

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

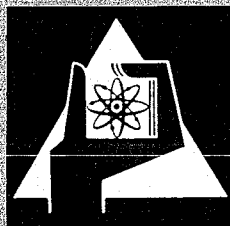
Februar 1972

KFK 1610

Institut für Kernverfahrenstechnik

**Aufbau und Erprobung einer Anordnung zur Erzeugung
hohlzylinderförmiger kondensierter Wasserstoffmolekularstrahlen**

H. Burghoff, A. R. Neugebauer



**GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

**GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE**

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Februar 1972

KFK 1610

Institut für Kernverfahrenstechnik

AUFBAU UND ERPROBUNG EINER ANORDNUNG
ZUR ERZEUGUNG HOHLZYLINDERFÖRMIGER
KONDENSIRTER WASSERSTOFFMOLEKULARSTRAHLEN

von

H. Burghoff
A.R. Neugebauer⁺⁾

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe

+) Dissertation; Universität Karlsruhe (T.H.) Februar 1972



Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. <u>Einleitung</u>	3
2. <u>Aufbau der Anordnung</u>	5
2.1 Prinzip und Auslegungsdaten	5
2.2 Ringstrahldüse	10
2.3 Kryostat	13
2.4 Kälteanlage	21
3. <u>Erprobung der Anordnung</u>	24
3.1 Dichtigkeit des Ventiles	24
3.2 Zeitlicher Verlauf der Ventilbewegung	25
3.3 Zeitlicher Verlauf der Strahlintensität	27
3.4 Räumlicher Verlauf der Strahlintensität	29
4. <u>Diskussion der Ergebnisse</u>	35

Zusammenfassung

Durch Expansion von Stickstoffgas aus einer mit flüssigem Stickstoff gekühlten ringförmigen Düse konnten bereits früher hohlzylinderförmige kondensierte Stickstoffmolekularstrahlen erzeugt werden, die sich durch elektrische Entladungen in entsprechende Plasmakonfigurationen umwandeln ließen. Da solche Plasmakonfigurationen aus den Isotopen des Wasserstoffs für die Erzeugung intensiver Neutronenblitze durch Kernfusion von großem Interesse wären, wurde eine Anordnung zur Erzeugung hohlzylinderförmiger kondensierter Wasserstoffmolekularstrahlen entwickelt. In der vorliegenden Arbeit werden Auslegung, Bau und Erprobung dieser mit flüssigem Wasserstoff gekühlten Anordnung beschrieben, mit der sich im Impulsbetrieb kondensierte Wasserstoffhohlstrahlen von 40 mm Innendurchmesser bei einer Impulsdauer von einigen Millisekunden erzeugen lassen. Im Bereich der vorgesehenen Entladungsstrecke ergeben sich Dichten in der Größenordnung von 1×10^{16} H₂-Molekülen/cm³. Das Innere des Hohlstrahls enthält nur etwa 1% der im Zylindermantel konzentrierten Materiemenge, was für die Erzeugung intensiver Neutronenblitze von großem Vorteil wäre.

Design and Test of a Device for Production of Hollow-Cylindrical Cluster Beams of Hydrogen.

Abstract:

It has been shown previously that a hollow-cylindrical beam of nitrogen clusters can be produced by expansion of nitrogen gas out of a ring shaped nozzle cooled by liquid nitrogen. An electrical discharge along this beam produces a plasma of corresponding shape.

Since plasmas of the heavy hydrogen isotopes in configurations of this kind may be of interest to produce intense neutron flashes by nuclear fusion it was decided to build a device for production of hollow-cylindrical cluster beams of hydrogen. This paper describes the design, construction and test of a liquid hydrogen cooled cluster generator that produces a pulsed cluster beam of 40 mm I.D. and a pulse length of several milliseconds. In the discharge region the particle density in the beam is of the order of 10^{16} H₂-molecules/cm³, whereas the interior contains only ca 1% of total amount of material concentrated in the beam. This should be an advantage for the generation of intense neutron flashes.

1. Einleitung

In einer früheren Arbeit wurde gezeigt, daß sich durch Expansion von Stickstoffgas aus einer mit flüssigem Stickstoff gekühlten ringförmigen Düse hohlzylindrische kondensierte Stickstoffmolekularstrahlen erzeugen lassen, die durch eine elektrische Entladung in entsprechende Plasmakonfigurationen umgewandelt werden können¹⁾. Da solche Plasmakonfigurationen aus den Isotopen des Wasserstoffs für die Erzeugung intensiver Neutronenblitze durch Kernfusion von großem Interesse wären²⁾, wurde die in¹⁾ benutzte Anordnung versuchsweise auch mit Wasserstoff als Strahlgas und flüssigem Wasserstoff als Düsenkühlmittel betrieben. Es gelang jedoch nicht, reproduzierbar hohlzylinderförmige kondensierte Wasserstoffmolekularstrahlen zu erzeugen.

Eine Analyse des Problems zeigte, daß es im Fall des Wasserstoffs wesentlich schwieriger ist, die erforderliche Kühlleistung auf Strahlgas und Düse zu übertragen, und daß die benutzte Anordnung in dieser Hinsicht unzureichend war. Es wurde daher beschlossen, eine speziell für die Erzeugung hohlzylinderförmiger kondensierter Wasserstoffmolekularstrahlen geeignete Anordnung zu entwickeln, wobei der Durchmesser der Ringdüse gleichzeitig von 20 auf 40 mm erhöht werden sollte. Um die mit der Handhabung größerer Mengen offenen flüssigen Wasserstoffs verbundenen Sicherheitsprobleme zu vermeiden, sollte die neue Anordnung mit einem geschlossenen Kältemittelkreislauf betrieben werden.

1) E.W. Becker, H. Burghoff, R. Klingelhöfer, Z. f. Naturforschung 22a, 589 (1967)

2) R.G.A. Frank, R. Klingelhöfer, Z. f. Naturforschg. 24a, 1632 - 1636 (1969)

Da die Strahlen bei der Erzeugung der Plasmakonfigurationen jeweils nur für die Dauer einiger tausendstel Sekunden benötigt werden, kann durch Impulsbetrieb des Strahlerzeugungssystems außerordentlich an Pumpkapazität gespart werden. Wie die bestehende Anordnung sollte daher auch die neue für Impulsbetrieb ausgelegt werden.

2. Aufbau der Anordnung

2.1 Prinzip und Auslegungsdaten

Das Prinzip der Strahlerzeugung zeigt Abb. 1. Strahlgas strömt unter dem Druck p_0 in eine ringförmige gekrümmte Lavaldüse und expandiert als Überschallstrahl. Dabei setzt unter geeigneten Bedingungen Kondensation ein. Durch Umlenken des Strahlgases um 90° während der Beschleunigung erreicht man eine räumliche Trennung zwischen dem unkondensierten Restgas und den kondensierten Agglomeraten, die danach vorwiegend an der Innenseite des Hohlstrahles zu finden sind. Ein durch Abschäler und Kollimator ausgeblendeter Teil des kondensierten Strahles wird ins Hochvakuum überführt, in dem der Druck p_K herrscht. Der andere Teil wird zusammen mit dem unkondensierten Restgas von den beiden rotationssymmetrischen Schneiden an der Strahlaußenseite abgeschält, in die 1. und 2. Druckstufe geleitet und bei den Drücken p_1 und p_2 getrennt abgesaugt.

Längs des kondensierten Hohlstrahles sollen später in der Vakuumkammer periodisch elektrische Entladungen bei jeweils gleichem Anfangsdruck gezündet werden. Dieser Druck soll unter 10^{-4} Torr liegen und den Durchbruch elektrischer Entladungen außerhalb der vorgesehenen Strecke verhindern. Gegenüber stationärem Betrieb, bei dem durch die mit flüssigem Wasserstoff gekühlte Düse ca. 6 Mol H_2 /sec treten und aus der Vakuumkammer ein Volumenstrom von 10^5 l/sec gepumpt werden müßte, kann im gepulsten Betrieb der gleiche Anfangsdruck mit einer im Verhältnis von Pulsdauer zu Auspumpzeit kleineren Pumpleistung erreicht werden.

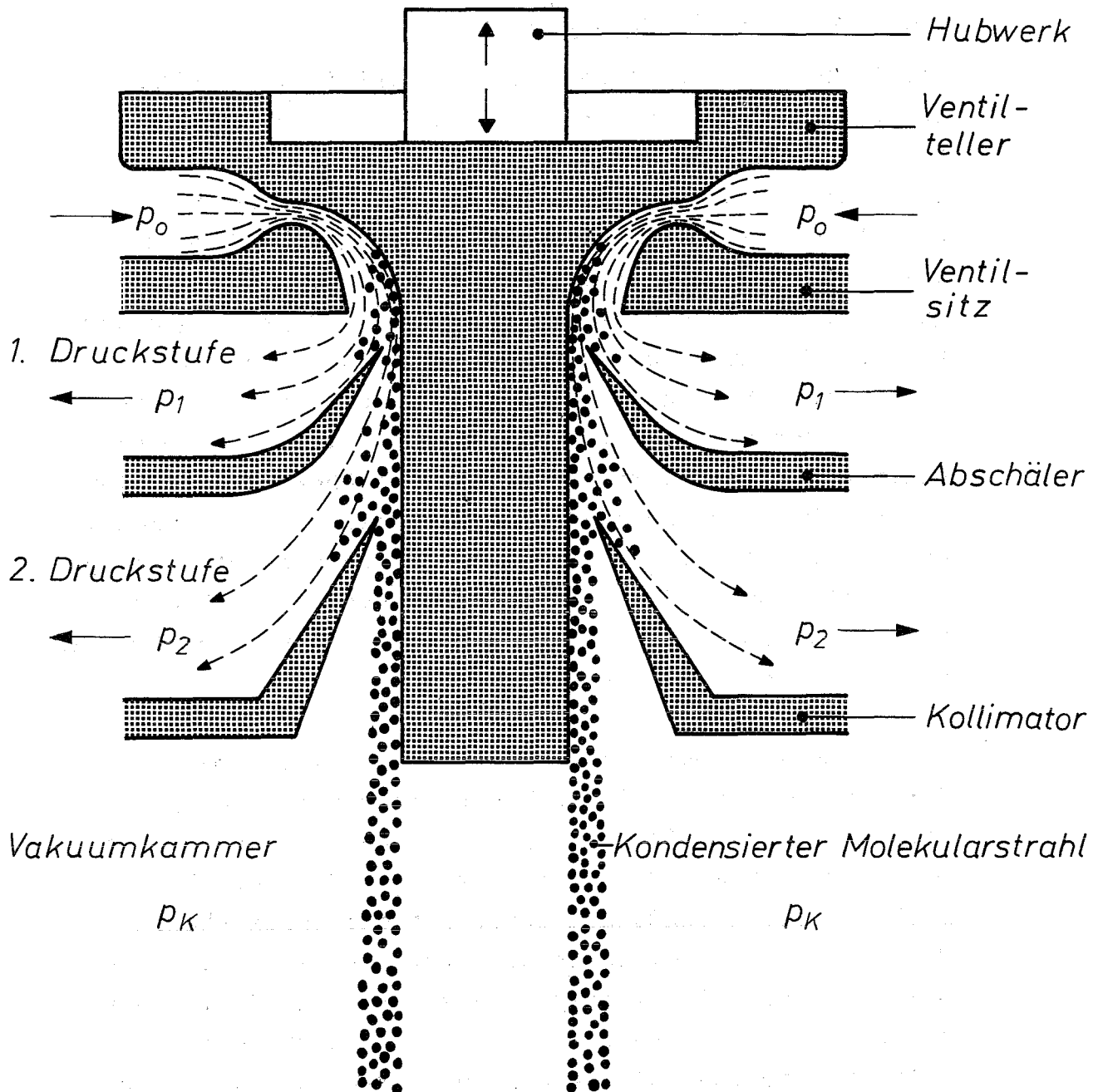


Abb. 1: Prinzip der Erzeugung hohlzylinderförmiger kondensierter Molekularstrahlen in einer um 90° gekrümmten ringförmigen Lavaldüse, die impulsweise durch Anheben des Ventiltellers freigegeben wird.

Im Hinblick auf eine hohe Wiederholfrequenz bei der Erzeugung intensiver Neutronenblitze wird angestrebt, die Pulsdauer soweit zu verkürzen, daß ein kondensierter Hohlstrahl stationärer Intensität die Entladungstrecke gerade füllt. Die minimale Pulsdauer wird durch die Laufzeit bestimmt, in welcher der Strahl die Entladungstrecke durchsetzt, und beträgt bei einer mittleren Strahlgeschwindigkeit von 400 m/sec etwa 0,5 msec. Die Zeit, während der die Strahlintensität von Null auf den stationären Wert anwächst, muß kleiner sein als 2 msec, weil der Strahl dann auf den Bodenflansch der Vakuumkammer auftrifft, verdampft und den Druck erhöht. Es wird zusätzlich gefordert, daß die zum Auf- und Abbau des stationären Strahles benötigten Zeiten kleiner als die minimale Pulsdauer sind, damit die dabei in das Vakuumsystem eintretenden Teilchenströme die Auspumpzeit nur wenig vergrößern.

