt beobachtet, was dem Umstand zu verdanken ist, daß solchermaßen gerissene Scheiben dem anstehenden Druck, im Maximalfall 150 [at], standhielten (siehe Foto 1, S.71).

Mit der Verwendung von Asbestdichtungen (Klingorit) sind diese Mängel behoben. Wegen der Weichheit des Asbestes sind die Fenster durch das Anpressen mittels Tellerfedern dicht, ohne daß Innendruck aufgebracht werden muß, weiterhin sind sie neben den bereits vorher angeführten Vorteilen gegen wiederholtes An- und Abfahren unempfindlich. Allerdings wird ein Erneuern der Dichtung nach ungefähr 100 Betriebsstunden notwendig, da wegen der Reibbeanspruchung infolge unterschiedlicher Wärmedehnung beim An- und Abfahren die Dichtung in ihrer Dicke immer mehr abnimmt, bis schließlich auch hier der vorstehend beschriebene, durch blasende Dichtungen hervorgerufene Effekt eintritt.

Nachdem Erfahrungen bezüglich des Einsatzes dieser Scheiben über einen längeren Zeitraum im Versuchsbetrieb gewonnen waren, wurde eine Bestellung von weiteren Saphiren erforderlich. Es wurden 12 Scheiben bezogen, von denen fünf bei Beanspruchung von maximal 159[at] und minimal 75[at] zerborsten sind. Drei dieser Scheiben zerbarsten während der Durchführung von Versuchen. In einem Fall herrschte Druckkonstanz ( $p = 80 \text{ [at]}$ ), im anderen stieg der Druck im Behälter an ( $p = 135 \text{ [at]}$ ), im dritten Fall sollte gerade Druckbeharrung angefahren werden ( $p = 75 \text{ [at]}$ ). Die zwei verbleibenden Saphirscheiben barsten bei der Erprobung der Berstsicherung (siehe dazu Versuchsprotikolle, S. 83, 85).

Die geborstenen Scheiben zeigen alle das gleiche Bruchbild, wie das aus kleinen Saphirbruchstücken mühsam zusammengesetzte Puzzle zeigt, denn der expandierende Dampf-Wasserstrom reißt die Saphirscheibe bis auf die eingespannte Ringfläche weg, so daß hinterher nur noch einzelne kleine Bruchstücke fein verteilt im Laborraum zu finden sind. Foto 2 auf Seite 71 zeigt die bei  $p = 75 \text{ [at]}$  kurz vor Druckbeharrung geborstene Scheibe. Von der Scheibenmitte ausgehend laufen strahlenförmig nach außen die ganze Scheibendicke durchsetzende Risse mit glattem Bruchbild. Untereinander sind diese Risse durch solche mit kleinen, unregelmäßigen Spaltflächen verbunden.

Außer dem Bersten zweier Druckfenster im Kaltversuch bei 300 bzw. 320[at] (TÜV-Abnahme) sind keine Scheiben der beiden vorhergehenden Lieferungen während des Versuchsbetriebes ge-  
borsten, vielmehr kamen diese Scheiben durch das vorher be-  
schriebene Spalten wegen blasender Dichtungen zum Erliegen.

Bemerkenswert ist die Tatsache, daß die Saphirscheiben der letzten Lieferung diese relativ große Neigung zum Bersten zeigen, obwohl an der Konstruktion der Einspannung und Dichtung und an der Geometrie der Scheiben nichts geändert wurde. Der Hersteller, die Saphirschmelze, kann keinen Unterschied zwischen einer bereits eingesetzten, alten Saphirscheibe (Versuchsbetrieb bei 130 - 150[at]) und einer neuen Scheibe der dritten Lieferung feststellen. Sie bezeichnet beide Scheiben als einwandfrei, was sich auch zu bestätigen scheint, denn bisher haben die beiden untersuchten Scheiben im Versuchsbetrieb ungefähr 300 Betriebsstunden erreicht, wobei sie maximal mit einem Druck von 84[at] belastet wurden.

Interessant bei der Betrachtung der Frage nach der hohen Ausfallquote der Saphirscheiben der letzten Lieferung ist zunächst die Beobachtung, daß im direkten Anschluß an ein leichtes Zischgeräusch eine Scheibe mit lautem Knall zerbarst; das dabei entstandene Bruchbild unterscheidet sich nicht von dem im Foto 2 beschriebenen. In diesem zweifelsfrei beobachteten Fall ist das Blasen der Dichtung die Ursache für das Bersten der Scheibe. Somit zeigt diese Scheibe ein anderes Bruchverhalten als die Saphire der vorherigen Lieferung.

Wie auf Seite 12 aufgeführt, genügen geringste Mengen  $\text{Na}_2\text{O}$  im mikrokristallinen Ausgangsprodukt  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , um aus der geschmolzenen  $\alpha$ -Form bei langsamem Abkühlen die hexagonale  $\beta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  Modifikation entstehen zu lassen, die sehr gute Spaltbarkeit zur Basis besitzen soll. Es ist also durchaus vorstellbar, daß bei entsprechender Verunreinigung des Ausgangsmaterials der Rohling nicht in  $\alpha$ -Form, dh. als Saphir vorliegt,



sondern die  $\beta$ -Form eingenommen hat. Von der Farbe und von den optischen Eigenschaften her läßt sich keine Unterscheidung machen, denn der hexagonale Kristall ist genau wie der rhomboedrische Saphir doppelbrechend und optisch einachsigt, wobei die Lage der optischen Achse und der kristallographischen Hauptachse entspricht. Hier hilft nur eine Analyse der Gitterstruktur mit Hilfe von Röntgenstrahlen, die auf der Grundlage der Wechselwirkung zwischen Röntgenstrahlen und dem Kristallgitter aufgebaut ist.

Es gilt die Bragg'sche Gleichung:

$$n\lambda = 2 d \cdot \sin \alpha$$

Ein Röntgenstrahl der Wellenlänge  $\lambda$  wird dann durch einen Kristall gebeugt, wenn der Gangunterschied ein ganzzahliges Vielfaches  $n$  der Wellenlänge  $\lambda$  ist. Der Gangunterschied ist gegeben durch den Netzebenenabstand  $d$  und den Winkel  $\alpha$ . Bei bekannter Wellenlänge  $\lambda$  und bekanntem Winkel  $\alpha$  liefert die Bragg'sche Gleichung den Netzebenenabstand  $d$ . Für die verschiedenen Kristallsysteme geben die sogenannten quadratischen Formeln in Verbindung mit den  $d$ -Werten Aufschluß über die Gitterkonstanten des untersuchten Materials. Bruchstücke von geborstenen Saphirscheiben wurden auf diese Weise auch mit Kupfer  $K\alpha_1$ -Strahlen untersucht ( $\lambda_{Cu-K\alpha_1} = 1,54051 \text{ \AA}$ ). Das Ergebnis zeigte eindeutig die  $\alpha$ -Modifikation. (siehe S. 68)

Für das Bersten einer Saphirscheibe lassen sich eine Vielzahl von Gründen anführen und sicher ist es das gemeinsame Auftreten und Zusammenwirken mehrerer Fehler, was den Berstvorgang auslöst.

Zunächst muß davon ausgegangen werden, daß es unmöglich ist, eine Korundscheibe völlig homogen und fehlerfrei herzustellen. Der Idealkristall wird durch Baufehler zum Realkristall. Teilweise hängen die physikalischen Eigenschaften in hohem Maße von den Baufehlern ab; so ist beispielsweise die Festigkeitseigenschaft des Kristalls eine stark störungsempfindli-

che Eigenschaft, die Lichtbrechung dagegen eine störungsunempfindliche Eigenschaft.

Prinzipiell unterscheidet man in makroskopische, mikroskopische und submikroskopische Baufehler, denen Störungen der Größenordnung  $10^{-3}$  (cm),  $10^{-3} \div 10^{-5}$  [cm],  $10^{-5}$  [cm] zugeordnet werden.

In der Größenordnung von  $4 \cdot 10^{-7}$  bis  $10^{-5}$  [cm] liegen neben atomaren Baufehlern, Gitterlücken oder falsch eingebaute Atome bzw. Ionen, die sog. Realstrukturen, aus kleinen idealen Blöcken aufgebaut, wobei jedoch diese Blöcke um geringe Winkelgrade gegeneinander verdreht sind.

Als makroskopische Fehler sind Störungen wie Risse, Sprünge, Einlagerungen, Gaseinschlüsse und dergl. zu nennen.

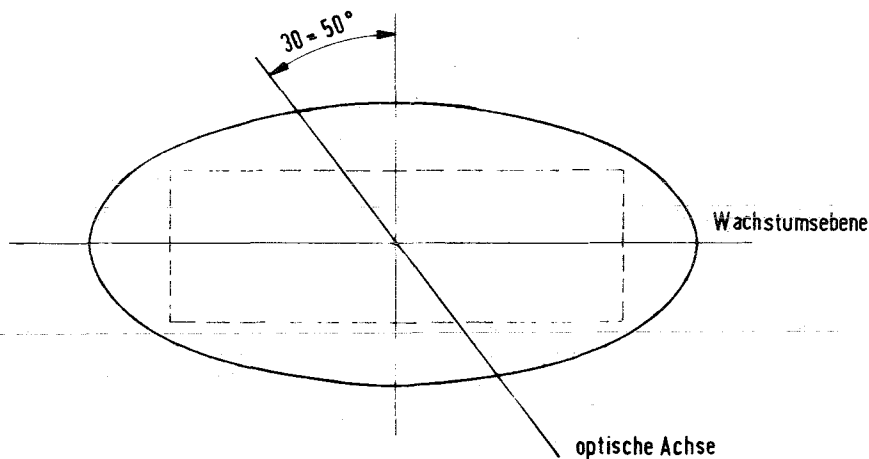
Hierher gehören auch Fehler, die während der mechanischen Bearbeitung des Rohrlings in Form von Schleif- und Polierriefen oder ausgebrochenen Kanten entstehen.

Nicht unberücksichtigt lassen darf man die Fehler, die bei der im Schauglasflansch eingespannten Scheibe, etwa durch ungleichmäßige Auflage auf der Dichtung, vorkommen können.

Sicherlich besteht auch eine Hauptschwierigkeit darin, daß die Scheiben nach der Züchtung, dem Schneiden und Bearbeiten kräftig verspannt sind.

All diese Inhomogenitäten, die mehr oder weniger häufig in den einzelnen Scheiben auftreten, sind für die Minderung der Festigkeitseigenschaften von großer Bedeutung; doch stellt sich hier die im Abschnitt 2.4 begründete, vordringliche Frage nach der optischen Orientierung der Korundplatten.

Mit der dort beschriebenen konoskopischen Anordnung des Mikroskops wurde die Lage der optischen Achsen näherungsweise bestimmt. Eine genaue Bestimmung war mit dem zur Verfügung stehenden Polarisationsmikroskop (Kondensor) wegen der Dicke der Saphirscheiben (6 mm) nicht möglich. Aus der Lage der Dunkelkreuze wurde geschlossen, daß die c-Achse zur Senkrechten der beiden planparallelen Flächen unter einem Winkel von  $30 - 50^\circ$  geneigt liegt. Eine Paralleluntersuchung von Zeiss in Oberkochen bestätigte die Richtung der Orientierung; dabei wurden die Platten in Methylenjodid eingetaucht (gleiche Lichtbrechung) und im Immersionstrog grob justiert. Die Achsen können auf diese Weise etwa auf  $5 - 10^\circ$  genau bestimmt werden. Eine Skizze verdeutlicht die Achslage.



Der Saphir ist ohne Orientierung aus der Schmelze gezogen, dabei entsteht ein Rohrling in Diskusform; aus diesem wird die Scheibe geschnitten.

Ein Großteil der gelieferten Scheiben zeigten schon beim Betrachten mit dem unbewaffneten Auge Fehler in Form ausgebrochener Kanten und milchiger Trübungen (Gaseinschlüsse), vorwiegend im Zentrum der Scheiben. Da aber auch Scheiben ohne erkennbare Trübungen mit sauber verrundeten Kanten geborsten sind, ist das Bersten nicht allein auf diese makroskopischen Fehler zurückzuführen.

Die Bruchstücke zeigen nach den Untersuchungen bei Zeiss und aus eigenen Beobachtungen im allgemeinen die für Korund übliche Spaltbarkeit nach dem Rhomboeder und Prisma; dabei läßt sich auf den Spaltflächen eine zarte Streifung parallel zur optischen Achse erkennen, die nach Wilke als Kombinationsstreifung nach dem Prisma deutbar ist.

Berücksichtigt man die gezielte Temperatur- und Druckbelastung der Saphirscheiben (Temperaturanstieg  $\leq$  ein Grad pro Minute) und die gute Isolation (kein Abschrecken der Außenphase durch Zugluft), so scheint für das unterschiedliche Bruchverhalten der verschiedenen Saphirlieferungen bei gleicher relativ steiler Lage der optischen Achse, bezogen auf die offensichtlich untere Auslegungsgrenze der Scheibenstärke (6 mm), das Maß der thermischen Verspannung des Kristalls ausschlaggebend zu sein.

Wirkt eine Spannung senkrecht zur Richtung der optischen Achse eines Korundeinkristalles, so verändert sich der ursprünglich rotationssymmetrische Indexellipsoid in eine Fläche 4. Grades. Der Kristall wird dadurch optisch zweiachsig und in Richtung der ursprünglichen optischen Achse doppelbrechend, wobei die Ebene, in der die neuen optischen Achsen liegen, parallel zur kristallographischen c-Achse und senkrecht zur Druckspannung verläuft. Für einen homogen beanspruchten Korundeinkristall gilt die Beziehung zwischen Spannung, Doppelbrechung und optischem Achsenwinkel.

$$T = \frac{D}{c} = \frac{\Gamma}{dc}$$

$$T = 3,8 \cdot 10^4 \cdot \sin^2 \Omega$$

T = resultierende Spannung [kp cm<sup>-2</sup>]

D = Spannungsdoppelbrechung in c-Achsenrichtung

c = Photoelastische Konstante

c<sub>Korund</sub> = 2,1 · 10<sup>-7</sup> [cm<sup>2</sup> kp<sup>-1</sup>]

Γ = Gangunterschied [cm]

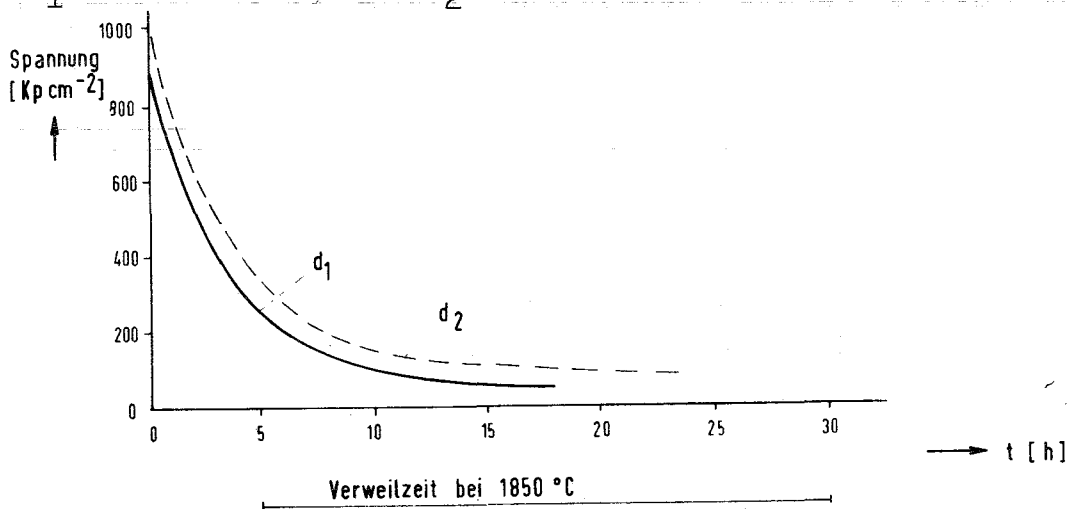
d = Lichtweg im Kristall [cm]

2Ω = optischer Achsenwinkel

Der synthetische Korund hat im allgemeinen in Abhängigkeit von der Abkühlung eine zugbeanspruchte Außenphase und eine druckbeanspruchte Innenphase. Dadurch kann es nach KVAPIL beim Durchgang von Licht durch den Kristall zur Kompensation des Gangunterschiedes  $\Gamma$  kommen, während der Achsenwinkel  $2\Omega$  noch nicht beeinflußt wird, wodurch die Spannungen, ermittelt aus dem optischen Achsenwinkel, annähernd zweimal so groß wie die mit der Spannungsdoppelbrechung gewonnenen Werte sind.

Die Stabilisierung der gezüchteten Korundeinkristalle wird durch nachträgliches Tempern in speziellen Öfen vorgenommen. Die plastische Deformation des Korundes verläuft bei Temperaturen  $> 900^\circ \text{C}$  als Basisgleitung und bei  $> 1600^\circ \text{C}$  als prismatische Gleitung; deshalb liegen die Temperaturen im allgemeinen zwischen  $1800 - 2000^\circ \text{C}$ .

KVAPIL gibt für Saphirbirnen mit Birnendurchmesser  $d_1 = 18 - 19 \text{ cm}$  und  $d_2 = 21 - 22 \text{ mm}$  folgende Kurven an:



Diese Kurven gelten für nach dem Verneuilverfahren gezüchtete Saphirscheiben. Sie haben somit für unsere Scheiben keine absolute Gültigkeit. Es ist aber einzusehen, daß besonders starke thermische Verspannung in einer im Verhältnis freie Querschnittsfläche zur Auflagefläche knapp bemessenen Scheibe den Berstvorgang auszulösen vermag.

### 3.3 Reaktion der Saphirscheibe auf schnelle Druckentlastung

Der Vollständigkeit wegen sei hier zu dem Thema Erfahrungen mit Saphir noch folgendes über das Verhalten bei schlagartiger Druckentlastung angeführt.

