

Ein Membran-Stosswellenrohr
für Plasmaexperimente

A Diaphragm Shock Tube
for Plasma Experiments

H. Muntenbruch, H. Nett

IPP 3/99

Juli 1969

I N S T I T U T F Ü R P L A S M A P H Y S I K
G A R C H I N G B E I M Ü N C H E N

INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Ein Membran-Stosswellenrohr
für Plasmaexperimente

A Diaphragm Shock Tube
for Plasma Experiments

H. Muntenbruch, H. Nett

IPP 3/99

Juli 1969

Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem Institut für Plasmaphysik GmbH und der Europäischen Atomgemeinschaft über die Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.

Abstract

This report describes an improved version of a diaphragm shock tube first built at the Institut für Plasmaphysik in 1963/64. The original shock tube was transferred at the beginning of 1965 to a new laboratory and then underwent major technical improvements. The basic principle and technical solutions adopted have been completely successful. Even now (1969) they can still be regarded as optimum and "modern". This provides justification for outlining here the solutions to the technical problems entailed in constructing the shock tube, now that more than 3000 shots have been fired with the tube.

First the preliminary considerations underlying the dimensioning of the tube are briefly sketched and then its mechanical construction is described. This involves problems relating to the high-pressure, low-pressure, and buffer sections. The diaphragm problem and the associated triggering problem are also dealt with.

Later the gas supply and vacuum systems are described, these having a major influence on the experimental utilization of the tube. The question of operational safety is also touched on.

Finally, the installation and operation of the tube are reported, a "routine" shot being documented in table form.

Various special technical problems are treated in detail in the appendices.

	Seite
<u>I. Einleitung</u>	1
<u>II. Dimensionierung des Stossrohres (Allgemeine Vorüberlegungen)</u>	2
1. Prinzip des Membranrohres	2
2. Bedingungen für die Plasmaerzeugung (Verhältnis der Drücke in Hoch- und Niederdruckteil)	4
3. Rohrdurchmesser und Rohrwahl	8
4. Längen von Nieder- und Hochdruckteil	8
<u>III. Mechanischer Aufbau des Stosswellenrohres</u>	11
1. Der Hochdruckteil	13
2. Der Niederdruckteil	17
3. Der Pufferkessel	22
4. Membranen und Membranzonen	25
5. Teleskopverbindungen	28
6. Membran zwischen Laufrohr und Pufferkessel und ihre Halterung	30
<u>IV. Gasversorgung und Vakuumsystem</u>	34
1. Vakuumsystem und Gasversorgung des Hochdruckteils und des Zwischenmembranbereiches	37
2. Vakuumsystem des Niederdruckteils und seine Versorgung mit Arbeitsgas	39
3. Vakuumsystem des Pufferkessels und seine Versorgung mit Schutzgas	41
<u>V. Sicherheitssystem</u>	42
<u>VI. Montage und Betrieb der Membranrohranlage</u>	44
1. Allgemeiner Aufbau	44
2. Montage und Justierung der Anlage	45
3. Inbetriebnahme der Anlage und Routinebetrieb	46
<u>VII. Schlussbemerkungen und Danksagungen</u>	53
<u>Literaturzusammenstellung</u>	54

Anhang

- | | |
|---|----|
| 1. Prägevorrichtung für Membranen | 55 |
| 2. Hochdruck-Hochvakuumventil | 58 |
| 3. Schnellauslassventil für hochkomprimierte Gase | 58 |

I. Einleitung

Der vorliegende Bericht beschreibt die Konstruktion und den Aufbau eines Membranstosswellenrohres, das im Institut für Plasmaphysik betrieben wird. Mit diesem Stosswellenrohr sollten verschiedene Probleme der Plasmaphysik (Relaxationserscheinungen, Ionisationsvorgänge usw.), besonders aber Probleme der Magnetohydrodynamik untersucht werden.

Das Verhalten strömender Plasmen in Magnetfeldern weicht nämlich von dem auf der Basis einfacher Theorien vorhergesagten merklich ab, und die Weiterführung der Theorien setzt zusätzliche experimentelle Ergebnisse voraus. Da sich hinter starken Stosswellen Plasmen genügenden Ionisationsgrades bilden, können Stossrohre zu solchen Experimenten benutzt werden.

Die Wechselwirkung zwischen strömenden Stosswellen-Plasmen und Magnetfeldern beeinflusst auch die Stossfronten selbst, und die Reflexion, die Geschwindigkeitsänderung von Stossfronten im Magnetfeld und andere Effekte sollten ebenfalls Gegenstand der Untersuchungen sein.

Zur Erzeugung ausreichend starker Stosswellen können verschiedene Antriebsmechanismen benutzt werden: Durch elektrische Stossentladungen können zwar in geeigneten Anordnungen (z.B. T-Rohren, Lauffunkenstrecken u.v.a.) besonders schnelle Stosswellen erzeugt werden, diese sind aber aufgrund der nur kurz wirkenden Antriebskraft instationär und deshalb zum Studium der oben genannten Wechselwirkungen wenig geeignet. Dagegen sind die Stosswellen, die in sogenannten Membranstosswellenrohren erzeugt werden, in guter Näherung stationär und eindimensional (eben). Ein weiterer Vorteil der Membranrohranlagen besteht darin, dass in ihnen ziemlich homogene Plasmen erzeugt werden, deren Parameter einerseits reproduzierbar sind, andererseits aber auch leicht in einem weiten Bereich variiert werden können. Ausserdem ist das in solchen "mechanischen" Stossrohren erzeugte Plasma - im Gegensatz zu dem in "elektrischen" Rohren produzierten - frei von elektrischen Ringströmen und eingeschlossenen Magnetfeldern. Allerdings sind Geschwindigkeit und Temperatur (und damit Ionisationsgrad) der in Membranrohren erzeugten Plasmen beschränkt. Abschätzungen zeigten jedoch, dass bei geeigneter Gaswahl ein Membranstosswellenrohr die gestellten Bedingungen am besten erfüllen würde, wenn sich die technischen Schwierigkeiten bewältigen liessen.

Die Lösung der technischen Probleme erfolgte in enger Zusammenarbeit mit der Gruppe Konstruktion der Abteilung Technik, der schon hier für ihre Hilfe bei der relativ schnellen Lösung der technischen Aufgaben gedankt werden soll.

II. Dimensionierung des Stossrohres (Allgemeine Vorüberlegungen)

1. Prinzip des Membranrohres

Ein Membranrohr besteht im Wesentlichen aus einem Rohr, das durch eine Trennwand (Membran) senkrecht zur Rohrachse in zwei Kammern geteilt ist. Die eine Kammer wird mit einem Gas genügend hohen Druckes (p_4) gefüllt. Der Druck (p_0) in der anderen Kammer ist dagegen vergleichsweise klein. Platzt die Membran, so läuft eine Verdünnungswelle in den "Hochdruckteil" (auch "Treibrohr" genannt) hinein. Über diese Verdünnungswelle hinweg wird der Druck abgesenkt und das Gas in den "Niederdruckteil" (das "Laufrohr") hinein beschleunigt. Es wirkt dabei wie ein Kolben und schiebt das Gas aus dem Niederdruckteil vor sich her. Im Gas des Niederdruckteiles läuft so eine Kompressionswelle, die sich zu einer Stosswelle aufsteilt, wenn die ursprüngliche Druckdifferenz gross genug war. Die Trennfläche zwischen den aus den beiden Kammern stammenden Gasen stellt ebenso wie die "Stossfront" eine Unstetigkeitsfläche dar und wird "Kontaktdiskontinuität" genannt.

Da der Antrieb der Strömung in dieser Anordnung für einige Zeit praktisch konstant bleibt, sind Stossfront und Kontaktfront quasistationär. Zwischen ihnen befindet sich ein nahezu homogenes Gebiet adiabatisch komprimierten und aufgeheizten Gases, das Plasma.

In Abb. 1 ist ein Weg-Zeit-Diagramm des Strömungsablaufes nach Platzen der Membran dargestellt. Die Druckverteilungen vor und nach dem Platzen der Membran sind ebenfalls angegeben.

- Abb. 1: Weg-Zeit-Verlauf (x-t-Diagramm)
der Strömung im Membranstosswellenrohr
- (A1) Bereiche vor Platzen der Membran
 - (A2) Druckverteilung " " " "
 - (B) x-t-Diagramm (Lebenslinien der Strömung)
 - (0) Ruhendes Gas vor der Stossfront
 - (1) Komprimiertes Gas zwischen Stoss- und Kontaktfront
 - (2) Homogener Bereich des expandierten Gases
 - (3) Verdünnungswelle im expandierenden Gas
(zwischen "Fuss" und "Kopf" der Verdünnungswelle)
 - (4) Ruhendes Gas im Hochdruckteil vor dem Kopf der Verdünnungswelle
 - (C1) Bereiche nach Platzen der Membran
 - (C2) Druckverteilung " " " "
 - (C3) Dichteverteilung " " " "
 - (C4) Temperaturverteilung " " " "

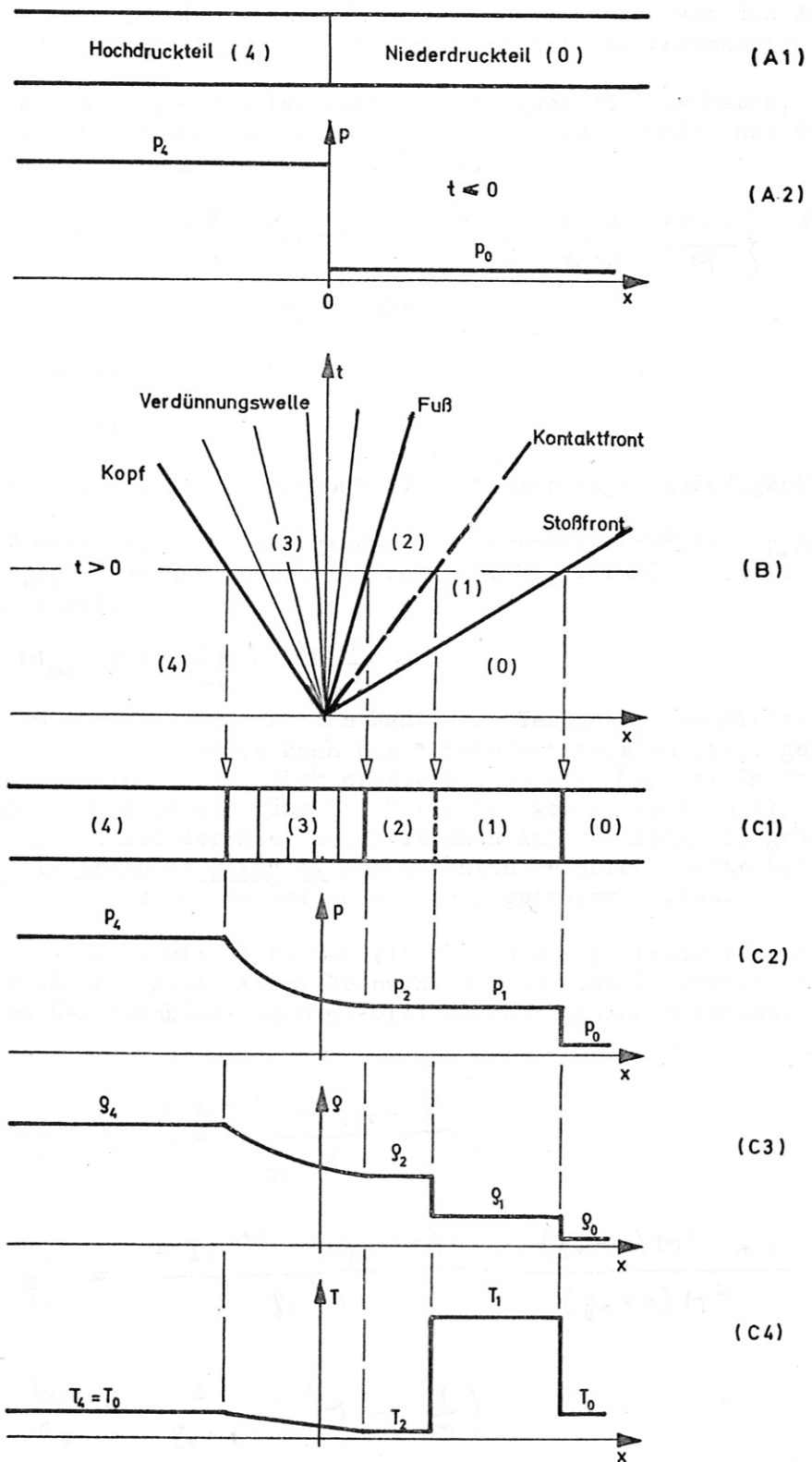


Abb. 1

2. Bedingungen für die Plasmaerzeugung
(Verhältnis der Drucke in Hoch- und Niederdruckteil)

Geschwindigkeit und Stärke der entstehenden Stosswelle und damit auch die über die Stossfront hinweg erfolgende Zustandsänderung im Gas hängen von den Ausgangsdrücken in Treib- und Laufrohr (p_4 und p_0) sowie der Art der verwendeten Gase ab.

Für Stossrohre, in denen Treib- und Laufrohr gleiche Querschnitte haben, gilt näherungsweise folgender Zusammenhang zwischen den Anfangszuständen und der Machzahl der entstehenden Stosswelle (siehe z.B. [1, 2, 3]):

$$(1) \quad \frac{p_4}{p_0} = \left\{ 1 + \frac{2\gamma_0}{\gamma_0+1} \cdot (M^2-1) \right\} \cdot \left\{ 1 - \frac{c_0}{c_4} \cdot \frac{\gamma_4-1}{\gamma_0+1} \cdot \frac{M^2-1}{M} \right\}^{-\frac{2\gamma_4}{\gamma_4-1}}$$

mit $\gamma_i = c_{pi}/c_{vi}$ = Verhältnisse der spez. Wärmen

c_i = Schallgeschwindigkeiten

p_i = Drucke

$M = V/c_0$ = Machzahl der Stossfront (V = Stossfrontgeschwindigkeit) .

Die Stossmachzahl M nimmt also mit steigendem Ausgangsdruckverhältnis p_4/p_0 zu, erreicht aber für $p_4/p_0 \rightarrow \infty$ den endlichen Grenzwert M_∞ . Dafür gilt im Allgemeinen mit genügender Genauigkeit

$$(2) \quad M_\infty \approx \frac{c_4}{c_0} \cdot \frac{\gamma_0+1}{\gamma_4-1}$$

Im Allgemeinen bestimmt das Experiment die Wahl des "Testgases" im Niederdruckteil (und damit auch γ_0 und c_0). Dagegen kann das "Treibgas" meistens frei gewählt werden. Die grössten Machzahlen lassen sich erreichen, wenn $c_4/(\gamma_4-1)$ am grössten ist. Dafür erweisen sich H_2 und He als günstig. Vor allem wegen des wesentlich geringeren Preises wurde für den Betrieb der hier beschriebenen Anlage trotz der grösseren Gefahren Wasserstoff als Treibgas gewählt. Den erhöhten Gefahren musste bei der Konstruktion und dem Bau der Anlage natürlich Rechnung getragen werden.

Nach Abschätzen der Machzahl mit Hilfe von (1) können die Zustandsgrössen im stosswellengeheizten Gas näherungsweise (bei Vernachlässigung von Dissoziation und Ionisation) aus dem System der "Rankine-Hugoniot-Gleichungen" gewonnen werden:

$$(3) \quad \frac{p_1}{p_0} = \frac{2\gamma_0 M^2 - (\gamma_0-1)}{\gamma_0+1}$$

$$(4) \quad \frac{T_1}{T_0} = \frac{2\gamma_0 M^2 - (\gamma_0-1)}{\gamma_0+1} \cdot \frac{(\gamma_0-1)M^2 + 2}{(\gamma_0+1)M^2}$$

$$(5) \quad \frac{w_1}{c_0} = \frac{2}{\gamma_0+1} \cdot \left(M - \frac{1}{M} \right)$$

$$(6) \quad \frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{(\gamma_0+1)M^2}{(\gamma_0-1)M^2 + 2}$$

mit ρ_i Dichten vor bzw. hinter der Stossfront
 T_i absoluten Temperaturen " " " " "
 w_i Strömungsgeschwindigkeit hinter der Stossfront

In dem für Plasmaexperimente interessanten Bereich liefern die Beziehungen (3) bis (6) allerdings nur grobe Näherungswerte. Für Edelgase (keine Dissoziation) können die Gleichungen (s. dazu Turner [4]) zu Abschätzungen benutzt werden, bis die Ionisation merklich einsetzt (1%). Mit (4) und der Sahagleichung kann deshalb eine Machzahl abgeschätzt werden, bei der die Temperatur hoch genug ist, um einen Ionisationsgrad von 1% zu gewährleisten. Turner [4] gibt diese Temperaturen für $p_0 = 10$ Torr für alle Edelgase an.

In Tabelle 1 sind ausser diesen Temperaturen (bzw. Temperaturverhältnissen) auch noch die Machzahlen eingetragen, die notwendig sind, um (von Zimmertemperatur ausgehend) diese Temperaturen in den Edelgasen zu erreichen. Weiterhin sind die Druckverhältnisse zur Erzeugung der entsprechenden Machzahlen eingetragen, wobei Wasserstoff als Treibgas vorausgesetzt ist. Mit der Kombination Wasserstoff-Helium kann der gewünschte Ionisationsgrad prinzipiell nicht erreicht werden.

Durch passende Wahl des Anfangsdruckes p_0 im Niederdruckteil und des Ausgangsdruckverhältnisses p_4/p_0 lassen sich Ionisationsgrad und Dichte des Plasmas (damit auch seine Leitfähigkeit) vorgeben. Die Wahl von p_4 und p_0 unterliegt aber noch verschiedenen Einschränkungen:

p_0 wird zu kleinen Werten hin durch die Forderung nach genügend kleinen Einstellzeiten für die Gleichgewichte eingeschränkt. Auch die mit kleiner werdendem p_0 anwachsenden Verluste stosswellengeheizten Gases durch Grenzschichteffekte begrenzen die Wahl von p_0 nach unten. Schliesslich stellt die notwendige Reinheit des Gases von mindestens 99,9% im Laufrohr noch eine Bedingung dar, die p_0 beeinflusst, denn die Leckzahl wird in praxi einen gewissen Wert nicht unterschreiten können. Der Anfangsdruck p_0 im Laufrohr sollte so einige 10^{-2} Torr nicht unterschreiten, und für die Konstruktion wurde deshalb

$$p_0 \geq 0,1 \text{ Torr}$$

festgelegt.

	T für 1 % Ionisation	$\frac{T_1}{T_0 (= 300)}$	M (T_1)	$\frac{p_4}{p_0}$
Neon	11 000	36,7	11	$4,7 \cdot 10^5$
Argon	8 000	26,7	9,2	$1,7 \cdot 10^3$
Krypton	7 100	23,7	8,4	$4 \cdot 10^2$
Xenon	6 200	20,7	8	$2,3 \cdot 10^2$

Tabelle 1

Untere Temperaturgrenze für Plasmaexperimente in Edelgasen und zugehöriges Ausgangsdruckverhältnis im Membranstossrohr (Treibgas: Wasserstoff)

Zu grossen Werten hin ist p_0 dadurch begrenzt, dass p_4/p_0 den zur Ionisation notwendigen Grenzwert überschreiten muss. Die in Betracht kommenden maximalen p_4 lassen erkennen, dass nur mit

$$p_0 \leq 100 \text{ Torr}$$

gerechnet zu werden braucht.

Die obere Grenze von p_4 wird praktisch nur durch die technischen Möglichkeiten und den vertretbaren Aufwand begrenzt. Der durch andere Zusammenhänge mitbestimmte Rohrdurchmesser beeinflusst die Festlegung eines maximalen p_4 wesentlich mit. Auch die Sicherheit der Anlage muss im Auge behalten werden. So wurde der Planung

$$p_4 \leq 100 \text{ Atü}$$

als Richtwert zugrundegelegt.

Dass auch minimale p_4 bzw. p_4/p_0 technische Probleme aufwerfen, wurde bei der Planung der Anlage nicht berücksichtigt. Bei kleinen Drucken p_4 können nur noch sehr dünne Membranen reproduzierbar zum Platzen gebracht werden, die Anbringung von Sollbruchstellen daran wird schwierig, und das Triggern zu einem besonderen Problem. Das Arbeiten an dieser Grenze des Druckes wird also ausschliesslich zu einem Membranproblem.

Die Einschränkungen für die Drucke in Treib- und Laufrohr ergeben einen maximalen Wert des Ausgangsdruckverhältnisses

$$(p_4/p_0)_{\max} \approx 10^6$$

Ein Vergleich dieses Wertes mit den in Tabelle 1 angegebenen zeigt, dass in der so geplanten Stossrohranlage auch Neon nur schwach ionisiert werden kann.

In den Abb. 2a und b sind die Temperatur- und Teilchenzahlbereiche dargestellt, in denen bei Erfüllung der obigen Bedingungen im Membranrohr Plasmaexperimente durchgeführt werden können.