Ein für die Erzeugung kurzer Strahlimpulse geeignetes System wird durch die bewegliche Anordnung des als Ventilteller benutzten Innenteiles der in Abb. 1 dargestellten Ringstrahldüse gebildet, welche damit die Funktionen von Düse und Ventil vereinigt. Das Ventil wird von einem aus Elektromagnet und Feder aufgebauten Hubwerk betätigt, wobei der Ventilweg der engsten Düsenweite entspricht und der kleinstmögliche ist. Die Zeiten für den Auf- und Abbau eines kondensierten Strahles stationärer Intensität werden praktisch nur durch den Verlauf der Öffnungs- und Schließbewegung und nicht durch die Zu- und Abnahme des Einlaßdruckes in einem zwischen Ventil und Düse gelegenen Raum bestimmt, wie es bei Anordnung des Ventiles vor der Düse erwartet werden muß. Die Dichtigkeit des auf einer Dichtlinie von 180 mm Länge schließenden Ventiles soll so gut wie möglich sein.

Das vereinfachte Schema der Versuchsanordnung zeigt Abb. 2. In eine Vakuumapparatur ist ein Kryostat eingesetzt, dessen Kältemittelbad die Ringstrahldüse umfaßt. Das verdampfte Kältemittel wird von einer Kälteanlage rekondensiert und wieder dem Bad zugeführt. Zur Verminderung des Kälteleistungsbedarfs im Temperaturbereich des flüssigen Wasserstoffs besitzt der Kryostat ein Stickstoffbad zur Strahlgasvorkühlung. In mehreren Kühlstufen wird Strahlgas nacheinander von Raum- auf Stickstoff- und Wasserstofftemperatur abgekühlt und tritt dann in das unmittelbar vor der Düse gelegene Gasvorratsvolumen ein. Damit der Einlaßdruck p_0 während der Strahlerzeugung um weniger als 5 % abnimmt, ist im Gasvorratsvolumen die 20-fache Menge des pro Impuls in die Düse tretenden Gases gespeichert.

Die Ringstrahldüse sowie alle damit in Kontakt stehenden Kryostatteile sind aus Reinstkupfer gefertigt, das bei der Temperatur des flüssigen Wasserstoffs gegenüber Messing eine um den Faktor 100 und gegenüber Edelstahl um den Faktor 600 bessere Wärmeleitfähigkeit besitzt³⁾. Bauteile, deren Funktion die Verwendung von Stahl erforderte, wurden in Verbundbauweise mit Kupfer hergestellt, so daß alle Teile durch hochwärmeleitfähige Wärmebrücken mit dem Kältemittelbad verbunden sind.

Mit Hilfe eines in Polarkoordinaten verstellbaren Auffängers kann die Intensität des in die Vakuumkammer überführten Strahles gemessen werden.

3) V.J. Johnson, "Properties of Materials at Low Temperature", Phase 1, S. 3.112-1, 3.212-1, 3.301, National Bureau of Standards, Pergamon Press, (1961)

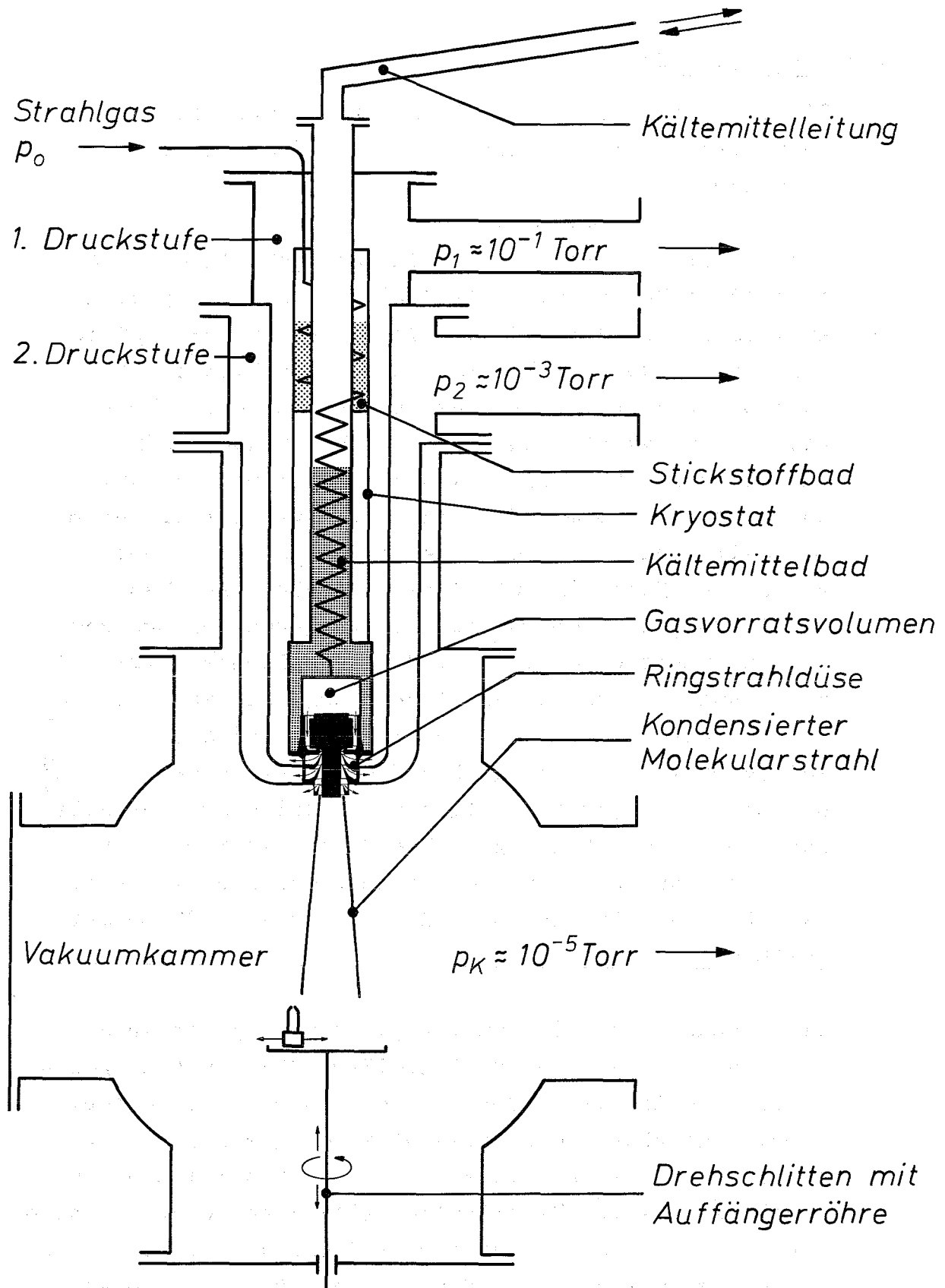


Abb. 2: Vereinfachtes Schema der Versuchsanordnung mit Ringstrahldüse und Kryostat, die in einen Vakuumzustand eingesetzt sind und von einer Kälteanlage mit Kälteleistung versorgt werden.

2.2 Ringstrahldüse

Die Einzelteile der Ringstrahldüse werden entsprechend dem Zusammenbauplan in den Abbildungen 3a bis 3g erläutert.

Der kopiergedrehte und anschließend gehärtete und geschliffene Ventilteller (21) wird in Abb. 3a gezeigt. Abb. 3b stellt dar, wie der Ventilteller (21) auf der Führungsbüchse (08) läuft, die auf die Mittelachse (07) aus Kupfer aufgeschrumpft ist und deren Oberflächenrauigkeit nach einem abschließenden Feinstziehschleif-Arbeitsgang kleiner als $1/1000$ mm ist. Das mittlere Übermaß des Schrumpfsitzes ist größer als die Differenz der Durchmesseränderungen von Stahlausen- und Kupferinnenteil bei Abkühlung auf Wasserstofftemperatur, so daß auch im eingekühlten Zustand die Führungsbüchse fest auf der Mittelachse sitzt. Die bei Raumtemperatur unter "Innendruck" der Kupfermittelachse stehende und in diesem Spannungszustand auf Endmaß bearbeitete Führungsbüchse wird beim Einkühlen auf Wasserstofftemperatur entlastet. Dabei nimmt der Außendurchmesser der Führungsbüchse durch die Rückbildung der Querdehnung zu und verkleinert das radiale Spiel zwischen Ventilteller und Führung von $40/1000$ mm auf $36/1000$ mm.

Die Mechanik für die Ventilwegverstellung ist in Abb. 3c eingezeichnet. Der Ventilteller (21) läuft an gegen einen Anschlag (10), der auf der Führungsbüchse (08) gepaßt und über ein eingeläpptes Feingewinde M 30 x 1 auf Teil (07) axial fixiert ist. Die Prallflächen an Anschlag (10) und Ventilteller (21) sind durch Bankette von der feinstbearbeiteten Oberfläche der Führungsbüchse (08) zurückgenommen, damit etwa entstehende Grate

die Führung des Ventiltellers nicht verschlechtern. Zur Verstellung des Anschlages (10) wird dieser über ein Querhaupt (33) mit dem Drehstab (15) gedreht. Die Schraubverbindung mit Teil (07) übersetzt die Drehung in eine axiale Bewegung. Das Querhaupt (33) kann in einer querliegenden Aussparung der Mittelachse (07) um $\pm 25^{\circ}$ geschwenkt werden. Dies entspricht einer axialen Verschiebung des Anschlages (10) um $\pm 0,07$ mm. Abb. 3d veranschaulicht die Spannvorrichtung für die Schließfeder (14). Auf das Außengewinde des Anschlages (10) ist die Spannmutter (11) aufgeschraubt, die über ein Axialkugellager die Schließfeder zusammendrückt. Das Kugellager besteht aus zwei gehärteten plangeschliffenen Laufringen (12), die auf das zylindrische Ende der Spannmutter (11) aufgeschoben sind und zwischen sich den Kugelkäfig (13) mit den Kugeln tragen. Es verhindert, daß die Spannmutter (11) beim Drehen die Schließfeder (14) durch Reibkräfte in der Berührebene auf Biegung beansprucht, so daß ein Rückdrehmoment vorhanden ist, welches Teil (11) in eine undefinierte Lage zurückdrehen kann. Die Schließfeder (14) stützt sich über Spannmutter (11) und Anschlag (10) auf der Mittelachse (07) ab und erfüllt neben der Schließfunktion auch die Aufgabe einer Schraubensicherung für die beiden Gewinde, über die der Kraftfluß geleitet wird. Ein Edelstahl-Faltenbalg (35) ist im beweglichen Ventilteller (21) und im feststehenden Ring (09) weich eingelötet. Die zylindrischen Enden des Faltenbalges besitzen den gleichen Durchmesser wie die Dichtlinie des Ventils, die Gas- und Vakuumkammer voneinander trennt. Die Druckkräfte auf Ober- und Unterseite des Ventiltellers heben sich auf, das Ventil ist exakt druckentlastet.

Mit der Montage des Faltenbalges (35) ist der Zusammenbau der ersten kompakten Gruppe abgeschlossen. Diese Gruppe wird, wie Abb. 3e zeigt, eingesetzt in die Bohrung eines Verbundbauteiles, das aus dem Eisenkern des

Ringmagneten (02) und den aufgelöteten Teilen Führungshülse (04) und Kappe (05) aufgebaut ist. Die hier noch nicht gezeichnete Spule des Ringmagneten wird nach dem Einbau durch die Sicherungsringe (34) gehalten. Der Flansch am Oberteil der Mittelachse (07) ist eingepaßt in eine Bohrung in der Kappe (05) und wird mit Schrauben gegen eine Planfläche gedrückt. Bohrung und Planfläche in der Kappe und die beiden Außendurchmesser der Führungshülse (04) sind in einer Einspannung gedreht und laufen so genau zusammen, wie es die Rundlaufgenauigkeit von 1/100 mm der zur Verfügung stehenden Drehmaschine erlaubt. Die Mittelachse (07) mit der Führungsbüchse (08) ist zwischen Spitzen gedreht.

Als Verlängerung der zylindrisch auslaufenden Ventilkontur in Strahlrichtung ist der Innenzylinder (16) auf die Führungsbüchse (08) aufgesteckt. Er besitzt vier achsenparallele Bohrungen, in die jeweils ein Führungsrohr (31) mit halbmondförmigem Bund eingeschoben ist. In die Führungsrohre (31) werden Halterungen für Mikro-Glühlampen eingesetzt, die zur Hubmessung benötigt werden. Innenzylinder (16) und Führungsrohre (31) werden gemeinsam gehalten durch die Spannplatte (32), die mit der Mittelachse (07) verschraubt wird.

Das Ventilgehäuse (01) in Abb. 3f nimmt alle Bauteile auf und bestimmt die Zuordnung von Ventilteller (21) zum Ventilsitz (22) sowie die Stellung der so gebildeten Ring-Lavaldüse und des Innenzylinders (16) zum Abschäler und den Kollimatoren. Der gehärtete und geschliffene Ventilteller (21) wird von der Schließfeder (14) gegen die ballige Kontur des ungehärteten Ventilsitzes (22) gepreßt. Vor der Montage werden die Ventil-

hälften in einer Vorrichtung aufeinander eingeläpft. Der Ventilsitz (22) ist eingesetzt in die Ventilsitzaufnahme (23) und mit dieser verstiftet und verschraubt. Nach dem Einsetzen des Schließringes (03) ist die ringförmige Lavalldüse fertig zusammengebaut.