Beim Bersten einer Saphirscheibe werden die in der Nachbarschaft befindlichen Scheiben in Mitleidenschaft gezogen, und zwar derart, daß sie auf der dem Medium zugewandten Seite, also auf der Druckseite, anreißen (Photo 3, S.71). Der Anriß erfolgt in Form einer geraden Linie in der freien Querschnittsfläche, um, falls er bis zur Auflagefläche der Einspannung läuft, dort in Umfangsrichtung abzubiegen. Der Winkel, der von Anrißlinie und der Projektion der optischen Achse auf die planparallelen Flächen eingeschlossen wird, beträgt  $80^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $60^\circ$  und  $40^\circ$ . Der Anriß setzt sich ins Scheibeninnere unter dem Winkel, den optische Achse und Scheibenfläche bilden, fort. Hier ist also ein Trennen der in Richtung der c-Achse verlaufenden Netzebenen festzustellen; somit ein Spalten in der bevorzugten, mechanischen Spaltfläche.

Scheiben, bei denen die Druckentlastung besonders schnell erfolgt, also bei solchen, die der geborstenen Scheibe direkt gegenüberliegen, sind, ausgehend von der Anrißlinie, neue Rißlinien zu beobachten, die mit der Projektion der optischen Achse zusammenfallen. Zwischen beiden Rißlinien ist ein flachverlaufendes Abgleiten der Kristallflächen in Hyperbelform zu beobachten (mit Kreuz gekennzeichnete Scheiben). Hier ist wahrscheinlich der dem Material eigene Realkristallbau zu beobachten; die Einkristalle sind in gegeneinander fehlorientierten Teilbereichen eingruppiert, was zu einem radial-strahligen Abgleiten führt.

Die mit Doppelkreuz gekennzeichnete Scheibe läßt sich nicht in diese Betrachtung einordnen. Die Spaltfläche stimmt hier nicht mit der Lage der optimalen Achse überein.

### 3.4 Diskussion und Erprobung einer neuen Geometrie

Eine Lösung des Problems zeichnet sich bei gleichem finanziellen Aufwand nur in einer Richtung ab, nämlich durch Verkleinerung im Durchmesser und Vergrößerung in der Dicke. (Bei den gezüchteten Kristallen (Korund) kostet der Durchmesser das Geld.)

Orientiert gezüchtete und getemperte Scheiben haben den 3- bis 5-fach höheren Preis. Somit erfolgte lediglich eine Änderung der Geometrie, wie nachfolgende Tabelle zeigt:

#### Saphir weiß, erste Qualität

	alte Abmessungen	neue Abmessungen
Durchmesser [mm]	40	36
freier Durchmesser [mm]	32	20
Dicke [mm]	6	10
Kanten r [mm]	0,1	0,5
Breite der Dichtflächen [mm]	4	8

Der Tabelle ist zu entnehmen, daß neben der Verkleinerung des freien Querschnittes um den Faktor 2,5 und der Vergrößerung der Scheibendicke um den Faktor 1,7 auf eine Zunahme der Auflagefläche um den Faktor 1,5 geachtet wurde.

Freier Querschnitt und Scheibendicke ergeben zusammen eine etwa vierfach bessere Dimensionierung gegenüber der alten Scheibe. Durch die Vergrößerung der Auflagefläche soll ein gleichmäßigeres Tragen der relativ weichen 0,5 mm dicken Asbest-Dichtung erreicht werden.

Das System des Einspannens der Scheibe, das Dichten unter Innendruck und die Verwendung von Klingerit als Dichtung wurde von anderen Experimentatoren bestätigt. Durch die gute Verformbarkeit des Asbestes wird die theoretisch entstehende Dichtfläche in Form einer Kreislinie bei der unter Druck durchgebogenen Scheibe in eine größere Ringfläche übergeführt. Auch das Einspannen der Scheiben mittels Tellerfedern, um die Lage (Ringspalt zwischen Scheibe und Flansch) zu fixieren und um ohne Innendruck dicht zu sein, wurde beibehalten. Um keine zusätzliche Biegemomente auf der belasteten, durchgebogenen Scheibe zu erhalten, wird eine Zwischenlage von Klingerit zwischen Anpressring und Scheibe gebracht, wodurch besseres Gleiten ermöglicht werden soll.

Die Anordnung, wie sie die Skizze Seite 72 zeigt, wurde unter Versuchsbedingungen getestet.

Der Versuch mußte bei 270 atü abgebrochen werden, da die Flanschdichtung ausgeblasen wurde, was wahrscheinlich dem Nachlassen der Vorspannkraft durch Strecken der Dehnschrauben unter Druck und Temperatur zuzuschreiben ist.

Der Versuch bestätigt den eingeschlagenen Weg. Eine endgültige Beurteilung der Scheiben ist erst nach dem Einsatz einer größeren Scheibenanzahl über mehrere Betriebsstunden möglich. Nach Angaben des Herstellerwerkes beträgt, einwandfreie Dichtung und Auflage vorausgesetzt, bei einer maximalen Temperatur von  $400^{\circ}$  C der zulässige Druck  $2000 \text{ kp/cm}^2$ .

Es muß sich im Versuchsbetrieb zeigen, ob das weite Abrücken von den vom Herstellerwerk angegebenen Festigkeitswerten den erhofften Erfolg bringt und eine Durchführung der Versuche bis zum kritischen Druck hin ermöglicht.



#### 4. Berechnung der Kräfte einer Dampf-Wasser-Expansion bei gegebener Geometrie

Es zeigt sich, daß bei Druckfenstern aus synthetischem Saphir auf eine Sicherung gegen Bruch nicht verzichtet werden kann. Die Vorgänge des direkten Stoff- und Wärmetausches beim Eindispersieren von Gas in Flüssigkeit werden am System Wasser-Dampf bis zu Betriebsdrücken von rund 200 at betrachtet, wobei sich die Wasserphase auf Sättigungszustand befindet. Beim Bersten einer Saphirscheibe expandiert ein Dampf-Wasser-Gemisch aufgrund des anstehenden Druckgefälles (Betriebsdruck-Atmosphärendruck) durch die freiwerdende Öffnung. Die Umwelt ist somit vor den Scheibenbruchstücken und dem expandierenden Dampf-Wasser-Gemisch zu schützen. Um einen Überblick über die technischen Ausführungsmöglichkeiten einer Berstsicherung zu erhalten, ist es erforderlich, eine Vorstellung über Kräfte und Temperaturen beim Berstvorgang zu gewinnen. — Bei der Expansion wird eine Zustandsänderung von einem zum Zeitpunkt des Berstens konstanten Anfangszustand zu einem konstanten Endzustand durchlaufen. Da die zeitliche Änderung der Zustandsgrößen sehr groß ist, kann, streng betrachtet, nicht mit dem Einstellen eines thermodynamischen Gleichgewichtes während des Ausströmvorganges gerechnet werden, es werden sich vielmehr Übergangszustände einstellen, nach deren Durchlaufen letztlich der End-Gleichgewichtszustand erreicht wird. Diese Relaxationsvorgänge werden bei der Berechnung der auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten, Kräfte und Temperaturen nicht berücksichtigt, vielmehr wird hier die generelle Annahme getroffen, daß thermische und calorische Gleichgewichtszustände durchlaufen werden.

##### 4.1 Adiabate, reibungsfreie Strömung

Betrachtet man den Vorgang als eine adiabate, reibungsfreie Strömung mit isentroper Zustandsänderung des Strömungsmit-

mels, so gilt wegen  $dq = 0$  und  $ds = 0$  nach dem 1. und 2. Hauptsatz

$$di = vdp \quad (1)$$

Bei thermodynamischem Gleichgewicht besagt die Kontinuität:

Der Mengenstrom  $m$  ist durch jeden Querschnitt derselbe.

$$\dot{m} = c_1 \rho_1 F_1 = c_2 \rho_2 F_2 = \text{const.}$$

Die Mengenstromdichte  $c\rho = \frac{\dot{m}}{F}$  ist der auf die Querschnittsfläche bezogene Mengenstrom.

Durch Differenzieren erhält man:

$$0 = \frac{dF}{F} + \frac{d(c \cdot \rho)}{c\rho} \quad ; \quad \frac{dF}{F} = - \frac{cdc}{c^2} - \frac{d\rho}{\rho} \quad (2)$$

Die Energiebilanz des 1. Hauptsatzes lautet:

$$\frac{c_1^2}{2} + i_1 = \frac{c_2^2}{2} + i_2$$

in differenzieller Form geschrieben:

$$di = - d\left(\frac{c^2}{2}\right) = - cdc \quad (3)$$

aus (1) und (3) erhält man:

$$vdp = - cdc \quad (4)$$

(4) in (2) eingesetzt:

$$\frac{dF}{F} = - \frac{d\rho}{\rho} + \frac{vdp}{c^2} \quad (5)$$

Bei isentroper Zustandsänderung gehört zu jeder Dichteänderung eine Druckänderung

$$dp = \left(\frac{\delta p}{\delta \rho}\right)_s \cdot d\rho = a^2 \cdot d\rho$$

$a$  = Schallgeschwindigkeit

mit  $\frac{d\rho}{\rho} = v \cdot d p$

erhält man:

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{v}{a^2} dp \quad (6)$$

(6) in (5) ergibt:

$$\frac{dF}{F} = -\frac{v}{a^2} dp + \frac{v}{c^2} dp$$

$$\frac{dF}{F} = \left(\frac{1}{c^2} - \frac{1}{a^2}\right) v dp \quad (7)$$

Bei einer beschleunigten Strömung sinkt der Druck in Strömungsrichtung. Ist  $c < a$ , so herrscht Unterschallströmung. Dabei muß  $dF < 0$  sein, der Querschnitt des Kanals verengt sich.

Wird die Strömungsgeschwindigkeit  $c$  gleich der Schallgeschwindigkeit  $a$ , dann ist  $dF = 0$  und nach der Kontinuitätsgleichung  $d(c\rho) = 0$ ; die Mengenstromdichte erreicht ein Maximum. Bei Strömungsgeschwindigkeiten oberhalb der Schallgeschwindigkeit wird  $dF > 0$ .

Der weiteren Betrachtung ist das Maximum der Mengenstromdichte, was definitionsgemäß gleich ist, dem maximalen, zeitlichen Massenstrom, bezogen auf die kleinste Querschnittsfläche, mit zugehöriger Schallgeschwindigkeit zugrunde gelegt.

#### 4.2 adiabate, reibungsbehaftete Rohrströmung

Die Zeichnung des Schauglasflansches, (Seite 70) gibt Aufschluß über die Form des Strömungskanals, der mit einer Länge  $l = 8,5$  cm bei konstantem Querschnitt  $F = 8$  cm<sup>2</sup> hinreichend genau beschrieben ist. Da der Flansch in einem beheizten, gut isolierten Behälter sitzt, scheint die Annahme einer adiabaten Rohrströmung berechtigt.

Die adiabate Rohrströmung ist reibungsbehaftet, das strömende Medium befinde sich zu jeder Zeit im Gleichgewichtszustand. Es handelt sich hier also um eine Düse konstanten Querschnittes, für die die Maximalwerte, d.h. kritischer Massenstrom und Schallgeschwindigkeit zu ermitteln sind.

Die Energiebilanz des 1. Hauptsatzes lautet:

$$i_1 + \frac{c_1^2}{2} = i_2 + \frac{c_2^2}{2} \quad (8)$$

und die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\dot{m}}{F} = \frac{c_1}{v_1} = \frac{c_2}{v_2}$$

Da  $F = \text{const}$ , ist auch  $\frac{c}{v} = \text{const}$ . Daraus folgt:

$$c = v \cdot \frac{\dot{m}}{F} \quad (9)$$

(9) in (8) ergibt:

$$i_1 + \frac{v_1^2}{2} \left(\frac{\dot{m}}{F}\right)^2 = i_2 + \frac{v_2^2}{2} \left(\frac{\dot{m}}{F}\right)^2 = \text{const} \quad (10)$$

Für Gleichgewichtszustände ist hiermit der Verlauf der Zustandsänderung im Rohr bestimmt. Ausgehend von dem Anfangszustand  $i_1, v_1$  läßt sich, bei bekannter Mengenstromdichte  $\frac{\dot{m}}{F}$ , der Verlauf der thermischen und calorischen Zustände des strömenden Mediums verfolgen und beispielsweise im  $i$ - $s$ -Diagramm eintragen. Die dabei erhaltenen Kurven werden als Fanno-Linien bezeichnet.

Adiabate, reibungsbehaftete Rohrströmung heißt nach dem zweiten Hauptsatz Zunahme der Entropie. Eine Entropieabnahme ist bei einem adiabaten Prozeß, der Reibungsarbeit besitzt, nicht möglich. Somit stellt das Entropiemaximum, also der Punkt mit senkrechter Tangente im  $i$ - $s$ -Diagramm den Endpunkt der Fanno-Linie dar. Es gilt:

$$Tds = 0 = di - v dp \quad (11)$$

Gleichung (10) differenziert ergibt:

$$di + \left(\frac{\dot{m}}{F}\right)^2 v dv = 0 \quad (12)$$

Für  $s = \text{const}$  wird aus (11) und (12)

$$v dp + \left(\frac{\dot{m}}{F}\right)^2 v dv = 0$$

oder

$$\left(\frac{\dot{m}}{F}\right)^2 = \frac{c^2}{v^2} = - \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s$$

$$c = \sqrt{-v^2 \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s} = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s} = a \quad (13)$$

Die erreichbare Maximalgeschwindigkeit ist die Schallgeschwindigkeit des Mediums. Mit der Theorie einer adiabaten, reibungsbehafteten Expansionsströmung in einem Rohr konstanten Querschnitts erhält man eine beschleunigte Unterschallströmung, die nach Maßgabe des Massenstromes den kleinsten erreichbaren Druck (Schalldruck) und die maximale Geschwindigkeit (Schallgeschwindigkeit) beschreibt.

Über die für diese Vorgänge erforderliche Rohrlänge macht diese Methode keine Aussage. Unter der Annahme, die errechneten Maximalwerte werden erreicht, werden diese der Dimensionierung der Berstsicherung zugrundegelegt.

#### 4.3 Maximaler Massenstrom

Bevor man rechnen kann, ist die Frage nach dem maximalen Massenstrom zu beantworten. Dieser ist, wie oben ausgeführt wurde, von charakteristischer Bedeutung für den mit dem Bersten beginnenden Strömungsvorgang, der, da der Behälterdruck größer ist als der Druck im Ausströmkanal, in Form einer beschleunigten Zweiphasenströmung zu erwarten ist, wie schon mehrfach angeführt.

Für den auf die Berstsicherung wirkenden Kraftstoß ist in erster Linie die auftreffende Wassermasse verantwortlich. Demnach ist die Frage nach Größe und Dampfgehalt des Massenstromes beim Bersten der Scheiben im Wasser- und im Dampfraum zu beantworten. In [11] ist unter der Annahme adiabater, reibungsfreier Strömung in Abhängigkeit vom Druck eine solche Berechnung der kritischen Werte durchgeführt, in der weiterhin angenommen ist, daß die Dampf- und die Wasserphase des Mediums gleiche Strömungsgeschwindigkeit besitzen. Die Ergebnisse sind hier in Form einer Tabelle wiedergegeben:

Ausströmen von gesättigtem Wasser				Ausströmen von gesättigtem Dampf		
$P_1$ [ata]	$P_2$ [ata]	$x_2$	$\frac{\dot{m}}{F} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s cm}^2} \right]$	$P_2$ [ata]	$x_2$	$\frac{\dot{m}}{F} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s cm}^2} \right]$
170	108,8	0,177	3,93	95,2	0,814	2,38
150	100,5	0,140	3,85	90,0	0,852	2,20
130	91	0,110	3,63	72,8	0,874	1,79
110	80,3	0,086	3,33	64,9	0,897	1,58
90	68,4	0,065	3,05	53,1	0,911	1,27

Demnach ist der zeitliche Massenstrom beim Bersten einer im Wasserraum gelegenen Saphirscheibe größer. Der Druckbehälter ist mit maximal 8 Saphirfenstern bestückt; er hängt an drei Zugankern in einem Stahlgerüst. - Der maximale Unfall tritt ein, wenn eine der beiden unteren Scheiben birst, denn diese befinden sich mit Sicherheit im Wasserraum; dabei wird der größte Hebelarm zur Momentübertragung auf das Gerüst wirksam. Dieser Fall soll betrachtet werden.

Mit dem Bersten sinkt während des Ausströmens der Druck im Behälter, was zu einer teilweisen Verdampfung des gesättigten Wassers führt. Der Expansionsvorgang läuft sehr schnell ab; das erfordert eine schnelle Strömung zur Bruchstelle hin. Dieser ist die relativ langsame Aufstiegs geschwindigkeit der Dampfblasen entgegengerichtet. Das rechtfertigt die Annahme, daß keine Trennung des entstehenden Dampfes vom Wasser stattfindet. Es entsteht also unmittelbar nach dem Bersten im Behälter ein Zweiphasengemisch.

In dem Bericht 'Massen- und Druckänderung in einem mit Wasser und Sattedampf gefüllten Behälter beim Ausströmen mit kritischem Massenstrom' werden diese Strömungsvorgänge

nach der Theorie von Moody berechnet. Dabei wird thermodynamisches Gleichgewicht zwischen Wasser und Dampf bei isentropem Ausströmvorgang angenommen; weiterhin wird mit einem Schlupf zwischen Wasser und Dampf von

$$K = \left(\frac{\rho'}{\rho''}\right)^{\frac{1}{3}}$$

gerechnet.