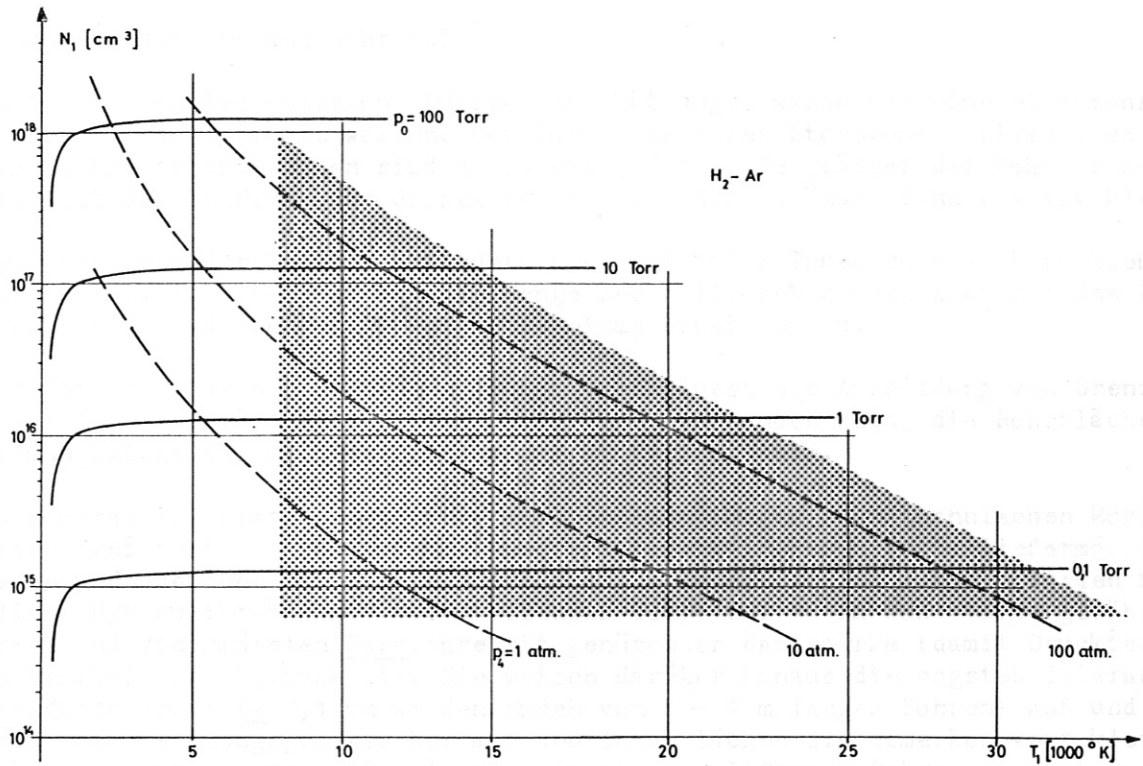


Abb. 2a: Teilchendichte-Temperatur-Ebene für stosswellenaufgeheiztes Argon mit dem Niederdruck p_0 (in Torr) und dem Hochdruck p_4 (in atm.) als Parameterkurven. Schraffiert ist der im Membranrohr technisch realisierbare Plasmabereich.

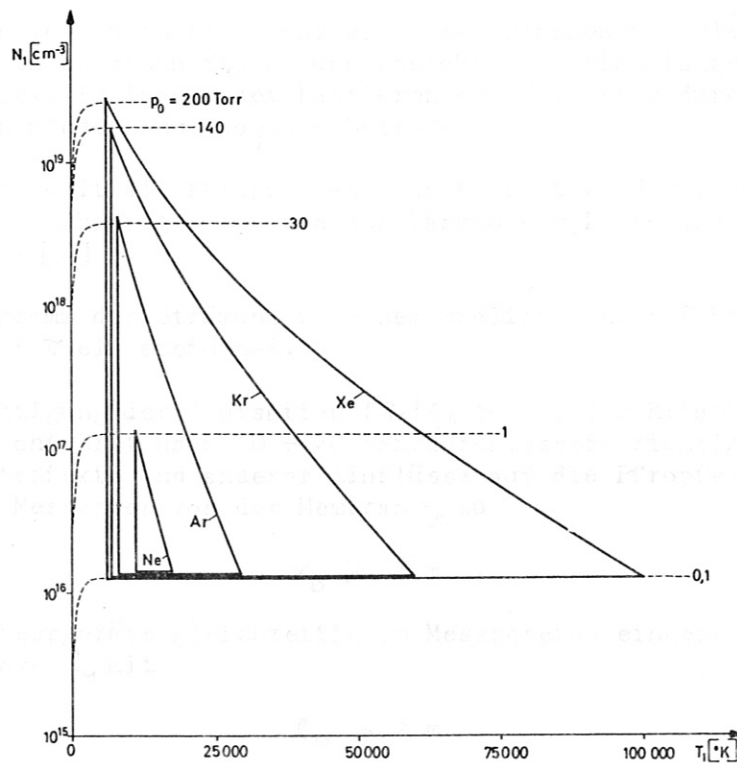


Abb. 2b: Teilchendichte-Temperatur-Ebene für stosswellenaufgeheizte Edelgase. Umrandet sind die im Membranrohr für die einzelnen Gase technisch realisierbaren Plasmabereiche.

3. Rohrdurchmesser und Rohrwahl

Die im vorigen Abschnitt angeführten Abschätzungen waren für eine eindimensionale (ebene) Strömung gemacht worden. Der Durchmesser des Stossrohres blieb also unbestimmt. Die Abschätzungen sind um so eher gültig, je grösser der Rohrdurchmesser ist, weil der Einfluss der Grenzschichten auf die Strömung dann relativ kleiner ist.

Steigender Rohrdurchmesser erfordert aber bei hohem Innendruck auch wachsende Wandstärken. Ausserdem wächst die Menge des Füllgases quadratisch mit dem Rohrdurchmesser, und die Gefahr bei Lecks nimmt erheblich zu.

Auch die Struktur der Rohrrinnenflächen beeinflusst die Ausbildung von Grenzschichten. Es sollten also möglichst glatte Oberflächen vorhanden sein, die Rohrfläche in Strömungsrichtung möglichst gerade und stufenfrei sein.

Ein Kompromiss zwischen den verschiedenen Forderungen, den technischen Möglichkeiten (bei vertretbarem Aufwand) und anderen Bedingungen (z.B. Liefermöglichkeiten und -zeiten) war also unvermeidbar. - Im vorliegenden Falle wurden handelsübliche Hydraulikrohre mit 100 mm lichter Weite und 11 mm Wandstärke gewählt. Diese Rohre sind die grössten Normrohre mit genügender Wandstärke (damit Druckfestigkeit und Bearbeitungsmöglichkeit). Sie weisen darüber hinaus die engsten Toleranzen im Innendurchmesser ($\pm 0,1$ mm an den Enden von 3 - 4 m langen Rohren) auf und weisen schon vom Fertigungsprozess her auf den Innenflächen die bemerkenswert kleine Rauigkeit von ca. $3 \mu\text{m}$ auf. Sie sind damit geschliffenen Rohren mindestens ebenbürtig. Die Rohre sind auch in einer genügenden Länge (> 3 m) lieferbar. Schliesslich konnten auch Lieferzeit und Preis durch die Wahl dieser Rohre klein gehalten werden.

4. Längen von Nieder- und Hochdruckteil

Um die Messungen an den im Stossrohr erzeugten Plasmen zu erleichtern, sollte der Plasmapfropfen zwischen Stoss- und Kontaktfront eine Länge von ca. 50 cm haben. Die Messzeit (zwischen dem Passieren des Messortes durch die beiden Fronten) sollte dann mindestens $100 \mu\text{sec}$ betragen.

Die Messzeit und damit die Pfropfenlänge am Messort werden von der Lage des Messortes im gesamten Rohrsystem und von den Längen von Lauf- und Treibrohr wesentlich mitbestimmt (vgl. [3]).

Im Weg-Zeit-Diagramm der Strömung in einem endlich langen Rohr (Abb. 3) ist die maximale Messzeit τ eingezeichnet.

Unter Berücksichtigung der Ionisation ($\varrho_1/\varrho_0 > 4$), der Erfahrungstatsache, dass sich die Stossfront erst nach 10 - 20 Rohrdurchmessern richtig ausgebildet hat, der Grenzschichteffekte und anderer Einflüsse auf die Pfropfenlänge ergibt sich der Abstand des Messortes von der Membran x_B zu

$$x_B \geq 8 \text{ m} .$$

Damit genügend Messgeräte gleichzeitig im Messbereich eingesetzt werden können, wurde dessen Länge l_M mit

$$l_M = 2 \text{ m}$$

grosszügig bemessen, und damit das Puffervolumen am Ende des Laufrohres nicht stört, wurde für das anschliessende Auslaufrohr ebenfalls eine Länge

$$l_A = 2 \text{ m}$$

gefordert, obwohl zur Verhinderung einer Störung der Messungen durch eine reflektierte Stosswelle nur ca. 20 cm notwendig sind (vgl. 3).

Damit ergibt sich eine Gesamtlänge l_N des Niederdruckteiles

$$l_N = 12 \text{ m} .$$

Die Länge l_N des Treibrohres wird, wie aus Abb.3 leicht zu ersehen ist, durch die Forderung bestimmt, dass der reflektierte Kopf der Verdünnungswelle, die anfänglich in den Hochdruckteil hineinläuft, den Messort B (im Abstand x_B von der Membran) nicht während der Messzeit τ erreichen soll.

Die Quotienten $x_B/l_H = \chi_B$ wurden in [3] für die Kombinationen Wasserstoff-Edelgase und die Druckverhältnisse $10^3 \leq p_4/p_0 < 10^6$ berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 4 dargestellt. Das Längenverhältnis ist für die Kombination Wasserstoff - Xenon am ungünstigsten, dort wieder für das Druckverhältnis $p_4/p_0 = 10^3$. Damit selbst für diesen Fall die gestellte Bedingung erfüllt ist, muss das Treibrohr mindestens die Länge

$$l_H = 1,7 \text{ m}$$

haben. Um weder Raum noch Gas zu verschwenden, wurde diese Länge auch der Konstruktion zugrunde gelegt.

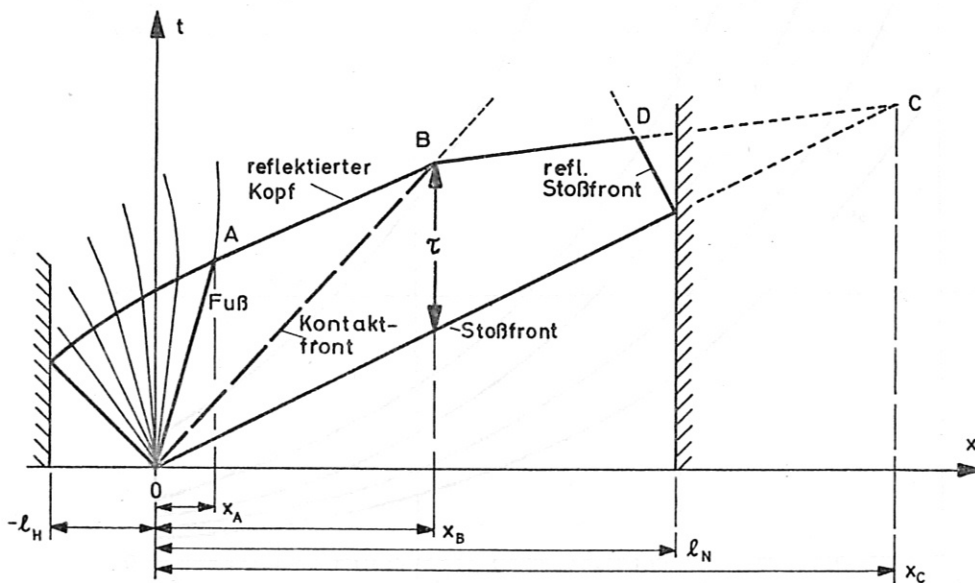


Abb. 3: x-t-Diagramm der Strömung in einem endlich langen Stosswellenrohr.

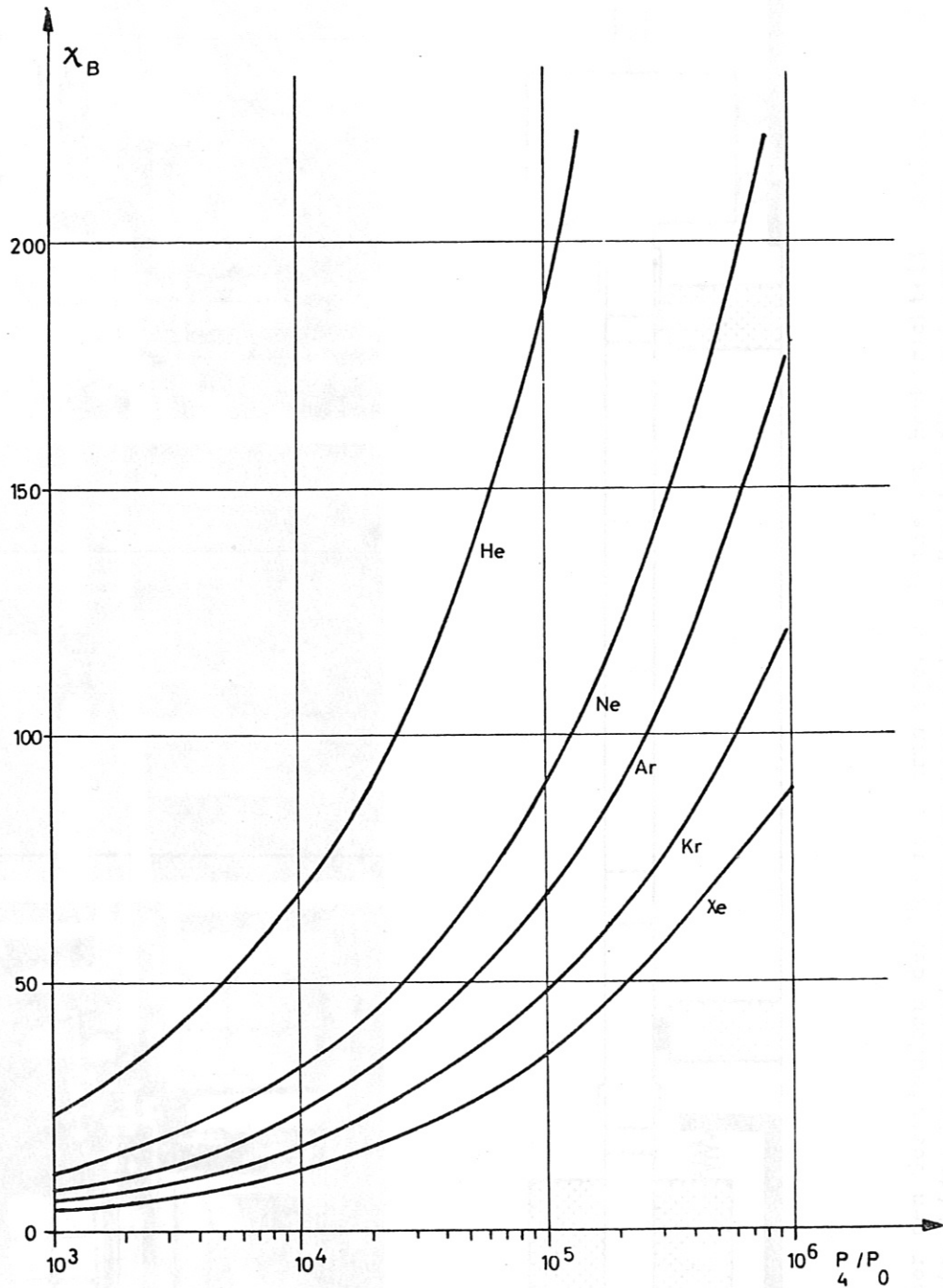


Abb. 4: Normierte Koordinaten χ_B des Punktes B für die Kombinationen Wasserstoff-Edelgas.

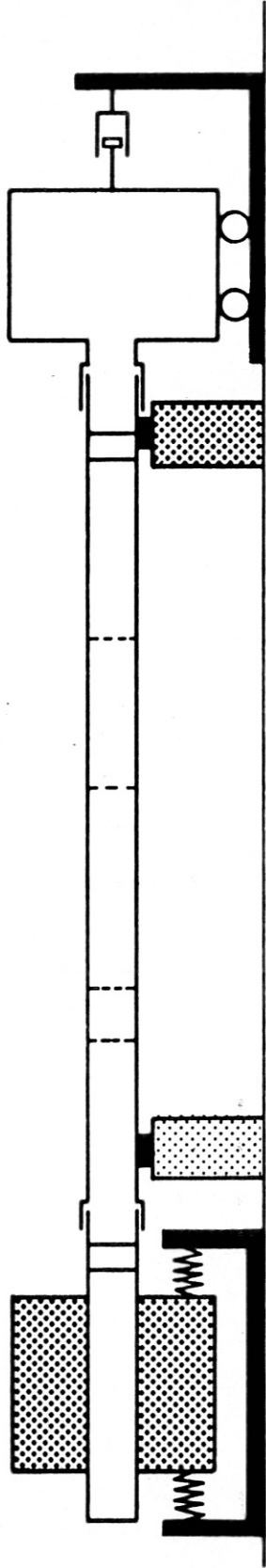
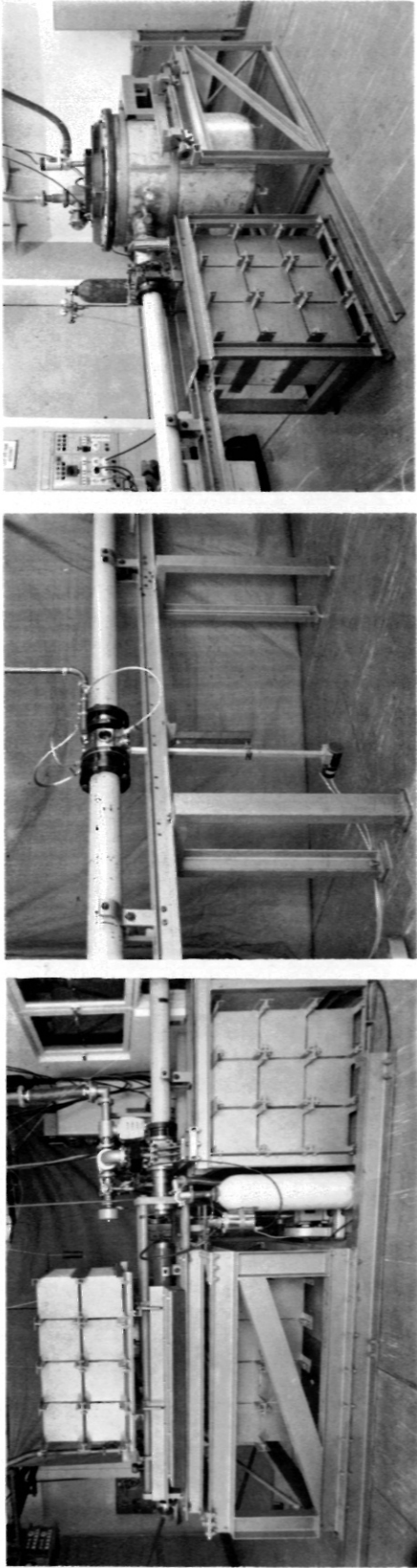


Abb. 5: Überblick über den Gesamtaufbau der Membranrohranlage. a) Fotos von Hochdruckteil, Laufrohr und Pufferkessel, b) Prinzipskizze (die Zahlen entsprechen den Abschnitten im Kapitel "Mechanischer Aufbau").

III. Mechanischer Aufbau des Stosswellenrohres

Der Aufbau des Stosswellenrohres, das gem. den in II. geschilderten Vorüberlegungen gebaut wurde, ist in Abb. 5 skizziert. Es gliedert sich im wesentlichen in den Hochdruckteil, den Niederdruckteil (in den die Messstellen eingefügt sind) und in ein Puffervolumen, das den grössten Teil des Treibgases nach Ablauf des Experimentes aufnimmt. Hochdruckteil und Puffervolumen sind vom Niederdruckteil durch Membranen getrennt und durch teleskopartige Verbindungen mechanisch "entkoppelt". Durch diese Teleskopstücke kann die Übertragung von Kräften auf das Laufrohr und damit auf den Messteil weitgehend vermieden werden. Die erste Membran (zwischen Hoch- und Niederdruckteil) trennt das Treib- und das Testgas und muss zu Beginn des Experimentes zum Platzen gebracht werden. Dagegen ist die Membran zwischen Niederdruckteil und Puffervolumen für das Experiment nicht von Bedeutung. Sie wurde lediglich aus vakuumtechnischen Gründen und zur Erhöhung der Reinheit des Gases in den Niederdruckteil eingebaut. Im Folgenden soll der mechanische Aufbau der Membranrohranlage genauer beschrieben werden.