Die komplette Ringstrahldüse ist in Abb. 3g dargestellt. Abschäler (17) und 1. Kollimator (18) sind von unten her in das Ventilgehäuse (01) eingesteckt und verschraubt. Bei einem Teil der Experimente wird ein 2. Kollimator (20) verwendet, der vom Kollimatorkäfig (19) gehalten und mit diesem zusammen in den 1. Kollimator (18) eingeschraubt wird.

Die elektrischen Meßleitungen aus dem Vakuumbereich treten durch die Durchführung (24) in den gaserfüllten Raum ein, die von der Druckschraube (25) zusammen mit einem Indiumring gegen einen Absatz in der Mittelachse (07) gepreßt wird. Man erkennt im Schnitt die Ringmagnetspule, welche aus Spulenkörper (26) und ca. 40 Windungen Spulendraht (28) von 1,5 mm Stärke besteht. Die Mikroglühlampen (30) und die von ihnen beleuchteten Photodioden (29) zur Messung des Ventilweges vervollständigen die Anordnung der elektrischen Bauteile.

2.3 Kryostat

Zur Prüfung und Reparatur defekter Bauteile wurde der Kryostat aus sieben demontierbaren Baugruppen aufgebaut, die in Abb. 4 dargestellt sind.

Baugruppe "Strahlgaskühlung": Diese im Kryostateninnern liegende Gruppe umfaßt die Strahlgasleitung im Kältemittelraum bis zum Eintritt in das Gasvorratsvolumen. In der Rohrschlange kühlt sich das Strahlgas von ca. 100 °K auf die Temperatur des Bades ab. Am oberen Ende wird mit

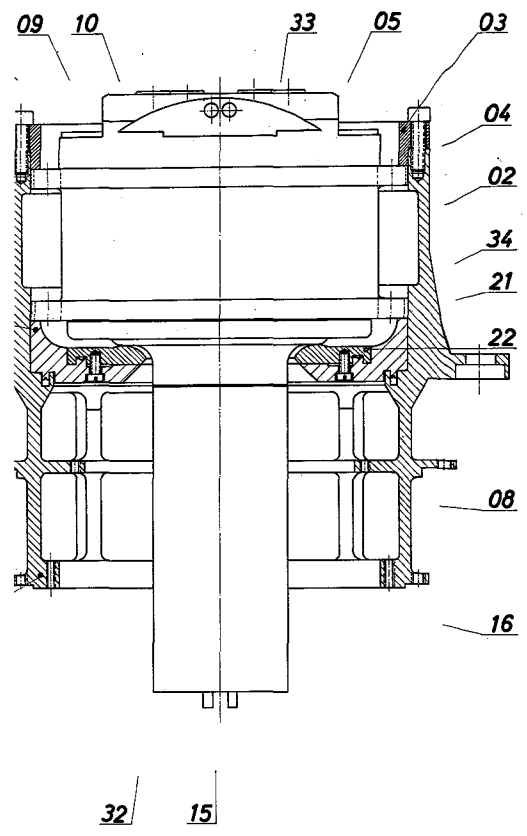


Abb. 3f

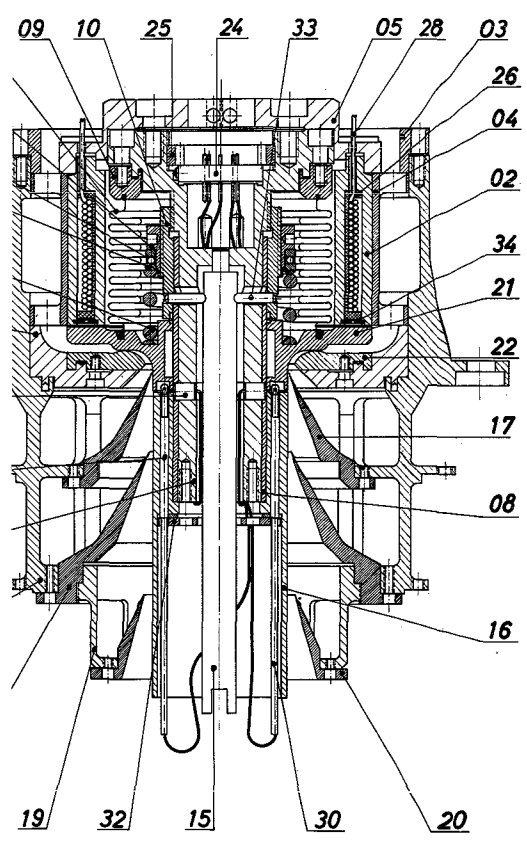


Abb. 3g

Zusammenbau der Ringstrahldüse in einzelnen Montageschritten, Maßstab 1:2

einer lösbaren Rohrverbindung der Übergang zwischen dem Edelstahlrohr (40) und der aus dem Stickstoffvorkühlbad kommenden Leitung (39) (Baugruppe "Druckrohr") hergestellt. Die Hochführung der Rohre in den warmen Kryostatbereich erlaubt die Montage der beiden ineinandergreifenden Baugruppen an gerade noch zugänglicher Stelle. Ein nennenswerter Wärmeeinstrom in das vorgekühlte Strahlgas wird durch Isolation der Rohre mit Teflon-Schlauch vermieden. An das Rohr (40) schließt sich eine Kupfer-Kühlschlange (49) an, die in den unteren Teil der Frittenglocke (30) einmündet. Aus dem Ringraum zwischen Frittenglocke (30) und Fritte (31), die von Frittendeckel (32) und Frittenboden (33) gehalten wird, fließt Strahlgas radial nach innen und tritt durch sechs Überströmröhre (34), die im oberen Anschweißflansch (06) eingelötet sind, in das Gasvorratsvolumen ein. Als Fritte wird ein Hohlzylinder aus Sinterbronze mit einer Porenweite zwischen 25,um und 40,um verwendet. Teil (06) und der untere Anschweißflansch (07) sind mit einem Edelstahlfaltenbalg verschweißt und erweitern den Kältemittelraum bis zur Kontaktplatte (09), welche die Oberseite der Ringstrahldüse kühlt. Der Faltenbalg wird durch die verstellbare Dehnungsbegrenzung (10) gesichert. Zwei Edelstahlröhrchen (41) stabilisieren die Rohrschlange.

Baugruppe "Druckrohr": Den oberen Abschluß des Druckrohres (04) bildet der Druckflansch (26), an den die Kältemittelleitung angeflanscht wird. Mit dem oberen (19) und mittleren Kragenflansch (18) wird die Baugruppe "Kühlmantel" verschraubt. Im Ringraum zwischen der Baugruppe "Kühlmantel" und dem Druckrohr (04), der etwa zur Hälfte mit flüssigem Stickstoff gefüllt ist, wird das Strahlgas vorgekühlt. Die Leitungen für die Strahlgaszufuhr, das Einfüllen von flüssigem und das Auslassen von verdampftem Stickstoff laufen durch den oberen Kragenflansch (19) in

den Vorkühlraum. Ein Gegenstromwärmetauscher ist in der dampferfüllten Hälfte des Ringraumes auf das Druckrohr gewickelt. Strahlgas strömt durch das Innenrohr (44), um das mit großer Steigung ein Kupferdraht gewickelt ist. Durch den von den Rohren (44) und (45) gebildeten Ringspalt fließt Stickstoffdampf spiralig im Gegenstrom ab. Es schließt sich eine Kühlschlange (42) an, die den mit flüssigem Stickstoff gefüllten Raum durchläuft und in einem Eckstück (43) endet, das Strahlgas aus dem Vorkühlraum in den Kältemittelraum führt. Vom Eckstück (43) aus steigt ein teflon-isoliertes Edelstahlrohr (39) bis auf die Höhe des Druckflansches (26) und stellt dort über eine lösbare Verbindung den Übergang zur Baugruppe "Strahlgaskühlung" her. Das untere Ende der Baugruppe "Druckrohr" bildet der obere Trennflansch (52a).

Baugruppe "Druckkörper": Die Baugruppen "Druckrohr" und "Druckkörper" umschließen den Kältemittelraum, in dem während des Betriebes Drücke bis zu 25 atü zugelassen sind. Der untere Trennflansch (52b) ist mit dem Reduzierdeckel (03) verschweißt, der den Durchmesserunterschied von Druckzylinder (02) und Druckrohr (04) ausgleicht. In die obere Planfläche des Kupferringes (01a), in dem Kegelsitz sowie Gewindefacklöcher zur Aufnahme und Befestigung der Ringstrahldüse vorgesehen sind, sind zwei Ringnuten eingearbeitet. Drucktopf (01b) und Druckzylinder (02) sind in diese Nuten eingesetzt und hart verlötet. Sie begrenzen einen Ringraum, der im Betrieb mit flüssigem Kältemittel gefüllt ist und die Ringstrahldüse umfaßt. Der obere Anschweißflansch (06) der Baugruppe "Strahlgaskühlung" wird mit Teil (01b) verschraubt. Teil (01a) trägt einen Kupfer-Ring (58), in den Kühlschlange und Heizwicklung zur Be-

schleunigung des Kalt- bzw. Warmfahrens eingelötet sind. Vom Kryostatoberteil herkommende teilbare Rohre (46), die als Meßleitungen dienen, sind in den Reduzierdeckel (03) eingeschweißt und im Drucktopf (01b) zusammen mit Lötstücken (05) verlötet. Nach Ausbau der Ringstrahldüse läßt sich das Gasvorratsvolumen leicht reinigen und kontrollieren.

Baugruppe "Durchführungsring": Der Sternring (27) ist mit dem Druckflansch (26) verschraubt und trägt auf dem Außendurchmesser neun radial einlaufende Zuleitungen (48), die durch Überwurfmutter (35) fixiert werden. Die neun Leitungen werden durch rechtwinklig einlaufende Bohrungen axial aus dem Sternring (27) nach unten herausgeführt und setzen sich fort in Lötstützen (51) und darin eingelöteten umflochtenen Tombak-Schläuchen (38). Ein Edelstahlfaltenbalg zwischen Sternring (27) und Einlötring (28) schirmt das Vakuum der ersten Druckstufe gegen den Außendruck ab und bildet eine flexible Verbindung zwischen Kryostat und Vakuumkammer.

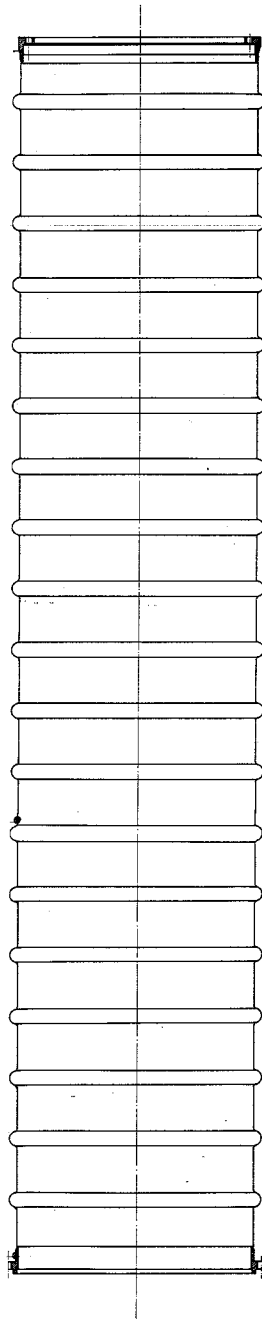
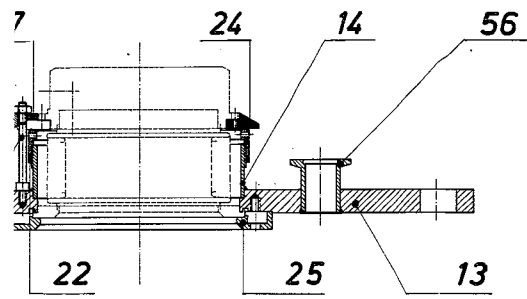
Baugruppe "Kühlmantel": Der Ringraum zur Vorkühlung des Strahlgases wird durch Kühlzylinderdeckel (20), Kühlzylinderboden (17) und Kühlmantel (16) abgeschlossen. Drei Leitungen laufen in den Vorkühlraum, die anderen sechs werden mit Schläuchen (38) verschraubt, die im Kühlzylinderdeckel (20) enden. Sie setzen sich fort in fünf Edelstahlrohren (46), die mit Gewindestücken (47) in Teil (20) befestigt sind und bei der Montage mit den zugehörigen Rohren der Baugruppe "Druckkörper" verbunden werden. Die sechste Leitung endet in Teil (20) und dient zum Auspumpen des den Kühlzylinder umgebenden Vakuumraumes. Beim Zusammenbau wird der Kühlmantel (16), der wegen der eingepprägten Sicken die Eigenschaften einer sehr harten Feder besitzt, um 0,5 mm in Längsrichtung gedehnt. Auftretende Längenunter-

schiede beim Einkühlen infolge unterschiedlicher Temperatur von Druckrohr (04) und Kühlmantel(16) können nicht zu axialer Druckbelastung und Beulgefahr des dünnwandigen Blechmantels führen.