Der kritische Massenstrom ist in erster Linie von dem Anfangszustand im Behälter, von dem Einlaufverhalten und der Düsenlänge abhängig. Die Berechnung nach Moody liefert theoretische, kritische Massenströme, die um bis 30 % höher liegen als die bisher in Düsen gemessenen, so daß man sich mit dieser Berechnungsmethode auf der sicheren Seite befindet.

Es werden die kritischen Massenströme für die Behälterberstdrücke 190 at, 170 at, 150 at, 130 at berechnet, mit der Volumenvariation: Behälter voll gesättigten Wassers ( $V_B = V_{H_2O} = 3,6$  Liter) und gesättigtes Wasservolumen 3 bzw. 2 Liter mit darüberstehendem Dampfvolumen von 0,6 bzw. 1,6 Litern.

Die Ergebnisse werden in Form von Listen ausgedruckt; verschiedene, den Verlauf der kritischen Strömung kennzeichnende Punkte, sind herausgegriffen und in einer Tabelle wiedergegeben.

Bei Beginn des Berstvorganges, also zur Zeit  $t = 0$  ist der maximale Massenstrom nur druckabhängig. (siehe dazu Diagramm, S.49).

Die Leichte ~~Abnahme~~ des Massenstrommaximums bei 190 at gegenüber 170 at Behälterberstdruck ist auf Ungenauigkeiten in der Rechnung zurückzuführen.



$P_{\text{Behälter}}$ [ata]	190			170			150			130
$V_{\text{H}_2\text{O}}$ [Liter]	3,6	3,0	2,0	3,6	3,0	2,0	3,6	3,0	2,0	3,6
$\dot{m}_{\text{max}}$ [ $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ ]; $t = 0$	40,2	40,2	40,2	40,4	40,4	40,4	39,3	39,3	39,3	38,2
$\dot{m}$ [ $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ ]; $t = 20$ [ms]	32,7	32,9	31,6	33,6	33,0	31,6	34,4	34,0	32,6	34,2
$P_{\text{Beh.}}$ [ata]; $t=20$ [ms]	142	143	136	135,5	135	127	123	123	117	111
$\dot{m}$ [ $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ ]; $t=50$ [ms]	16,8	14,1	4,5	19,6	16,5	4,2	21,5	18,6	4,3	23,2
$P_{\text{Beh.}}$ [ata]; $t=50$ [ms]	66,5	63	34	70	66	35	71	66	34	71

Bei ausschließlich mit gesättigtem Wasser gefülltem Behälter ist der zeitliche Massenstrom größer als bei über dem Wasser stehendem Sattdampfpolsten.

Nach 50 ms ist, unabhängig vom Ausgangsdruck, annähernd die gleiche Masse ausgetreten, d.h. die Behälterdrücke sind fast gleich, was darin begründet liegt, daß man mit höheren Drücken bei der Entspannung zu größeren Dampfanteilen kommt.

Die weitere Rechnung ist mit folgender Annahme durchgeführt: Nach 5 ms sei der Widerstand durch Massenträgheit der Verbundscheiben und die elastische Verformbarkeit (Nachgiebigkeit) der gesamten Berstsicherung abgeschlossen; die bis zu diesem Zeitpunkt ausgeströmte Masse übertrage ihre Bewegungsgröße in Form eines Kraftstoßes voll auf die Sicherung.

Die Berechnung nach der Moody-Theorie liefert von  $t = 0$  bis  $t = 5$  ms folgende mittlere Massenströme:

p [ata]	190	170	150	130
$\dot{m}$ [ $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$ ]	40	40	39	38

#### 4.4 Ausströmen mit kritischem Massenstrom, Expansionslinie im Naßdampfgebiet

-----

Mittels dieser Massenströme wird jetzt die Expansionslinie im Naßdampfgebiet unter der Annahme adiabater, reibungsbefahter Rohrströmung berechnet. Dabei ist der Massenstrom am Anfang des Rohres als gesättigtes Wasser ohne Dampfgehalt angenommen.

Somit stellt sich folgende Aufgabe: gesättigtes Wasser strömt durch ein Rohr der Fläche  $F = 8 \text{ cm}^2$ , der Ausgangsdruck ist  $p = 190, 160$  und  $130$  [at], der zugehörige Massenstrom ist  $40, 39$  und  $38$  [kg/s]. Zu bestimmen ist der

Schalldruck und die Schallgeschwindigkeit, die in dem Punkt der Fanno-Linie erreicht sind, dessen Tangente im  $i$ - $s$ -Diagramm senkrecht verläuft.

Die Gleichung der Fanno-Linie lautet:

$$i_1 + \left(\frac{\dot{m}}{F}\right)^2 \frac{v_1^2}{2} = i_2 + \left(\frac{\dot{m}}{F}\right)^2 \frac{v_2^2}{2}$$

Index 1 bezeichnet den Ausgangszustand, d.h. einen Zustand auf dem linken Ast der Sättigungskurve im  $i$ - $s$ -Diagramm.

Es gelten die Ausdrücke:

$$\begin{aligned}v &= v' + x(v'' - v') \\i &= i' + x(i'' - i') \\s &= s' + x(s'' - s')\end{aligned}$$

In die Ausgangsgleichung eingesetzt und aufgelöst erhält man die quadratische Gleichung in  $x$

$$x^2 + 2x \left[ \frac{v'}{v'' - v'} + \left(\frac{F}{\dot{m}}\right)^2 \frac{i'' - i'}{(v'' - v')^2} \right] + \frac{v'^2 - v_1^2 + 2\left(\frac{F}{\dot{m}}\right)^2 (i' - i_1)}{(v'' - v')^2} = 0$$

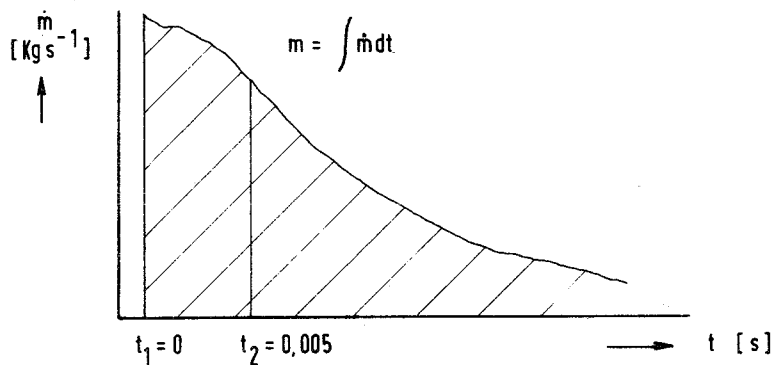
Die Koeffizienten sind Funktionen des Druckes. Die Dampftafel liefert für verschiedene Drücke zugehörige  $v'$ ,  $v''$ ,  $i'$  und  $i''$  - Werte. Die Expansion wird durch schrittweise Druckabsenkung vorgegeben, für jeden Schritt erhält man einen bestimmten Dampfgehalt  $x$ , mit dem man nach obigen Formeln die Enthalpien und Entropien im Naßdampfgebiet berechnet.

Die Berechnungen werden mit einem Rechenprogramm durchgeführt, die Ergebnisse sind in Form von Kurven im  $i$ - $s$ -Diagramm wiedergegeben. (Siehe S. 74, 75, 76)

Im Punkt der senkrechten Tangente ist die kritische Strömung erreicht. Die Schallgeschwindigkeit in diesem Punkt errechnet sich aus der Kontinuitätsgleichung

$$a = c = \frac{\dot{m}}{F} \cdot v = \frac{\dot{m}}{F} [v' + x(v'' - v')]$$

Die Masse für das Zeitintervall  $\Delta t = 0,005$  [s] beträgt:



Nimmt man den oberen Kurventeil als Gerade an, so wird

$$m = \dot{m} \cdot \Delta t$$

Der Wasseranteil errechnet sich zu:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = m (1 - x)$$

Mit der Annahme, diese Wassermasse treffe mit der errechneten Schallgeschwindigkeit  $a$  auf die Berstsicherung auf, erhält man den Impuls

$$I = m \cdot a \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{sec}} \right]$$

In nachfolgender Tabelle sind die Ergebnisse zusammengestellt.

	Behälter-Berstdruck		$p_1$ [at]
	130	160	190
Schalldruck $P_2$ [at]	110	125	165
Dampfgehalt	0,0615	0,1112	0,1127
spez. Volumina zum Schalldruck:			
$v'$ [ $\frac{m^3}{kg}$ ]	0,0014809	0,0015352	0,0017178
$v''$ [ $\frac{m^3}{kg}$ ]	0,01641	0,01395	0,009178
Volumen im krit.Punkt			
$v$ [ $\frac{v^3}{kg}$ ]	0,002399	0,002915	0,002559
Schallgeschwindigkeit			
[ $\frac{m}{s}$ ]	114	142	128
Wassermasse $m$ [kg]	0,1785	0,1730	0,1775
Impuls $I$ [ $\frac{kg \cdot m}{s}$ ]	20,4	24,6	22,7

Die Rechnung macht deutlich, daß der maximale Kraftstoß nicht allein eine Abhängige des Behälterdruckes ist, vielmehr spielt hier auch der Dampfgehalt und somit die Schallgeschwindigkeit eine Rolle.

Es sei nochmals kurz zusammengefaßt, wie das Ergebnis zustande kommt.

1. Nach der Moody-Theorie wird der maximale, zeitliche Massenstrom berechnet.
2. Dieser Massenstrom wird als reine Wassermasse (ohne Dampfgehalt) angenommen.
3. Die Wassermasse expandiere in einem adiabaten, reibungsbehafteten Rohr bis zu ihrem kritischen Punkt (Schalldruck, Schallgeschwindigkeit, x-Gehalt).
4. Der im kritischen Punkt erreichte Wasseranteil treffe mit Schallgeschwindigkeit auf die Berstsicherung.
5. Nach 5 ms sei die Nachgiebigkeit der Berstsicherung erschöpft, der Kraftstoß muß aufgenommen werden.

Mit diesen, immer nach der ungünstigsten Seite getroffenen Annahmen errechnet man ein Impulsmaximum von ca.  $25 \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}} \right]$ , bei einem Behälterberstdruck von ca. 160 [at].

Bis jetzt wurde nur über das ausströmende Medium gesprochen, bei dem man auf rechnerischem Wege zu einer Abschätzung der oberen Grenze bezüglich der Kraftwirkung kommt.

Will man die Energie der Bruchstücke der geborstenen Saphirscheibe abschätzen, so kann von der Voraussetzung ausgegangen werden, daß die Verspannung der Scheibe, hervorgerufen durch Druck- und Zugspannungen, mit der Druckbelastung steigt. Somit ist der Energiezustand in dem Saphir bei Maxi-

maldruck am größten. Unklar sind die Einflüsse der mit dem Druck steigenden Verspannung auf die max. Bruchstückgröße. Die Saphirscheiben haben eine Dicke von 6 mm. Trifft man die Annahme, daß ein Würfel von 6 mm Kantenlänge das größte Bruchstück darstellt, so errechnet sich bei einer Dichte von  $4 \text{ g/cm}^3$  eine Masse von 0,864 g. Diese Masse treffe mit einer Geschwindigkeit von 500 m/s auf die Berstsicherung auf, sie übt dort einen Impuls von  $m \cdot v = 0,432 \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}} \right]$  aus. - Nimmt man an, das Saphirfenster treffe als eine Scheibe des Durchmessers der freien Querschnittsfläche mit der einem Berstdruck von 160 at entsprechenden Schallgeschwindigkeit von ca. 140 m/s auf die Sicherung auf, so wirkt ein Kraftstoß von  $2,24 \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}} \right]$  .

Vom reinen Betrag her gesehen ist also die dem Dampf-Wassergemisch innewohnende Bewegungsgröße ungleich viel größer als die der Saphir-Bruchstücke. Über die Wirkung auf die Sicherung, in einem Falle relativ scharfkantige Bruchstücke, im anderen Falle ein unlenkbarer Dampf-Wasser-Strom ist keine Aussage gemacht. Dieser Punkt muß durch das Experiment geklärt werden.

## 5. Wahl einer geeigneten Schutzvorkehrung (Berstsicherung)

Bei der Wahl einer geeigneten Schutzvorrichtung muß zunächst davon ausgegangen werden, daß die Kräfte, verursacht durch ein expandierendes Dampf-Wasser-Gemisch und durch Bruchstücke der Saphirscheibe, aufgenommen werden können. Geht man von einem Berstmantel geeigneten Materials und Stärke aus, so stellt sich das Problem der Führung des optischen Strahlenganges, denn die Vorgänge im Behälterinnern werden mittels einer Zeitdehnerkamera im direkten Gegenlicht gefilmt.

### 5.1 Umlenkung des optischen Strahlenganges

Die Umlenkung des Strahlenganges mit Spiegeln oder Prismen ist eine technisch aufwendige Lösung. Stellt man sich eine

Anordnung vor, wie die Skizze auf Seite 77 zeigt, so sind vier Umlenkeinrichtungen erforderlich. Diese müssen die Möglichkeit besitzen, in unterschiedlichen Beobachtungsebenen montierbar und dabei einfach einjustierbar zu sein. Weiterhin sollten sie derart angebracht sein, daß sie im Falle des Berstens einer Saphirscheibe leicht zur Seite schwenken, um nicht durch starre Montage den Dampf-Wasser-Strom und die Saphirbruchstücke nach außen zu lenken.

### 5.2 Strahlengangführung durch Lichtleitkabel

Bei der Strahlengangführung durch Lichtleitkabel liegen die Schwierigkeiten im technischen Bereich; auch scheint ganz allgemein die Anwendung der Faseroptik finanziell recht aufwendig zu werden (siehe Seite 77).

Die flexiblen Lichtleitkabel bestehen aus einer großen Anzahl zu einem Bündel zusammengefaßter einzelner Glasfasern. Zum Schutz gegen mechanischen Angriff ist das Bündel mit der PVC-Hülle umgeben. Die Temperaturbeständigkeit des PVC-Mantels liegt bei  $-50^{\circ}\text{C}$  bis  $+80^{\circ}\text{C}$ .

Die Glasfasern sind lt. Prospekt ohne Beeinflussung der optischen Eigenschaften bis  $400^{\circ}\text{C}$  temperaturbeständig. Wie die Durchlässigkeit für sichtbares Licht in Abhängigkeit von der Kabellänge aussieht, zeigt ein Diagramm aus der Information Faseroptik Nr. 7001 der Firma Schott und Genossen (siehe Seite 78).

In der Informationsschrift sind unter allgemeinen Eigenschaften noch folgende Punkte zu finden:

Numerische Apertur:	$A = 0,55$
Maximaler Öffnungswinkel:	$2\alpha = 67^{\circ}$
Faserdurchmesser:	$d = 68\ \mu\text{m}$



Der Begriff der numerischen Apertur (A) ist eingeführt, um das Auflösungsvermögen eines zum Mikroskopieren verwendeten Objektivs zu kennzeichnen.

$$A = n \cdot \sin \alpha$$

mit  $n$  = Brechungsindex des Stoffes zwischen  
Objekt und Frontlinse des Objektivs

$\alpha$  = halber Öffnungswinkel des Objektivs

Je größer der Wert A, umso besser ist das Auflösungsvermögen.

Als das 500 - 1000-fache der numerischen Apertur ist der Begriff der förderlichen Vergrößerung definiert. Stärkere Vergrößerungen machen bei gleicher numerischer Apertur keine weiteren objektseitigen Einzelheiten sichtbar. Im vorliegenden Fall ist also die numerische Apertur des Lichtleitkabels mit der eines Weitwinkelobjektivs vergleichbar.

Die Kabelenden werden mit Metall- oder Kunststoffhülsen gefaßt, die den objekt- bzw. objektivseitigen Anschluß darstellen; die Stirnflächen werden optisch bearbeitet.

Bei dem Einsatz von Lichtleitkabeln handelt es sich, allgemein gesprochen, um ein optisches System mit geringer Lichtdurchlässigkeit und zwar gutem, aber eben doch begrenztem Auflösungsvermögen.

### 5.3 Sicherung mit Verbundglasscheiben

Stellt man die Frage nach einer durchsichtigen, mit geringem Lichtverlust behafteten, optisch einwandfreien Konstruktion, die den auftretenden mechanischen Beanspruchungen beim Bersten einer Saphirscheibe standhält, erscheint der Einsatz von Verbundsicherheitsglas möglich (siehe Seite 79). Laut Prospekt ist Verbund-Sicherheitsglas ein splitterbindendes Glas, das aus zwei oder mehreren durch hochelastische, organische Zwischenschichten zu einer Einheit verbundenen Glas-

scheiben besteht. Beim Zerstören der Scheibe entstehen keine losen, scharfkantigen Glassplitter, da die Bruchstücke fest an den Zwischenschichten haften.

Die einzelnen Glasscheiben sind aus Kristallspiegelglas hergestellt, einem gegossenen und gewalzten Glas mit planen Oberflächen, das somit in der Durchsicht verzerrungsfrei ist. Die Lichtdurchlässigkeit liegt im sichtbaren Bereich bei 93 %; die spektrale Durchlässigkeit eines normal weißen Spiegelglases von 6,5 mm Dicke zeigt das Diagramm auf Seite 80.

Je nach Verwendungszweck muß man bei den Verbundscheiben in zwei Fälle unterscheiden:

- I) beschußfeste Verglasung
- II) druckfeste Verglasung

Zu I): Die Beschußfestigkeit ist nicht nur von der Gesamtdicke und der Anzahl der Scheiben und Zwischenschichten des Verbundes abhängig, sondern auch von der Anordnung verschieden dicker Scheiben im Verbund.

Der Vorgang läßt sich folgendermaßen beschreiben. Das auftreffende Geschoß dringt nicht durch die Scheibe, es prallt ab oder bleibt stecken (je nach Auftreffwinkel), weil die zähelastischen, reißfesten Zwischenschichten die Durchschlagkraft der Kugel abfangen.