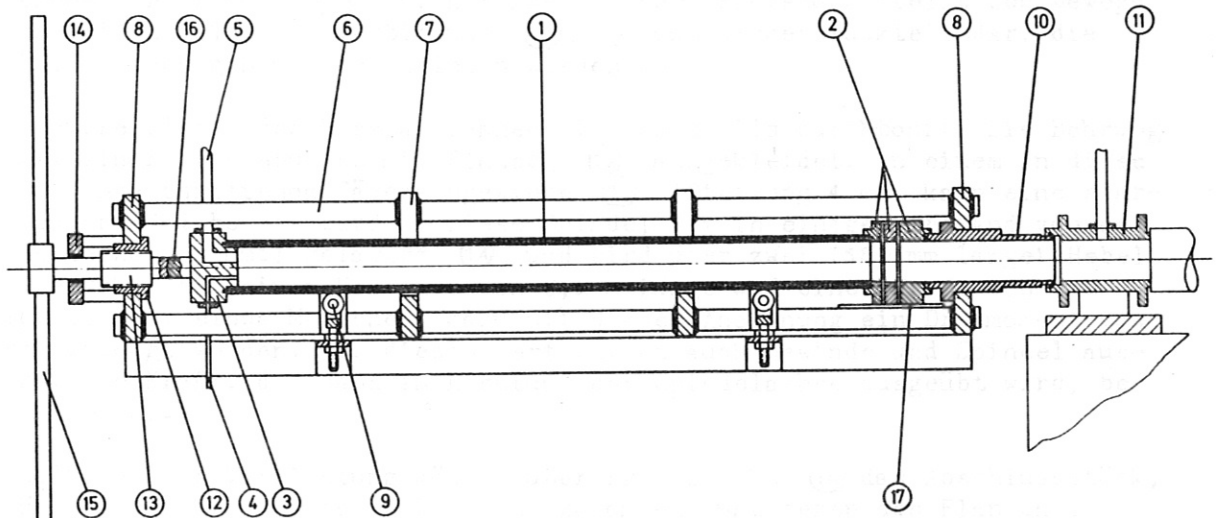


Abb. 6: Schnitt durch Treibrohr und Verspannrahmen

- 1 Hochdruckrohr
- 2 Doppelmembranzone mit Membranen
- 3 Abschlussstück mit Bohrungen für Vakuumanschluss und Gaszufuhr
- 4 Treibgaszufuhr
- 5 Vakuumanschluss
- 6 Zuganker für Verspannrahmen
- 7 Platten im Verspannrahmen
- 8 Endplatten des Verspannrahmens
- 9 Rollenlager, auf denen das Hochdruckrohr verschoben werden kann
- 10 Beweglicher Teil des Teleskopstücks
- 11 Fester Teil des Teleskopstücks
- 12 Bronzebüchse mit Sägezahngewinde für Spindel
- 13 Stahlspindel
- 14 Lagerung für Spindel
- 15 Hebel
- 16 Druckstück
- 17 Justierbare Auflage für Membranzonen

1. Der Hochdruckteil

Das wichtigste Stück des Hochdruckteiles, die Hochdruckkammer (das Treibrohr), besteht im wesentlichen aus einem Stück der in II. 2. erwähnten nahtlosen Stahlrohre von 1700 mm Länge (s. Abb. 6, ①). Das dem Niederdruckteil zugekehrte Ende trägt eine Vorrichtung ②, in der sich die Membran befindet, die Hoch- und Niederdruckteil voneinander trennt. Diese "Membranzone" soll in III. 4. noch genauer beschrieben werden. Am anderen Ende ist das Rohr mit einem Stahlpfropfen ③ abgeschlossen. Durch Bohrungen ④, ⑤ in diesem Abschlusspfropfen kann die Hochdruckkammer evakuiert und mit Treibgas gefüllt werden.

Das Rohr mit den beiden Abschlussstücken wird von Rollen ⑨ getragen und auch seitlich geführt, sodass es in axialer Richtung verschoben werden kann. Es liegt in einem massiven Verspannrahmen ⑥, ⑦, ⑧. Dieser besteht aus vier quadratischen Stahlplatten ⑦, ⑧ (von 40 mm Dicke), die an den Ecken durch vier Rundstahlstäbe (50 mm ϕ) verbunden sind. Der Abstand zwischen den beiden äusseren Stahlplatten ⑧ beträgt 1880 mm. Die beiden inneren Platten ⑦ sind u-förmig ausgeschnitten, sodass das Treibrohr in den Rahmen hineingelegt werden kann.

Die vordere Platte des Verspannrahmens wird von einem (mit einem Flansch versehenen) Rohrstück ⑩ durchdrungen. Dieses Rohrstück stellt den beweglichen Teil der Teleskopverbindung ⑩, ⑪ zum Niederdruckteil dar, die in III. 5. noch genauer beschrieben werden soll.

Die hintere Platte des Verspannrahmens ist ebenfalls durchbohrt. Die Bohrung ist mit einer Bronzebuchse mit Flansch ⑫ ausgekleidet. In einem in diese Buchse eingeschnittenen Sägezahnengewinde ⑬ (Steigung 4 mm) kann eine starke Stahlspindel bewegt werden. Diese Spindel ist in einigem Abstand von der Endplatte noch einmal gelagert ⑭ und wird über zwei (580 mm lange) Hebel ⑮ gedreht. Bei einem Hebelarm von 0,5 m Länge und einer Kraft von ca. 75 kp (Gewicht eines Menschen) kann mit dieser Anordnung ein Drehmoment von 38 mkp erzeugt werden. Für diesen Wert wurden auch Gewinde und Spindel ausgelegt. Die Kraft, die dann in Richtung der Spindelachse ausgeübt wird, beträgt 9500 kp.

Mit Hilfe dieser Vorrichtung können über Druckstücke ⑯ das Abschlussstück, das Hochdruckrohr und die Membranzone zusammen- und gegen den Flansch in der anderen Platte des Verspannrahmens gepresst werden. Die Spindel mit den Druckstücken, das Abschlussstück, das Rohr und die Membranzone werden dabei auf Druck beansprucht, die Zuganker, die die von der Spindel hervorgerufene Kraft abfangen müssen, auf Zug, und die Endplatten des Verspannrahmens auf Biegung.

Die Flansche, die die einzelnen, eigentlich lose im Verspannrahmen liegenden Teile miteinander verbinden, wurden leicht konisch angedreht, sodass sie sich selbst zentrieren. Den pressenden Flächen der Druckstücke ⑯ wurde zu diesem Zweck eine schwach kugelige Form gegeben.

Die Dichtung des Hochdruckteils erfolgt mit Hilfe von Gummi-O-Ringen, die von den Druckkräften verformt werden und sowohl vakuum- als auch hochdruckfest abdichten. Die O-Ringe sind im Abschlussstück und in den Flanschen der Membranzone so in Nuten eingelassen, dass die Abdichtung stirnseitig erfolgt. Auf diese Weise konnte es vermieden werden, das Hochdruckrohr anzudrehen und seine Festigkeit zu verringern.

Wird die Hochdruckkammer mit Treibgas gefüllt, so wirkt auf das Abschlussstück und auf die Membran eine zusätzliche Kraft $K = p_4 \cdot F$. Die Zuganker des Verspannrahmens werden dadurch noch stärker belastet, und auch die Durchbiegung der Endplatten nimmt zu. Der Verspannung des Rohres wirkt diese Kraft aber entgegen, und es kann ganz oder zumindest teilweise entlastet werden. Dem maximal zulässigen Druck $p_4 = 100$ atm im Hochdruckteil entspricht eine Kraft $K = 7800$ kp. Wurde der Hochdruckteil vor dem Laden des Treibrohres mit der grössten mit Hilfe der Spindel aufzubringenden Kraft (9500 kp) vorgespannt, so wird das Rohr in gefülltem Zustand noch mit einer Kraft von 1700 kp zusammengepresst. Diese Kraft reicht sicher aus, um die Dichtungs-O-Ringe ganz zu verformen.

Um die Dichtigkeit des Hochdruckrohres auch bei einer geringeren als der maximalen Vorspannung zu gewährleisten, wurden die Zuganker so ausgelegt, dass sie sich unter der beim Laden maximal auftretenden Kraft von 7800 kp nur 0,1 mm dehnen. Die Durchbiegung der Endplatten bleibt dabei klein gegen diesen Wert. Andererseits wurden die Dicke der O-Ringe (105 x 3 mm, hart), die das Hochdruckrohr an beiden Enden abdichten, und der Querschnitt der Nuten, in denen sie liegen, so gewählt, dass ihre Dichtfähigkeit und ihr Sitz in den Nuten durch einen Spalt von 0,1 mm nicht beeinträchtigt werden können. Diese Auslegung des Hochdruckteils garantiert auch dann Dichtigkeit, wenn vor dem Laden der Hochdruckkammer die Gummiringe schon ganz in ihre Nuten eingedrückt waren. Die weitere Verspannung der Zuganker und des Hochdruckrohres selbst dient als Sicherheit.

Nach dem Platzen der Membran übt der Druck - abgesehen von Radialkräften auf die Rohrwandung - nur noch einseitig auf den Abschlusspfropfen des Hochdruckteils eine Kraft aus. Die Druckkraft, die vorher auf die Membran gewirkt hat, ruft dann die Impulsänderung des ausströmenden und des aufgesammelten Gases und den Aufbau der Druckdiskontinuität in der Stossfront hervor. Die Kraft auf den Hochdruckteil bleibt (ähnlich wie die Antriebskraft) konstant bis zur Ankunft des Kopfes, der beim Ausströmen des Treibgases entstehenden Verdünnungswelle am Abschlusspfropfen und nimmt dann ab. Der Maximalwert dieser Kraft hängt vom Anfangsdruck p_4 und der Querschnittsfläche F des Treibrohres ab ($K = p_4 \cdot F$). Er beträgt in der beschriebenen Anlage - wie schon erwähnt - maximal 7800 kp (bei $p_4 = 100$ atm). Die Zeit, während der diese Kraft wirkt, hängt ausser von der Länge des Treibrohres auch von der Schallgeschwindigkeit des Gases ab. Sie beträgt im vorliegenden Fall bei

$$H_2 \approx 1,3 \text{ msec}$$

$$\text{Luft} \approx 5 \text{ msec} .$$

Dem Hochdruckteil wird also ein "Rückstoss" erteilt. Die Zeit, über die diese Kraft wirkt, und somit der Gesamtimpuls $\int K \cdot dt$, der auf den Hochdruckteil übertragen wird, nimmt mit abnehmender Schallgeschwindigkeit zu. Die von der Kraft hervorgerufene Beschleunigung des Hochdruckteils hängt - ausser von der Kraft selbst - noch von der Grösse der zu beschleunigenden Masse ab. Die Geschwindigkeit, die der Hochdruckteil dabei erhält, und seine Verschiebung aus der ursprünglichen Lage nehmen natürlich mit der Wirkungsdauer der Kraft zu.

Bei den ersten Probeexperimenten, die beim Aufbau der Anlage durchgeführt wurden, waren Hochdruckteil, Niederdruckteil mit Auflagerahmen und der Pufferkessel starr verbunden und mussten somit als Ganzes beschleunigt werden. Trotz der grossen Gesamtmasse (≈ 15000 kg) wurde die ruhende Reibung überwunden, und bei jedem Versuch (mit 100 atm Luft im Hochdruckteil) die ganze Anlage um ca. 5 cm verschoben. Dabei traten im Niederdruckteil beträchtliche Zugspannungen auf.

Um zu verhindern, dass die im Laufrohr eingebauten empfindlichen Messeinrichtungen zerstört werden können, wurde der Hochdruckteil vom Niederdruckteil mechanisch getrennt. Dies geschieht mit Hilfe eines (in III. 5. beschriebenen) "Teleskopstückes". Durch die Entkopplung wird aber die impuls-aufnehmende Masse beträchtlich kleiner, und der Rückstoss würde den Hochdruckteil noch viel stärker als vorher in Bewegung setzen. Diese Bewegung muss verhindert, bzw. in Grenzen gehalten werden, damit die Vakuum- und Gasleitungen zur Hochdruckkammer nicht beschädigt werden, und damit die hohen Anforderungen (siehe III. 5.) an Druck- und Vakuumdichtigkeit im Teleskop selbst erfüllt werden können.

Deshalb wurde der gesamte Hochdruckteil mit Federelementen in einem massiven Stahlgestell aufgehängt, das fest mit dem Betonboden des Labors verbunden ist. Abb. 7 lässt diese Anordnung erkennen. Diagonale U-Eisen geben dem Stahlrahmen seine Festigkeit in Längsrichtung, während kreuzweise eingebaute Druckanker (⑦ in Abb. 7) dem Rahmen seine Quersteifigkeit verleihen. Ein Verstellen dieser Druckanker erlaubt gleichzeitig in genügenden Grenzen eine seitliche Justierung des Treibrohres mit minimalem Aufwand.

Die elastische Lagerung verhindert eine Beschädigung des Betonbodens durch den starken Rückstoss. Für die Federelemente wurde gefordert, dass sie eine Stossbelastung von ca. 10 Tonnen und 0,01 sec Dauer vertragen sollten. Die von ihnen auf den Lagerrahmen - und damit auf den Fussboden - übertragenen Kräfte sollten dabei um mindestens die Hälfte verringert werden. Die Federelemente wurden von der Firma Grünzweig und Hartmann berechnet und geliefert. Sie bestehen aus vier Hartgummiklötzen (mit den Abmessungen 1200 x 100 x 50 mm), auf deren Ober- und Unterseiten Stahlplatten aufvulkanisiert sind, die mit dem Verspannrahmen und dem Untergestell verschraubt sind (vgl. Abb. 7).

Der so gelagerte Hochdruckteil stellt ein stark gedämpftes, schwingungsfähiges System dar. Um die Ausschläge genügend klein zu halten, wurde die schwingende Masse des Hochdruckteiles mit 16 Betonklötzen von je 40 kg auf ca. 1 Tonne vergrössert. Die Vorspannung der Gummifedern durch dies Gewicht muss natürlich bei der Justierung berücksichtigt werden.

Mit dem oben beschriebenen Federungssystem war es möglich, die Bewegung des schwingenden Teiles sehr klein zu halten. Er bewegt sich beim maximalen Ausgangsdruck von 100 atm und Wasserstoff als Treibgas nur um ca. 1,5 mm aus der Ruhelage heraus.

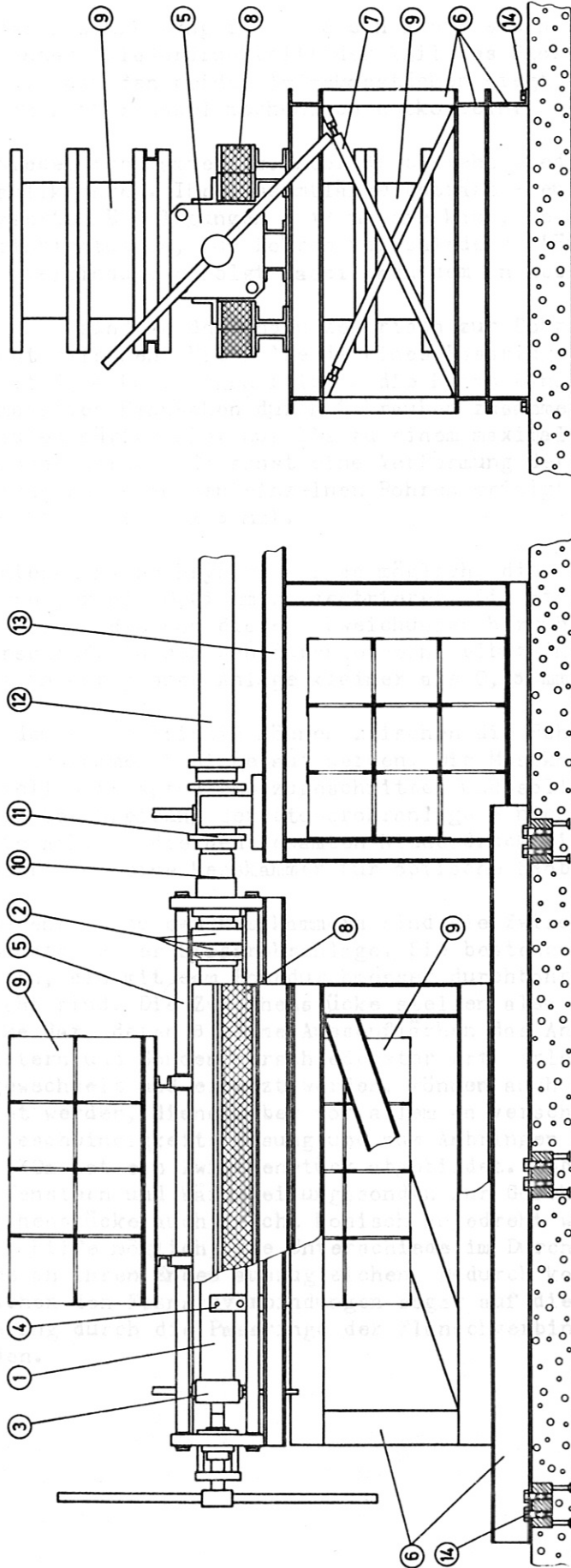


Abb. 7: Aufbau des Hochdruckteils.

- 1 Treibrohr
- 2 Doppelmembranzone
- 3 Abschlussstück
- 4 Rollenlager
- 5 Verspannrahmen
- 6 Lagerrahmen
- 7 Druckerker

8 Stossdämpfer aus Gummi

- 9 Betongewichte
- 10 Beweglicher Teil des Teleskopstücks
- 11 Fester Teil des Teleskopstücks
- 12 Niederdruckrohr
- 13 Lagerrahmen für Niederdruckteil
- 14 Verankerungen, im Betonboden eingegossen.

2. Der Niederdruckteil

Bei der Beschreibung des m e c h a n i s c h e n Aufbaus des Stossrohres soll unter "Niederdruckteil" der Teil des Stossrohres verstanden werden, der zwischen den beiden Teleskopstücken liegt, die ihn vom Hochdruckteil und vom Pufferkessel mechanisch entkoppeln.

Die Niederdruckkammer (s. Abb. 8) besteht wieder aus den bereits erwähnten Hydraulikrohren. Ihre Gesamtlänge beträgt - entsprechend den in II. 3. skizzierten Überlegungen - 12 m. Sie kann, je nach Art der eingebauten Messeinrichtungen, aus Rohren verschiedener Länge zusammengesetzt werden. Deren Verbindung erfolgt dabei nach dem in Abb. 9 gezeigten Prinzip.

Die Rohre sind an den Enden zentrisch zur Bohrung angedreht und mit einer Ringnut versehen. Mit Hilfe je eines Passringes können die Rohre zentriert und mit je 4 Halbringen (die in die Nuten eingreifen) und darübergeschobenen massiven Flanschen durch Schrauben zusammengespannt werden. Diese Schrauben dürfen aber nur bis zu einem maximalen Drehmoment von 6,5 mkg angezogen werden, da sonst eine Verformung der Rohre erfolgen kann. Die Dichtung zwischen den einzelnen Rohren erfolgt mit stirnseitig angebrachten O-Ringen (105 x 3 mm).

Mit diesem Flanschsystem war es möglich, die Rohre bis auf Abweichungen von weniger als 0,05 mm zu zentrieren. Die Stösse am Übergang zwischen den Rohren, die von diesen Abweichungen herrühren, sind kleiner als die Unterschiede in den Rohrdurchmessern selbst (max 0,1 mm). Sie konnten somit in der ganzen Anlage kleiner als 0,15 mm gehalten werden.

Nach demselben Prinzip können zwischen die Rohre "Triggerzwischenstücke" und "Messkammern" eingebaut werden. Die Messkammern sind immer auf die speziellen Messprobleme zugeschnitten und sollen hier - bei der allgemeinen Beschreibung der Stossrohranlage - nicht beschrieben werden. In die Abb. 8, die den gesamten Niederdruckteil zeigt, ist jedoch zur Illustration eine Messkammer für optische Beobachtungen mit eingezeichnet.

Im Gegensatz zu den Messkammern sind die Zwischenstücke (Abb. 10) feste Bestandteile der Stossrohranlage. Sie bestehen aus prismatischen Stahlklötzen, die mit dem Rohrdurchmesser durchbohrt und an die Flansche angedreht sind. Die Zwischenstücke stellen also auswechselbare, kurze Rohrstücke dar, deren 8 plane Aussenflächen das Anbringen von Messelementen (Fenstern und Sonden verschiedenster Art) erleichtern. Sie können leicht ausgewechselt und ersetzt werden, können auch als kleine Messkammern verwendet werden, dienen aber vor allem an verschiedenen Stellen des Rohres zur Geschwindigkeitsmessung und zum Anbringen von Triggerimpulsgebern. In Abb. 10a ist ein Zwischenstück abgebildet. Abb. 10b zeigt ein Zwischenstück mit Fenstern und Wärmeleitungs sonden zur Geschwindigkeitsmessung. Da die Zwischenstücke auch leicht konisch angedreht werden konnten, war es mit ihrer Hilfe möglich, die Unterschiede im Durchmesser der verschiedenen Rohre an ihren Enden auszugleichen. Dadurch konnten die Stosstellen zwischen den Flanschverbindungen sogar auf die Ungenauigkeit in der Zentrierung durch die Passringe der Flanschverbindung (0,05 mm) reduziert werden.