Baugruppe "Aufhängung": Der Kragenflansch (13) bildet den oberen Abschluß der Vakuumkammer. Ein dreigeteilter Anpreßring (25) verspannt den Einlötring (28) der Baugruppe "Durchführungsringsring" vakuumdicht in Teil (13). Über den am Sternring (27) verschraubten dreigeteilten Haltering (24) stützt sich der Kryostat auf dem Justier-ring (22) ab, der auf ein im Teil (13) verschweißtes Gewinderohr (14) geschraubt ist und in seiner Höhe um ± 5 mm verstellt werden kann. In die Lücken des dreigeteilten Halteringes (24) greifen drei in Teil (13) verschraubte Verdrehsicherungen (23) mit Halteschuhen (57) ein, die den Edelstahlfaltenbalg gegen Verdrehen und Überdehnen sichern. Die Aufhängung des Kryostaten ermöglicht es, diesen geringfügig zu verschieben, anzukippen und in der Höhe zu verstellen, um die Ringstrahldüse in der Vakuumkammer zu justieren. Auf dem Kragenflansch (13) sind zwei Kleinflansch-Rohrstutzen (56) für die Aufnahme elektrischer Durchführungen sowie Kettenösen (59) angeordnet.

Baugruppe "Vakuummantel": Der Vakuummantel (15) aus 0,5 mm starkem Edelstahlblech ist mit nach außen geprägten Sicken versehen, die das Einbeulen des evakuierten Bauteiles unter einem Außendruck von 1 ata verhindern. Die Enden von Teil (15) sind mit dem oberen (21) und dem unteren Mantelflansch (12) verschweißt. Die gesamte Baugruppe wird vor Montage der Baugruppe "Aufhängung" von oben her über den Kühlzylinderdeckel (20) gezogen und bis zum Reduzierdeckel (03) abgesenkt. Bei der Montage wird der Vakuummantel um 1 mm vorgespannt und kann beim Einkühlen des Kryostaten keine nennenswerten Druckspannungen bekommen. Den fertig

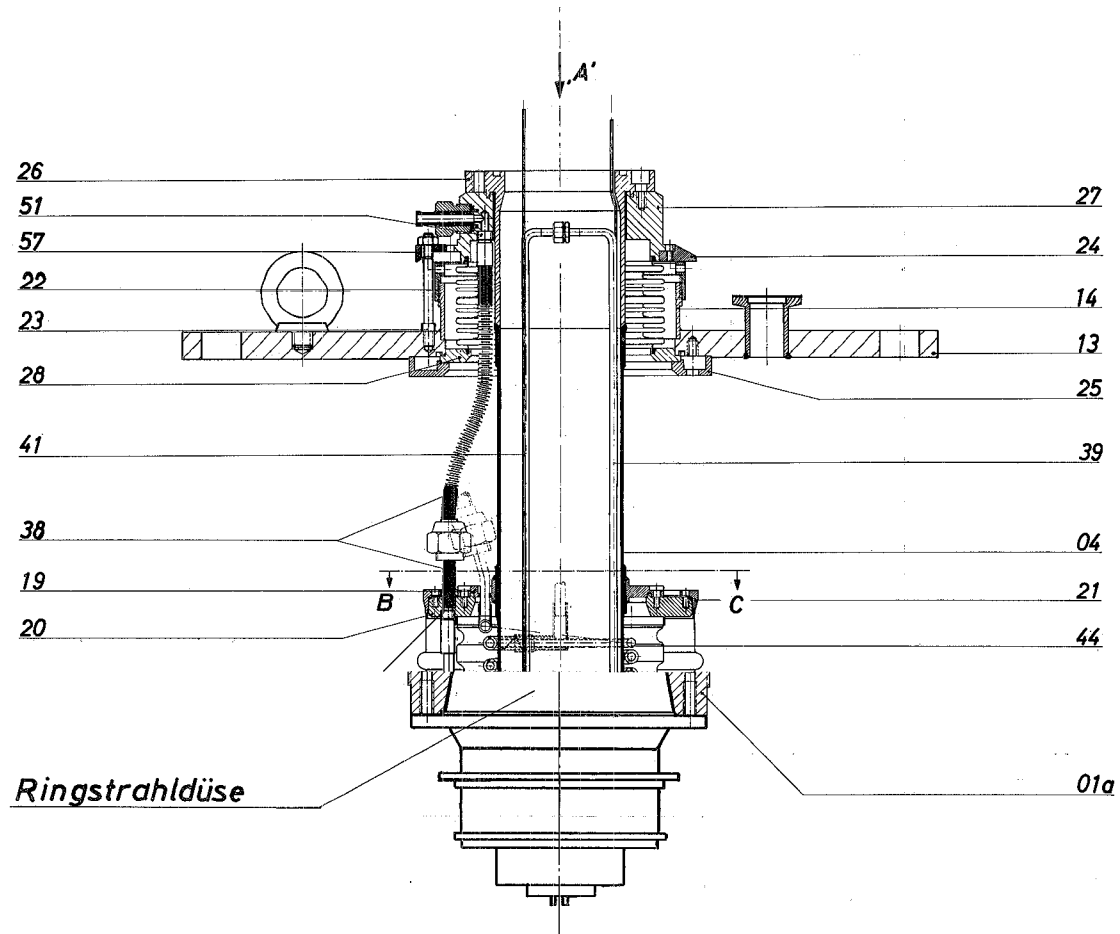
Gruppe „Aufhängung“



*Baugruppe
„Vakuummantel“*

*ng und Zuordnung der
Baugruppen des Kryostaten*





- | | | |
|--|-------------------------------------|------------------------------------|
| 1 Einfüllrohr für flüssigen Stickstoff | 4 Strahlgaszufuhrleitung | 7 Abdampfleitung für Stickstoff |
| 2 Stromleitungen zum Ringmagneten | 5 Auspump- und Temperaturmeßleitung | 8 Leitungen zu den Photodioden |
| 3 Druck- und Temperaturmeßleitung | 6 Reserve - Meßleitung | 9 Leitungen zu den Mikroglühlampen |

Abb. 5: Schnittbild des betriebsbereiten Kryostaten mit eingebauter Ringstrahldüse

montierten Kryostaten mit eingebauter Ringstrahldüse zeigt Abb. 5.

2.4 Kälteanlage

Zur Versorgung des Strahlerzeugungssystemes mit Kälteleistung wurde eine Kälteanlage⁴⁾ installiert, die im Rekondensationsbetrieb bei geschlossenem Kreislauf den vom Kältemittelbad im Kryostaten aufsteigenden Dampf wieder verflüssigt (Abb. 6). Den Kältemittelraum des Kryostaten und die Rekondensationsfläche am Tieftemperatur-Wärmetauscher der Kältemaschine verbindet ein strahlungs- und vakuumisoliertes geneigtes Rohr, das im stationären Betrieb von flüssigem und dampfförmigem Kältemittel entgegengesetzt durchströmt wird. Die von der Kältemaschine erzeugte Kälteleistung wird bei konstanter Temperatur im kondensierten Kältemittel in Form von Verdampfungsenthalpie transportiert. Die Temperatur des Kältemittels im Rekondensationsraum kann durch wahlweise Verwendung von Wasserstoff oder Neon und Variation des Druckes zwischen 0 und 15 atü entsprechend den Dampfdruckkurven³⁾ auf Werte zwischen 20 °K und 40 °K eingestellt werden. In diesem Temperaturintervall liegt die Kälteleistung der Kältemaschine etwa zwischen 70 Watt und 180 Watt. Während der Experimente verbraucht das Strahlerzeugungssystem eine Kälteleistung von ca. 30 Watt. Die Verluste durch Transport des Kältemittels in der Leitung, die mit Kaltventilen und einer Abzweigung zum Anschluß eines weiteren Kryostaten versehen ist, betragen etwa 30 Watt. Überschüssige Kälteleistung wird in der Kältemaschine durch eine über den Druck im Rekondensationsraum geregelte Widerstandsheizung vernichtet.

Abb. 7a zeigt die Kälteanlage, die gesamte Molekularstrahlapparatur und links das Strahlerzeugungssystem, Abb. 7b eine Ansicht der Ringstrahldüse.

4) Die Anlage wurde von Firma Linde AG, Höllriegelskreuth, entworfen und aufgebaut. Als Kälteerzeuger wird eine zweistufige Gaskältemaschine Philips PPH 110 eingesetzt.

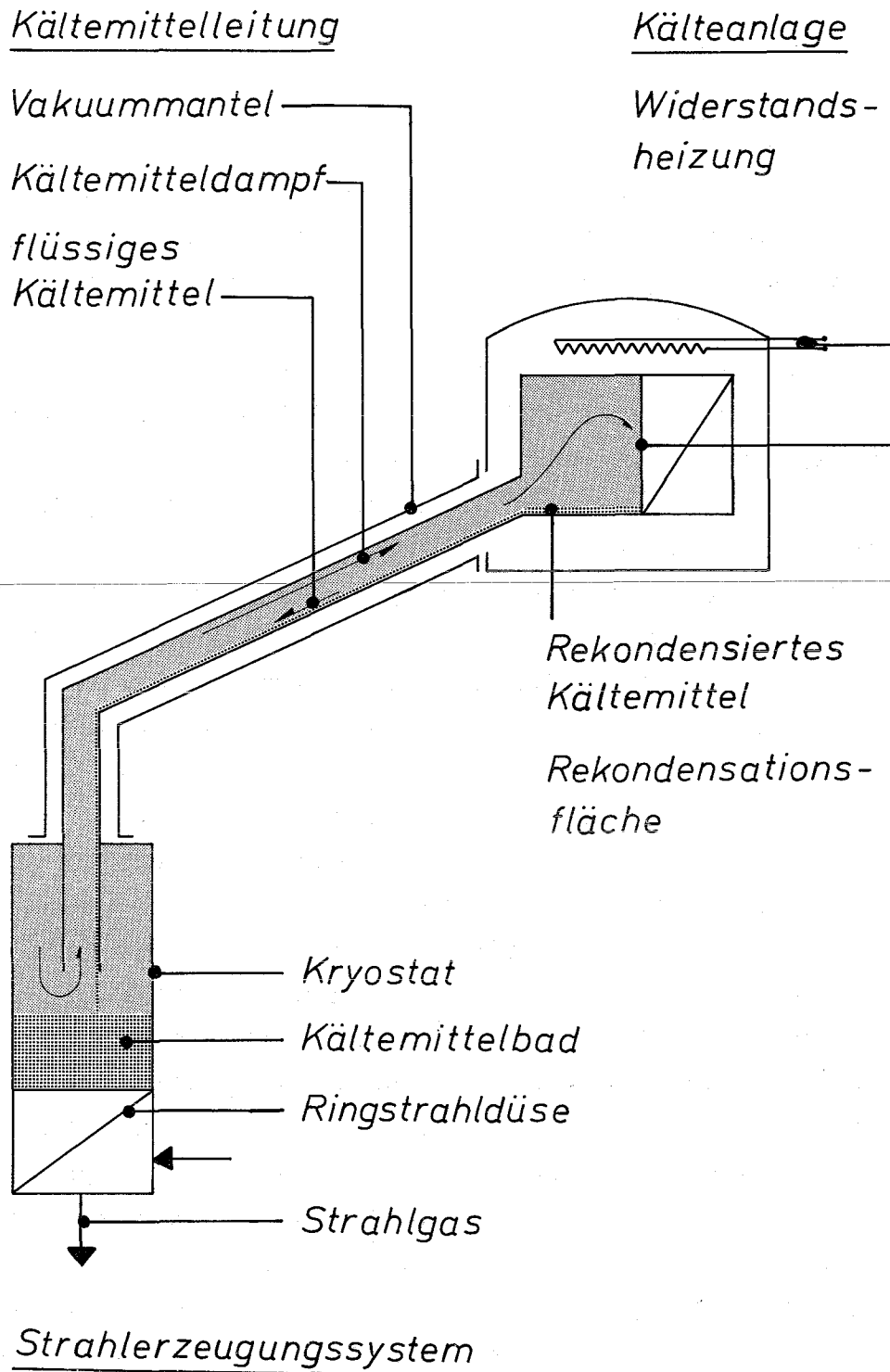
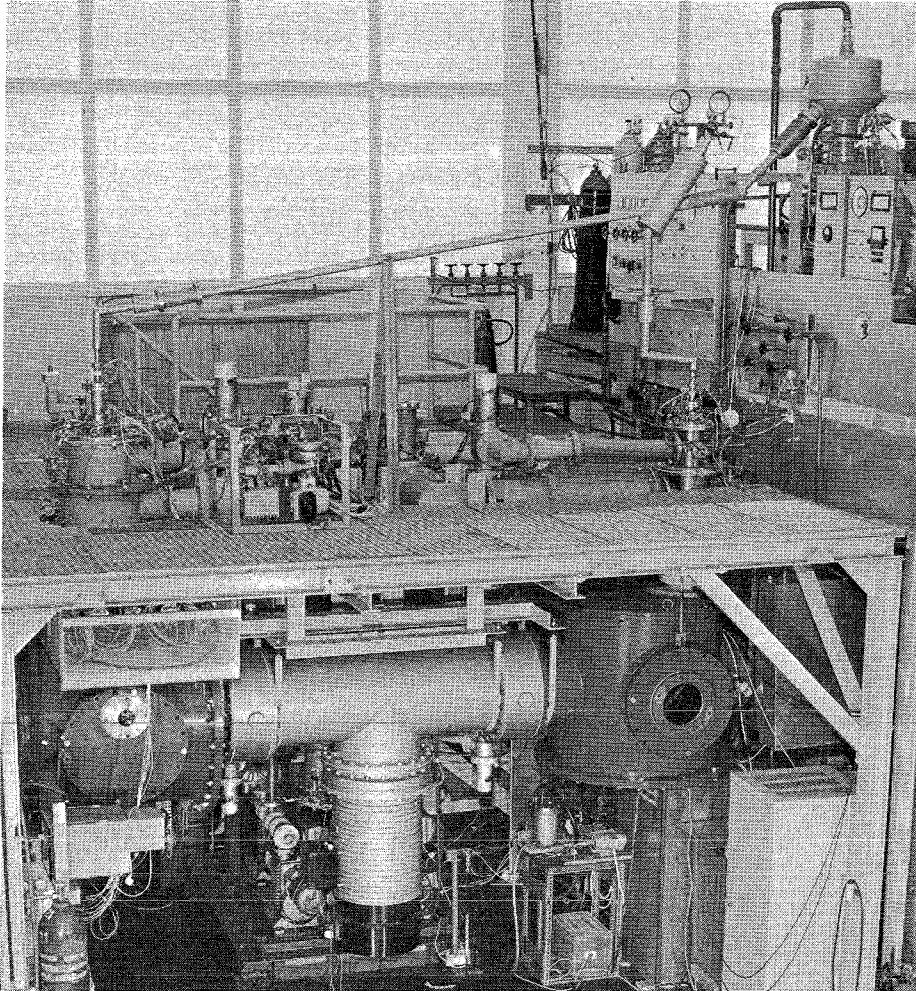