Trifft ein Geschoß senkrecht auf die erste Scheibe auf, so biegt sich diese durch und überträgt dabei ihre Bewegungsgröße stark gedämpft durch die Zwischenschicht auf die zweite Scheibe, die in gleicher Weise den Impuls weiterleitet. In Abhängigkeit von der Energie des Geschosses werden dadurch den einzelnen Scheiben Biegespannungen auferlegt, die mit

fortschreitender Verbundscheibendicke abnehmen. Nimmt man an, die zulässige Zugspannung wird an der ersten Hälfte der Scheiben des Verbundes überschritten, so springen diese, werden aber am Ausplatzen durch die elastischen Zwischenschichten gehindert. Der Kugel steht somit die volle Materialstärke entgegen, durch die sie sich mühsam durchmahlen muß; sie verliert durch die Schaffung ständig neuer Oberflächen an Energie und bleibt schließlich stecken.

Zu II): Bei druckfester Verglasung ist die Festigkeit gegenüber Beanspruchung durch Druck flüssiger oder gasförmiger Medien weniger von der Anzahl der Scheiben und Zwischenschichten als von der Dicke der Glasscheiben im Verbund abhängig. Im allgemeinen sieht man für einen solchen Verwendungszweck zwei Scheiben größtmöglicher Dicke mit einer dem Gesamtverbund entsprechenden Zwischenschicht vor. Man kann ganz allgemein feststellen, daß die Festigkeit des Gesamtverbundes nicht höher als die Festigkeit der dicksten (stärksten) Einzelscheibe im Verbund ist.

Weiterhin ist zu beachten, ob die Verbundscheibe kontinuierlich wachsendem oder explosionsartig ansteigendem Druck ausgesetzt ist.

Langsam ansteigender Druck beansprucht den Verbund auf Biegung über die ganze Fläche. Bei explosionsartigem Druck spielt die Biegefestigkeit nur noch eine untergeordnete Rolle; hier wird der wesentliche Teil des Widerstandes durch die Massenträgheit, die mit der Scheibendicke ansteigt, aufgebracht.

In unserem Falle ist die an die Verbundscheibe zu stellende Aufgabe nicht so klar zu umreißen. Hier

soll ein explosionsartig auftreffendes, expandierendes Wasser-Dampfgemisch, das Saphirbruchstücke mit sich führt, umgelenkt werden. Dabei ist der Verbund nicht nur einer mechanischen sondern auch einer thermischen Beanspruchung ausgesetzt. Das läßt den Einsatz von sekurisiertem Glas in Erwägung ziehen, in der Form, daß an die Stelle der ersten Kristallspiegelglasscheibe im Verbund ein sogenanntes Einscheiben-Sicherheitsglas tritt. Dieses Glas ist durch eine Spezialwärmebehandlung vorgespannt, die dadurch erreicht wird, daß Kristallspiegelglas auf Erweichungstemperatur erwärmt wird und dann durch gezieltes Anblasen mit Luft die Wärme an den Oberflächen abgeführt wird. Der innere Kern bleibt weich und erzeugt beim nachträglichen, langsamen Abkühlen eine Druckspannung in den Außenphasen. Je nach der Stärke des Luftstromes wird die Oberfläche mehr oder weniger schnell abgekühlt, was zu einer Schwächung oder Verstärkung des Sekuritisierereffektes (Druckeigenspannung) führt, der sich in verstärkter Schlagfestigkeit, Widerstandsfähigkeit und Temperaturunempfindlichkeit des Glases äußert. Die Schutzwirkung einer Sekuritscheibe beruht auf den gesteigerten Festigkeitseigenschaften, insbesondere der Biegefestigkeit ( $\sigma_{zul} = 500 \text{ kg/cm}^2$ ; 4-fache Sicherheit), und auf der Art des Bruchbildes. Bei Bruch löst sich die ganze Scheibe in ein engmaschiges Netz von Glaskrümeln auf, die stumpfkantig sind. Diese Glasart verliert allerdings sofort ihre guten Eigenschaften, wenn die Oberfläche angekratzt ist oder von spitzen, harten Gegenständen getroffen wird.

Beim Einsatz als erste Scheibe im Verbund ist damit zu rechnen, daß beim Aufprall der Saphirbruchstücke das vorgespannte Glas sofort zerspringt und die ent-

stehenden Glaskrümel der Scheibe ihre Stützwirkung im Verbund nehmen.

Es ist damit zu rechnen, daß sich die Verbundscheibe durch Wärmeleitung über ihre Aufnahme im Berstmantel mit fortschreitender Versuchsdauer aufheizt. Die elastischen, organischen Zwischenschichten sind jedoch wärmeempfindlich dadurch, daß nach Erreichen ihre Erweichungspunktes die Sicherheitswirkung der Verbundscheibe stark abgebaut wird.

Alle diese Überlegungen führten zu der Erprobung unter Versuchsbedingungen von zwei Verbundscheiben unterschiedlichen Aufbaus .

Die 'Kinon-Panzerglas-Kristall'-Verbundscheibe ist vierscheibig und hat eine Dicke von 25,5 mm bei einem Durchmesser von 100 mm. Alle vier Scheiben bestehen aus Kristallspiegelglas, sie haben die gleiche Stärke von 6 mm. Die organischen Zwischenschichten bestehen aus Polyvinylbutyral; der Fließpunkt liegt bei 140° C.

Diese Verbundscheibe entspricht in ihrem Aufbau den Sicherheitsgläsern, wie sie in Banken und Sparkassen Verwendung finden; ihre Sicherheitswirkung wird bis zu einer Betriebstemperatur von 40 C durch amtliche Schußprotokolle ausgewiesen (siehe Seite 81).

Die Verbundscheibe der 'Deutschen Spiegelglas AG' hat einen etwas anderen Aufbau. Hier sind drei Scheiben aus Kristallspiegelglas von 4 mm Stärke und eine Scheibe aus Tempaxglas 5 mm dick gefertigt. Die Gesamtverbundstärke beträgt 18,2 mm bei einem Durchmesser von 120 mm. Bei der Tempaxscheibe, die der Beschuß-Seite zugewandt sein muß, handelt es sich um ein Glas, das durch ausgewählte Material-

zusammensetzung in Verbindung mit einer leichten Sekuritierung sehr gute Temperaturwechselbeständigkeit und Festigkeitseigenschaften erhält. Es ist also ein Glas, bei dem die guten Eigenschaften des vorgespannten Kristallspiegelglases weiter verbessert wurden.

Die 4 Scheiben sind mit einem hochhitzebeständigen Harz zum Verbund geklebt. Ein Dauertest über 48 Stunden bei 120° C im Wärmeumluftofen ergibt keine Änderung der Harzverbindung; somit ist auch die optische Reinheit des Verbundes bis zu dieser Temperatur gewährleistet. Bei 80° C Verbundscheibentemperatur führt ein Schlagversuch nicht zum Durchbrechen der Scheibe, dabei beträgt die Masse 1,5 kg und die Fallhöhe 1 m, was einer kinetischen Energie von ca. 30 kg m<sup>2</sup>/sec entspricht. Die hier angeführten Daten sind Herstellerangaben.

Die Konstruktion der Aufnahme der Verbundglasscheiben ist aus der Skizze (Seite 82) ersichtlich. Der Druckbehälter ist von einem achteckigen Berstmantel umgeben, der die Verbundscheiben aufnimmt. Dieser ist sehr massiv ausgeführt und mit dem Druckbehälter über ein oberes Festlager und ein unteres Loslager starr verbunden, um die beim Bersten der Saphirscheibe auftretenden Rückstoßkräfte zu kompensieren. Durch diese Konzeption werden keine Momente in die Aufhängung und das Gerüst des Prüfstandes übertragen.

Um zu verhindern, daß sich der Berstmantel durch Wärmestrahlung des Druckbehälters aufheizt und dann über Wärmeleitung die Verbundscheiben unzulässig hoch erwärmt, ist ein runder Strahlungsmantel aus blankem Aluminiumblech zwischen Behälter und Berstmantel gebracht. Fest- und Loslager sind so ausgeführt, daß sich eine vernünftige Kaminwirkung ausbilden kann, die konvektiv die Wärme vom Strahlungsmantel abführt.

#### 5.4 Erprobung im Versuch, Diskussion der Ergebnisse

Die Erprobung der Berstsicherungen wurde unter Versuchsbedingungen durchgeführt derart, daß acht von neun Saphirfensteröffnungen blindgeflanscht wurden. Eine Saphirscheibe wurde in der untersten Schauglasebene eingebaut; ihr gegenüber befand sich im Berstmantel die zu testende Verbundscheibe. Der Druckbehälter war bei 3,6 Liter Rauminhalt mit zwei Litern Wasser gefüllt. Der Druck wurde durch Beheizen des Behälters mittels einer elektrischen Widerstandsheizung unter Durchlaufen des Sättigungszustandes aufgebracht. Der Verlauf der Versuche ist aus den Versuchsprotokollen (Seite 83,85) zu ersehen. Die Seiten 84 und 86 zeigen die beschossenen Verbundscheiben.

Bei der Erprobung der 'Kinon-Panzerglas-Kristall'-Verbundscheibe betrug zum Zeitpunkt des Berstens der Saphirscheibe der Druck im Behälter 126 at, die Scheibe hatte eine Temperatur von 39° C angenommen.

Das Glas auf der Beschuß-Seite (1. Scheibe) zeigte Einschüsse bis maximal 4 mm Tiefe. Die mittlere Eindringtiefe liegt bei 1 - 2 mm; es ist eine ausgeprägte Mattfläche vorhanden. Diese und die zweite Scheibe sind mehrfach gesprungen, wobei die Anzahl der Sprünge bei der ersten Scheibe etwas größer ist.

Die dritte Scheibe ist unbeschädigt geblieben. Die 4. Scheibe zeigt ein ähnliches Sprungbild wie die 2. Scheibe, nämlich dergestalt, daß ausgehend von einem Punkt die Sprünge strahlenförmig, wenn auch nicht geradlinig zum Scheibenrand hinlaufen.

Auf der Fläche von etwa 4 cm<sup>2</sup> ist das Glas der letzten (4.) Scheibe in Form zweier Glassplitter ausgebrochen.

Es kann gesagt werden, daß das Verbundsicherheitsglas die gestellten Anforderungen erfüllt hat, wenn auch im Hinblick auf die Wahl der Scheibendicke sicherlich noch bessere Ergebnisse erzielt werden können. Das geht auch aus den Beschußergebnissen hervor, die beispielsweise zeigen, daß bei Verwendung 'dicker' Rückfrontscheiben mit einer Splitterabgabe zu rechnen ist.

Bei der Erprobung der Verbundscheibe der Deutschen Spiegelglas AG betrug der Behälter-Berstdruck 157 [at] . Die Scheibe hatte eine Temperatur von 22,5° C angenommen. Keine der vier, zu einem Verbund geklebten Scheiben ist gesprungen. Die auf die Tempaxscheibe auftreffenden Saphirsplitter haben eine leichte Mattfläche verursacht. Vier Stellen zeigen deutliche Einschußkrater. Die maximale Einschußtiefe liegt bei 1,5 mm.

Diese Scheibe zeigt im Vergleich zu der 'Kinon-Verbundscheibe' das eindeutig bessere Verhalten, denn mit einem um 20 mm größeren Verbundscheibendurchmesser mußte ein Kraftstoß des Dampf-Wasser-Gemisches aufgefangen werden, der, wie die Berechnung zeigt, (siehe Tab. S. 53) um rund 20 % höher liegt, als der der vorgenannten Scheibe. Da die Werte von Gemisch-Schallgeschwindigkeit und Saphir-Scheibenvorspannung bei einem Behälterberstdruck von 157 [at] größer sind als die bei 125 [at], ist, läßt man ein mögliches unterschiedliches Bruchverhalten bezüglich der Saphirscheiben-Bruchstückgröße unberücksichtigt, die Energie der auftreffenden Bruchstücke ebenfalls größer. - Vorstellbar ist, daß, bedingt durch die kleinere Öffnung im Strahlungsmantel, nicht alle Bruchstücke die Tempax-Scheibe getroffen haben, sondern einige durch den Aluminium-Mantel abgefangen wurden; tatsächlich zeigt das Blech an dem Rand der Ringfläche Ausrisse, und es ist in Strömungsrichtung leicht umgebogen.



Aufgrund der durch Erprobung gewonnenen Erkenntnisse ist die Berstsicherung wie folgt ausgeführt:

Verbundscheiben der Deutschen Spiegelglas AG bekannten Aufbaus, Scheibendurchmesser 100 mm; an der Konstruktion des Berstmantels und der Scheibenaufnahme wurde nichts geändert. Somit ergibt sich ein freier Scheibendurchmesser von 80 mm. Die Ausschnitte im Strahlungsmantel haben 50 mm Durchmesser.

Die Versuche haben die am Ende des Abschnittes der Berechnung der Kraftstöße angedeutete Vermutung bestätigt, nämlich derart, daß der von einer explosionsartigen Dampf-Wasser-Strömung hervorgerufene Impuls von ca. 25 kg·m/s in seiner Wirkung auf die Verbundscheibe nicht zu vergleichen ist mit einer Stahlkugel, die einen Kraftstoß von ca. 6 kg·m/s ausübt. Das Wort Kraftstoß ist eigentlich in diesem Zusammenhang falsch gebraucht. Die Physik versteht unter einem Kraftstoß  $\Delta \bar{P}$  das Produkt aus der Kraft  $\bar{K}$  und der Zeit  $\Delta t$  ihrer Einwirkung auf den Massenpunkt (Querstrich steht für Vektor). Das Produkt aus einer Masse  $m$  und ihrer Geschwindigkeit  $v$  bezeichnet man als Bewegungsgröße  $\bar{B}$ . Da die durch einen Kraftstoß an einem freibeweglichen Körper bewirkte Geschwindigkeitsänderung so beschaffen ist, daß die Änderung der Bewegungsgröße gleich dem Kraftstoß ist, ist die Bewegungsgröße eines Massenpunktes zahlenmäßig gleich der Summe aller Kraftstöße, die der Massenpunkt mit dem Bewegungsbeginn erhalten hat.

$$\Delta \bar{P} = \bar{K} \cdot \Delta t$$

$$\Delta \bar{B} = m \cdot \Delta v$$

$$\Sigma \Delta \bar{B} = \Sigma m \cdot \Delta v = \int_0^t \bar{K} \cdot dt$$

Grenzübergang:

$$\bar{B} = m \cdot v = \int_0^t \bar{K} dt$$

Wegen der zahlenmäßigen Gleichheit zwischen Bewegungsgröße und Summe aller Kraftstöße hat man ein neues Wort geprägt: den Impuls.

Dieser Impuls ist jetzt bezüglich seiner Wirkung auf die Verbundscheibe entscheidend von den physikalischen und geometrischen Eigenschaften der auftreffenden Masse abhängig.

Hier steht ein zentraler, fast punktförmiger Kraftangriff eines sich 'nicht deformierenden' Körpers der Kraftwirkung eines verformbaren, umlenkbaren Dampf-Wasser-Stromes gegenüber. Die Versuche zeigen, daß die diesem System innewohnende Bewegungsgröße von der Verbundglasscheibe bei geeigneter, konstruktiver Lösung der Einspannung der Scheibe aufgenommen werden kann. Weiterhin scheint sich die Berechnung der möglichen Kraftstöße, die unter den Annahmen auf Seite 54 durchgeführt wurde, als eine Abschätzung der maximalen, oberen Grenze zu bestätigen.

Leichter läßt sich die Wirkung der scharfkantigen und nichtverformbaren Saphirbruchstücke auf die Verbundglasscheibe abschätzen. Die der Beschuß-Seite zugewandte Scheibe wird durch eine Vielzahl von Bruchstücken getroffen, was sich in Form einer leichten Mattfläche äußert. - Da nicht anzunehmen ist, daß die Geschwindigkeit der Bruchstücke unterschiedlich ist, muß ihre Masse sich unterscheiden, was aufgrund höherer kinetischer Energie zu der Ausbildung größerer und tieferer Krater führt. Nimmt man die maximale Bruchstückmasse mit 1 g an, so errechnet sich mit  $v = 500 \text{ m/s}$  eine kinetische Energie von  $1/2 mv^2 = 125 \text{ kg m}^2/\text{sec}$ . Das Bruchstück hat dann die Bewegungsgröße  $m \cdot v = 0,5 \text{ kg m/sec}$ . Die vergleichende Betrachtung eines Pistolengeschosses der Masse 10 g und der Geschwindigkeit  $v = 400 \text{ m/sec}$  zeigt, daß die in der Scheibe zu vernichtende

Bewegungsgröße von 4 kg.m/sec dem rund 10-fachen des einem Saphirbruchstück innewohnenden Impulses entspricht. - Zwischenzeitig hat die Berstsicherung sich im Versuchsbetrieb bestens bewährt, indem sie einmal Berstdrücken von  $p = 80$  und 75 [at] Widerstand, zum anderen, weil sie keine allzugroße Absenkung des Lichtwertes verursacht, so daß der photographische Aufbau des Versuchsstandes beibehalten werden kann.