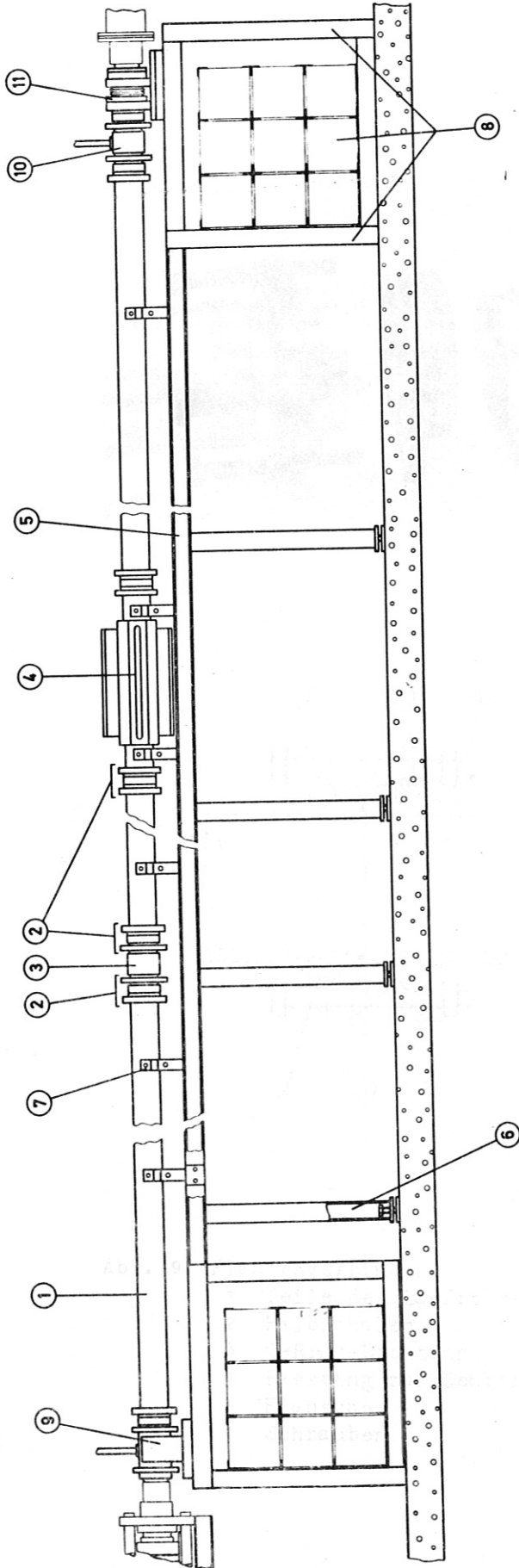


Abb. 8: Niederdruckkammer

- | | | | |
|-----|---------------------------|----|---|
| 1 | Laufrohr (Hydraulikkohre) | 7 | Justierbare Rollenlagerung |
| 2 | Flanschverbindungen | 8 | Rahmen mit Betongewichten |
| 3 | Zwischenstück | 9 | Befestigung des Laufrohres = fester Teil des Teleskop- |
| 4 | Optische Messkammer | 10 | stückes (mit Gas- und Vakuumanschlüssen) |
| 5/6 | Lagerrahmen | 11 | Vakuumschluss am Ende des Laufrohres |
| | | | Befestigung des Laufrohres = hintere Membranhalterung = |
| | | | fester Teil des Teleskopstückes |

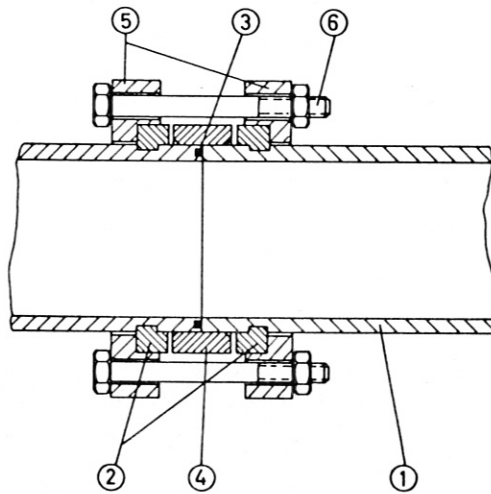
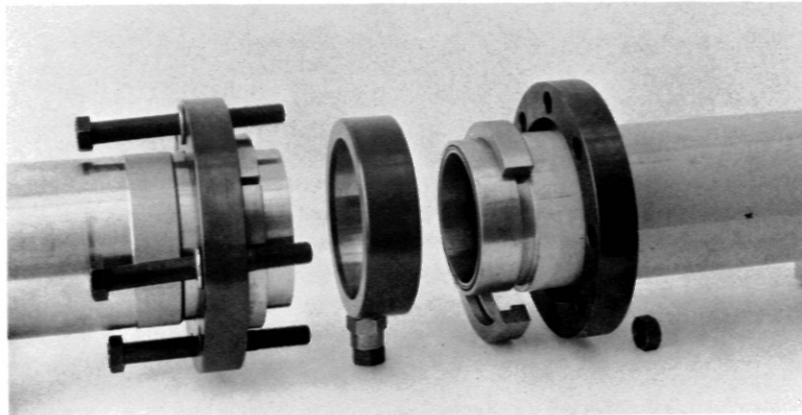


Abb. 9 Flanschverbindung
1 Teile des Laufrohres
2 Halbschalen
3 O-Ring-Dichtung
4 Passring zur Zentrierung
5 Flansche
6 Schrauben

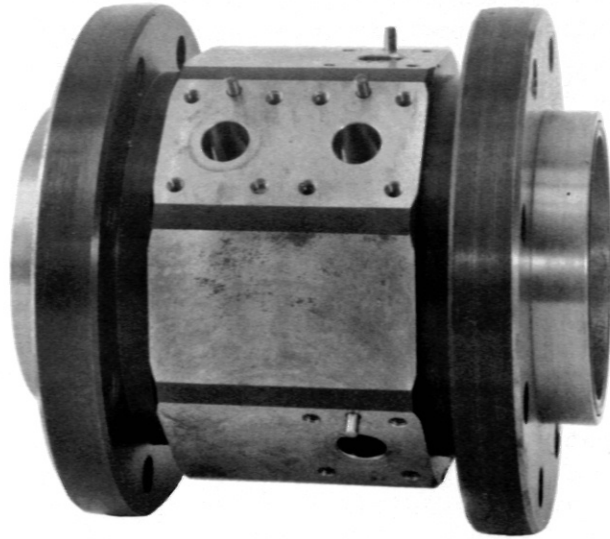


Abb. 10a: "Zwischenstück" mit Bohrungen für Wärmeleitungs sonden
(und Justierungsstiften)

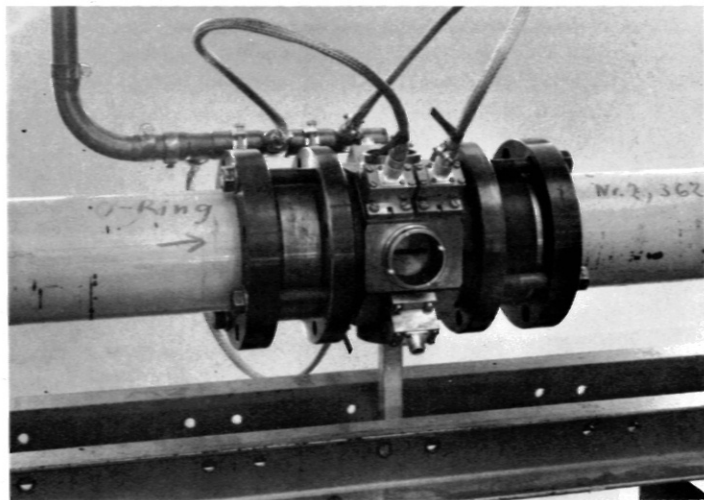


Abb. 10b: "Zwischenstück" mit Wärmeleitungs sonden und Fenster für
optische Beobachtungen, eingebaut im Laufrohr

Das Niederdruckrohr (mit den Messkammern) wird von einem langen, massiven Lagerrahmen aus starkem U-Eisen getragen (siehe Abb. 8 und 11). Er besteht aus 2 Längsträgern, die auf Lagerböcke aufgeschraubt sind. Um einen sicheren Stand zu gewährleisten, sind die Beine der Lagerböcke mit Schrauben einzeln in der Höhe justierbar. Auf den Längsträgern können an beliebigen Orten Vorrichtungen zur Lagerung der Rohre festgeschraubt werden. Diese Lagerungen bestehen aus gabelförmig gebogenen Flacheisen und tragen 3 justierbare Rollen, von denen das Rohr getragen und seitlich geführt wird (siehe Abb. 11). Auf diese Weise können die Rohre leicht axial verschoben werden. Da die Rohre mit diesen Lagern leicht an vielen Stellen unterstützt werden können, kann ein starkes Durchbiegen des Niederdruckrohres verhindert werden. Die Biegefestigkeit der Rohre selbst ist jedoch schon so gross, dass die Durchbiegung bei einem Lagerabstand von 2 m nur etwa 0,02 mm beträgt.

Die beiden Enden der Längsträger sind an zwei Stahlgestellen festgeschraubt. Diese Stahlgestelle sind mit je 9 der bereits beschriebenen Betongewichte beschwert und haben ein Gesamtgewicht von je ungefähr 400 kp. Das vordere Gestell trägt - justierbar aber doch starr verschraubt - den festen Teil des Teleskopstückes, das Hochdruckteil und Niederdruckteil trennt (der gleitende Teil ist fest mit dem Verspannrahmen des Hochdruckteils verbunden). Der feste Teil des Teleskopstücks ist als massiver Stahlblock ausgebildet, an den das erste Rohr des Niederdruckteils angeflanscht werden kann. In diesem Stahlblock befindet sich auch eine ziemlich grosse Bohrung zum Anschluss der Vakuum- und Gasleitungen und der Manometer für den Niederdruckteil. An dieser Stelle (kurz hinter der Membran) ist die Störung der Stosswelle durch die Bohrung in der Wand noch vernachlässigbar.

Das andere Ende des Niederdruckrohres ist an einer Vorrichtung angeflanscht, die mit dem zweiten Betonklotz verbunden ist. Sie besteht im wesentlichen aus einer zweiten Membranzone, die aus vakuumtechnischen Gründen den Pufferkessel vom Niederdruckteil trennt. Da diese Membranzone mit dem zweiten Teil des Teleskopstückes zu einer Einheit zusammengebaut ist, wird sie auch mit diesem zusammen(in III. 5.) beschrieben.

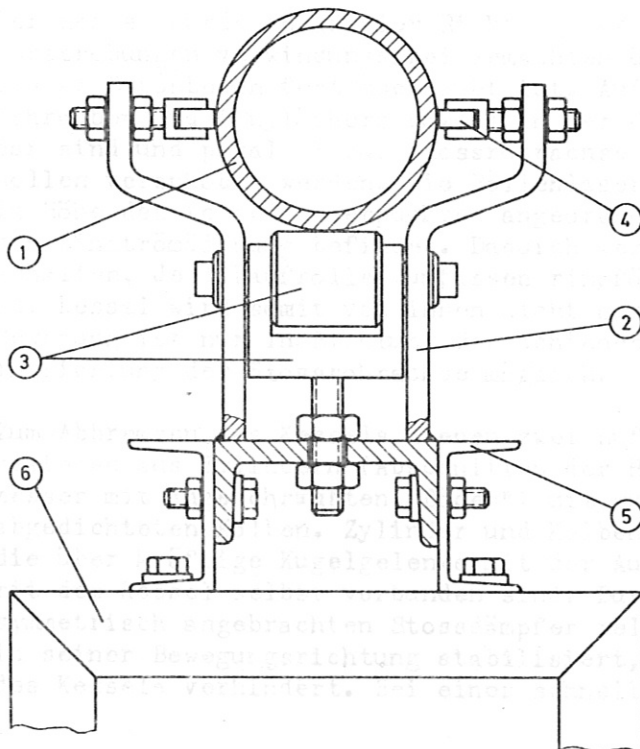


Abb. 11: Rohrlagerung

- 1 Laufrrohr
- 2 Lagergabel
- 3 Justierbarer Träger mit Lagerrolle
- 4 Seitliche Führungsrollen
- 5 Längsträger
- 6 Lagerbock

3. Der Pufferkessel

Der Pufferkessel dient - wie bereits erwähnt - dazu, den stationären Enddruck im Rohr (nach Ablauf des Strömungsvorganges) niedrig zu halten. Bei einer Länge des Hochdruckteils von 1,7 m, des Niederdruckteils von 12 m und einem Anfangsdruck $p_4 = 100$ atm würde ohne Puffervolumen im ganzen Rohr nach dem Experiment ein Druck von ca. 12,4 atm herrschen. Dies würde hohe technische Anforderungen an Messkammern, Beobachtungsfenster, Sondendurchführungen usw. stellen. Sollte das Rohr an irgendeiner Stelle undicht werden, würde praktisch der gesamte Wasserstoff in das Labor hinein ausströmen, und die Gefahr wäre trotz verschiedener Sicherheitsmassnahmen erheblich. Der als Puffervolumen an den Niederdruckteil angeschlossene Kessel mit einem Fassungsvermögen von ca. 800 l setzt den Enddruck auf ungefähr 1,7 atm $\hat{=}$ 0,7 atü herab, wenn der Kessel zuvor auf einige 10 Torr evakuiert wurde. Bei nicht allzugrossen Lecks an nicht extrem ungünstiger Stelle bliebe deshalb immer noch mehr als die Hälfte des Wasserstoffs in der Membranrohranlage. Wenn der Kessel nicht zufällig vorhanden gewesen wäre, wäre ein noch etwas grösseres Volumen (günstigerer Form) gewählt worden.

Beim Einströmen des Gases in den Kessel wird, ähnlich wie beim Ausströmen aus dem Hochdruckteil, auf Grund des Impulserhaltungssatzes eine beträchtliche Kraft ausgeübt. Damit auch davon so wenig wie möglich auf die Messstellen übertragen wird, ist zwischen Kessel und Niederdruckteil wiederum ein Teleskopstück eingebaut, das ebenfalls in III. 5. genauer beschrieben wird. Hier soll nur erwähnt werden, dass es eine Verschiebung des Pufferkessels in Richtung der Stossrohrachse bis zu 60 mm zulässt. Die am Kessel auftretenden Kräfte auf einem Weg abzufangen, der wesentlich grösser ist, als der für den Hochdruckteil zugelassene, ist möglich, weil die Anforderungen an die Vakuumdichtigkeit und Druckfestigkeit der Dichtungen im Teleskop (hinter der zweiten Membran) nicht sehr gross sind. Bei einem Weg von einigen cm stellt auch die technische Lösung der Kesselfederung kein Problem mehr dar, obwohl einschlägige Firmen des Stossdämpferbaues keine brauchbaren Feder- und Dämpfungselemente liefern konnten.

Der Kessel wurde in axialer Richtung verschiebbar auf einem massiven, durch Verstreben verwindungsfrei gemachten Gestell aus starken U-Eisen gelagert, das am Betonboden festgeschraubt ist. Auf zwei Stahlrohren, die mit Hilfe von Schrauben und Langlöchern sowohl in der Höhe als auch der Seite nach verstellbar sind und parallel zur Stossrohrachse justiert werden, kann der Kessel auf Rollen verschoben werden. Die Rollenlager sind (ebenfalls justierbar) ungefähr in Höhe des Kesselschwerpunktes angeordnet, in dessen Höhe sich auch ungefähr die Einströmöffnung befindet. Dadurch werden Kippmomente am Kessel sehr klein gehalten. Je 3 Laufrollen umfassen ringförmig die als Schienen dienenden Rohre. Der Kessel wird somit von ihnen nicht nur getragen, sondern auch geführt. Eine Bewegung ist nur in Richtung der Schienen, also bei richtiger Justierung nur in Richtung der Stossrohrachse möglich.

Zum Abbremsen des Kessels dienen zwei Luftstossdämpfer (siehe Abb. 13). Sie bestehen aus Zylindern (Abschnitten der Hydraulikrohre von 10 cm Innendurchmesser mit angeschraubten "Böden") mit gut eingepassten und mit Gummi-O-Ringen abgedichteten Kolben. Zylinder und Kolben tragen kurze, starke Schubstangen, die über kräftige Kugelgelenke mit der Aufhängevorrichtung des Kessels, bzw. mit dem Kessel selbst verbunden sind. Durch eine seitliche Neigung der beiden symmetrisch angebrachten Stossdämpfer relativ zur Rohrachse wird der Kessel in seiner Bewegungsrichtung stabilisiert, d.h. ein seitliches "Ausbrechen" des Kessels verhindert. Bei einer schnellen Bewegung des Kessels wird die Luft

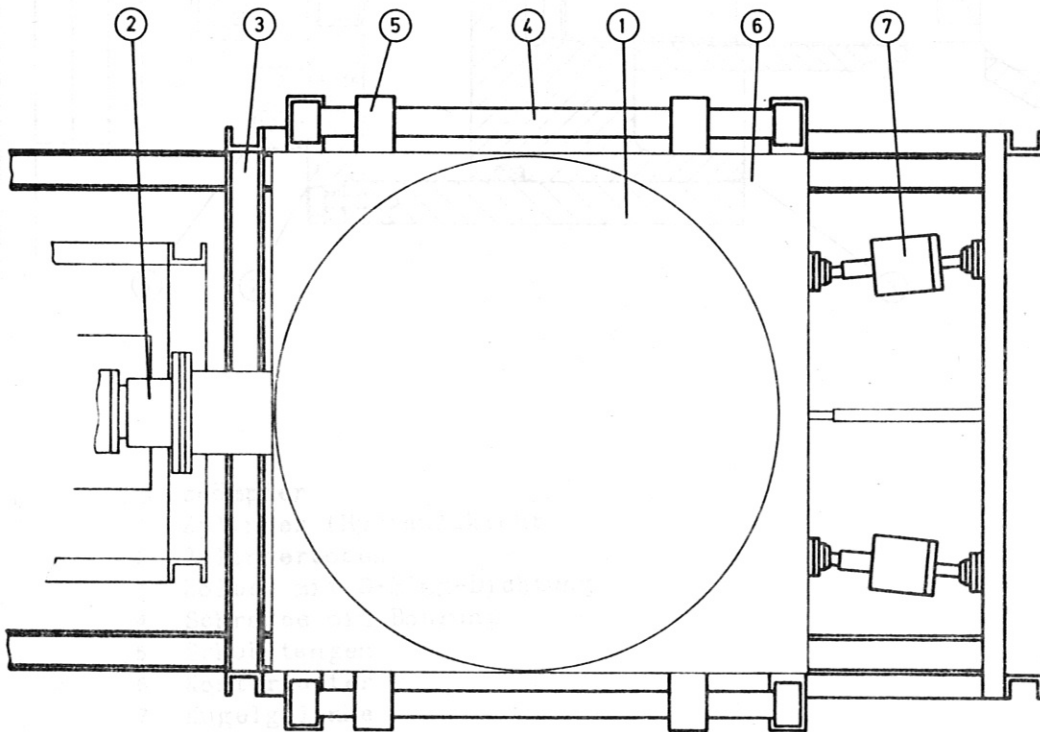
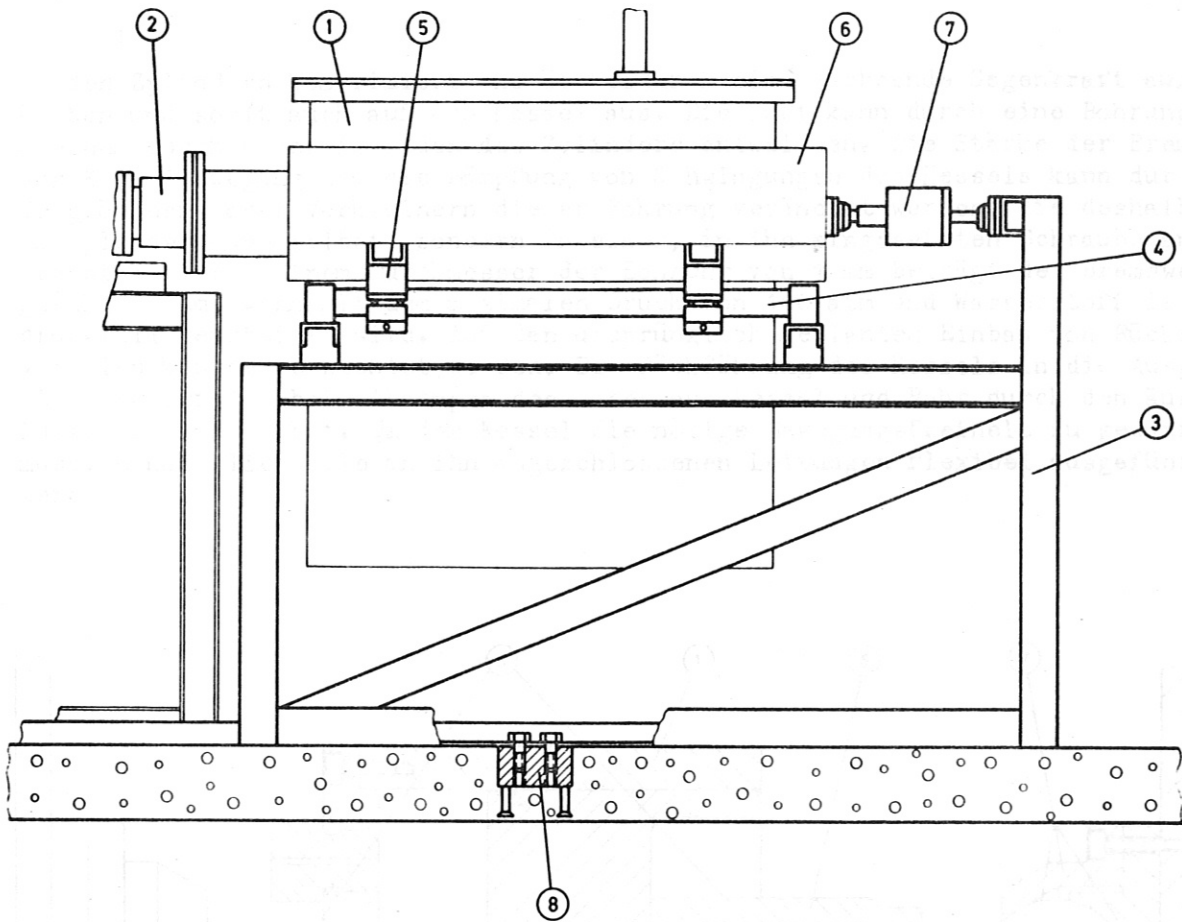


Abb. 12: Pufferkessel mit Aufhängevorrichtung

- | | |
|--|--|
| 1 Pufferkessel | 5 Rollenlager |
| 2 Beweglicher Teil des zweiten Teleskopstückes | 6 Aufhängevorrichtung des Kessels |
| 3 Lagerrahmen | 7 Luftstossdämpfer (s. Abb. 13) |
| 4 Laufschienen | 8 Verankerung des Lagerrahmens im Fussbodenbeton |

in den Zylindern komprimiert und übt dadurch eine wachsende Gegenkraft auf den Kolben und somit auch auf den Kessel aus. Die Luft kann durch eine Bohrung mit kleinem Durchmesser im Boden des Zylinders entweichen. Die Stärke der Bremsung der Kesselbewegung und die Dämpfung von Schwingungen des Kessels kann durch Vergrössern oder Verkleinern dieser Bohrung verändert werden, die deshalb nicht im Zylinderboden selbst, sondern in einer, in ihn eingesetzten Schraube angebracht ist. Bei einem Durchmesser der Bohrung von 1 mm beträgt der Bremsweg ungefähr 20 mm, wenn mit dem maximalen Druck von 100 atm und Wasserstoff im Hochdruckteil gearbeitet wird. Auf den ursprünglich geplanten Einbau von Rückschlagventilen konnte verzichtet werden. Die Rückführung des Kessels in die Ausgangsstellung erfolgt beim Abpumpen des Gases aus Kessel und Rohr durch den äusseren Luftdruck von selbst. Um dem Kessel die nötige Bewegungsfreiheit zu gewähren, mussten natürlich alle an ihm angeschlossenen Leitungen flexibel ausgeführt werden.