Abb. 6: Schematische Darstellung des Kältemittelkreislaufes in der Anlage.

a)



b)

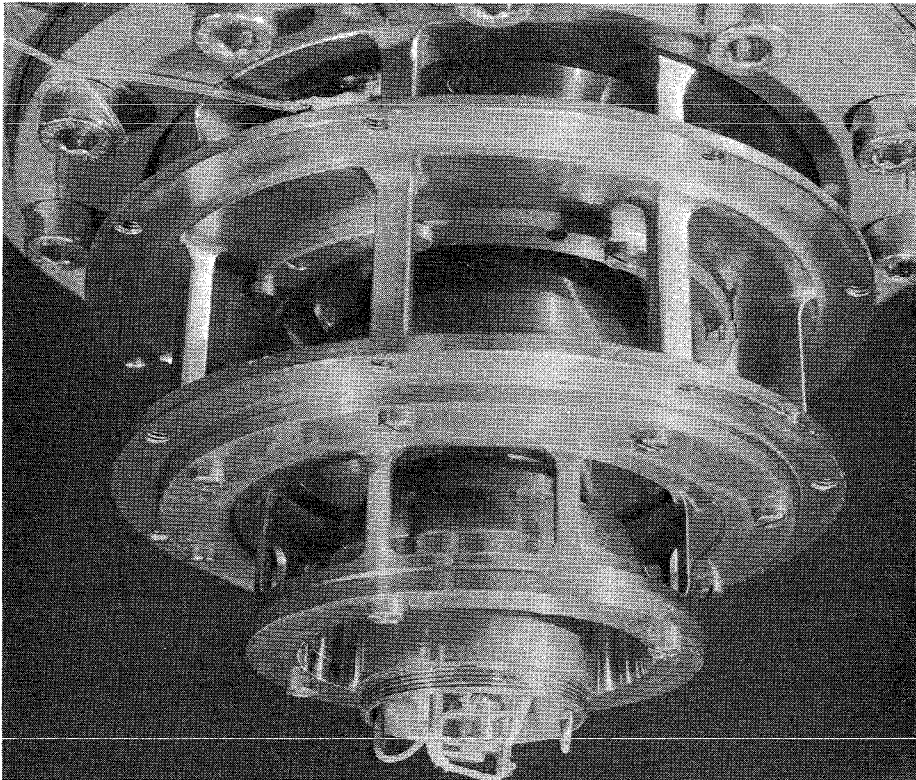


Abb. 7: a) Gesamtansicht der Molekularstrahlapparatur mit Kälteanlage.

b) Ansicht der in den Kryostaten eingebauten Ringstrahldüse.

3. Erprobung der Anordnung

3.1 Dichtigkeit des Ventils

Die Dichtigkeit wird durch das Verhältnis der Teilchenströme angegeben, die bei geöffnetem und geschlossenem Ventil in das Vakuumsystem eintreten. Bei Wasserstofftemperatur wurden nach Einläppen des gehärteten und geschliffenen Ventiltellers und des ungehärteten Ventilsitzes bei einer Schließkraft von 30 kp Dichtigkeiten um 10^4 erreicht. Das Aufsintern einer Teflon-Kunstharzmischung mit einer Schichtdicke von 6/100 mm auf den Ventilsitz verkleinerte die Dichtigkeit und wurde daher nicht weiter verfolgt.

Erfahrungsgemäß wird die Dichtigkeit im Betrieb durch Spuren von Verunreinigungen verschlechtert, die zwischen Ventilteller und -sitz gelangen und die Oberflächenrauigkeit der eingeläppten Dichtlinie vergrößern. Daher wurden vor der Montage von Ringstrahldüse und Kryostat alle Teile sorgfältig gereinigt. Das gepulst in die Düse eintretende Strahlgas wird vor Eintritt in das Gasvorratsvolumen durch eine Sinterbronze-Fritte geleitet, die eine Porenweite zwischen 25, μm und 40, μm besitzt. Ein Drahtgewebe mit einer Maschenweite von 30, μm hält an der Oberseite der Ringstrahldüse Verunreinigungen aus den Zuleitungen und dem Gasvorratsvolumen zurück.

Nennenswerte Änderungen der Dichtigkeit wurden während der Experimente, bei denen das Strahlerzeugungssystem etwa 300 h arbeitete, nicht beobachtet.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Drücke, die vor Impulsbeginn in den Druckstufen und der Vakuumkammer erreicht werden konnten.

Tabelle 1: Drücke im Vakuumsystem unmittelbar vor Impulsbeginn

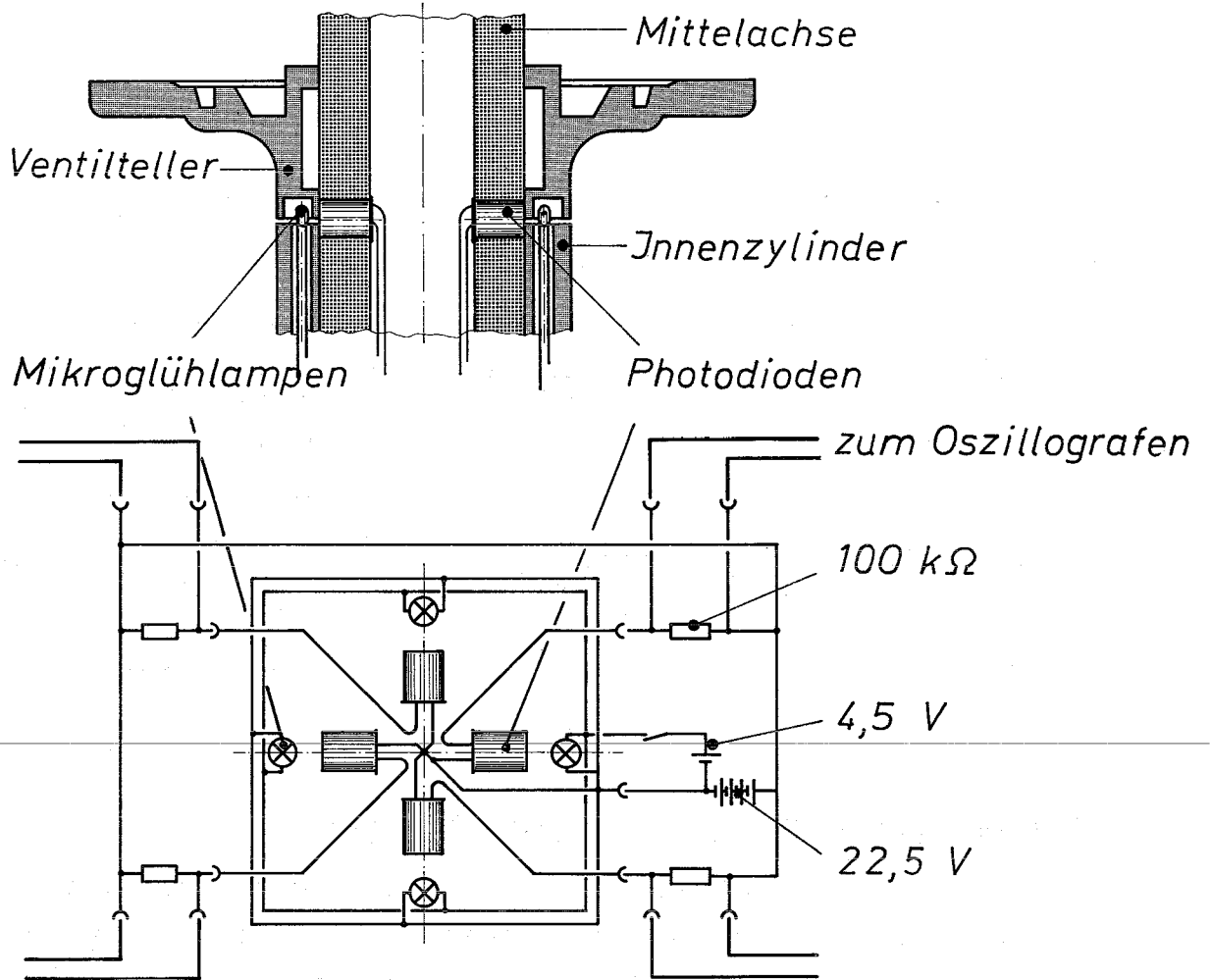
Einlaßdruck p_0 Torr	Druck p_1 der 1. Druckstufe Torr	Druck p_2 der 2. Druckstufe Torr	Druck p_K der Vakuumkammer Torr
350	8×10^{-2}	2×10^{-3}	$1,6 \times 10^{-5}$
700	3×10^{-1}	$1,4 \times 10^{-2}$	$3,6 \times 10^{-5}$

3.2 Zeitlicher Verlauf der Ventilbewegung

Da die Ventilöffnungs- und Schließbewegung den zeitlichen Verlauf der Strahlimpulse bestimmt, müssen die im Kapitel 2.1 genannten Anforderungen an den Strahlaufbau auch an den Bewegungsablauf bei Betätigung des Ventiles gestellt werden. Zur Beobachtung des zeitlichen Verlaufes der Ventilöffnungs- und Schließbewegung sowie der engsten Düsenweite wird an vier Stellen des Azimuts eine photoelektrische Meßanordnung eingesetzt, deren Prinzip aus Abb. 8 hervorgeht. Der Spalt zwischen Ventilteller und Innenzylinder wird von 4 in achsenparallele Bohrungen des Innenzylinders eingeschobenen und in eine Nut des Ventiltellers hineinragenden Mikroglühlampen⁵⁾ ausgeleuchtet. Auf Höhe des Spaltes sind in der Mittelachse vier radiale Bohrungen am Umfang angeordnet, in die je eine Photodiode⁶⁾ eingesetzt ist. Das Licht der Mikroglühlampen fällt durch den Spalt auf die Photodioden, die in Sperrichtung gepolt sind. Der durch die Photodioden fließende Strom ist in guter Näherung proportional zur Spaltweite und erzeugt an einem außerhalb der kalten Zone gelegenen Widerstand einen am Oszillografen

5) Menzel und Brandau, MW 10

6) Siemens, APY 13 III



Oszillogramme der Photodiodensignale:

Düse auf Wasserstoff-
temperatur, 0,02 V/cm

Düse auf Raum-
temperatur, 1 V/cm

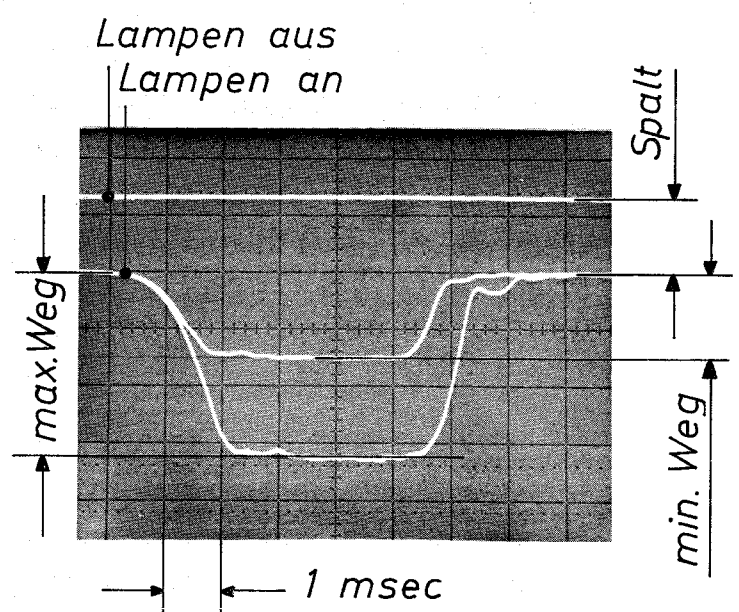
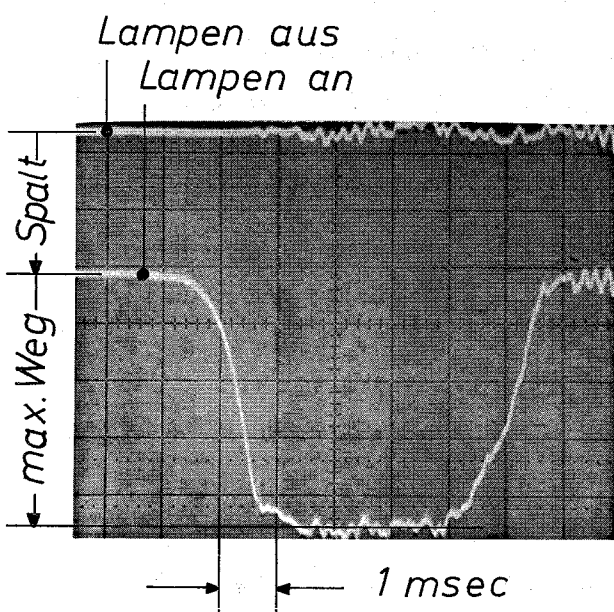


Abb. 8: Photoelektrische Anordnung zur Beobachtung der Ventilbewegung und Oszillogramme der Photodiodensignale. Der einstellbare Weg des Ventiltellers entspricht der engsten Düsenweite und wird über dem Niveau aufgezeichnet, das durch den Spalt zwischen geschlossenem Ventilteller und Innenzylinder festgelegt ist.

beobachteten Spannungsabfall. Die Zeitkonstante dieser Anordnung liegt genügend weit unter den Zeiten für die Ventilbetätigung, so daß eine verzerrungsfreie Abbildung gewährleistet wird.

Um die Abnahme der Beleuchtung infolge Alterung der Mikroglühlampen zu berücksichtigen, wird die Anordnung vor jedem Experiment neu geeicht. Dazu werden nacheinander der maximale und ein um 0.14 mm kleinerer Ventilweg eingestellt und die zugehörigen Diodensignale abgelesen. Wegen des linearen Zusammenhanges zwischen Ventilweg und Signal kann mit den beiden Meßpaaren sofort die gesuchte Eichgerade in ein Diagramm eingetragen werden. Auf diese Weise werden die engsten Düsenweiten auf $\pm 3\%$ genau gemessen. Sie schwanken auf dem Azimut um $\pm 5\%$ bzw. um $\pm 2/100$ mm. Beim Einkühlen auf die Temperatur des flüssigen Wasserstoffs vergrößern sich die Düsenweiten um $4/100$ mm. Der über dem Umfang gemittelte Größtwert der engsten Düsenweite beträgt dann 0,35 mm, der Kleinstwert 0,21 mm. Wie die Auswertung der Diodensignale während des Öffnungsvorganges in Abb. 9 zeigt, unterscheidet sich der Öffnungsbeginn an den vier beobachteten Stellen des Azimuts um maximal 0,2 msec. Als kürzeste Zeiten werden bei Wasserstofftemperatur und maximaler Düsenweite für die Öffnungsbewegung etwa 0,8 msec und für die Schließbewegung ca. 1,0 msec erreicht.

3.3 Zeitlicher Verlauf der Strahlintensität

Der zeitliche Verlauf der Intensität des kondensierten Strahles wird in der Vakuumkammer als Druckanstieg in einer mit einem Auffänger versehenen Ionisations-Manometerröhre gemessen. Der Auffänger hatte bei allen im folgenden genannten Experimenten eine Bohrung von 1 mm Durchmesser. Über den Zusammenhang zwischen Druck und Teilchendichte kann bei bekanntem Röhrenvolumen die Intensität aus dem Differentialquotient des Ionenstromsignales als Mole-

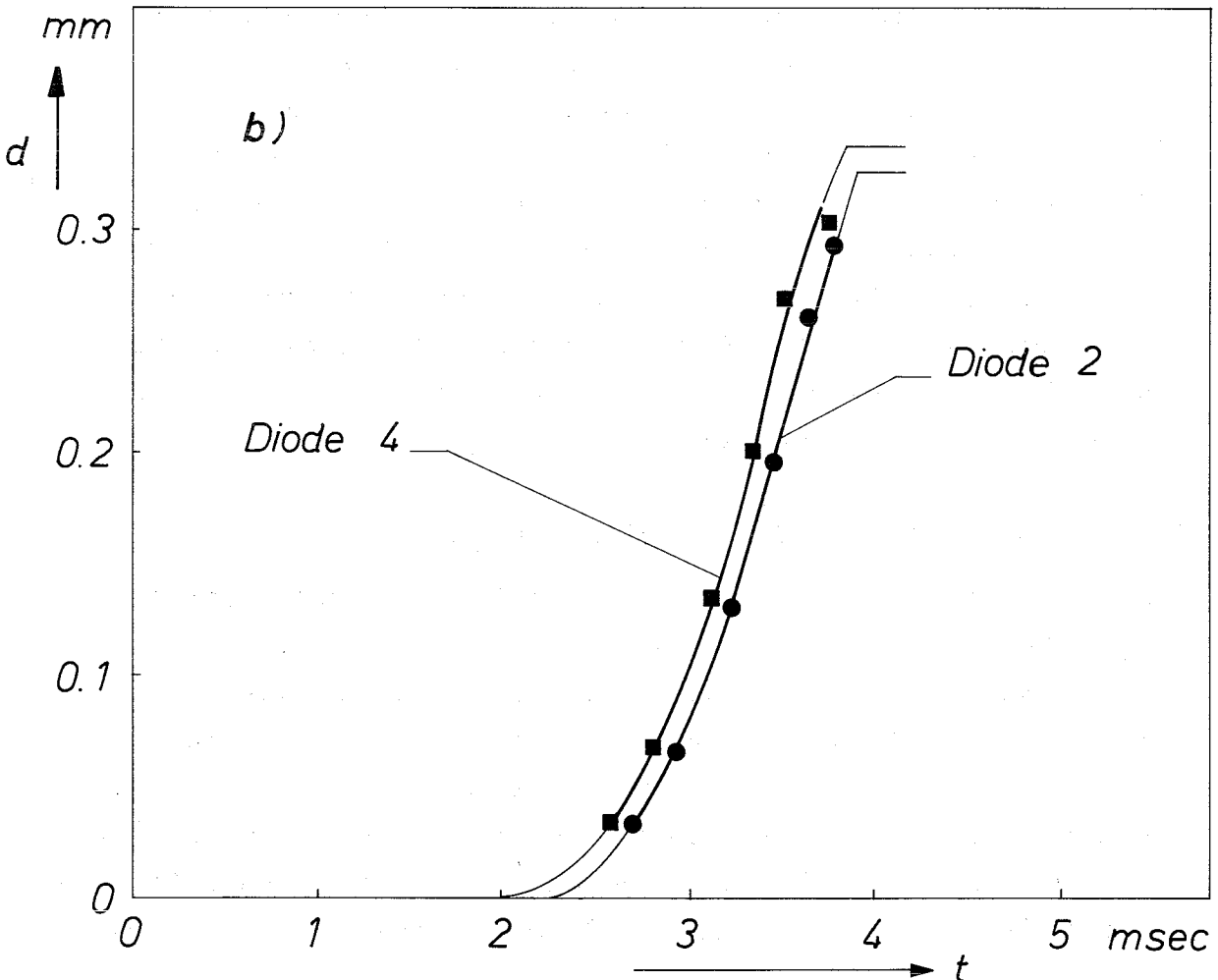
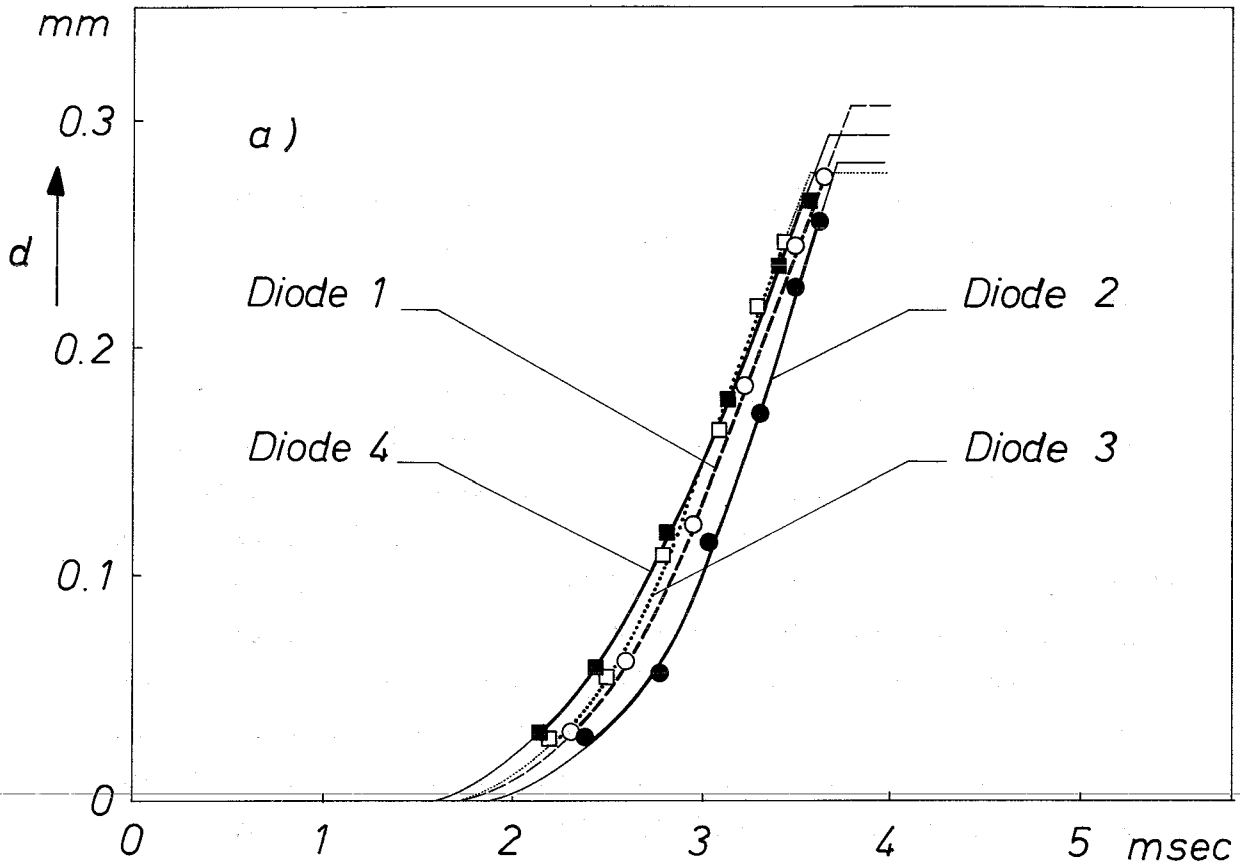


Abb. 9: Zeitlicher Verlauf der engsten Düsenweiten d an 4 bzw. 2 Stellen des Azimuts während der Öffnungsbewegung a) bei Raum- und b) bei Wasserstofftemperatur. Zur Zeit $t = 0$ wird der Ringmagnet eingeschaltet.

külstromdichte angegeben werden. Die Ventilbewegung und den Verlauf des Ionenstromsignales gibt Abb. 10a wieder. Während des Öffnungsimpulses steigt nach etwa 0,2 msec der Ionenstrom nahezu linear an, d.h. die Intensität hat einen stationären Wert erreicht. Bei einer Strahlgeschwindigkeit von 400 m/sec und einem Auffängerabstand von 130 mm zur engsten Düsenweite erwartet man eine Laufzeit und damit eine Differenz der Signalanfänge von 0,3 msec. Stattdessen wird bei allen Experimenten ein Zeitunterschied von etwa 1 msec gemessen. Die während der ersten 0,7 msec durch die Düse fließende Gasmenge kühlt möglicherweise die Umlenk wand ab und tritt unkon densiert in die Druckstufen ein. Das Einsetzen der Ven tilschließbewegung, die den Abbau des stationären Strah les einleitet, läßt sich 0,3 msec später an der Verklei nerung des Anstieges des Ionenstromsignales bzw. der Ab nahme der Intensität feststellen. Den Einfluß der Ventil öffnungsgeschwindigkeit zeigt Abb. 10b. Während die sta tionäre Intensität als Anstieg des Ionenstromsignales im linearen Teil in den drei Fällen gleich ist, verkürzt sich die Zeit, in der die Intensität von Null bis auf den Endwert zunimmt, mit wachsender Öffnungsgeschwindig keit von 0,4 msec auf ca. 0,1 msec. Aus Abb. 10c geht hervor, daß die Pulsdauer bis auf 1 msec verkleinert wer den kann, ohne daß sich dabei die Intensität des Strahles ändert.