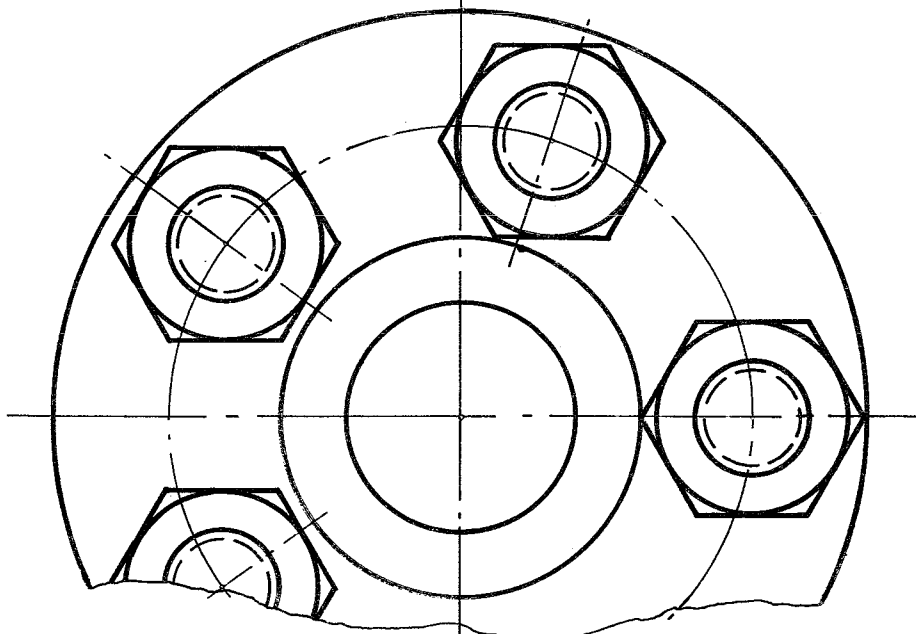
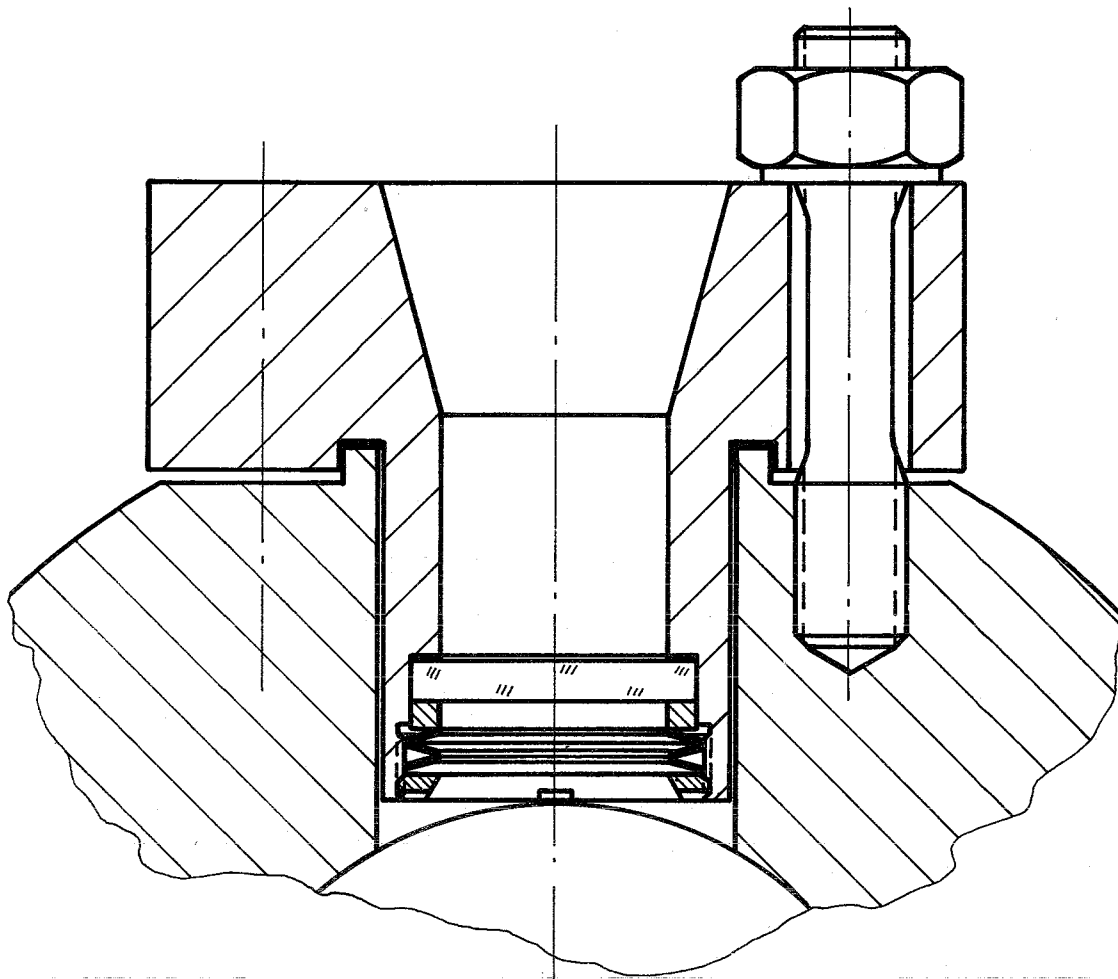
## 6. Literaturverzeichnis

- [1] Gmelin: Handbuch der anorganischen Chemie;  
8. Auflage, Aluminium Teil B, S. 78 ff.
- [2] K.Th. Wilke: Methoden der Kristallzüchtung;  
Verlag Harri Deutsch, 1963
- [3] H.G.F. Winkler: Struktur und Eigenschaften der  
Kristalle; Springer-Verlag, 1955
- [4] W. Kleber: Einführung in die Kristalloptik;  
VEB-Verlag, Technik Berlin, 1965
- [5] E. Buchwald: Einführung in die Kristalloptik;  
Sammlung Göschen, Band 619/619a, 1963
- [6] A. Smakula: Einkristalle; Springer-Verlag,  
1962, S. 294
- [7] J. Kvapil: Innere Spannungen in Korund-Einkristal-  
len;(I und II), Kristall und Technik, 4/1, 1969
- [8] H.D. Baehr: Thermodynamik; Springer-Verlag, 1962
- [9] E. Schmidt: Thermodynamik; Springer-Verlag, 1960
- [10] F. Kohlrausch: Praktische Physik; B.G.Teubner-  
Verlagsgesellschaft, 1960
- [11] S. Malang: Massen- und Druckänderung in einem mit  
Wasser und Sattedampf gefüllten Behälter beim  
Ausströmen mit kritischem Massenstrom.  
PSB-252, 1967 (unveröffentlicht)

Herr Dr. W. Schneider, GFK/IMF, führte die Analyse der  
Saphirgitterstruktur durch.

<u>7. Diagramme, Tabellen</u>	Seite
Schauglasflansch für Saphirscheibe (40 mm Ø)	70
defekte Saphirscheiben	71
Schauglasflansch für Saphirscheibe (32 mm Ø)	72
Maximaler Massenstrom in Abhängigkeit vom Behälterdruck	73
Fanno-Linien: P = 130 at	74
P = 160 at	75
P = 190 at	76
Führung des optischen Strahlenganges	77
Lichtdurchlässigkeit vom Lichtleitkabel	78
Sicherung mit Verbund-Sicherheitsglas	79
Spektrale Durchlässigkeit von weißem Spiegel- glas	80
Schußprotokoll von Verbund-Sicherheitsglas	81
Konstruktion des Schutzmantels	82
Erprobung der Berstsicherung	
Protokolle	83 u. 85
Abbildungen	84 u. 86

Schauglasflansch für Saphirscheibe 40mm $\phi$



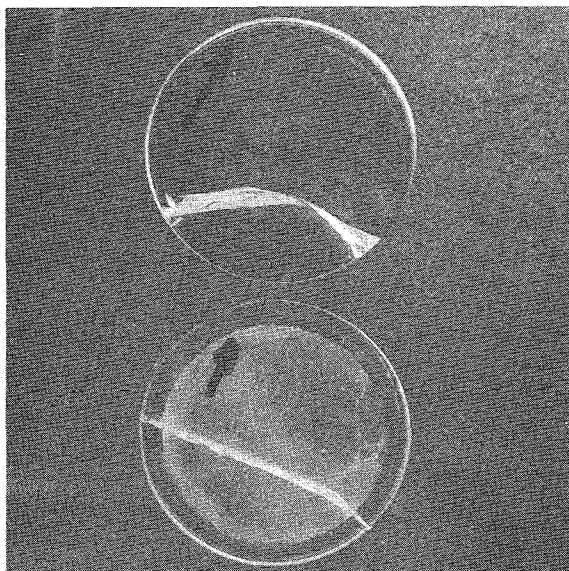


Foto 1

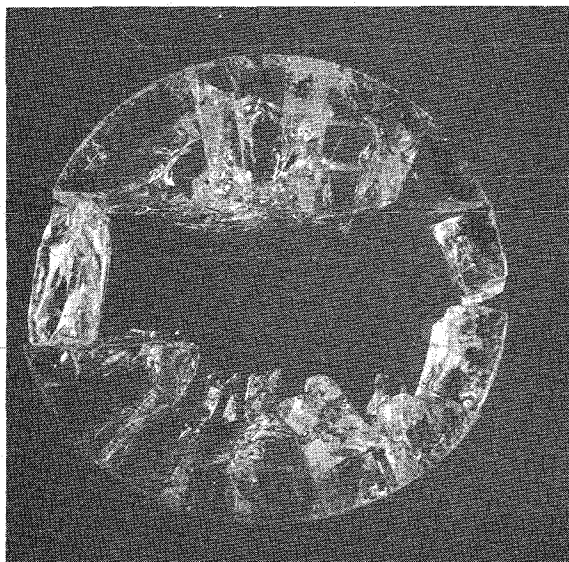


Foto 2

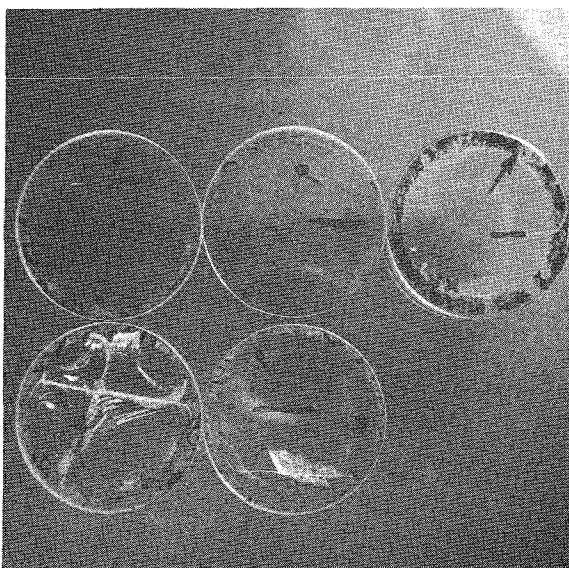
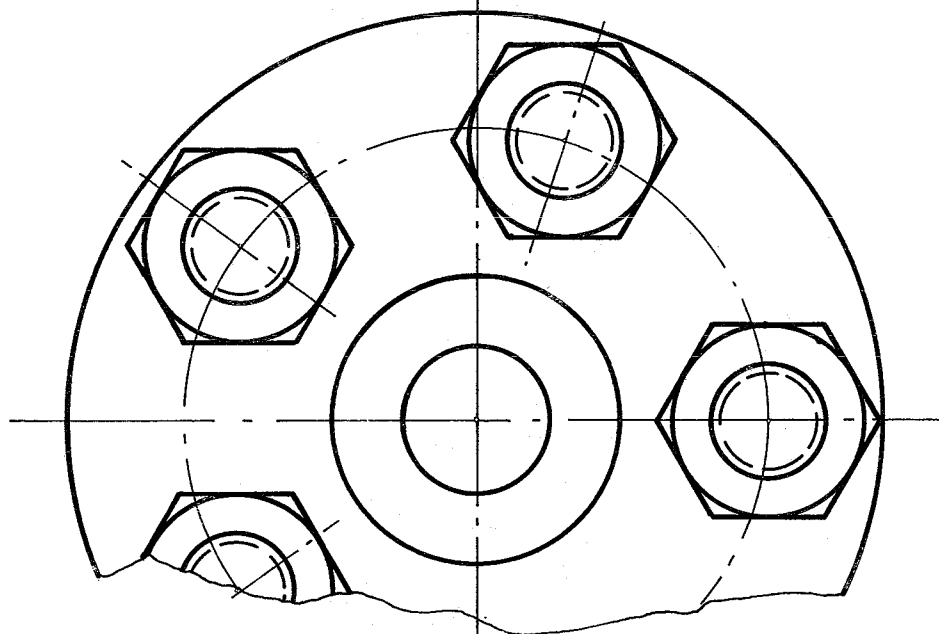
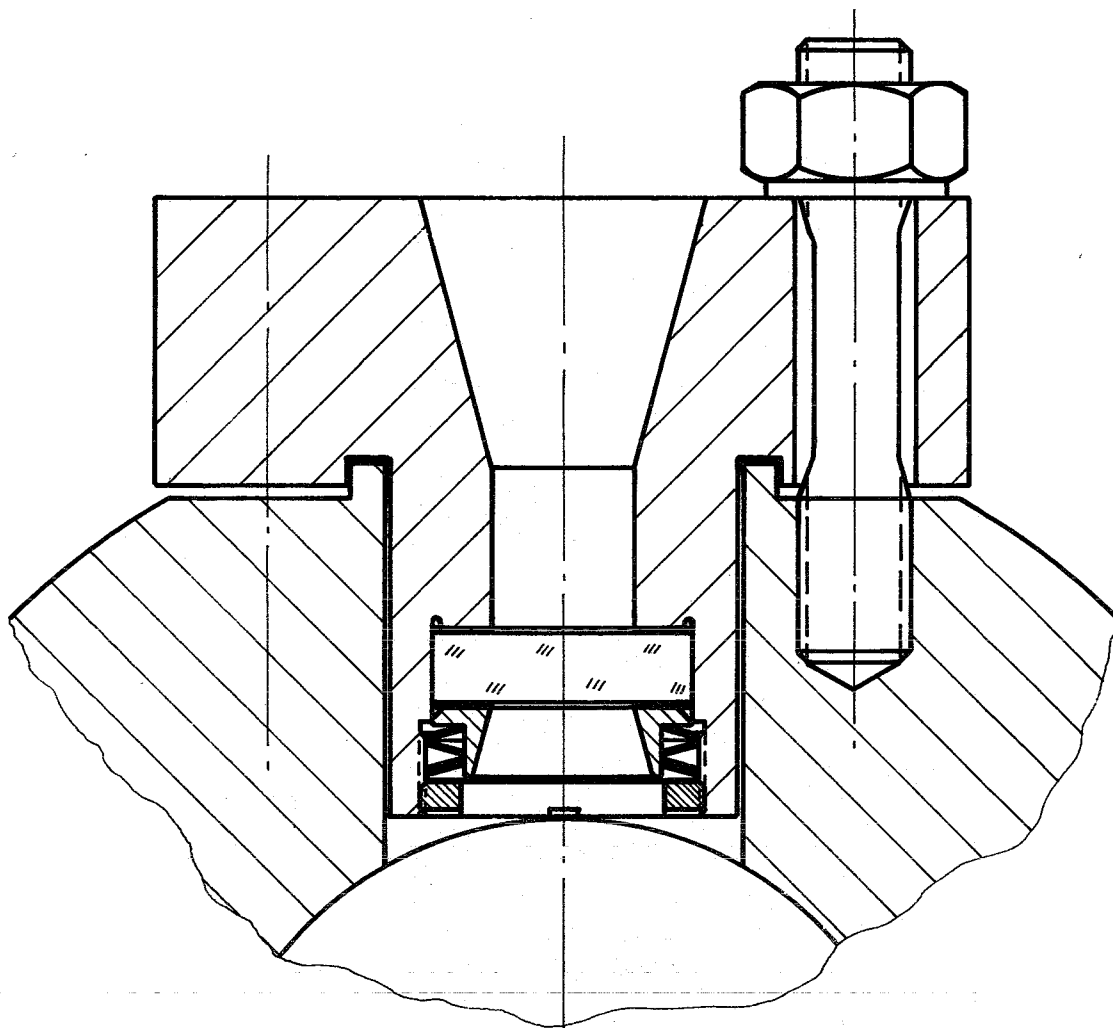