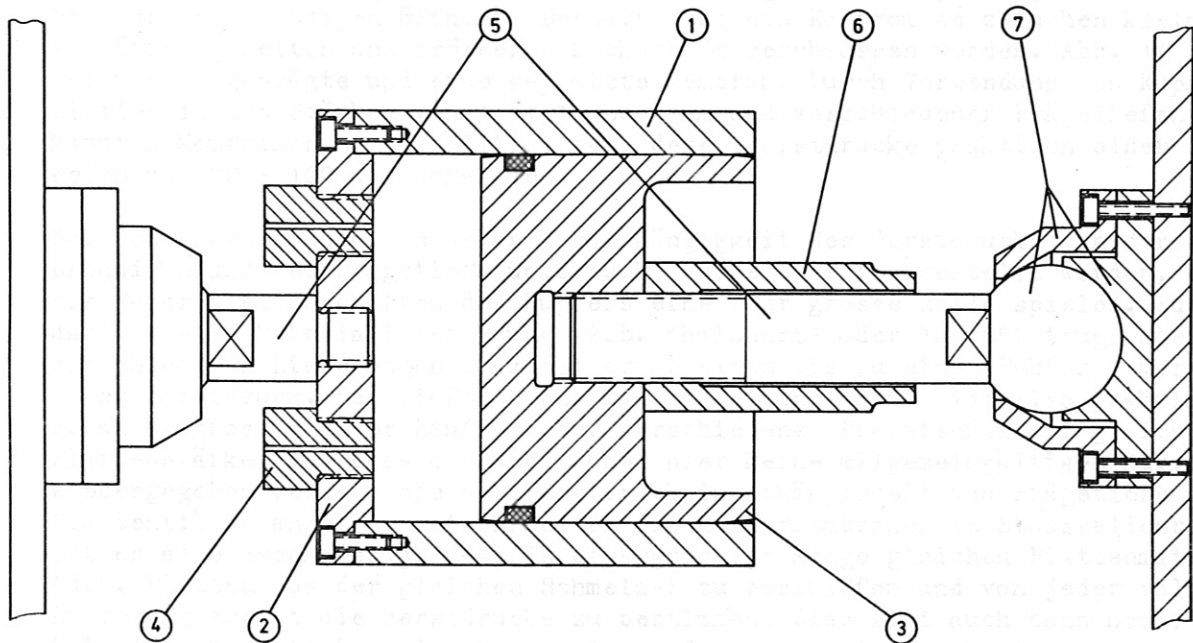


Abb. 13: Stossdämpfer

- 1 Zylinder (Hydraulikrohr)
- 2 Zylinderboden
- 3 Kolben mit O-Ring-Dichtung
- 4 Schraube mit Bohrung
- 5 Schubstangen
- 6 Kontermutter
- 7 Kugelgelenke

4. Membranen und Membranzonen

Die Membranen, die Hoch- und Niederdruckteil trennen, sollen in möglichst kurzer Zeit aufplatzen und dabei möglichst gleichmässig den ganzen Rohrquerschnitt freigeben. Ausserdem sollen von der Strömung keine Stücke von den Membranen abgerissen werden, da diese sonst im Messteil erhebliche Schäden anrichten könnten. In der hier beschriebenen Anlage werden Membranen aus Kupferblech verwendet, in die mit einer Prägevorrichtung^{+) Kreuzen als Sollbruchstellen eingedrückt werden. Durch Variation der Prägetiefe und die Wahl des Plattenmaterials (seiner Härte) lässt sich der Berstdruck bei 1 - 2 mm Blechstärke im Bereich von 50 - 100 atm auf etwa ± 3 atm genau festlegen. Beim Platzen reissen die Membranen längs der eingepprägten Linien auf, und die dreieckigen Lappen legen sich eng an die Rohrwand an. Um ein Abreissen dieser Lappen zu vermeiden, müssen die eingepprägten Linien echte Sollbruchstellen bilden, die Prägetiefe darf also im Verhältnis zur Plattendicke nicht zu gering sein. Bewährt haben sich Prägetiefen zwischen $\frac{1}{4}$ und $\frac{1}{2}$ der Membrandicke. Die von der Sicherheit gegen Abreissen der dreieckigen Lappen geforderte grössere Membrandicke bedingt allerdings längere Zeiten bis zur vollständigen Öffnung. Deshalb muss ein Kompromiss zwischen kleineren Öffnungszeiten und grösserer Sicherheit geschlossen werden. Abb. 14 zeigt eine geprägte und eine geplatze Membran. Durch Verwendung von Kupferplatten in den Stärken von 1; 1,5 und 2 mm und verschiedener Prägetiefen konnten Membranen hergestellt werden, deren Berstdrucke praktisch einen Bereich von 20 - 100 atm umfassten.}

Bei den Vorversuchen, in denen die Abhängigkeit des Berstdrucks von der Membrandicke und der Prägetiefe untersucht wurde, war festgestellt worden, dass die Materialeigenschaften des Kupfers eine sehr grosse Rolle spielen. Kupfer, das dieselbe Materialbezeichnung (z.b. "halbhart" oder "hart") trug, aber aus verschiedenen Lieferungen stammte, ergab einen bis zu einem Faktor 2 verschiedenen Berstdruck. Der Einfluss der Materialeigenschaften ist also praktisch genau so gross wie der Einfluss der verschiedenen Prägetiefen bei gleicher Plattenstärke. Aus diesem Grund können hier keine allgemeingültigen Kurven wiedergegeben werden, die den Berstdruck in Abhängigkeit von Prägetiefe und Plattenstärke angeben. Beim Arbeiten mit Kupfermembranen im Stosswellenrohr ist es also zweckmässig, jeweils eine grössere Menge gleichen Plattenmaterials (d.H. Platten aus der gleichen Schmelze) zu beschaffen und von jeder solchen Lieferung zuerst die Berstdrucke zu bestimmen. Dies gilt auch dann noch, wenn beim Arbeiten mit Doppelmembranen (worauf weiter unten noch eingegangen wird) die Toleranzgrenzen nicht mehr so eng gezogen werden müssen, um vergleichbare Bedingungen bei den Experimenten zu schaffen.

Gehalten werden die Membranen im Stossrohr von sogenannten "Membranzonen": Die "Einmembranzone" besteht aus zwei gegeneinander zentrierten Stahlflanschen, deren Bohrungen dem Durchmesser des Stossrohres entsprechen. Zwischen sie wird die Membran eingespannt. Die Dichtung erfolgt mit Hilfe von Gummi-O-Ringen in Nuten, die in die Flansche eingedreht sind. Es genügt, die Flansche mit Schrauben relativ locker zusammenzuhalten, denn das ganze System aus Flanschen und Membran wird dann zwischen Hochdruckrohr und Teleskopteil im Verspannrahmen zusammengepresst. Beim Füllen des Hochdruckrohres platzt die Membran, wenn der Berstdruck erreicht wird. Die Nachteile dieses Verfahrens sind, dass der Druck p_4 durch Wahl der effektiven Membrandicke nur auf ± 3 atm genau gewählt werden kann, und dass der Zeitpunkt des Platzens nicht in engen Grenzen vorgegeben werden kann.

+)

Im Anhang ist die Prägevorrichtung beschrieben

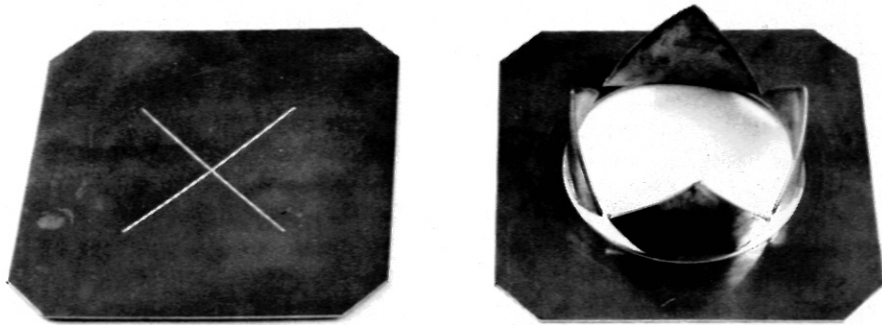


Abb. 14: Geprägte und geplatze Membran
Membrandicke 2 mm
Prägetiefe 0,8 mm
Berstdruck ca. 55 Atm.

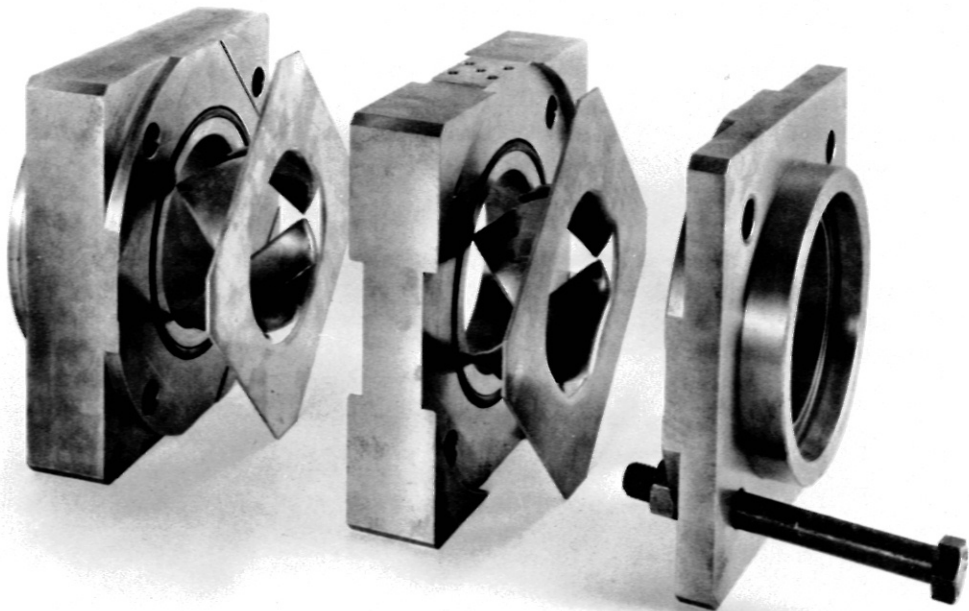


Abb. 15: Doppelmembranzone

Bei Benutzung einer "Doppelmembranzone" (siehe Abb. 15) werden die oben erwähnten Mängel vermieden. Sie besteht aus drei Stahlflanschen, zwischen die zwei Membranen eingespannt werden können, sodass zwischen Hoch- und Niederdruckteil noch ein kleines Zwischenvolumen (von ca. 250 ccm) entsteht. Die Dichtung erfolgt wieder mit Gummi-O-Ringen. Im Raum zwischen den Membranen lässt sich ein mittlerer Druck p_m einstellen, der zwischen den Drucken p_4 und p_0 im Hoch- und im Niederdruckteil liegt. Auf die beiden Membranen wirken also nur noch die Druckdifferenzen $(p_4 - p_m)$ und $(p_m - p_0)$. Die Berstdrucke der beiden Membranen müssen jeweils etwas höher gewählt werden als die obigen Differenzdrucke. Bei einer plötzlichen Absenkung von p_m platzt dann die erste Membran, wenn die Differenz $p_4 - p_m$ den Berstdruck erreicht. Der Druck in der Zwischenkammer wird danach plötzlich erhöht, und $p_m - p_0$ übersteigt den Berstdruck der zweiten Membran. Auch diese wird zum Platzen gebracht, und das Gas aus dem Hochdruckteil strömt in den Niederdruckteil. Der Druck in der Hochdruckkammer lässt sich bei dieser Arbeitsweise also im Rahmen der Messgenauigkeit von Experiment zu Experiment reproduzieren, und die Zeit des "Schusses" wird durch Öffnen des Gasauslassventiles am Zwischenvolumen vom Experimentator bestimmt.

Zweckmässigerweise wird der Druck in der Zwischenmembranzone ca. halb so gross wie der im Hochdruckteil gewählt. Die auf beiden Membranen wirkenden Differenzdrucke werden dann nahezu gleich gross, und es wird nur eine Art von Membranen benötigt. Beim praktischen Arbeiten mit der Anlage hat sich allerdings gezeigt, dass die Gleichmässigkeit des Aufplatzens der Membranen (die sich auf die Reproduzierbarkeit der Experimente auswirkt) vergrössert werden kann, wenn die dem Niederdruckteil zugekehrte Membran einen etwas kleineren Berstdruck zeigt als die zwischen Hochdruckteil und Zwischenmembranvolumen. Dies liegt vermutlich daran, dass die zweite Membran, deren Platzen erst das Ausströmen des Treibgases bewirkt, in diesem Fall mit einem höheren Stossfaktor (Verhältnis des plötzlich anstehenden Druckes zum Berstdruck) belastet wird und sich somit schneller öffnet. Um das Aufplatzen der zweiten Membran noch weiter zu beschleunigen, wurde die Doppelmembranzone so dimensioniert, dass die Lappen der aufplatzenden ersten Membran auf die zweite Membran aufschlagen und dadurch deren Öffnung einleiten und unterstützen.

Das Ablassen des Druckes aus der Kammer zwischen den Membranen geschieht von einem zentralen Schaltpult aus: Durch Knopfdruck wird ein elektromagnetisches Hochdruck-Hochvakuum-Ventil (Fabrikat Sogev) geöffnet, und das Gas strömt durch einen Schlauch in eine evakuierte 20 l - Stahlflasche (vgl. hierzu IV. 1., Vakuumsystem).

Bei der Konstruktion der Membranzonen im Rahmen des gesamten Hochdruckteiles wurde darauf geachtet, dass das Wechseln der Membranen möglichst rasch erfolgen kann. Auf diesen, für den Betrieb des Membranstössrohres wichtigen Vorgang wird bei der Beschreibung des Betriebes der Anlage noch näher eingegangen.

5. Teleskopverbindungen

Die bereits an verschiedenen Stellen dieses Berichts erwähnten teleskopischen Verbindungen dienen dazu, die enormen Kräfte, die beim Ausströmen des Treibgases aus dem Hochdruckteil oder beim Abbremsen des Gases im Pufferkessel entstehen, vom Niederdruckteil mit seinen meist stossempfindlichen Messkammern abzuhalten oder die dort wirkenden Kräfte auf ein Mindestmass zu reduzieren. Die Teleskopverbindungen bestehen im Prinzip aus zwei konzentrischen Rohren, die leicht ineinander gleiten. Das am Niederdruckteil angebrachte wird jeweils festgehalten. Der zweite Teil der Verbindung ist am Hochdruckteil bzw. am Pufferkessel befestigt und kann sich mitbewegen. Ein Teil der Kräfte wird allerdings noch über die Reibung zwischen den beiden Rohren übertragen. Die Dichtung zwischen den Rohren erfolgt mit Gummi-O-Ringen, die nicht nur aus vakuumtechnischen Gründen, sondern auch, um die Reibung herabzusetzen, mit Vakuumpfett eingerieben sind.

Da an die Teleskopverbindungen zum Hochdruckteil bzw. zum Pufferkessel ganz verschiedene Anforderungen gestellt werden, sollen sie getrennt behandelt werden:

An das zwischen Treib- und Laufrohr eingebaute Teleskop (siehe Abb. 16) werden besonders hohe Anforderungen gestellt. Es muss, da es sich im Niederdruckteil befindet, hochvakuumdicht sein. Es muss darüber hinaus aber auch hochdruckfest sein, denn bei der Erzeugung starker Stösswellen im Membranstossrohr wird der Fuss der entstehenden Verdünnungswelle vom ausströmenden Treibgas weit in den Niederdruckteil hineingespült. Über die Verdünnungswelle hinweg steigt der Druck jedoch an und kann am Ort des Teleskopstücks für kurze Zeit (ca. 10^{-2} sec) einen Wert von einigen 10 atm. erreichen. Obwohl der Spalt an der Stosstelle und zwischen den Teleskopteilen sehr schmal ist, dringt aufgrund der kleinen freien Weglänge bei diesen Drucken das Gas praktisch mit Schallgeschwindigkeit in den Spalt ein und versucht, die beiden Teleskopstücke auseinander zu drücken. Die Flächen, an denen dieser Druck angreifen kann, wurden zwar so klein wie möglich gemacht, trotzdem wirkt aber auf beide Teile des Teleskops in Rohrachsenrichtung noch eine Kraft von einigen hundert kp (ca. 400 kp bei 50 atm). Damit diese Kraft nicht über das Laufrohr auf die Messkammern übertragen werden kann, ist der niederdruckseitige Teil der Teleskopverbindung sehr fest (aber doch nach Höhe und Seite und in Achsenrichtung des Rohres justierbar) an einem massiven Rahmen befestigt, der mit Betonklötzen beschwert ist (siehe Abb. 8 und 16 und vgl. III. 2., Seite 21).

Der Druck wirkt natürlich auch auf die abdichtenden O-Ringe (die aus diesem Grund in tiefe Nuten eingebettet wurden), und das Teleskopstück lässt Bewegungen in axialer Richtung von nur ca. 5 mm zu. Das radiale Spiel darf nur 0,05 mm betragen (bei Toleranzen von derselben Grösse).

An das zweite Teleskopstück (siehe Abb. 17 und 18) werden weit geringere Anforderungen gestellt. Es verhindert zwar auch, dass über den Niederdruckteil Kräfte auf die Messkammern übertragen werden (die vom Puffervolumen ausgehen), doch liegt es bereits hinter der zweiten (dünnen) Membran, also ausserhalb des eigentlichen Hochvakuumbereichs. Es muss also nicht mehr hochvakuumdicht, auch nicht hochdruckfest sein. Deshalb konnte diese Teleskopverbindung so konstruiert werden, dass sie ein radiales Spiel von ca. 2 mm aufweist und eine axiale Verschiebung von 60 mm zulässt.

Der laufrohrseitige Teil dieses Teleskopstückes ist an der bereits erwähnten "hinteren Membranzone" fest angebaut (siehe Abb. 17 und 18). Mit ihr zusammen ist er wiederum auf einem massiven Stahlrahmen, der ebenfalls mit Betonklötzen beschwert ist, justierbar befestigt. Der mit dem Kessel zusammen bewegliche Aussenzylinder des Teleskops ist an einem Flansch des Kessels so angeschraubt, dass er unabhängig von der Justierung der Rollenlager und Laufschienen des Kessels noch konzentrisch zum Innenzylinder eingestellt werden kann.

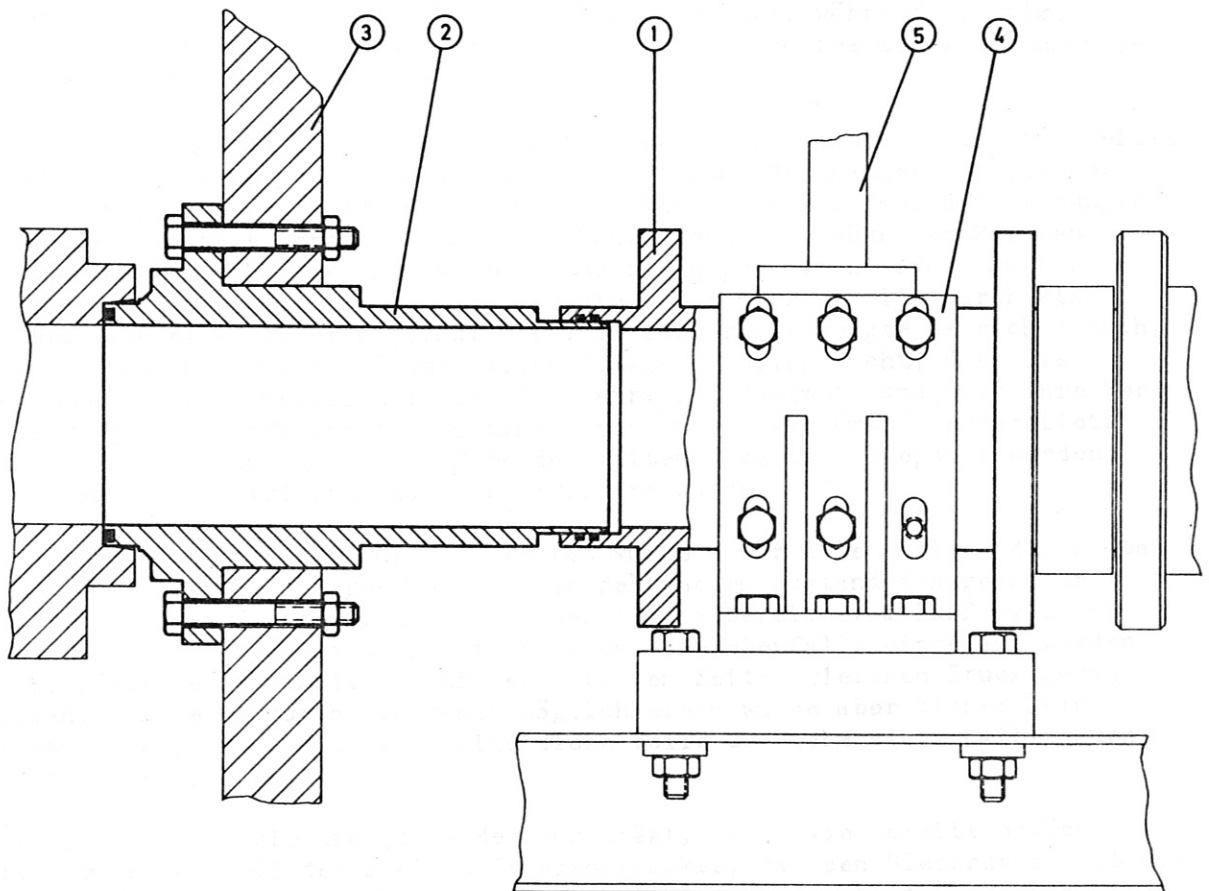


Abb. 16: Teleskopstück

- 1 Niederdruckseitiger Teil des Teleskopstücks
- 2 Hochdruckseitiger " " "
- 3 Endplatte des Verspannrahmens
- 4 Befestigung des Teleskopstücks, in allen Richtungen justierbar
- 5 Gas- und Vakuumanschluss

6. Membran zwischen Laufrohr und Pufferkessel und ihre Halterung

Zwischen das Laufrohr und die hintere Teleskopverbindung, also zwischen Niederdruckteil und Pufferkessel, ist eine zusätzliche, dünne Membran eingebaut. Um eine genügend hohe Reinheit des Gases, das von der Stosswelle aufgeheizt werden soll, zu gewährleisten, muss nämlich der ganze Niederdruckteil gut evakuierbar sein und eine genügend kleine Leckrate aufweisen. Diese Anforderungen werden zwar vom Laufrohr mit den Messkammern, nicht aber von dem als Puffervolumen benutzten Kessel erfüllt. Das Einfügen der dünnen Membran ermöglicht also erst die Benutzung des schon vorhandenen Kessels als Dumptank. Die dünne Membran erlaubt weiterhin, den Niederdruckteil zur Erhöhung der Reinheit des Arbeitsgases ohne allzugrossen Gasverbrauch (durch das grosse Kesselvolumen) mit dem - evtl. teuren - Testgas zu "spülen".