Die Zeitpunkte für den Beginn des Ionenstromsignales weichen auf dem Umfang um maximal 0,2 msec von einander ab und können mit den in Abb. 9 dargestellten Zeitpunkten für den Ventilöffnungsbeginn korreliert werden, die sich auf dem Azimut ebenfalls um 0,2 msec unterscheiden.

3.4 Räumlicher Verlauf der Strahlintensität

Ein in 130 mm Entfernung von der engsten Düsenweite gemessenes radiales Intensitätsprofil zeigt Abb. 11a. Der kondensierte Strahl wird dabei nur vom Abschäler und dem 1. Kollimator beschnitten und besitzt die Form eines Doppel-

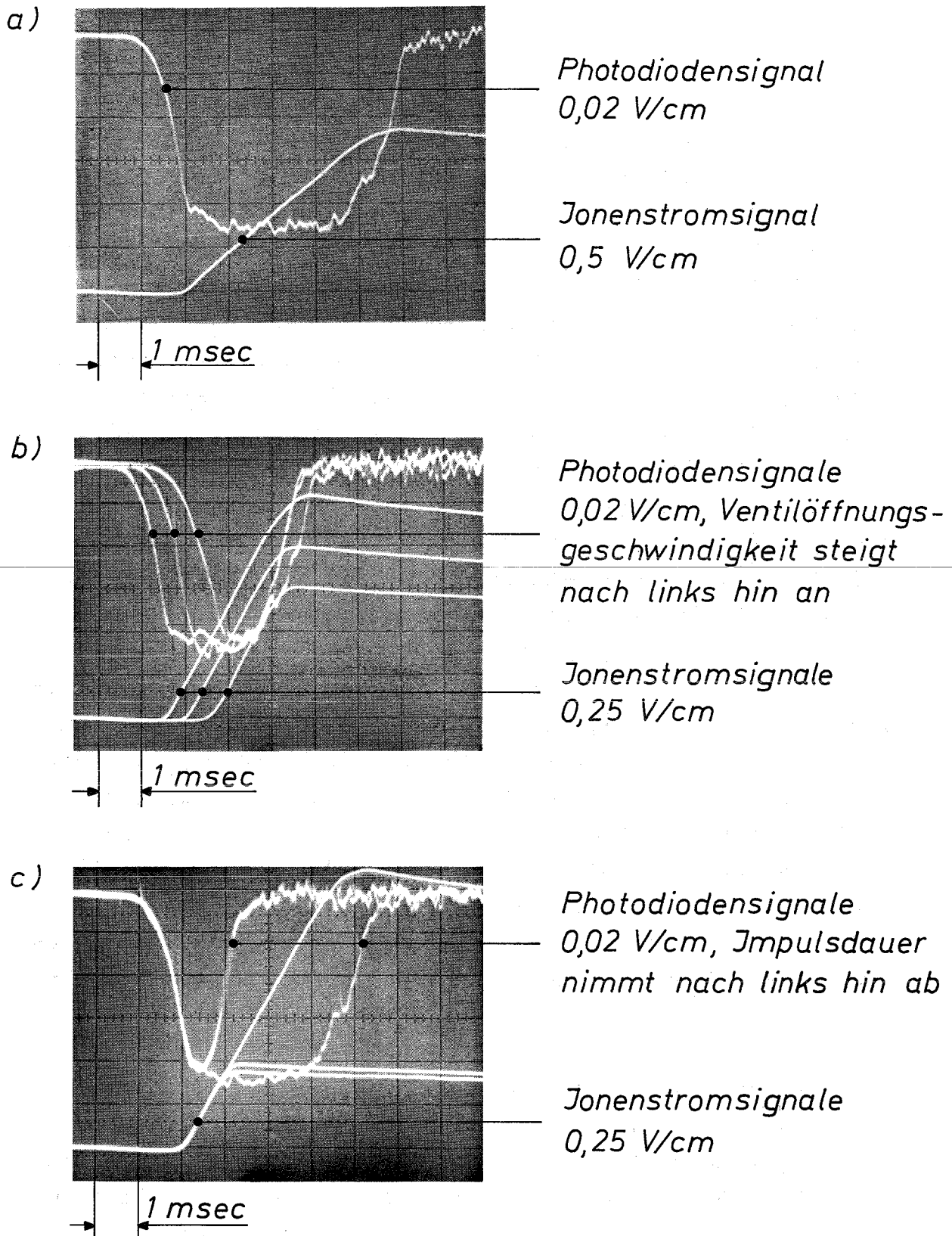


Abb. 10: Oszillografierter Verlauf der Photodioden- und der Ionenstromsignale, Auffänger 130 mm vom engsten Querschnitt der Düse entfernt.

- a) Zusammenhang zwischen Ionenstrom- und Photodiodensignal.
- b) Einfluß der Öffnungsgeschwindigkeit auf die Zeit innerhalb der stationäre Strahlintensität (konstanter Anstieg des Ionenstroms) erreicht wird.
- c) Einfluß der Verkürzung des Strahlimpulses auf etwa 1 msec.

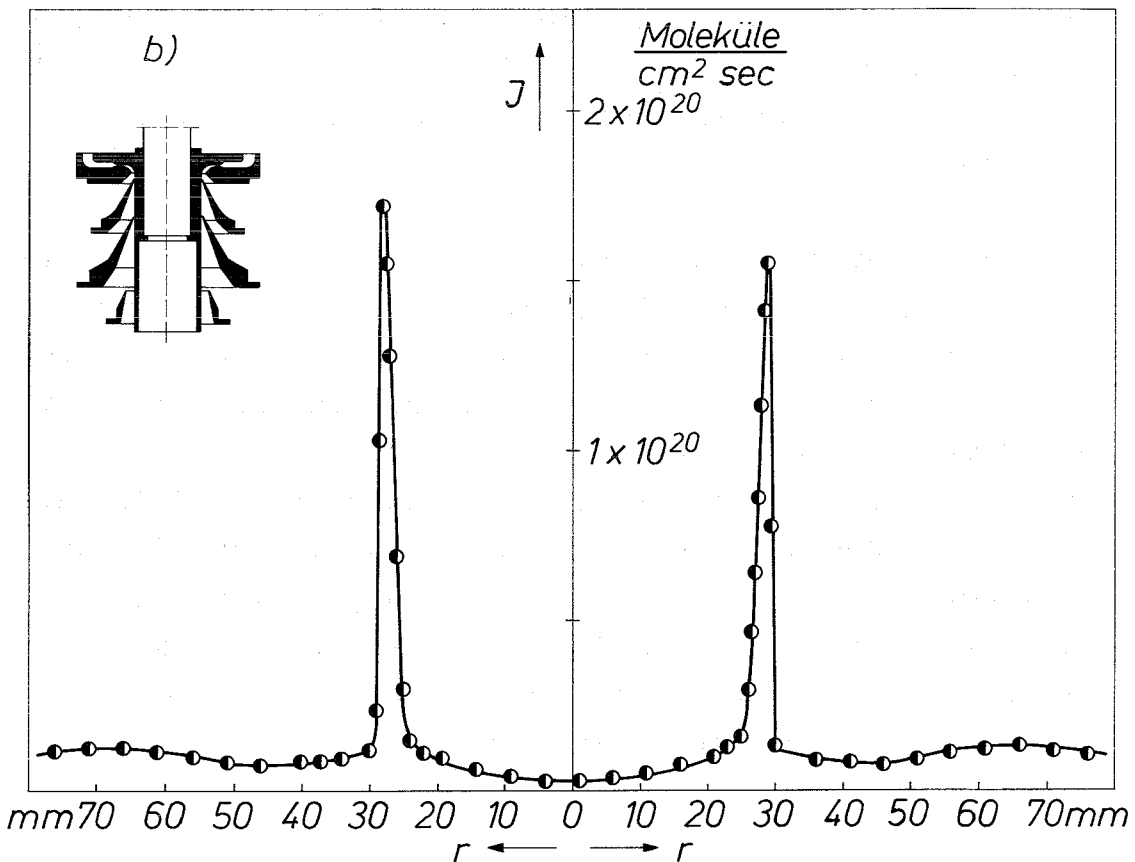
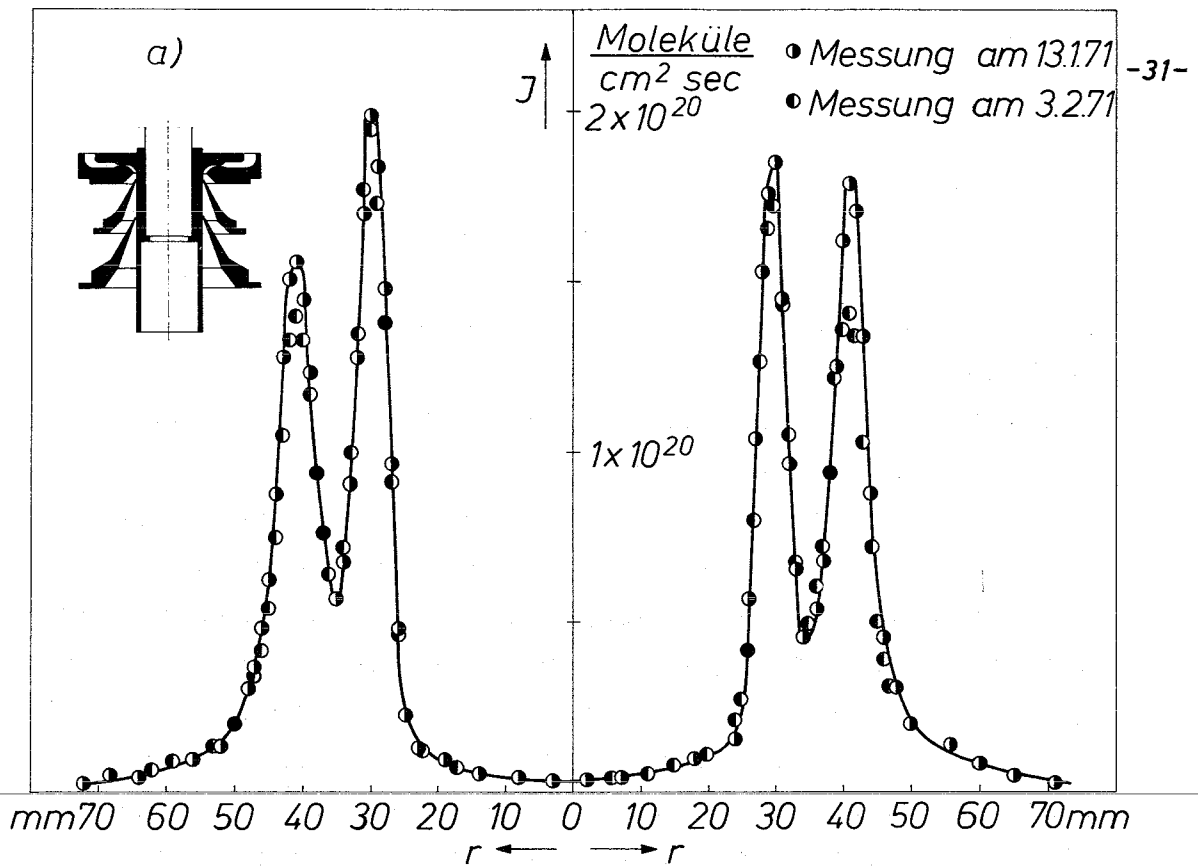


Abb. 11: Radiale Profile der Intensität J kondensierter Wasserstoffmolekularstrahlen. Radius r wird von der Symmetrieachse aus gezählt. Einlaßdruck $p_0 = 350$ Torr; Düse auf Wasserstofftemperatur; engste Düsenweite 0,33 mm; Auffängerentfernung zum engsten Querschnitt 130 mm; a) ohne und b) mit 2. Kollimator.

strahles. Aus dieser Materiekonfiguration kann mit dem 2. Kollimator ein Einfachstrahl ausgeblendet werden, wie es in Abb. 11b angegeben wird. Die Intensitäten im Maximum und auf der Zylinderachse bleiben praktisch konstant.

Aus Abb. 12 erkennt man, wie sich die Form des Doppelstrahles verändert, wenn man ohne den 2. Kollimator die Neigung der Innenflanke sowie die Führungslänge des 1. Kollimators verändert. Durch Verkleinerung des Winkels zwischen der Innenseite des 1. Kollimators und dem Innenzylinder wird die Auflösung des kondensierten Hohlstrahles in einen Doppelstrahl verkleinert, Abb. 12a. Wird dann noch der 1. Kollimator bis zur Unterkante des Innenzylinders verlängert, so wird ein einfacher Hohlstrahl erzeugt, Abb. 12b. In beiden Fällen steigen die Intensitäten im Strahlmaximum um den Faktor 1,5 und auf der Zylinderachse auf das dreifache an.

Die Schwankung der Intensität auf dem Azimut beträgt weniger als $\pm 10\%$.