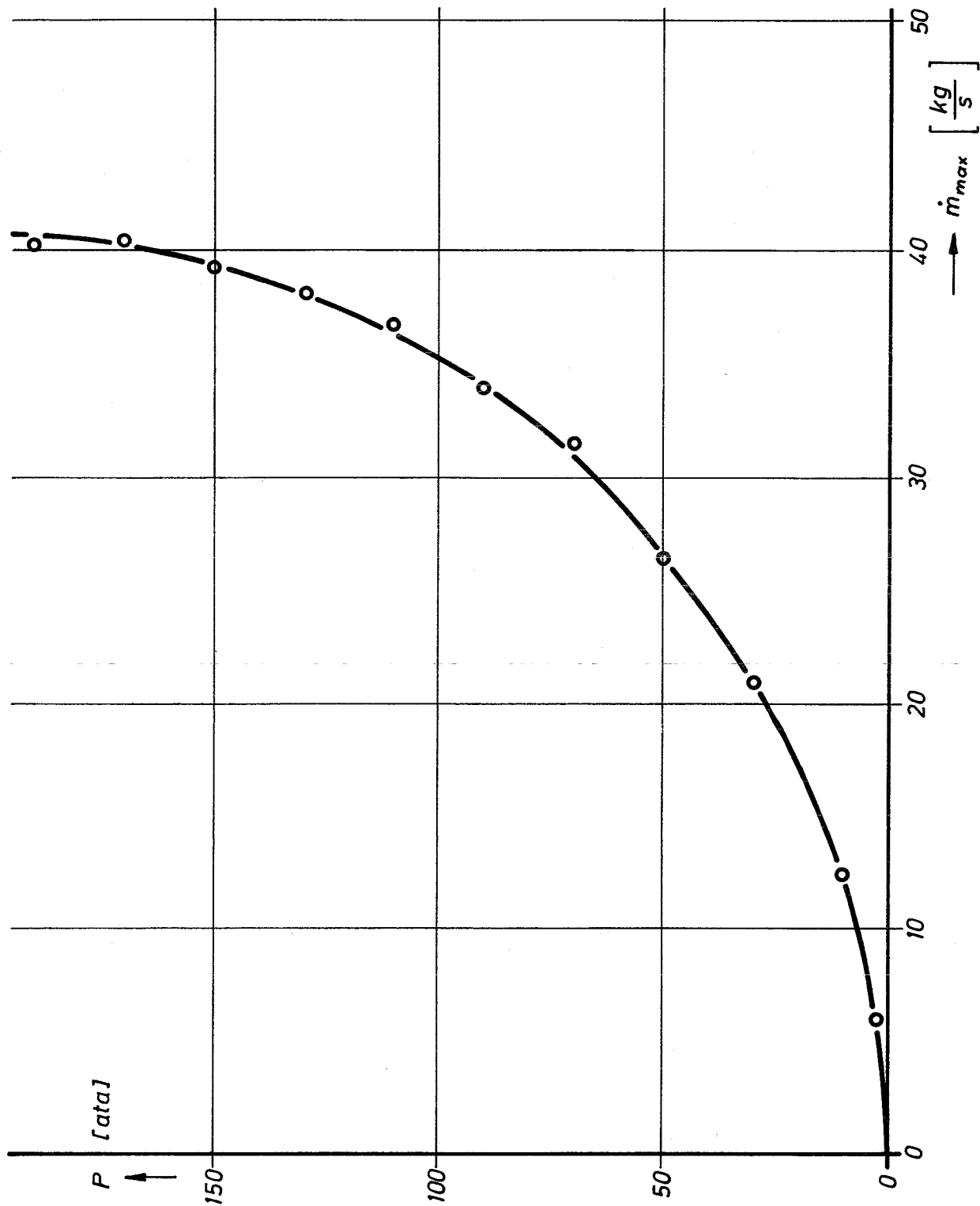
Foto 3

- 72 -  
Schauglasflansch für Saphirscheibe 32 mm  $\phi$

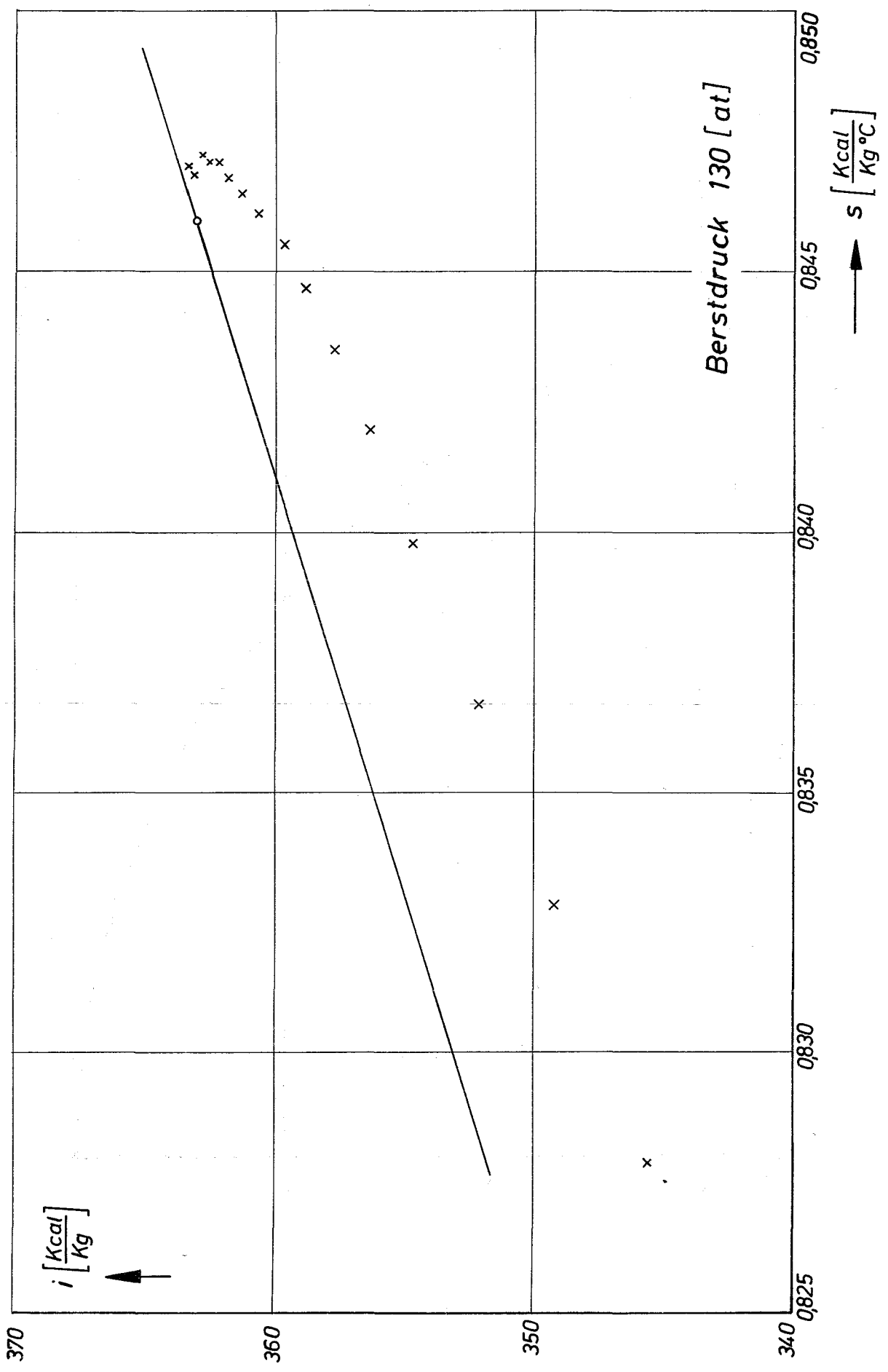




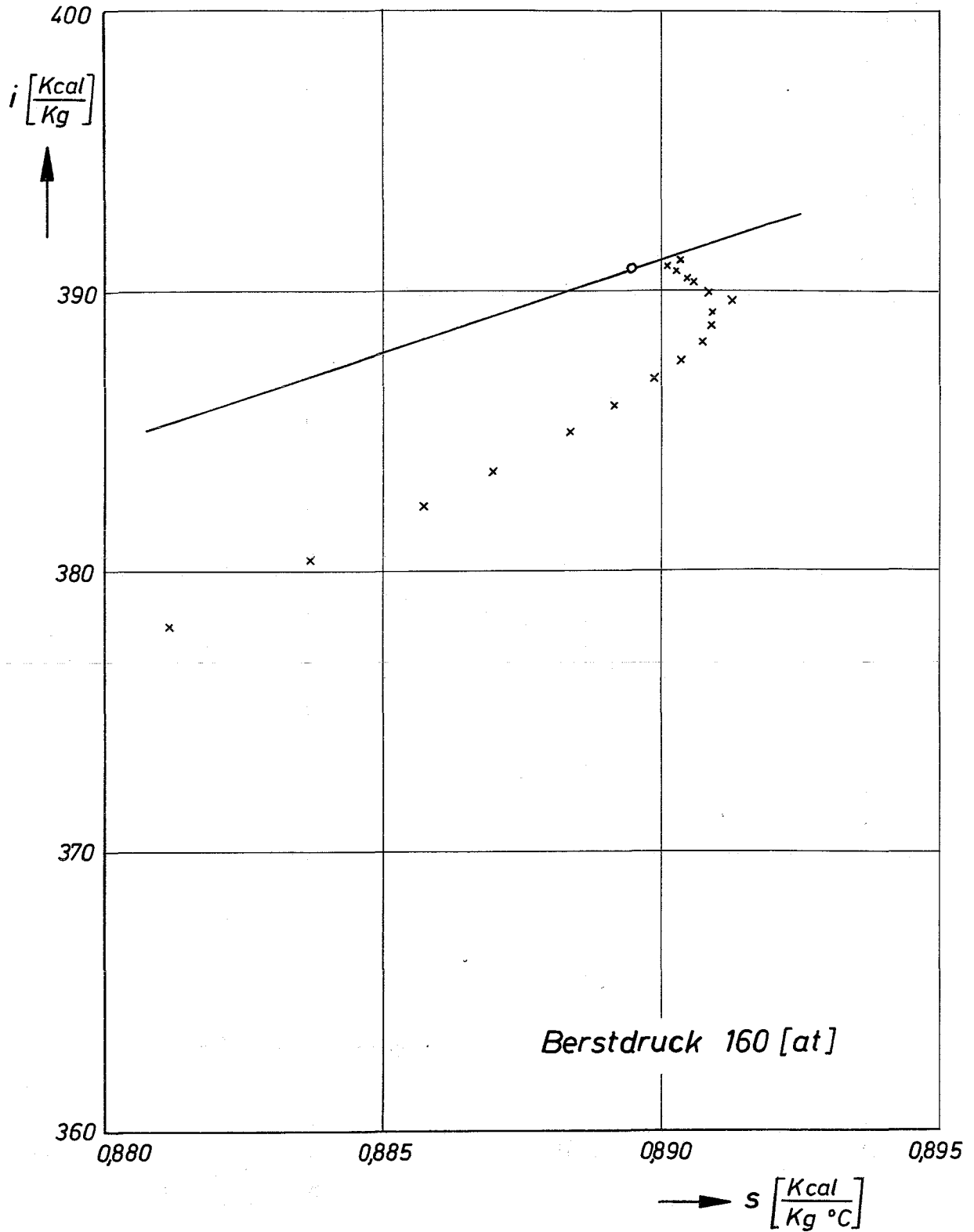
# Maximaler Massenstrom in Abhängigkeit vom Behälterdruck



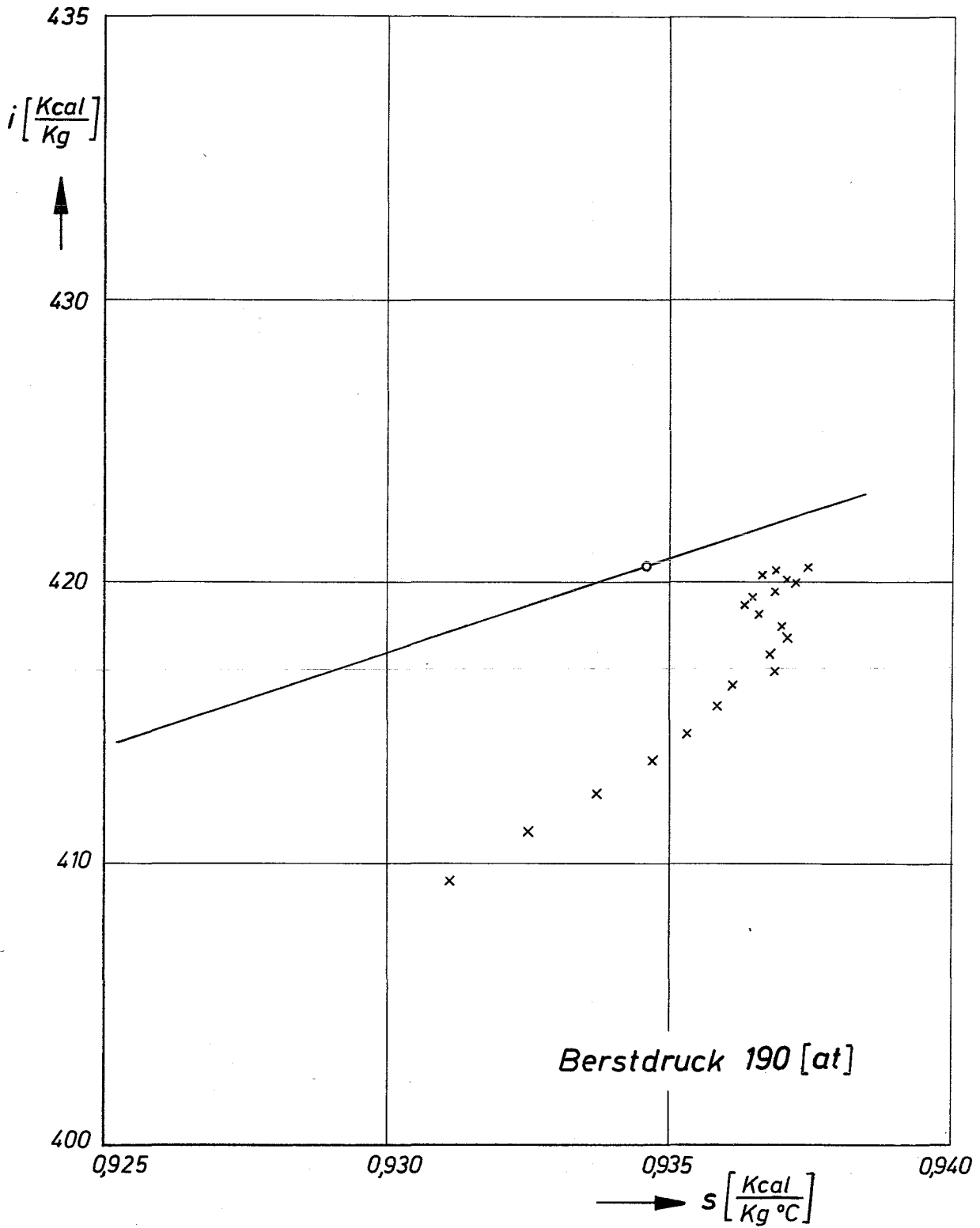
# Expansionsverlauf im Nassdampfgebiet (Fanno-Linie)