Die Membran besteht aus einer dünnen Metallfolie, die aber dick genug ist, um auch noch einen Differenzdruck von 1 atm auszuhalten. Dadurch wird ein unabhängiges Evakuieren von Laufrohr und Pufferkessel möglich. Kupfermembranen von ca. 0,05 mm Dicke haben sich gut bewährt, während Plastikmembranen zu erheblichen Verunreinigungen des ganzen Rohres mit Verbrennungsrückständen führten.

An der Membran wird die ursprüngliche Stosswelle reflektiert, und die reflektierte Welle läuft gegen die Strömung in Richtung Messkammer zurück. Der Abstand zwischen Membran und Messort ist aber so gross, dass die Messungen nicht mehr gestört werden.- Durch die Wahl wesentlich dünnerer Membranen könnte theoretisch erreicht werden, dass diese praktisch sofort nach Auftreffen der Stosswelle platzen und so die reflektierte Welle durch eine Verdünnungswelle wieder abgebaut wird. In der Praxis zeigte es sich jedoch, dass die Beschaffung so dünner Folien Schwierigkeiten macht, dass die Häufigkeit von Leckstellen in den Folien rapide zunimmt, und dass ihre Verarbeitung (Knitterfreiheit beim Einspannen) zu grosse Umstände bereitet. Ausserdem muss dann das Gas auf beiden Seiten simultan abgepumpt werden, was wiederum zusätzlichen Aufwand erfordern würde.

In der Haltevorrichtung für die Membran wurde - für alle Fälle - der Einbau eines Vakuumventils vorgesehen, das in geöffnetem Zustand den gesamten Rohrquerschnitt freigibt. Es sollte den Membranbereich vom Puffervolumen trennen. Eine Umwegleitung um die Membran, die ebenfalls eingebaut werden kann, würde beim Evakuieren auf deren beiden Seiten gleichen Druck garantieren. Von den dadurch gegebenen Möglichkeiten wurde aber bisher kein Gebrauch gemacht. (In Abb. 18 sind diese Teile der Uebersicht halber auch nicht eingezeichnet.)

Die Vorrichtung, die die dünne Membran trägt, ist - wie bereits erwähnt - mit dem festen Teil des zweiten Teleskopstückes, das den Niederdruckteil vom Puffervolumen "entkoppelt", zu einer Einheit zusammengebaut. Das ganze Bauelement ist fest, aber justierbar, mit dem zweiten Betonklotz verbunden. Abb. 17 zeigt die Kombination aus Membranträger und zweitem Teleskopstück. Sie lässt, zusammen mit Abb. 18 die Wirkungsweise dieser Baugruppe erkennen. Die Rolle mit der als Membran dienenden Folie ist an der Seite der Membranhalterung angebracht (s. Abb. 17). Der Folienstreifen (F) läuft dann zwischen zwei Flanschen (1) und (2) der Membranzone hindurch. Der eine dieser Flansche (1) ist (mit Hilfe von (9) usf.) fest mit dem Betonklotz und dem

Niederdruckrohr verbunden, der zweite (2) kann über einen kurzen Metallbalg (3) um einige mm verschoben und mit einem Hebel (4) über zwei Keilstücke (5) fest gegen den anderen Flansch gepresst werden. Zwei Federn (6) ziehen die Flansche (1) und (2) wieder auseinander, wenn der Hebel zurückgelegt wird. Die Dichtung zwischen den Flanschen und der dazwischenliegenden Membran erfolgt durch zwei in die Platten eingelassene O-Ringe (7). Zum Wechseln der Membran müssen also nur die Flansche (1) und (2) auseinandergefahren und nach dem Weiterziehen der Folie wieder zusammengepresst werden. Das andere Ende des Balges (3) ist in den festen Teil des Teleskopstückes (8) eingelötet und mit diesem zusammen (mit Hilfe von (10) usf.) ebenfalls fest mit dem Betonklotz verbunden. Die Schrauben (11), (12), (13) und (14) ermöglichen eine Justierung der Membranhalterung in Achsenrichtung, in der Höhe und nach der Seite. Ausserdem kann nach Lockern der Schrauben (11) der obere Teil der Halterung zwischen den Rollen an den Schrauben (14) verschoben werden. Dieser Verschiebung können ganze Teile des Laufrohres incl. Zwischenstücke und Messkammer folgen, sodass an beliebiger Stelle die Flanschverbindungen gelöst und Rohrstücke bzw. Messkammern ausgewechselt werden können.

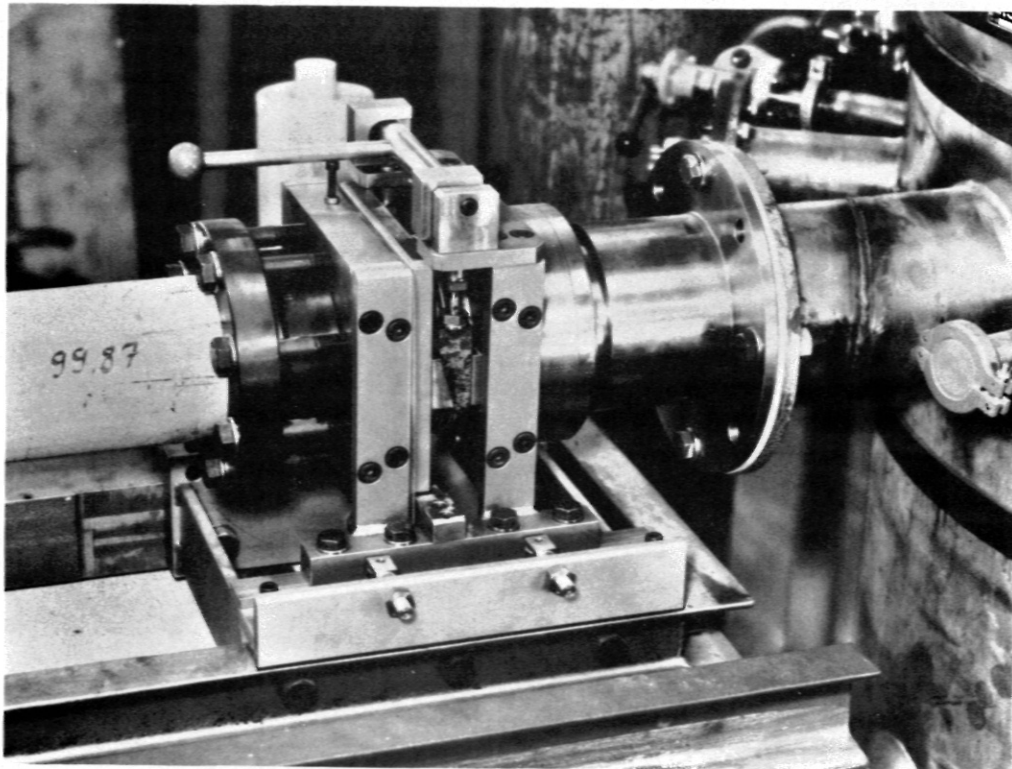
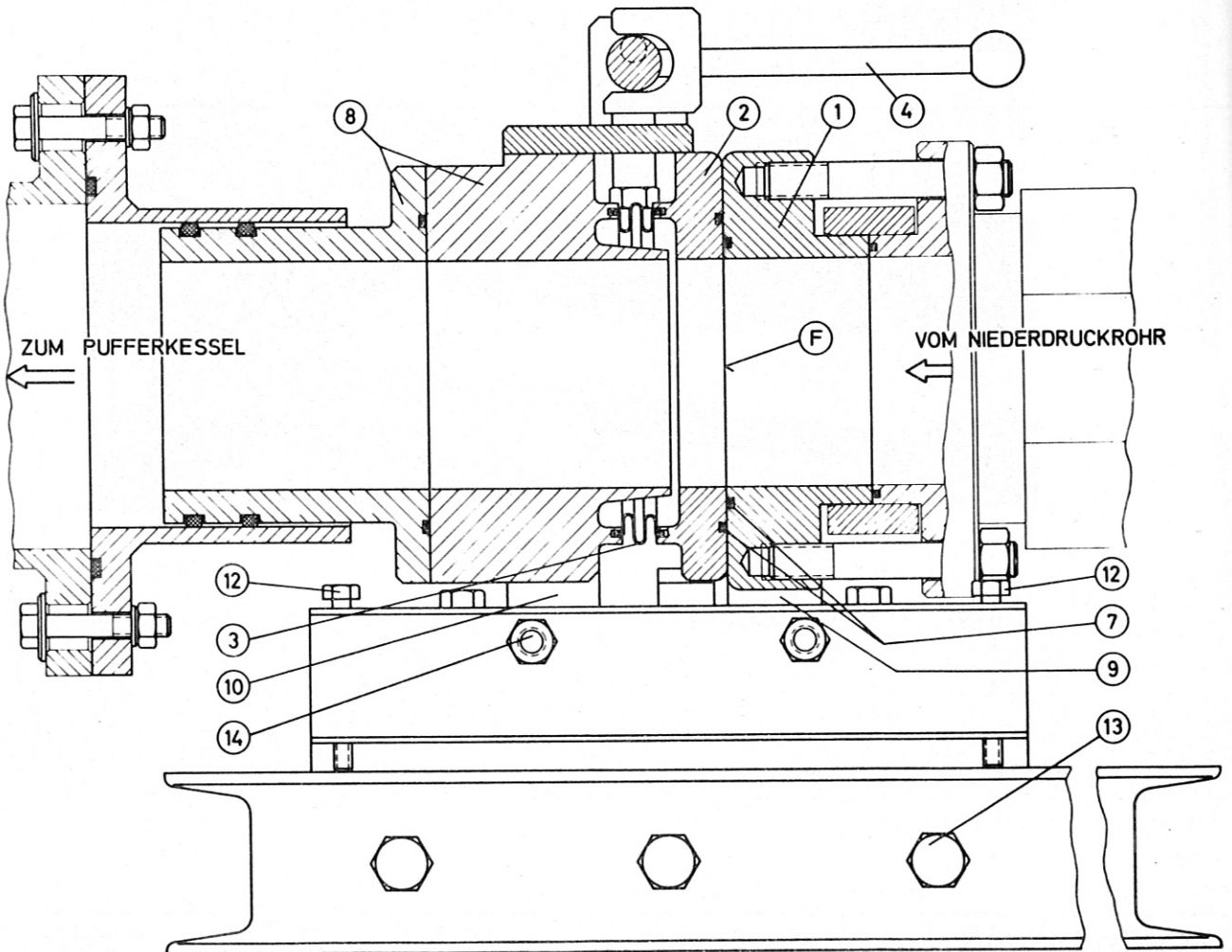
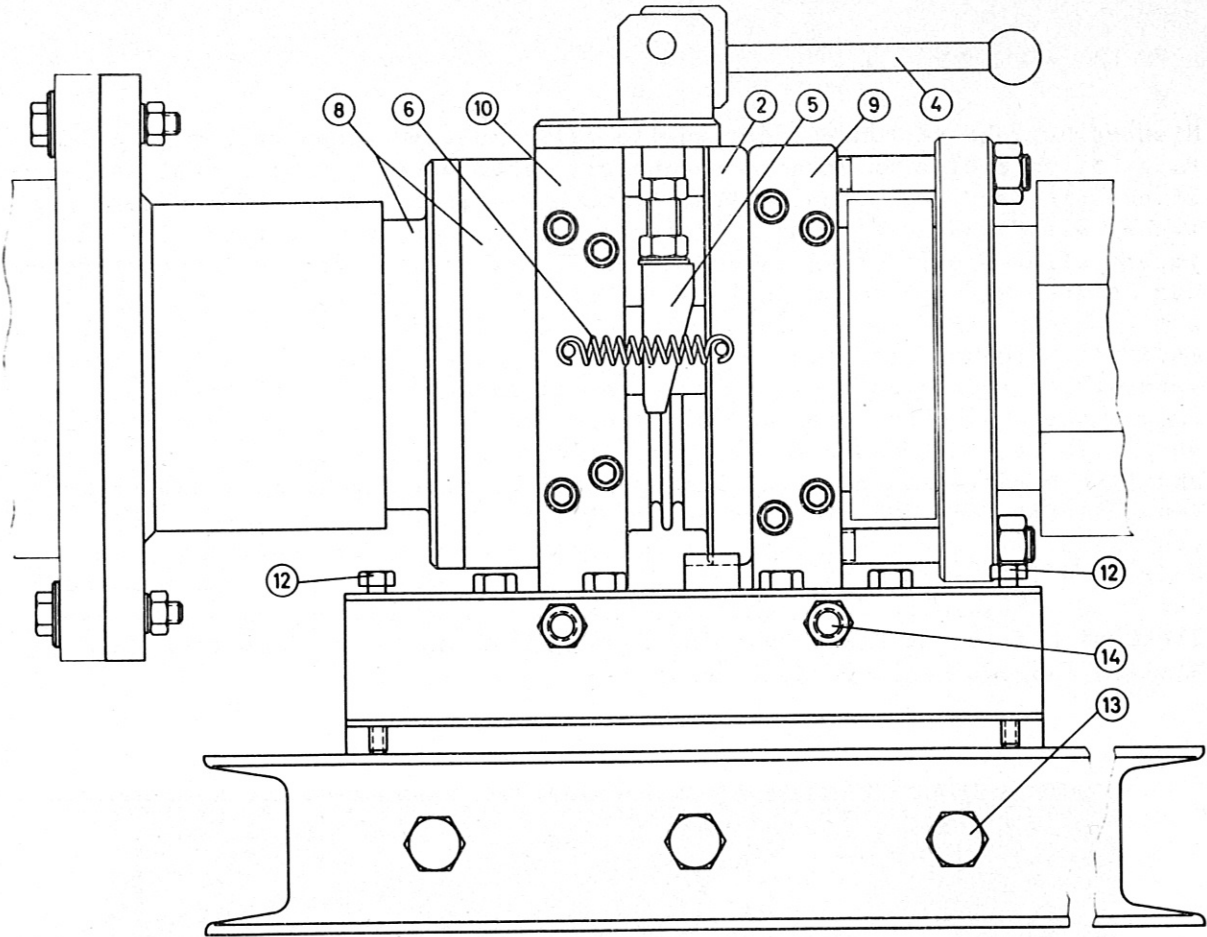


Abb. 17: Membranzone



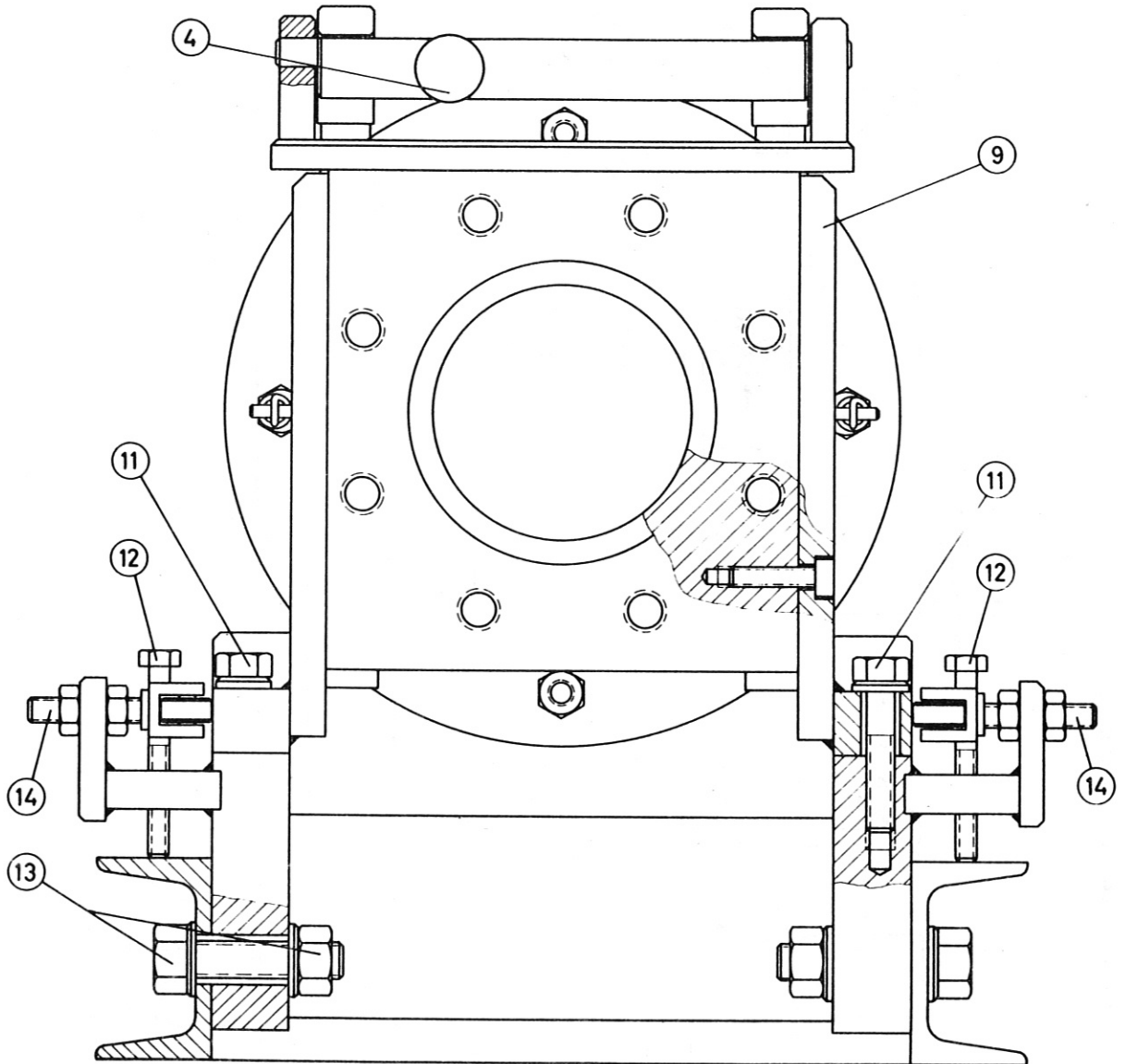


Abb. 18: Membranzone

- 1 Fester Teil der Membranzone
- 2 Beweglicher Teil der Membranzone
- 3 Balg
- 4 Exzenterhebel
- 5 Anpresskeil
- 6 Rückholfeder
- 7 O-Ring-Dichtung
- 8 Feste Teile des Teleskopstücks
- 9 Vertikalverbindung Teil 1 - Rahmen
- 10 " Teil 2 - Rahmen
- 11 Feststellschrauben
- 12 Vertikaljustierung
- 13 Befestigungsschraube
- 14 Horizontaljustierung
- F Kupferfolie als Membran