Aus den in verschiedenen Entfernungen gemessenen Strahlbreiten läßt sich der Strahlverlauf bestimmen. Durch Extrapolation des in guter Näherung geradlinigen Verlaufes auf die Strahlbreite Null wird der scheinbare Quellpunkt des Strahles ermittelt.

In Abb. 13 ist die maximale Strahlintensität J über dem reziproken Abstand R vom scheinbaren Quellpunkt für die Einlaßdrücke $p_0 = 350$ und 700 Torr aufgetragen. Der lineare Verlauf zeigt, daß die Intensität mit $1/R$ abnimmt. Der scheinbare Quellpunkt liegt bei höherem Einlaßdruck 14 mm weiter strahlaufwärts.

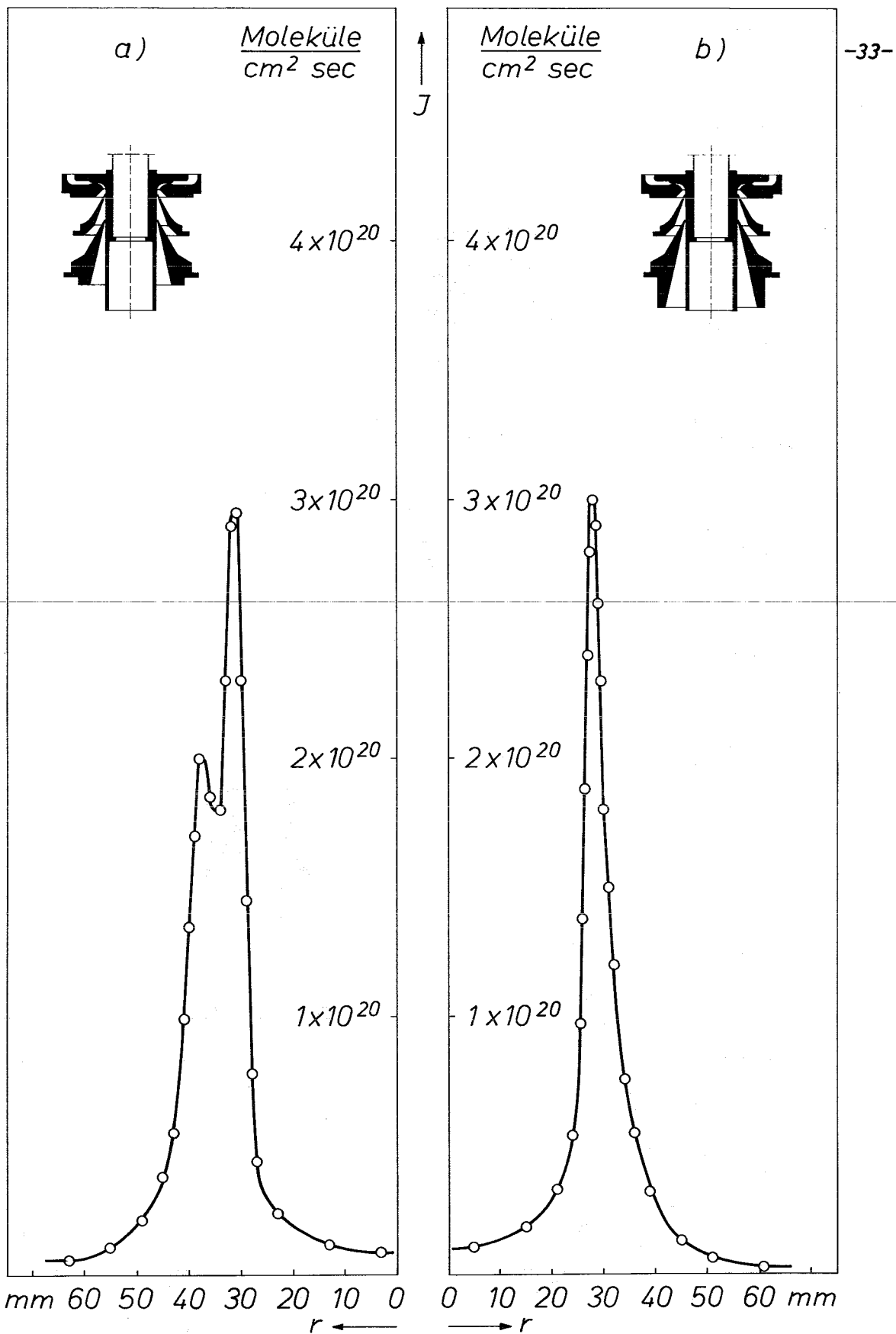


Abb. 12: Radiale Halbprofile der Strahlintensität J bei verschiedenen Formen des 1. Kollimators, Versuchsparameter wie in Abb. 11.

- a) Kollimatorinnenkegel hat gegenüber dem in Abb. 11a angegebenen einen kleineren Öffnungswinkel.
- b) Kollimatorinnenkegel ist bis zum Ende des Innenzylinders verlängert.

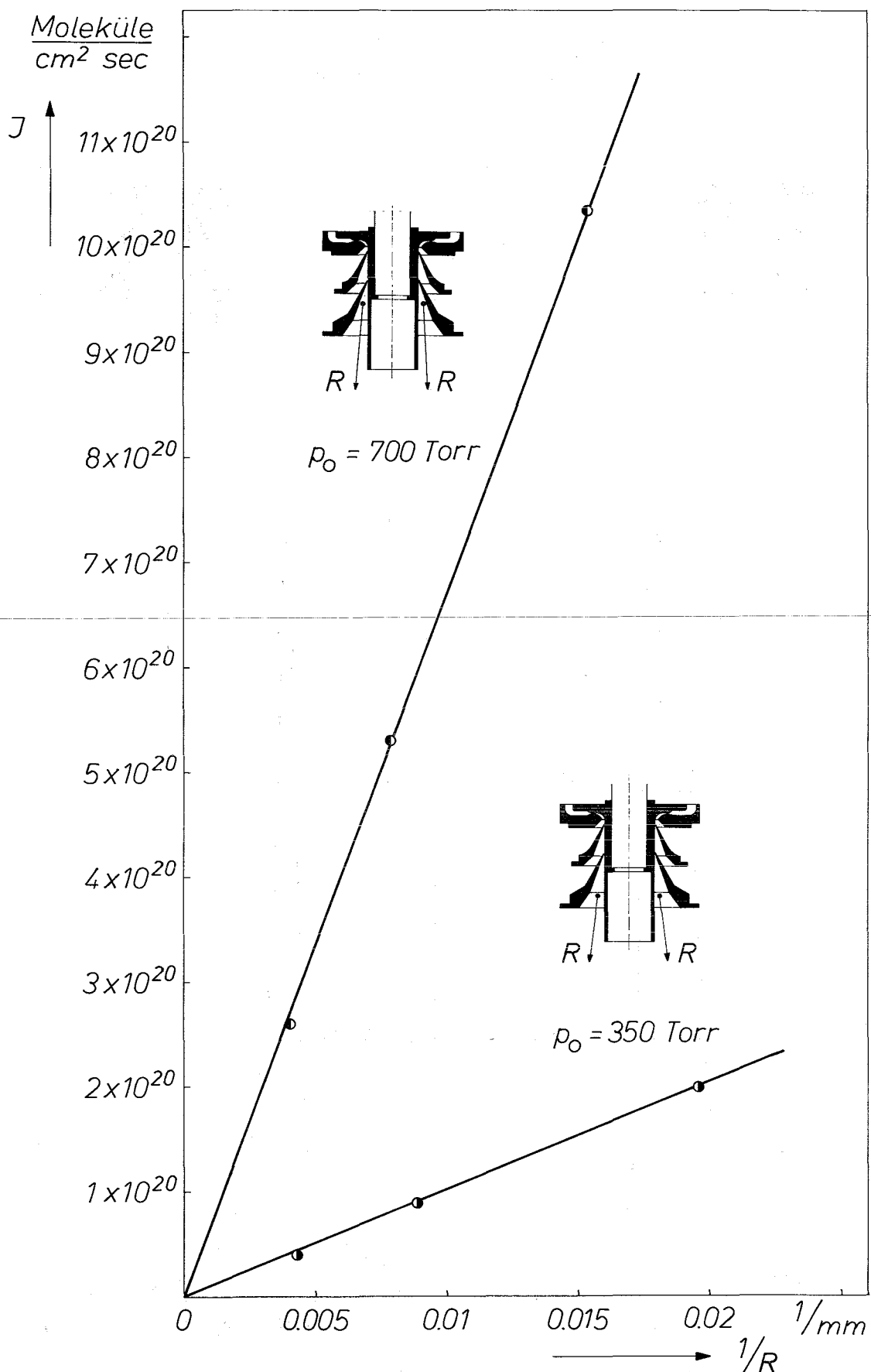


Abb. 13: Abhängigkeit der maximalen Intensität J vom reziproken Abstand R zum scheinbaren Quellpunkt der Strömung bei den Einlaßdrücken $p_0 = 350$ und 700 Torr. Alle anderen Versuchsparameter wie in Abb. 11.

4. Diskussion der Ergebnisse

Dividiert man die in 130 mm Abstand vom engsten Querschnitt der Düse gemessene maximale Teilchenstromdichte von $3 \cdot 10^{20}$ H₂ Molekülen/cm² sec durch die bei früheren Untersuchungen an kondensierten Wasserstoffstrahlen gemessene Strahlgeschwindigkeit von etwa 400 m/sec, so ergibt sich eine Dichte in der Größenordnung von $1 \cdot 10^{16}$ H₂ Molekülen/cm³. Bei dieser Teilchendichte konnten in kondensierten Wasserstoff-Vollstrahlen reproduzierbare elektrische Entladungen gezündet werden⁷⁾.

Die ausgeprägte Doppelstruktur des Hohlstrahls bei Verwendung von Kollimatoren mit großem Öffnungswinkel dürfte auf der Existenz zweier deutlich verschiedener Clustergrößen-Fractionen beruhen, die durch die Radialkomponente der Bewegung des unkondensierten Restgases räumlich aufgetrennt werden⁸⁾. Für diese Erklärung spricht die Tatsache, daß die räumliche Auftrennung bei Verminderung der Radialkomponente der Restgasströmung durch Verwendung engerer und längerer Kollimatoren verschwindet, und daß der scheinbare Quellpunkt des kondensierten Hohlstrahls stromabwärts von der Kollimatoröffnung liegt (Abb. 13). Da bei einer elektrischen Entladung längs kondensierter Molekularstrahlen die Anfangsleitfähigkeit des erzeugten Plasmas merklich von der mittleren Clustergröße abhängen dürfte⁹⁾, sollte sich das Zündverhalten des Hohlstrahls deutlich mit der Länge und dem inneren Öffnungswinkel der hohlkegelförmigen Kollimatorblende ändern.

7) E.W. Becker, R. Klingelhöfer, Z. f. Naturforschg. 19a, 813 (1964)

8) K. Körting, Untersuchung der Massenverteilung in kondensierten Molekularstrahlen nach einem Ziehfeld-Laufzeit-Verfahren; Dissertation Universität Karlsruhe, 1971

9) J. Wüst, Verteilung des Stromes in dynamischen z-pinch-Entladungen längs hohlzylinderförmiger kondensierter Stickstoff-Molekularstrahlen; Dissertation Universität Karlsruhe, 1971.

Das Innere des Hohlstrahles enthält nur etwa 1 % der im Zylindermantel konzentrierten Materiemenge. Ein elektromagnetischer Kollaps ("pinch") des in Plasma verwandelten Hohlstrahles würde also weitgehend gegendruckfrei erfolgen, was für die Erzeugung intensiver Neutronenblitze²⁾ von großem Vorteil wäre.

Dieser Arbeit zugrunde liegendes Material ist außer an den in Fußnoten angegebenen Stellen in den folgenden unveröffentlichten internen Berichten niedergelegt:

Dimensionierung und Konstruktion einer Ringstrahldüse für Impulsbetrieb und Erzeugung eines kondensierten Stickstoff-Ringstrahles mit einem 80 % H₂-20 % N₂-Gemisch (1966)

Reines Kupfer als Werkstoff für Bauteile in Tieftemperaturapparaturen (1969)

Entwicklung, Bau und Erprobung einer ringförmigen Lavalldüse mit einstellbarer engster Düsenweite zur Erzeugung gepulster, kondensierter Wasserstoffmolekularstrahlen von 40 mm Innendurchmesser (1970)

Entwicklung, Bau und Erprobung eines Druckkryostaten zur Aufnahme einer Ringstrahldüse zur Erzeugung gepulster kondensierter Wasserstoffmolekularstrahlen mit 40 mm Innendurchmesser (1971)

Ergebnisse der Experimente zur Erzeugung kondensierter Wasserstoffmolekularstrahlen in Hohlzylinderform bei Variation von Strahlgasdruck, Düsen- und Kollimator-Geometrie, Gemischzusammensetzung und Systemtemperatur (1971)

Übernahme und Betrieb eines Neon-Wasserstoff-Rekondensationssystems mit einem Philips-Cryogenerator PPH 110 zur Kühlung der beiden Kryostaten der Zweikammer-Molekularstrahlanlage MSA V/VI (1970)

...the ... of ...

...the ... of ...

...the ... of ...

...the ... of ...

...the ... of ...

...the ... of ...

...the ... of ...