# Expansionsverlauf im Nassdampfgebiet (Fanno-Linie)

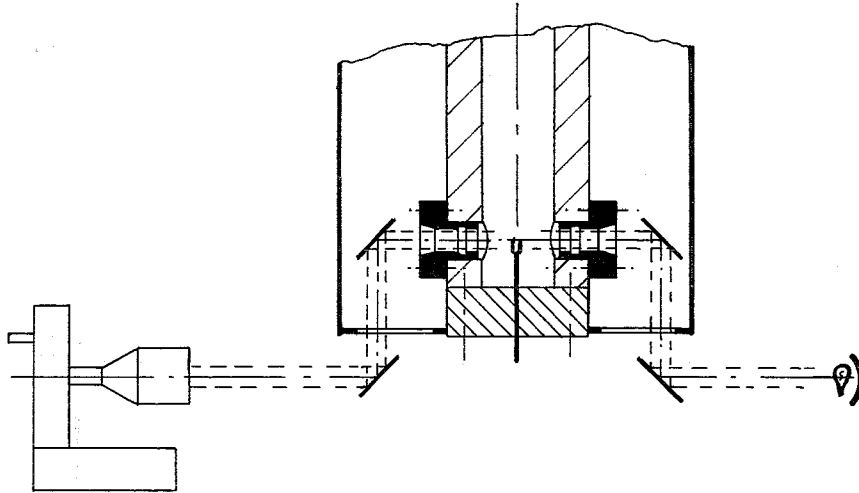


# Expansionsverlauf im Nassdampfgebiet (Fanno-Linie)

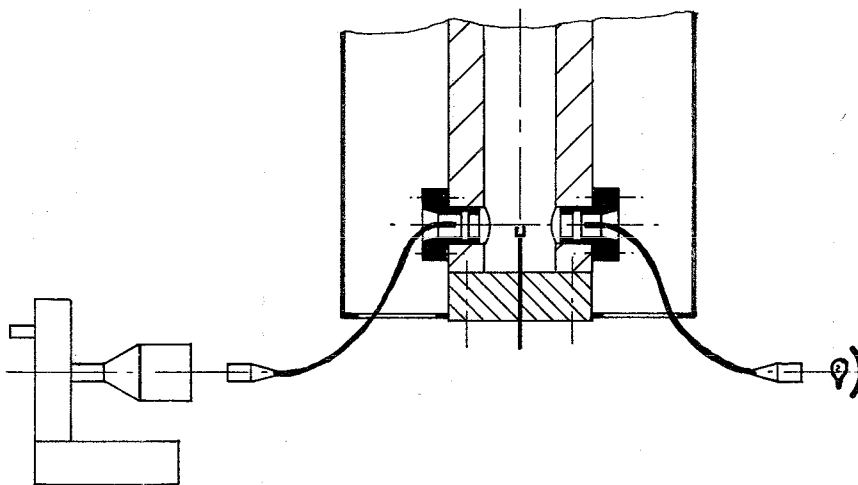


# Führung des optischen Strahlenganges :

a) durch Umlenkung mittels Spiegel oder Prismen



b) durch Lichtleitkabel der Faseroptik

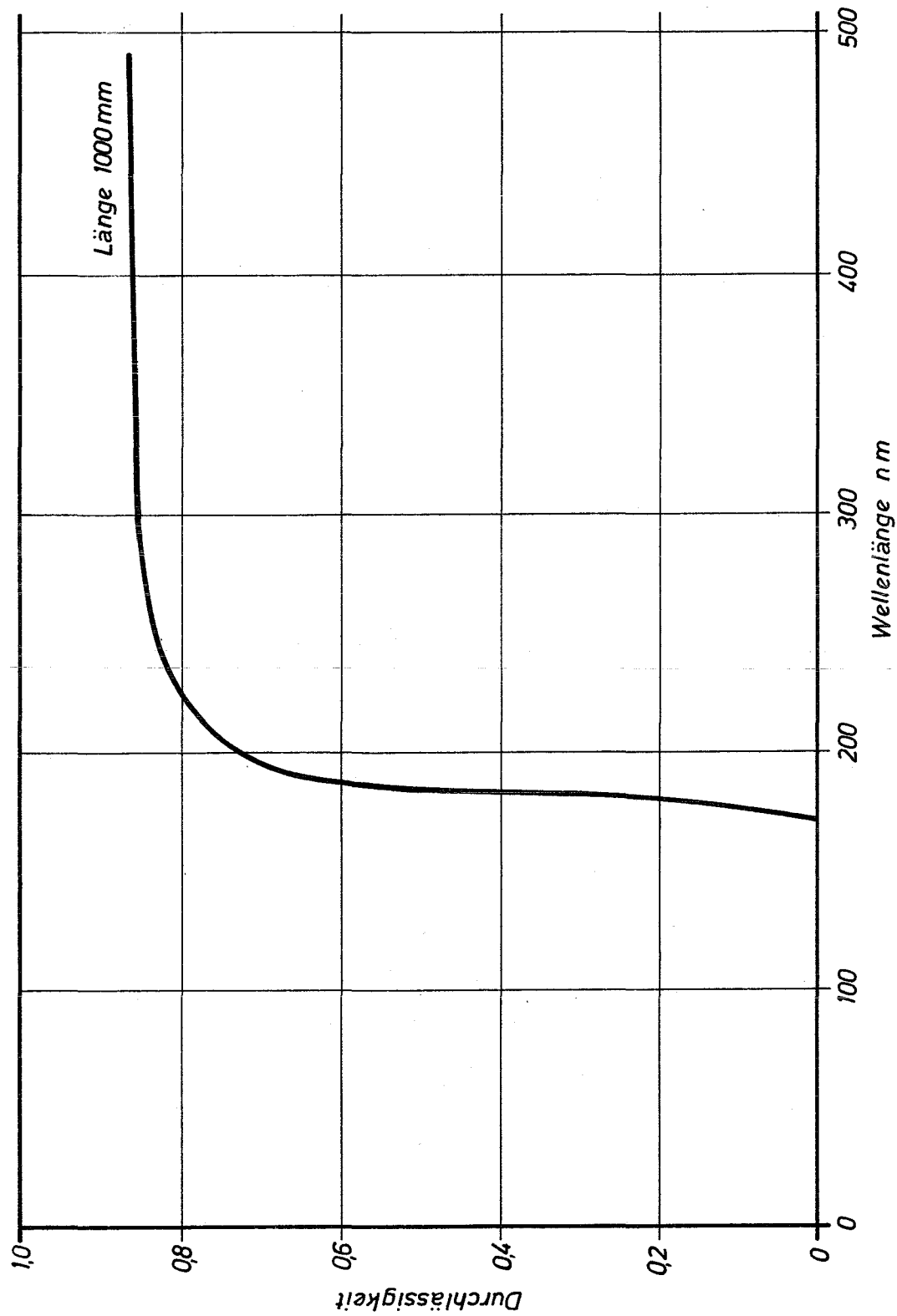


siehe Blatt 2 Seite

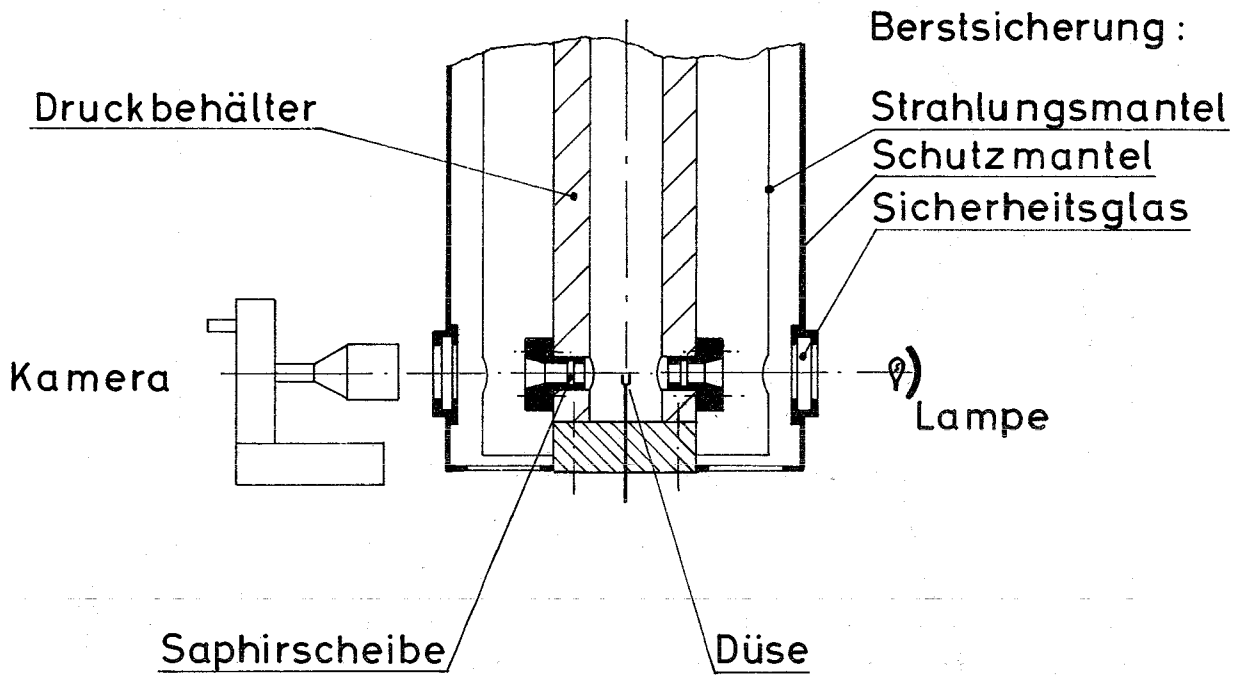
Lichtleitkabel:

- 78 -

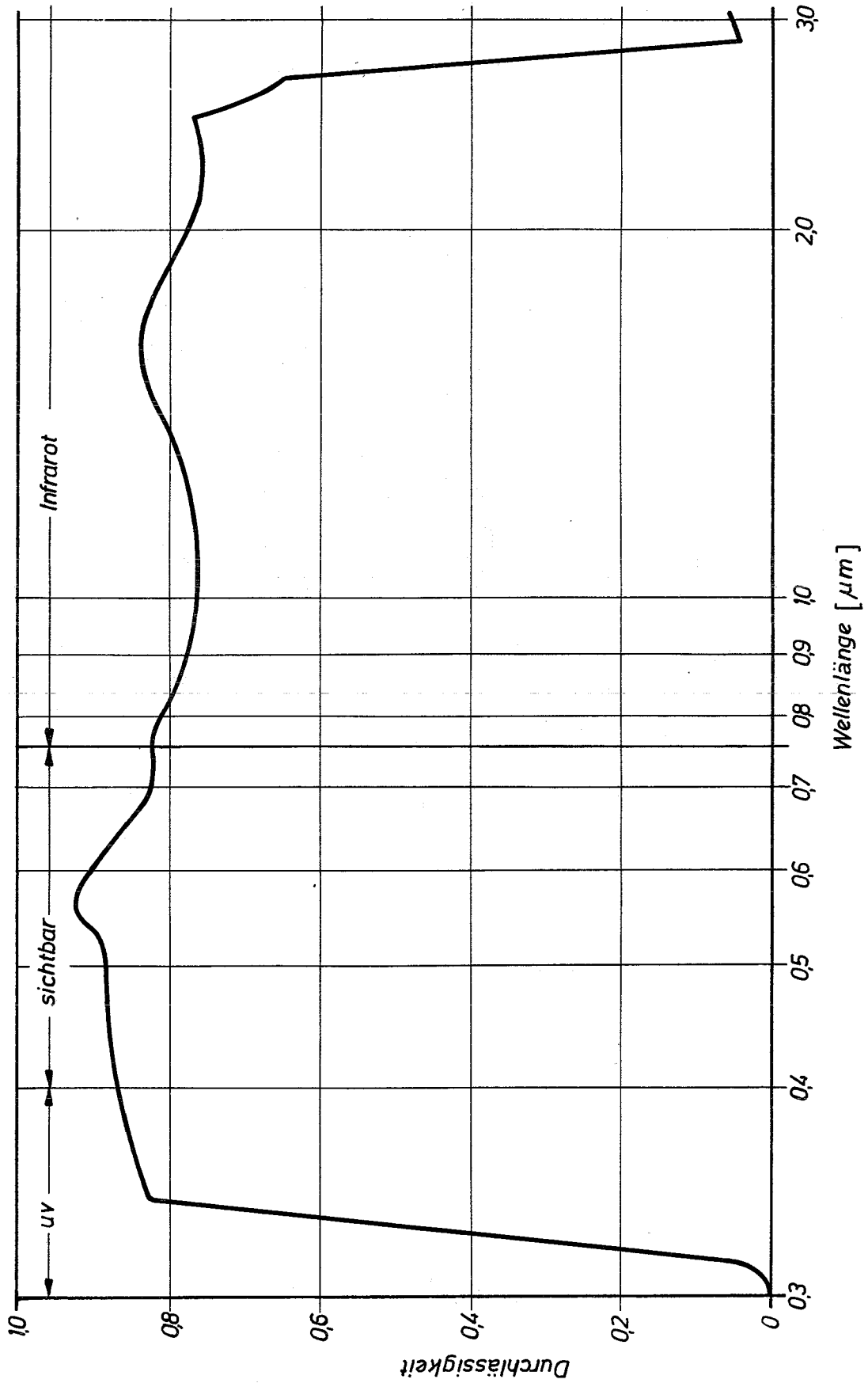
Lichtdurchlässigkeit in Abhängigkeit von Kabellänge



# Direkter optischer Strahlengang



- 80 -  
*Spektrale Durchlässigkeit eines normal weißen  
Spiegelglases.*





Beschußtabelle (Abschrift)

Auf die Scheiben wurden Einzelschüsse abgegeben; die Schußentfernung betrug 3 m.

lfd. Nr.	Material	Waffe	Munition	Geschoß- gewicht	Geschoß- geschwin- digkeit	Auftreff- energie	Ergebnis
1	26 mm Mehrschichten- glas; Fabrikat KINON 4 Schichten 6-11-5-3 Scheibe Nr. 1	Pistole Walther; Kal. 22 (5,6 mm); Lauflänge 97 mm	Randfeuer- patrone, Kal.22 mm lang, f.B.l.r. Vollblei- geschoß	2.215 g	310 m/s	10.6 mkp	<u>kein</u> <u>Durch-</u> <u>schuß</u> 1.Schicht beschädigt
2	Scheibe Nr. 1	Pistole FN Baby Kal. 6,35 Lauflänge 54 mm	Pist.Patro- ne; Kal. 6,35 mm Vollman- teil FN	3.299 g	186 m/s	5.8 mkp	<u>kein Durch-</u> <u>schuß</u> 1.Schicht beschädigt
3	Scheibe Nr. 1	Pistole Walther Modell PP Kal. 7,65 Lauflänge 97 mm	Pist.Patro- ne; Kal. 7,65 mm; Vollmantel Geco	4.710 g	282 m/s	19.1 mkp	<u>kein Durch-</u> <u>schuß</u> 1. und 2. Schicht be- schädigt
4	Scheibe Nr.1	Pistole Walther Modell P38 Kal.9 mm Parabellum Lauflänge 125 mm	9 mm Vollmantel (engl. Kymoch)	8.015 g	350 m/s	50.0 mkp	<u>kein Durch-</u> <u>schuss</u> 4 Schichten beschädigt Einschlag- stelle 4 cm Ø

lfd.	Material	Waffe	Munition	Geschoß- gewicht	Geschoß- geschwin- digkeit	Auftreff- energie	Ergebnis
5	Scheibe Nr. 2 (Material wie lfd.Nr. 1)	Pistole Mauser, Modell 1896, Kal.7,63 Lauflänge 130 mm	Pistole Patrone, Kal. 7,63 Vollmantel (engl. Kymoch)	5.505 g	458 m/s	59.0 mkp	<u>kein Durch- schuß</u> leichte Aus- buchtung nach hinten; Einschlag- stelle in 7 cm Ø stark zersplittert
6	25.8 mm Mehrschich- tenglas, 4 Schichten 7-11-4-3 Scheibe Nr.3	Pistole US-Army, Modell 1911, Kal.45 (11,45 mm), Lauflänge, 127 mm	Winchester 45, automa- tic, Voll- mantel	14.920 g	242 m/s	44.5 mkp	<u>kein Durch- schuß</u> leicht nach hinten aus- gebuchtet. Einschlag- stelle in 8 cm Ø zer- splittert
7	Scheibe Nr.3	Masch- Pistole Walther, Modell KURZ, Kal. 9 mm Lauflänge 180 mm	9 mm Geco Parabellus	8.015 g	372 m/s	56.5 mkp	<u>kein Durch- laß</u> stärker nach hinten ausge- buchtet. Sprungrosette 12 cm Ø

lfd.	Material	Waffe	Munition	Geschoßgewicht	Geschoßgeschwindigkeit	Auftreffenergie	Ergebnis
8	23,7 mm Mehrschichtenglas, Fabrikat KINON, 4 Schichten 6-11-5-3 Scheibe Nr.4	Revolver Smith u. Wesson, Kal.44 (11,15 mm) Lauflänge 165 mm	44 Magnus Voll- blei	15.538g	385 m/s	117.0 mkp	<u>kein Durchschuß</u>  Glasmasse an Einschlag- stelle pul- verisiert u.nach hinten aus- gebuchtet. Bei Berüh- rung abge- fallen. Öff- nung von 5 ca Ø. Sehr starke Sprengwir- kung. Rosette 8 cm Ø.

1  
81  
0  
1

Material: KINON - Panzerglas Kristall

Grösse 400 x 600 mm, Stärke 25 - 27 mm,  
Position a) 6/6/6/6  
b) 6/10/4/3

Beschuss: MP 40 - 9 mm - Stahlkern - 3 Schuss Einzelf.  
3 m Entf.

Ergebnis: kein Durchschuss

Mattfläche im Dreieck:

a) 210 - 200 - 220 mm  
b) 200 - 210 - 220 mm

Absplitterung a) Höhe 200 mm Breite 220 mm  
(Rückseite) b) Höhe 160 mm Breite 200 mm

---

Grösse 400 x 600 mm, Stärke 25 - 27 mm,  
Position a) 6/6/6/6  
b) 6/10/4/3

Beschuss: MP 40 - 9 mm - Bleikern - 1 Schuss - 3 m Entfernung

Ergebnis: kein Durchschuss

Mattfläche a) Höhe 110 mm Breite 120 mm  
b) Höhe 120 mm Breite 150 mm

Absplitterung a) Höhe 70 mm Breite 80 mm  
(Rückseite) b) Höhe 100 mm Breite 100 mm

---

Grösse 400 x 600 mm , Stärke a) 21,4 mm - Position 6/6/6/3  
b) 20,4 mm - Position 5/5/5/5  
c) 19,8 mm - Position 3/9/3/3

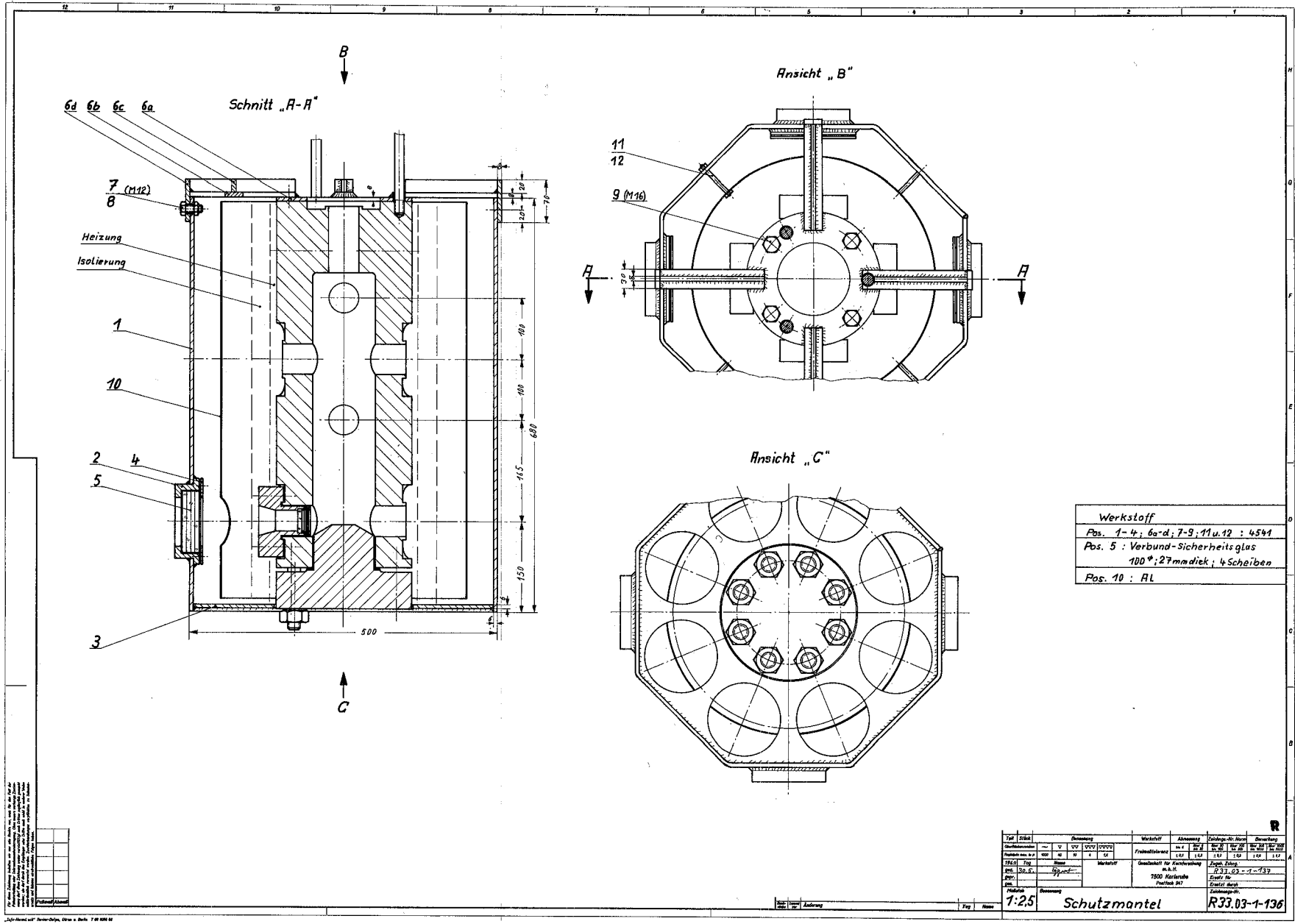
Beschuss: FN 10/22 - 7,65 mm, Bleikern - 1 Schuss - 3 m Entf.