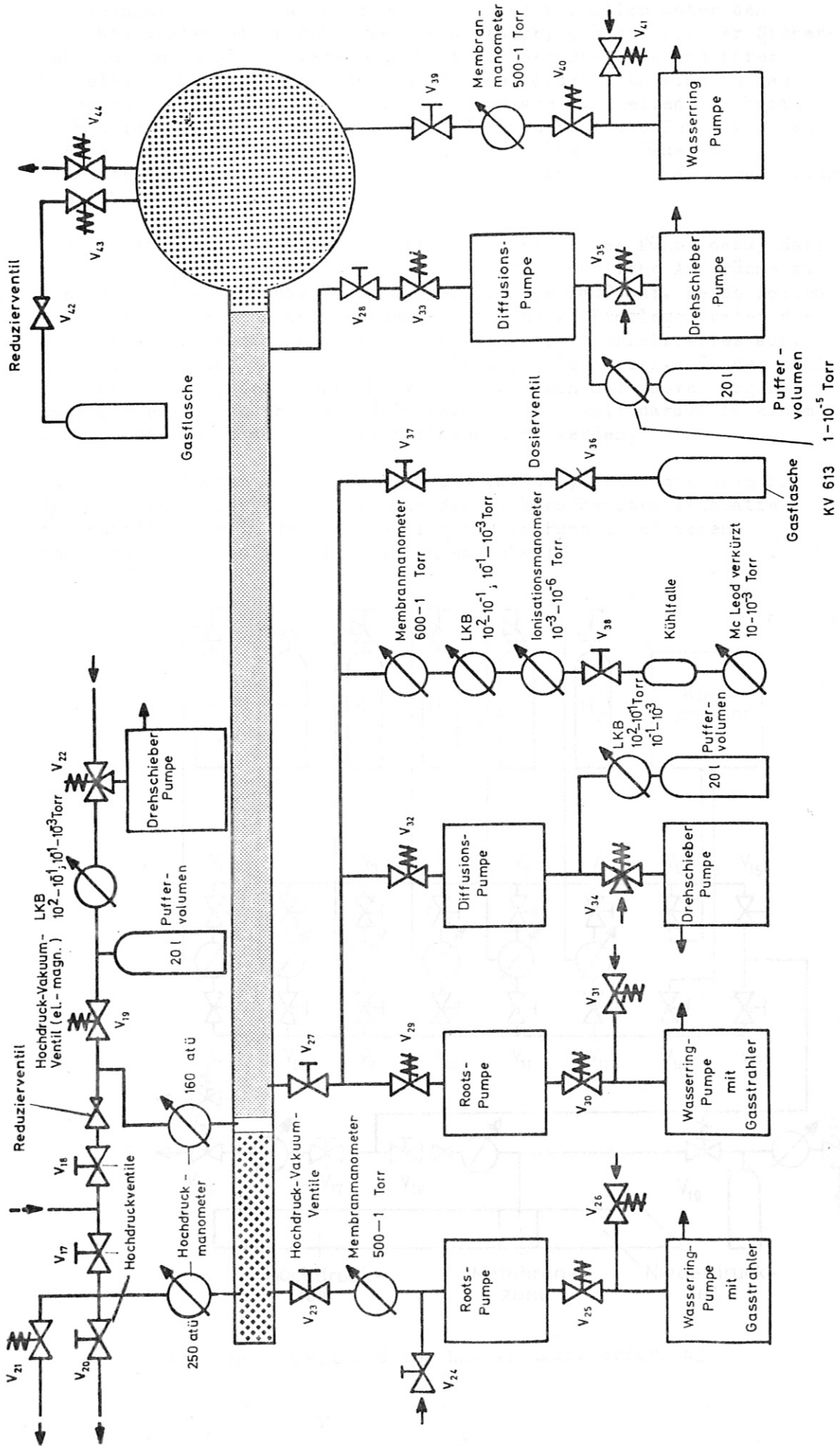


Abb. 19: Prinzipskizze des Vakuumsystems

IV. Gasversorgung und Vakuumsystem

Der mechanische Aufbau des Stossrohres war vor allem unter den Gesichtspunkten einer schnellen Schussfolge, grösstmöglicher Sicherheit und universeller Verwendbarkeit der Gesamtanlage und ihrer Einzelteile konzipiert worden. Aehnliche Forderungen sind an das Gasversorgungssystem und an die Vakuumanlage zu stellen. Es hatte sich bald gezeigt, dass nicht der Membranwechsel die Zeit zwischen zwei Schüssen bestimmt, sondern dass vor allem die Dauer des Evakuierens, aber auch der druckgenaue Gaseinlass in den Niederdruckteil die Schussfolge begrenzt.

Die Forderung nach hoher Reinheit des Arbeitsgases führt dazu, dass an den entsprechenden Teil der Gasversorgung ähnliche Ansprüche zu stellen sind wie an das Vakuumsystem für das Laufrohr. Beide sollen daher gemeinsam behandelt werden.- Ganz andere Probleme treten dagegen bei der Hochdruckanlage zur Füllung des Antriebsteiles auf. Seine Evakuierung ist relativ unproblematisch.- Da der dritte Teil der Anlage, der Dumptank, vakuumtechnisch und gasversorgungsmässig wiederum anders behandelt werden muss, soll darauf in einem dritten Abschnitt auch getrennt eingegangen werden.

In den Abbildungen 19 und 20 sind das Vakuumsystem (gemeinsam mit der Niederdruckgasversorgung) und das Hochdrucksystem schematisch dargestellt. Die in der Anlage eingebauten Pumpen und deren Leistungen sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

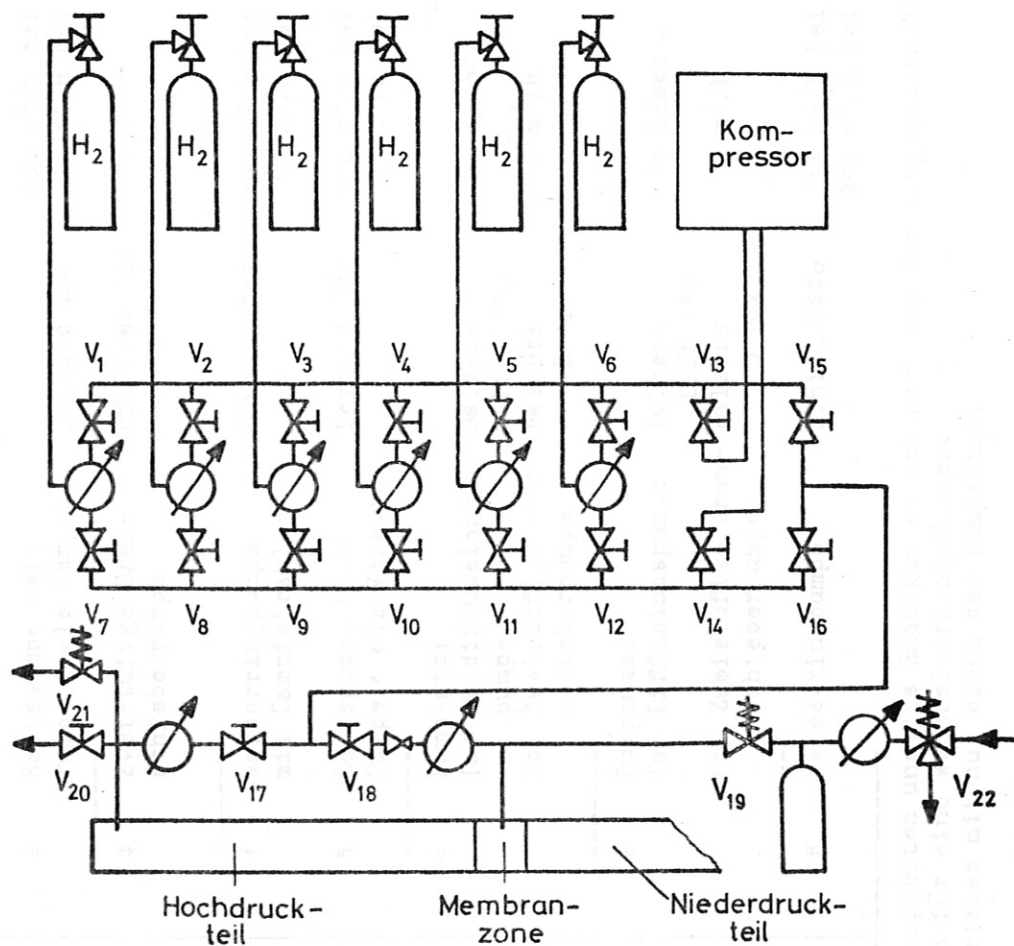


Abb. 20: Schaltbild der Hochdruckgasversorgung

Tabelle 2

	Installierte Pumpen	Saugleistung	Arbeitsbereich	Pumpzeiten	
Nr.	Art	Typ			
Hd-Teil	1	Wasserringpumpe mit Dampfstrahler	Sihl L 3708	102 m ³ /h bei 760T 51 m ³ /h bei 25T	760 - 25 T 10sec von 760 - 25 T
M-Zone	2	Rootspumpe (mit Pumpe 1 als Vorp.)	Leybold Z05	100 m ³ /h bei 25T 90 m ³ /h bei 10 ⁻² T	25 - 10 ⁻² T 15 sec von 25 - 10 ⁻² T
	3	Zweistufige Dreh-schieberpumpe	Pfeiffer Ro3	3 m ³ /h	760 - 10 ⁻² T läuft dauernd während des Experiments
Nd-Teil	4	Wasserringpumpe mit Dampfstrahler	Sihl L 3708	102 m ³ /h bei 760T 51 m ³ /h bei 25T	760 - 25 T 50 sec von 760 - 25 T x)
	5	Rootspumpe (mit Pumpe 4 als Vorp.)	Leybold Z05	100 m ³ /h bei 25T 90 m ³ /h bei 10 ⁻² T	25 - 10 ⁻² T 3 min von 25 - 10 ⁻² T x)
	6	Pumpsatz: (a) Oeldiffusionspumpe (b) Zweistufige Dreh-schieberpumpe	Balzers Diff 170 Balzers D 405	170 l/sec 5 m ³ /h	3 min von 3.10 ⁻² - 5.10 ⁻⁴ T x) xx)
	7	Pumpsatz: (a) Diffusionspumpe (b) Zweistufige Dreh-schieberpumpe	Balzers Diff 170 Balzers D 405	170 l/sec 5 m ³ /h	3 min von 3.10 ⁻² - 5.10 ⁻⁴ T x) xx)
Pufferkessel	8	Wasserringpumpe	Sihl L 5620	340 m ³ /h bei 760T 210 m ³ /h bei 25T	760 - 25 T 1 min von 760 - 30 T

x) Die Pumpzeiten und die Endvakua werden auch von der eingebauten Messkammer bestimmt. Die hier angegebenen Daten gelten für eine Wechselwirkungskammer.
xx) Bei Betrieb mit nur einem der Pumpsätze.

1. Vakuumsystem und Gasversorgung des Hochdruckteils und des Zwischenmembranbereichs

Der Hochdruckteil wird, wie in III bereits erwähnt, durch eine Bohrung im Abschlussstück des Treibrohres evakuiert. Durch ein Ventil (V_{23}), das sowohl hochdruckfest als auch hochvakuumdicht ist und einen grossen Oeffnungsquerschnitt ($6,3 \text{ cm}^2$) aufweist, ist der Hochdruckteil von dem zugehörigen Vakuumsystem getrennt ^{x)}. Ein Metallbalg von ca. 1 m Länge verbindet das Ventil, das die Bewegungen des Treibrohres mitmacht, mit den Leitungen des Pumpsystems, das so vor Stössen geschützt ist.

Der Pumpsatz zum Evakuieren des Treibrohres besteht aus einer Wasserringpumpe und einer Rootspumpe. Letztere wird automatisch erst dann zugeschaltet, wenn ein Vorvakuum von ca. 25 Torr erreicht ist. Die technischen Daten des Aggregates können, wie die aller anderen installierten Vakuumpumpen, der Tabelle 2 entnommen werden. Um den Lärm in den Experimentierräumen möglichst gering zu halten, wurde die Wasserringpumpe im Keller des Laborgebäudes untergebracht.

Die entsprechend lange Rohrleitung, der Oeffnungsquerschnitt des Hochdruck-Vakuum-Ventils (V_{23}) und der Durchmesser der Bohrung im Abschlussstück des Hochdruckteils bestimmen im wesentlichen die Pumpgeschwindigkeit dieses Vakuumsystems. Nach einer Pumpzeit von ca. 30 sec (s. Tabelle 2) wird ein Druck von 10^{-2} Torr erreicht. Der Pumpvorgang wird mit einem Membranmanometer (Heraeus VM-M, 500 - 1 Torr) und einem Wärmeleitungsmanometer (LKB, $10 - 10^{-3}$ Torr) kontrolliert. Die Messstellen liegen hinter dem Hochdruck-Vakuum-Ventil (V_{23}), sodass die Manometer nicht durch Ueberdruck zerstört oder leck werden.

Durch Evakuieren des Hochdruckteiles auf 10^{-2} Torr wird selbst bei dem geringen Fülldruck von 10 atü eine Reinheit des Treibgases von einigen ppm ermöglicht, was der garantierten Reinheit des benutzten Wasserstoffs entspricht.- Die Leckzahl (gemessen wurden für den Hochdruckteil $3 \cdot 10^{-4}$ Torr.l/sec) spielt keine Rolle, da bei den Ueberdrücken im Treibrohr bei kleinen Lecks das ausströmende Treibgas ein Eindringen von Luft trotz der Partialdruckdifferenz praktisch verhindert.

Durch Oeffnen des Ventils V_{24} kann das gesamte Membranstossrohr nach dem Schuss über V_{23} so gelüftet werden, dass kleine Membranbruchstücke, evtl. vorhandene kleine Fremdkörper oder grössere Schmutzpartikel mit dem Luftstrom in das Puffervolumen gespült werden.

Die Zwischenmembranzone wird über das Ventil V_{19} gemeinsam mit einem 20-l-Puffervolumen von einer kleinen zweistufigen Drehschieberpumpe (s. Tabelle 2) bis zu einem Endvakuum von 10^{-2} Torr evakuiert. Dieser Druck wird ebenfalls mit einem Wärmeleitungsmanometer (LKB) kontrolliert. Er gewährleistet einen Reinheitsgrad des Gases, der dem des Füllgases selbst entspricht. Die Pumpe wird während des Experimentierbetriebes nicht abgeschaltet. Auch das Oeffnen des

x) Da ein Ventil der oben beschriebenen Art nicht im Handel erhältlich ist, musste es selbst entworfen und gebaut werden.
(Die Konstruktion ist im Anhang (2) kurz beschrieben.)

elektromagnetisch betätigten Hochdruck-Vakuum-Ventils V_{19} zur Auslösung der Stosswelle schadet der Pumpe nicht, da das Puffervolumen in Verbindung mit zweckmässig gewählten Leitungsquerschnitten die Druckstösse genügend dämpft.

Der prinzipielle Aufbau der Druckgasanlage, die das Membranstosswellenrohr mit Treibgas (Wasserstoff) von maximal 100 atü Druck versorgt, ist in Abb. 20 leicht zu überblicken: Der Wasserstoff wird aus 6 Vorratsflaschen (je 40 Liter, Fülldruck 150 bzw. 200 atü) entnommen. Von diesen Flaschen führen Hochdruckkupferrohre zu einem Schaltpult und sind dort mit je einem Manometer und zwei Ventilen verbunden, die die Flaschen von zwei Sammelleitungen trennen. Parallel zu den Flaschen ist, wiederum zwischen zwei Ventilen (V_{13} und V_{14}), ein zweistufiger Kompressor (Dräger U 200 K/G) angeschlossen. Jede Sammelleitung kann über ein Ventil (V_{15} oder V_{16}) mit der Hochdruckleitung zum Bedienungsstand des Membranstosswellenrohres verbunden werden. Von dort aus kann dann das Gas über das Ventil V_{17} in den Hochdruckteil und über V_{18} und einen Reduzierer durch einen Hochdruckschlauch in die Kammer zwischen den Membranen eingelassen werden. Länge und Flexibilität des Hochdruckschlauches gestatten es auch, die gesamte Doppelmembranzzone zum Wechseln der Membranen aus dem Verspannrahmen herauszuziehen. Der Druckminderer erlaubt es, den Druck in der Doppelmembranzzone passend zum Berstdruck der Membranen und zum Druck im Hochdruckteil zu begrenzen.

Die Drucke im Hochdruckteil und in der Zwischenmembranzzone können mit Hilfe von zwei Manometern für Feinmessungen (Dräger, Gütekl. 1) auf ± 1 atm genau eingelassen werden. Zum Ablassen des Druckes aus der Doppelmembranzzone in das evakuierte 20-l-Puffervolumen, d.h. zum Auslösen des "Schusses", dient das bereits erwähnte elektromagnetische Hochdruck-Vakuum-Ventil (V_{19}), das vom Bedienungs-pult der Membranrohranlage aus gesteuert werden kann.

Mit Hilfe der Ventile V_1 bis V_6 kann wahlweise jede Flasche schnell mit dem Hochdruckteil verbunden werden. Dadurch kann der Wasserstoff zuerst aus den Flaschen entnommen werden, deren Druck schon weit unter den gewünschten Enddruck im Hochdruckteil abgesunken ist. Die Flaschen können somit weitgehend entleert werden. Das restliche Gas kann dann noch mit Hilfe eines Kompressors über die Ventile V_{13} und V_{14} in eine andere Flasche umgepumpt und dabei komprimiert werden. Auf diese Weise ist es möglich, den Flascheninhalt ohne allzuvielen Schaltvorgänge beim Füllen des Hochdruckteils nahezu vollständig auszunützen.

Ueber das Ventil V_{20} kann der Wasserstoff langsam aus dem Hochdruckteil in einen Schornstein abgelassen werden. Im Gefahrenfall kann dies in wenigen Sekunden über ein spezielles Notventil (V_{21}) geschehen. Dieses Ventil sitzt direkt auf dem Abschlussstück des Hochdruckrohres und gibt bei Betätigung eine grosse Oeffnung frei. Das Treibgas kann dann über eine eigene weite Rohrleitung schnell durch den Schornstein über Dach abströmen.

Vor der Inbetriebnahme der Hochdruckeinrichtung wurde das gesamte Leitungssystem bis zu den Vorratsflaschen hin mit dem Vakuumsystem des Hochdruckrohres evakuiert. Nach Umbauten und beim Anschluss neuer Gasflaschen werden die entsprechenden Leitungen auf die gleiche Weise abgepumpt. Dann bleiben die einzelnen Leitungsteile getrennt immer unter Ueberdruck von Wasserstoff.

2. Vakuumsystem des Niederdruckteils und seine Versorgung mit Arbeitsgas

Besondere Anforderungen werden an den Reinheitsgrad des Gases im Niederdruckteil des Membranstosswellenrohres und somit an die Vakuumbedingungen gestellt. Aus diesem Grund wurden für den Niederdruckteil ein Endvakuum von 10^{-5} Torr und eine Leckrate von 10^{-5} Torr.l/sec gefordert. Das Pumpsystem wurde ausserdem noch unter dem Gesichtspunkt möglichst kleiner Pumpzeiten, d.h. möglichst schneller Schussfolge zusammengestellt.

Das Evakuieren des Niederdruckteiles geschieht, wie bereits erwähnt, durch ziemlich grosse Oeffnungen (vom Querschnitt des freien Durchgangs in den selbst konstruierten Hochdruck-Vakuum-Ventilen V_{27} und V_{28}) an den beiden Enden des Niederdruckteiles. Die erste Pumpstelle befindet sich im festen Teil des ersten Teleskopstückes (vgl. Abb. 5 und 6), die zweite in einem Zwischenstück (s. Abb. 10), das vor der zweiten Membranzone (s. Abb. 17 und 18) angebracht ist. Bohrungen an diesen Stellen in der Wandung des Niederdruckteils können keine merkliche Störung der Stosswelle und des stosswellenaufgeheizten Plasmas am Messort hervorrufen. Am Ort der vorderen Bohrung ist die Stosswelle überhaupt noch nicht ausgebildet. Erreicht sie aber die hintere Bohrung, so ist die Messung bereits abgeschlossen.

Als Pumpsystem für den Grob- und Feinvakuumbereich wird wiederum eine Wasserringpumpe mit einer in Reihe geschalteten Rootspumpe benutzt. Es ist an das Ventil V_{27} (in der Nähe des Hochdruckteiles und direkt am Bedienungsstand) angeschlossen und evakuiert den Niederdruckteil in ca. 3 Minuten bis auf $2 \cdot 10^{-2}$ Torr. Nach Erreichen dieses Druckes werden die Pumpen mit elektrischen Ventilen (V_{29} und V_{30}) vom Niederdruckteil abgetrennt und dann abgeschaltet und belüftet. Gleichzeitig wird durch Oeffnen der Ventile V_{32} und V_{33} auf zwei Diffusionspumpen mit eigenen Vorpumpen und Pufferolumina umgeschaltet. Eines dieser Aggregate ist parallel zu Rootspumpe und Wasserringpumpe geschaltet, das zweite ist am anderen Ende des Laufrohres hinter V_{28} angebracht. Die Verwendung zweier Pumpen erhöht die Sauggeschwindigkeit und verhindert, dass sich im Rohr bei niedrigen Drucken ein Druck- und Dichtegradient ausbildet.

Die Pumpzeiten werden auch hier wieder vom Querschnitt des freien Durchgangs der Hochdruck-Vakuum-Ventile (V_{27} und V_{28}) mitbestimmt, mit denen die Pumpen vom Niederdruckrohr abgetrennt werden können. Diese Ventile schützen die Pumpen, die Messgeräte und das Gasversorgungssystem vor Zerstörung durch Stosswellen oder zu hohen Druck. Das Endvakuum von einigen 10^{-5} Torr (je nach benutzter Messkammer) wird ungefähr 10 Minuten nach dem Einschalten der Diffusionspumpen erreicht.