Ergebnis: kein Durchschuss

Mattfläche a) Höhe 70 mm Breite 70 mm  
b) Höhe 90 mm Breite 70 mm  
c) Höhe 70 mm Breite 60 mm

Absplitterung a) Höhe keine Breite keine  
(Rückseite) b) Höhe 80 mm Breite 85 mm  
c) Höhe keine Breite keine

---



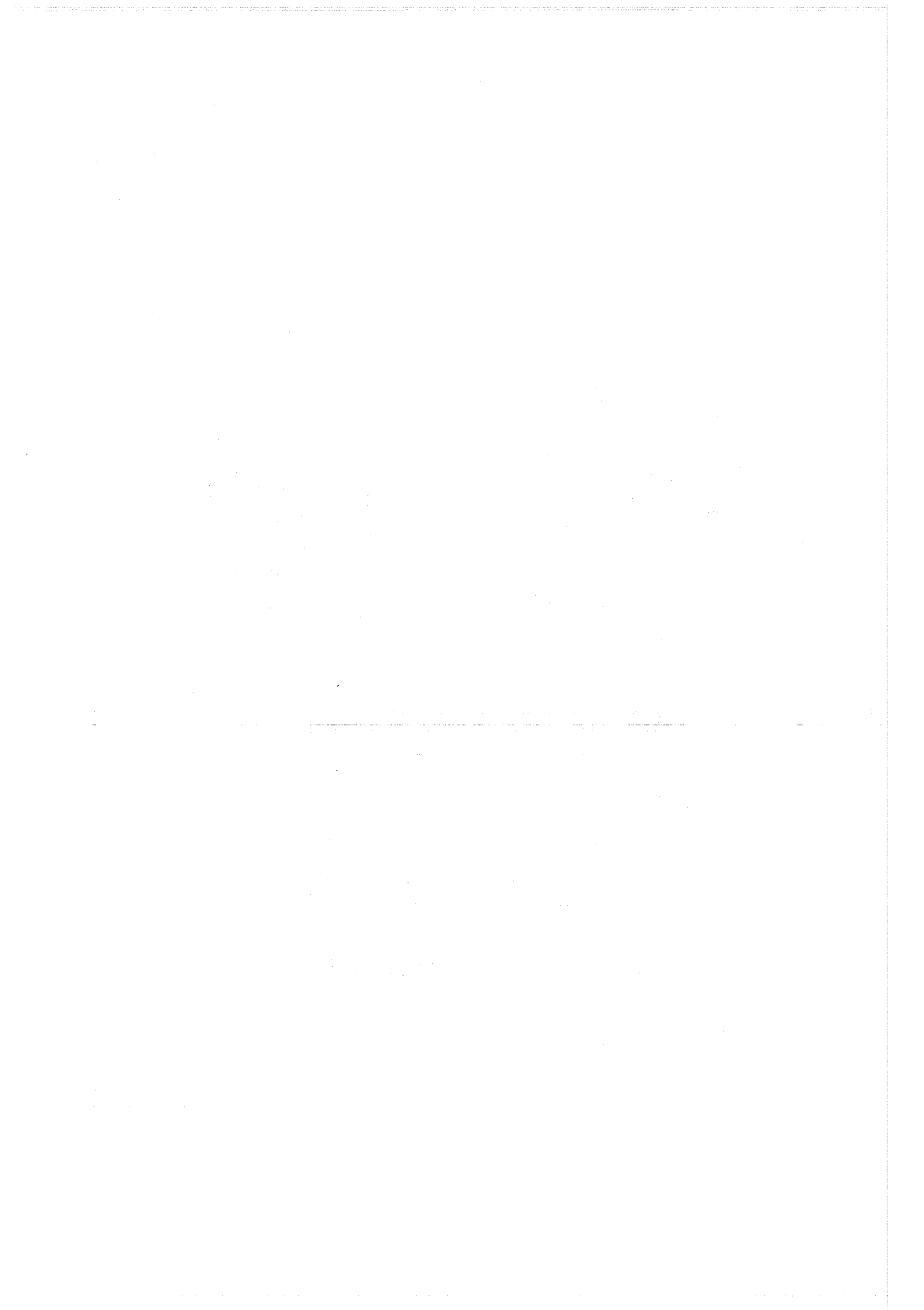
Werkstoff

Pos. 1-4; 6a-d; 7-9; 11 u. 12	: 4544
Pos. 5	: Verbund-Sicherheitsglas 100°; 27 mm dick; 4 Scheiben
Pos. 10	: AL

1. Fertigturteil der Firma...  
 2. ...  
 3. ...  
 4. ...  
 5. ...  
 6. ...  
 7. ...  
 8. ...  
 9. ...  
 10. ...  
 11. ...  
 12. ...

Zahl	Stück	Abmessung	Werkstoff	Abmessung	Zustände	Monte	Gezeichnet
2	1	100 x 100	CF	100 x 100	1	100 x 100	100
4	4	40 x 40	S	40 x 40	4	40 x 40	400
2	2	100 x 100	CF	100 x 100	2	100 x 100	200
1	1	100 x 100	CF	100 x 100	1	100 x 100	100
1	1	100 x 100	CF	100 x 100	1	100 x 100	100

Besondere Anmerkungen: 7500 Kastenblech  
 Ausführung: R33.03-1-136  
 Maßstab: 1:25  
 Zeichnung: Schutzmantel  
 R33.03-1-136



Protokoll: 23. Juli 1969

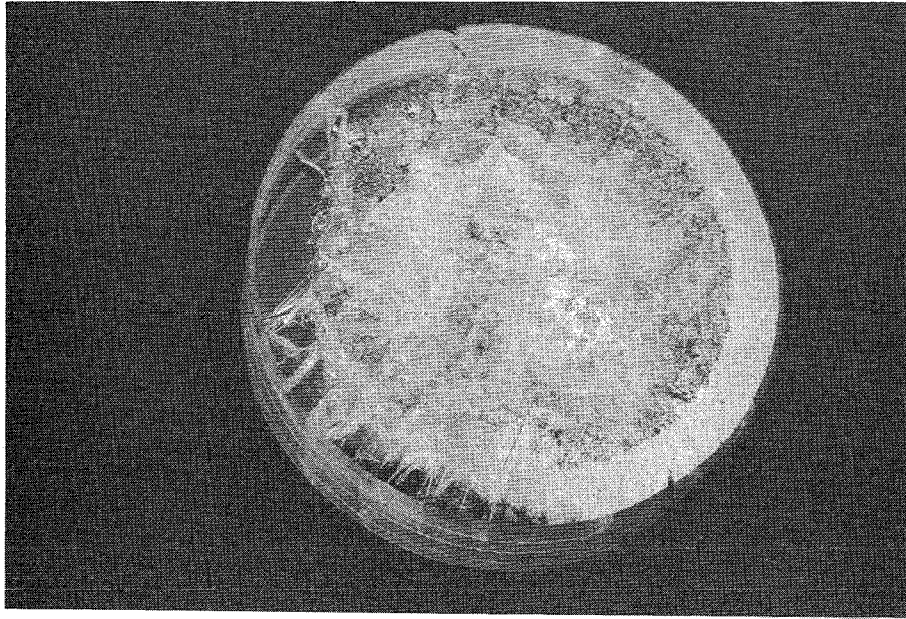
KINON-PANZERGLAS-KRISTALL. VERBUND-SICHERHEITSGLAS AUS KRISTALLSPIEGELGLAS

4 Scheiben à 60 mm, 100 mm Ø

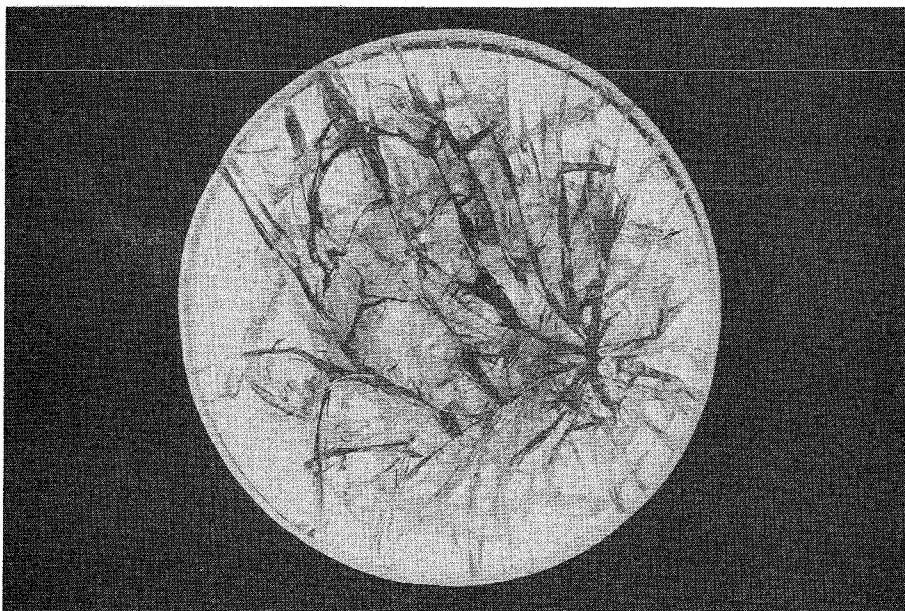
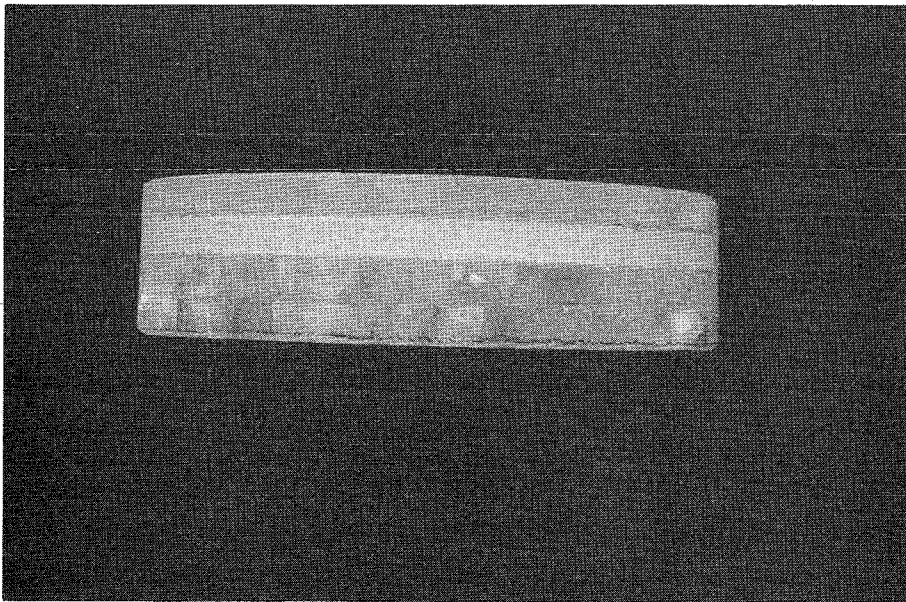
90 mm Öffnungsdurchmesser im Strahlungsmantel

16.7.1969 Zeit	Behälter- druck(atü)	Heizspannung (V)	Temperatur-Verbund- scheibe (mV)	Bemerkung
8.16	-	200	-	ein
8.35	-	300	-	
8.47	-	340	0,72	
9.15	1	340	0,84	CHROMEL-ALUMEL
9.34	4	340	0,89	
9.50	9	340	0,95	1(mV) = 25 (°C)
10.03	15	300	1,01	10(°C) = 0,4(mV)
10.16	21	300	1,05	
10.30	30	280	1,10	
10.44	40	280	1,16	
10.54	47	250	1,22	
11.15	62	250	1,28	
11.30	71	250	1,33	
11.45	82	220	1,37	
12.00	91	220	1,43	
12.15	97	220	1,45	
12.30	104	220	1,5	
12.47	112	220	1,51	
13.04	119	220	1,55	
13.10	125	220	1,9 nd.Bersten	Samphirscheibe geborsten

KINON-PANZERGLAS-KRISTALL  
VERBUND-SICHERHEITSGLAS AUS KRISTALLSPIEGELGLAS  
4 SCHEIBIG à 6 mm, 100 mm Ø BEHÄLTER-BERSTDRUCK 126 [at]



Beschuss-  
Seite



Rück-  
Seite



Protokoll: 23. Juli 1969

VERBUNDSCHEIBE DER DEUTSCHEN SPIEGELGLAS-AG

1 Scheibe 120 mm Ø, Tempaxglas 5 mm dick (Beschuß-Seite)

3 Scheiben 120 mm Ø, Kristall-Spiegelglas, à 4 mm

50 mm Öffnungsdurchmesser im Strahlungsmantel

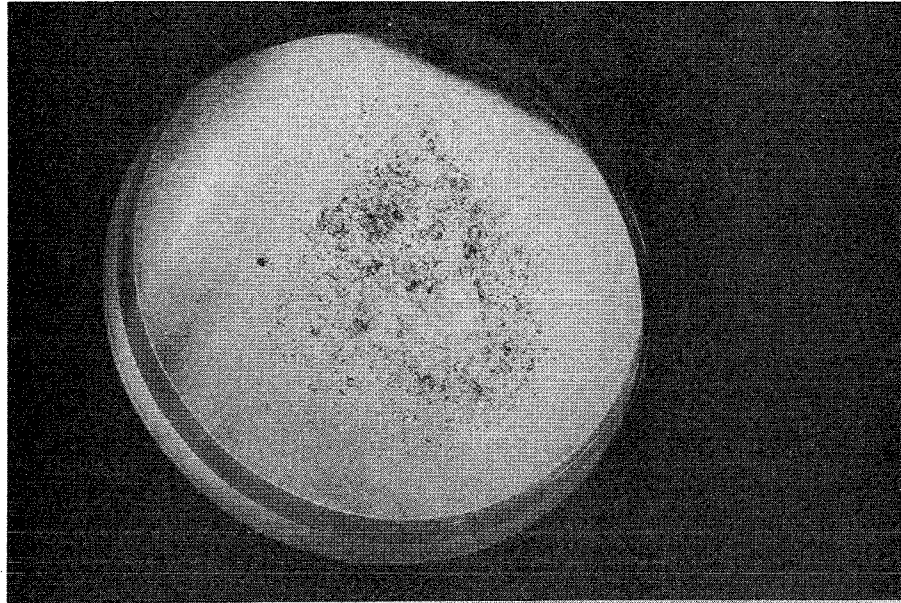
11.7.1969 Zeit	Behälterdruck (atü)	Heizspannung (V)	Temperatur-Verbund- scheibe (mV)	Bemerkungen
6.20				ein
10.23	109	280 250	0,85	
10.27	128	200	0,88	CHROMEL-ALUMEL
10.28	-	150	-	1(mV)= 25 (°C)
10.37	153	180	0,89	10(°C)= 0,4(mV)
10.42	148	200	0,89	
10.50	151	180	0,89	
10.57	150	200	0,9	
11.12	156	-		Saphirscheibe geborsten
			1,3 n.d.Bersten	

VERBUNDSCHEIBE DER DEUTSCHEN SPIEGELGLAS-AG

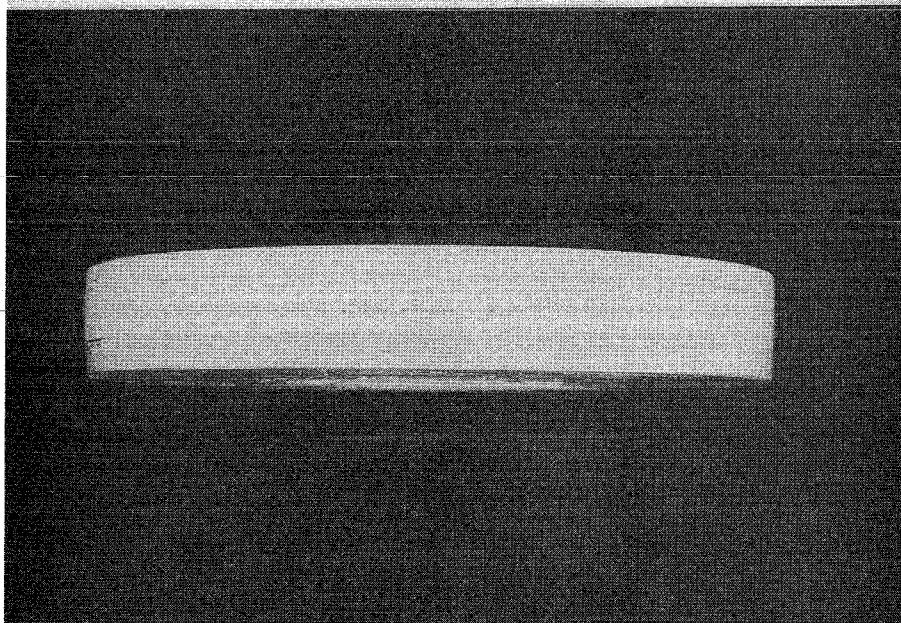
1 Scheibe 120 mm  $\varnothing$ , Tempaxglas 5 mm dick, Beschuss-Seite

3 Scheiben 120 mm  $\varnothing$ , Kristall-Spiegelglas, à 4 mm

BEHÄLTER-BERSTDRUCK 157 [at]



Beschuss-  
Seite



Rück-  
Seite