Parallel zu den Pumpaggregaten an der vorderen Pumpstelle liegen (s. Abb. 19) auch die Gasversorgung des Niederdruckteils und die Messgeräte, mit denen der Druck darin gemessen wird. Zur Druckmessung werden verschiedene Instrumente benutzt:

- a. Membranvakuummeter Heraeus VM-M (500 - 1 Torr)
im Grobvakuumbereich mit Impulsgeber zum Einschalten der
Rootspumpe bei 25 Torr.
- b. Wärmeleitungsmanometer LKB (10^{+2} - 10^{-1} , 10^{-1} - 10^{-3} Torr)
für Feinvakuummessungen mit Impulsgebern zum Abschalten
der Wasserring- und der Rootspumpe und zum Einschalten
der Diffusionspumpe.
- c. Ionisationsmanometer Heraeus VM-I2 (10^{-3} - 10^{-6} Torr)
im Hochvakuumbereich zur Kontrolle des Endvakuums.
- d. Mc-Leod-Kompressions-Vakuummeter Heraeus VM-KK (10 - 10^{-3} Torr)
(verkürzt und über Kühlfalle angeschlossen) für dosierten
Gaseinlass im Grob- und Feinvakuumbereich.

Das Arbeitgas wird aus einer Vorratsflasche über ein Dosierventil (V_{36}), das auf seine Vakuumdichtigkeit geprüft wurde, und ein Vakuumventil (V_{37}) entnommen und durch den gemeinsamen Anschluss dem Niederdruckteil zugeführt. Das Ventil V_{37} erlaubt dabei, die Gasvorratsflasche zu wechseln, ohne allzuviel Luft in das Vakuumssystem einzulassen. Ausserdem kann auch der Leitungsteil auf der Sekundärseite des Dosierventils V_{36} unter Ueberdruck bleiben.

Der Einfluss des Endvakuums auf die Reinheit des Gases im Niederdruckteil lässt sich durch mehrmaliges Spülen des Laufrohres mit dem Arbeitgas verkleinern. Die Reinheit des Gases kann auf diese Weise besonders bei kleinen Betriebsdrücken erheblich erhöht werden.

Die Leckzahl des gesamten Niederdruckteils (ohne Pufferkessel) hängt wesentlich von der benutzten Messkammer ab. Mit einigen Messkammern konnte nur ein Wert von 10^{-4} Torr.l/sec erreicht werden. Nimmt man an, dass die Zeit zwischen Abschalten der Pumpen und Platzen der Membran 3 Minuten beträgt, so ist im Niederdruckteil (mit einem Volumen von ca. 100 Litern) der Druck um ungefähr $2 \cdot 10^{-4}$ Torr angestiegen. Dies bedeutet für den kleinsten in Betracht gezogenen Arbeitsdruck p_0 von 0,1 Torr eine Verunreinigung von 2% , bei einem Druck von $p_0 = 10$ Torr nur noch 20 ppm. Vor allen Experimenten muss also geprüft werden, ob diese Verunreinigungen stören und die Messergebnisse verfälschen können. In vielen Fällen spielt der Einfluss der Verunreinigungen jedoch keine Rolle, da er von Fehlern von einigen % bei der Druckmessung verdeckt wird. Eine Verbesserung der Druckmessung ist also durchaus erwägenswert.

3. Vakuumsystem des Pufferkessels und seine Versorgung mit Schutzgas

Der als Puffervolumen dienende 800-l-Kessel wird über ein Plattenventil grosser Oeffnung (NW 65) (V_{39}) ebenfalls mit einer Wasserringpumpe auf ungefähr 25 Torr evakuiert. Beim Erreichen dieses Druckes schaltet sich die Pumpe automatisch ab. Würde der Kessel nicht evakuiert, so wäre bei Druckausgleich nach dem Schuss der im ganzen Stossrohr herrschende Druck um nahezu 1 atm höher. Vor allem aber käme es zu einer explosionsartigen Verbrennung des in den Kessel einströmenden Wasserstoffs mit der darin befindlichen Luft, wobei das heisse Plasma als "Zünder" wirken würde. Dies würde natürlich zu einer Zerstörung der ganzen Anlage führen. Sogar die restlichen 25 Torr Luft bewirken noch eine explosionsartige Verbrennung eines Teils des Wasserstoffs. Deshalb wird der Kessel nach dem ersten Evakuieren mit Stickstoff bis zu einem Druck von ca. 200 Torr aufgefüllt (um die dünne Membran nicht zu gefährden), dann wieder auf 25 Torr abgepumpt und hierauf nochmals mit Stickstoff als Schutzgas auf 50 Torr aufgefüllt. Es bleibt somit nur ein Bruchteil von ca. $\frac{1}{175}$ des ursprünglichen Volumens (entsprechend 5 Ltr. Luft bzw. 1 Ltr. Sauerstoff bei Normalbedingungen) im Kessel zurück. Der Stickstoff wird über einen Druckminderer (V_{42}) und ein elektrisches Ventil (V_{43}) einer Vorratsflasche entnommen und der Kesseldruck mit Hilfe eines Membranmanometers mit Fernanzeige eingestellt. Dieses Manometer steuert auch das Abschalten und Belüften der Wasserringpumpe mit Hilfe der Ventile V_{40} und V_{41} .

Am Kessel ist noch ein weiteres Ventil (V_{44}) angebracht, über das der Wasserstoff nach dem Experiment *s o f o r t* abgelassen werden kann. Es muss allerdings darauf geachtet werden, dass dieses Ventil nur betätigt wird, wenn der Wasserstoff im Kessel unter Ueberdruck steht. Andernfalls strömt Luft durch das Ventil in den Kessel, und es bildet sich Knallgas. Steht der Wasserstoff nach dem Experiment unter Unterdruck, so muss das Ventil geschlossen bleiben. In diesem Fall wird zuerst die Wasserringpumpe eingeschaltet, und, wenn die Leitungen leergepumpt sind, das Plattenventil (V_{39}) zum Kessel geöffnet. Dann strömt ziemlich reiner Wasserstoff durch die Leitungen und die Pumpe, und die Explosionsgefahr ist erheblich reduziert.

V. Sicherheitssystem

Das Arbeiten mit Wasserstoff erfordert immer besondere Sicherheitsmassnahmen, denn zusammen mit Luft bildet Wasserstoff in einem weiten Bereich des Mischungsverhältnisses (3,5% - 73%) ein hochexplosives Gasgemisch ("Knallgas"). Bei Stosswellenexperimenten, bei denen Wasserstoff in beträchtlichen Mengen und unter hohem Druck Verwendung findet, ist deshalb besondere Vorsicht geboten.

Um eine hohe Konzentration des Wasserstoffs im Labor zu verhindern, wurde bei der Planung der Membranrohranlage die Aufstellung der Vorratsflaschen und des Umfüllkompressors auf einem Balkon vorgesehen, der durch jalousieartige Blenden vor Sonneneinstrahlung, Regen und Schnee geschützt, aber immer gut durchlüftet ist.

Die Wasserstoffleitungen wurden mit mehrfachem Arbeitsdruck auf Dichtigkeit geprüft. Die Membranstossrohranlage selbst ist unter dem Gesichtspunkt hoher Dichtigkeit konstruiert. Trotzdem wird nach dem Experiment das im Membranstossrohr noch unter Ueberdruck befindliche Gas *s o f o r t* über eigene Leitungen ins Freie abgelassen und die Anlage gleich anschliessend vor dem Lüften noch einmal abgepumpt.

Steht das Membranstossrohr - wie es bei einigen Experimenten der Fall ist - nach dem Schuss unter Unterdruck, so darf das Gasablassventil nicht geöffnet werden, da sonst Luft von aussen hereinströmt, und sich dann in der ganzen Anlage Knallgas bildet. Auch in diesem Fall muss der Wasserstoff ganz abgepumpt werden. Eine Blockierung des Gasablassventils ist Bestandteil eines elektrischen Verriegelungssystems, das auch anderweitige Fehlbedienungen verhindern soll.

Im Gefahrenfall kann der Wasserstoff auch vor dem Platzen der Membran aus dem Hochdruckteil *s e h r s c h n e l l* über ein spezielles Notventil ins Freie abgelassen werden ^{x)}.

Um eine langsame Konzentrationszunahme des Wasserstoffs im Labor - wie sie durch Lecks in den Zuleitungen oder im Hochdruckteil auftreten könnte - zu verhindern, werden die Laborräume ständig durch eine Luftwechselanlage (300 - 1000 m³/h) gelüftet. Mit einer automatisch arbeitenden Wasserstoff-Mess- und Warn-Anlage (Fabrikat Dräger) wird die Wasserstoffkonzentration an verschiedenen Stellen unter der Labordecke ständig gemessen. Die Anlage ist so eingestellt, dass sie bereits bei einer Wasserstoffkonzentration von 0,5% anspricht und ein Warnsignal gibt.

Die Grösse des Laborraumes für den Hochdruckteil ist aber so gewählt, dass auch dann, wenn durch irgend einen Umstand der ganze Wasserstoff aus dem Hochdruckteil (bei $p_4 = 100$ atm ungefähr 1200 Liter unter Normalbedingungen) entweichen sollte, bei gleich-

x) Auch ein solches elektrisch gesteuertes hochvakuumdichtes, hochdruckfestes Ventil, das praktisch momentan einen grossen Querschnitt freigeben muss, ist im Handel nicht erhältlich und musste deshalb selbst entworfen und gebaut werden (s. Anhang).

mässiger Verteilung über den ganzen Laborraum die untere Konzentrationsgrenze des explosiven H_2 -Luft-Gemisches nicht erreicht würde.

Für das Arbeiten mit Messkammern im Laufrohr, deren Konstruktion bei mechanischen Defekten das Umherfliegen von Bruchstücken (Glas- oder Plexiglasteile von Fenstern etc.) nicht ausschliesst, stehen fahrbare Stahlblechschutzwände zur Verfügung.

Eine Gegensprechanlage erlaubt die dauernde Verständigung zwischen dem Experimentator im Messlabor (in dem das Laufrohr montiert ist) und dem Techniker im "Hochdrucklabor" (in dem das Treibrohr aufgebaut ist).

Ausser den Massnahmen zum Schutze der Bedienungsmannschaft sind, wie oben schon angedeutet, einige Vorkehrungen getroffen, um die Anlage selbst zu sichern. Durch ein elektrisches System wird z.B. das Einschalten von Pumpen blockiert, wenn das Vorvakuum nicht ausreicht, und Ruhestromkreise sorgen dafür, dass beim Ausfall einiger Stromkreise oder der gesamten Stromversorgung die Anlage automatisch abgeschaltet wird. Alle besonders wichtigen Stromkreise sind zwar an das Notstromnetz des Institutes angeschlossen, aber diese Massnahme wirkt sich im wesentlichen nur auf die Betriebssicherheit der Warnanlage aus und auf gelegentlichen Nachtbetrieb der Pumpen. Die zwischen Stromausfall und Einschalten der Notstromanlage verstreichende Zeit ist nämlich im allgemeinen so lang, dass aus Sicherheitsgründen die Anlage inzwischen abgeschaltet ist.

VI. Montage und Betrieb der Membranrohranlage

1. Allgemeiner Aufbau

Das Stosswellenrohr ist mit seiner Gesamtlänge von ca. 17 m in zwei Labors untergebracht. Im ersten steht der gesamte Hochdruckteil der Anlage. Das Laufrohr ist durch eine Wandöffnung in das Messlabor geführt, in dem fast der gesamte Niederdruckteil und der Pufferkessel installiert sind.

Im Hochdrucklabor befinden sich alle Bedienungs- und Messeinrichtungen für den Betrieb der ganzen Anlage, der im wesentlichen von hier aus gesteuert wird. Dies kann von einer Person bewältigt werden. Im Messlabor braucht beim Betrieb lediglich die Membran zwischen Niederdruckteil und Pufferkessel gewechselt zu werden. Die Verständigung zwischen Hochdruck- und Messlabor ist durch die Installation einer Gegensprechanlage auch dann sichergestellt, wenn optische Experimente eine Verdunklung des Messlabors erfordern.

Die Schaltelemente sind im Hochdrucklabor in drei Bedienungsständen untergebracht. Der erste enthält alle Ventile und Kontrollelemente für die Hochdruckgasversorgung aus den Druckgasflaschen und für die Bedienung des Umfüllkompressors. Im zweiten sind die Feinmessmanometer für das Füllen des Treibrohres und der Zwischenmembranzone, die dazu notwendigen Ventile, der Schalter zum Auslösen des Schusses beim Arbeiten mit der Doppelmembran sowie ein Ventil untergebracht, durch das im Notfall das Treibgas aus dem Hochdruckteil abgelassen werden kann. Der dritte Bedienungsstand umfasst alle für den Betrieb der Vakuumpumpen notwendigen Schalt- und Messgeräte, die Schaltelemente für die Niederdruckgasversorgung und das elektrische Steuerungs-, Blockierungs- und Sicherheitssystem der Anlage.

2. Montage und Justierung der Anlage

Die Montage der gesamten Anlage erfolgte, vom Hochdruckteil ausgehend, unter den besonderen Gesichtspunkten ihrer sorgfältigen Justierung und der schwingungsmässigen Trennung von Hochdruckteil, Laufrohr und Pufferkessel.

Nach Aufbau des Hochdruckteils auf einem Grundrahmen wurde dieser mit Hilfe von Druckschrauben der Höhe nach so justiert, dass die Achse des Treibrohres (genauer: die Achse des beweglichen Teils des Teleskopstückes) waagrecht lag. Damit diese Lage auch der während des Betriebs massgebenden entspricht, war darauf geachtet worden, dass der Aufbau des Hochdruckteils beim Justieren des Rahmens schon endgültig war, und dass sich die Gummifedern schon längere Zeit (ca. 1 Jahr) auf die Belastung eingestellt hatten. Durch Unterlegen passender Bleche und Verschrauben des Grundrahmens an Ankern im Betonboden des Labors wurde die Lage des Hochdruckteils fixiert. Anschliessend wurden die diagonalen Druckanker im Rahmen des Hochdruckteils alternierend so angezogen, dass sich die waagrechte Justierung des Teleskopstückes nicht änderte.

Dieser Teil des Teleskopstückes stellt das Element dar, von dem die ganze weitere Justierung ausgeht. Nach ihm wurde der zweite Teil justiert und auf dem ersten Betonklotz arretiert. Anschliessend wurden die Lagerböcke für den Niederdruckteil aufgestellt und das erste Stück des Laufrohres mit Hilfe der Rollenlagerungen (s. Abb. 11) nach Höhe und Richtung so justiert, dass der Passring (vgl. Abb. 9) auf den Rohrenden leicht gleitend läuft. Nach diesem Prinzip wurden die weiteren Rohrstücke aneinandergesetzt. Auch die Zwischenstücke und die Messkammer wurden so eingebaut.

Auf dem mit Betonklötzen beschwerten Rahmen am Ende des Laufrohres wurde die Halterung für die dünne Membran zwischen Laufrohr und Pufferkessel vormontiert, dann mit Hilfe von Druckschrauben nach dem Laufrohr (bzw. dem Zwischenstück an seinem Ende) ausgerichtet und schliesslich fest angeschraubt. Damit hatte auch der feste Teil des zweiten Teleskopstückes seine richtige Lage erhalten. Beim Einbau neuer Teile in das Laufrohr können die Schrauben gelöst werden, und die gesamte Halterung der Membran kann in Richtung der Rohrachse verschoben werden, ohne dass anschliessend vor Anziehen der Schrauben eine neue Justierung notwendig ist.

Schliesslich wurde der Rahmen des Pufferkessels mit Hilfe der Anker im Betonboden auf diesem fest angeschraubt und danach die als Laufschienen dienenden Rohre parallel zur Stossrohrachse ausgerichtet. Mit Hilfe von Langlöchern in der Verbindung zwischen den Rollenlagern und dem Kessel wurde der letztere so justiert, dass die Achse des Einlaufstutzens am Kessel mit der Stossrohrachse ungefähr übereinstimmte. Der am Flansch des Einlaufstutzens befestigte Teil des zweiten Teleskopstückes wurde schliesslich so verschraubt, dass die Achsen der beiden Teleskopteile unter Wahrung des erlaubten radialen Spiels übereinstimmten.

Am Ende der Justierarbeiten stand das Einstellen der Stossdämpfer hinter dem Pufferkessel, das sorgfältig vorgenommen sein muss, damit beim Rücklauf des Kessels und seiner Abbremsung keine seitlichen Kräfte bzw. Drehmomente auftreten, die trotz einer gewissen Weichheit des Kesselrahmens auf die Dauer zu Betriebsstörungen führen könnten.

3. Inbetriebnahme der Anlage und Routinebetrieb

Bei der ersten Inbetriebnahme der Anlage wurde mit Hilfe des Pumpensystems am Hochdruckteil das gesamte Leitungssystem der Hochdruckgasversorgung evakuiert. Anschliessend wurde es mit Wasserstoff so gefüllt, dass in allen Leitungsteilen ein gewisser Ueberdruck herrschte. Daraufhin wurden die Hochdruckventile geschlossen und die einzelnen Leitungsteile getrennt durch Druckkontrollen während einiger Tage auf Dichtigkeit geprüft.

Aehnlich wird immer dann verfahren, wenn Druckgasflaschen gewechselt werden, oder wenn aus irgendwelchen Gründen Druckleitungen gegen die Atmosphäre geöffnet werden. In gewissen Zeitabständen, im allgemeinen an den Wochenenden, werden die Hochdruckleitungen auch weiter ständig auf ihre Dichtigkeit hin geprüft.

Der Routineablauf des Evakuierens der Membranrohranlage und ihrer Füllung mit den verschiedenen Gasen ist in dem folgenden Schema - in einzelne Schritte aufgelöst - dargestellt. Auch der Zeitbedarf und der Druckverlauf in den Anlageteilen ist mit aufgeführt. Die Reihenfolge der Schritte ist so gewählt, dass nach Möglichkeit Wartezeiten vermieden werden. - Wenn ein zusätzlicher Techniker zur Verfügung steht (was bei Serienmessungen häufig der Fall ist), können einige Bedienungsschritte parallel vorgenommen werden, sodass die "Schusszeit" auf 20 Minuten reduziert werden kann. Gelegentlich konnte sogar eine 15-minütliche Schussfolge erreicht werden. - Pro Arbeitstag sind im Durchschnitt etwa 12 Schüsse möglich.

Abends wird die gesamte Anlage evakuiert, morgens werden bei Beginn des Experimentierens die Leckzahlen ermittelt. Dann wird die ganze Anlage etwa eine Stunde lang evakuiert. Während dieser Zeit werden auch die Diffusionspumpen angeheizt und für den Routinebetriebsablauf vorbereitet.

Ueber jeden Schuss wird in einem "Schussbuch" Protokoll geführt, wobei neben den wesentlichen Drucken gegebenenfalls auch Besonderheiten des Platzens der Membranen, der Messeinbauten im Laufrohr usw. registriert werden. Auch Flaschenwechsel, Leckzahlen etc. werden ins Schussbuch eingetragen.

Während das Auswechseln der Gasflaschen ohne längere Vorbestellungen erfolgen kann, muss sorgfältig darauf geachtet werden, dass immer eine genügende Zahl von Membranen der gewünschten Dicke, bzw. des gewünschten Berstdruckes vorhanden ist. Da das Material dafür von Lieferung zu Lieferung erheblich verschieden sein kann, werden jeweils Probepressungen bei der Vertragsfirma vorgenommen, die die Membranen prägt, und anschliessend Berstdruckprüfungen durchgeföhrt.

In regelmässigen Zeitabschnitten wird auch die Wasserstoffwarnanlage überprüft, indem man mit einem Testgasgemisch ihre Funktionsfähigkeit erprobt.

Bedienungsablauf im Routinebetrieb

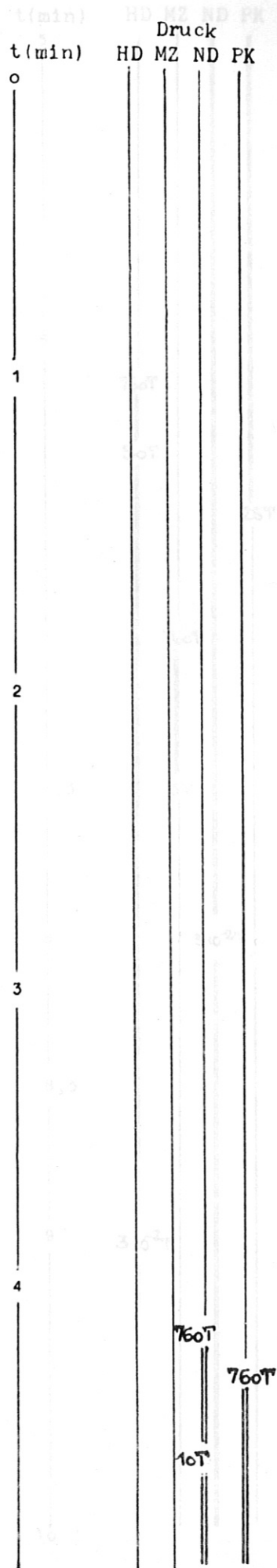
A. Membranwechsel

- 1(A) Öffnen des Hochdruckteils und Ausfahren der Membranzone
Wechseln der vorgeprägten Platten
Einführen der Membranzone und Verspannen des HD-Teils
Schliessen des Belüftungsventils V₂₄

- 2(A) Öffnen der Halterung für die dünne Membran
Weiterspulen der Metallfolie und Schliessen der Halterung
Öffnen des HD-HV-Handventils V₂₈

B. Evakuieren von Niederdruckteil und Pufferkessel

- 3(B) Einschalten der Wasserringpumpe für ND-Teil
Öffnen der el.magn. Ventile V₂₉ und V₃₀
Einschalten der Wasserringpumpe für Pufferkessel
(V₄₀ u. V₄₁ öffnen bzw. schliessen dabei automatisch)
Langsames Öffnen des HD-HV-Handventils V₂₇



--- Bei 50 Torr im ND-Teil:
Einschalten der Rootspumpe für ND-Teil
Öffnen des Handventils V_{38} für Kammerer- Manometer (verkürztes Mc-Leod-Manometer)

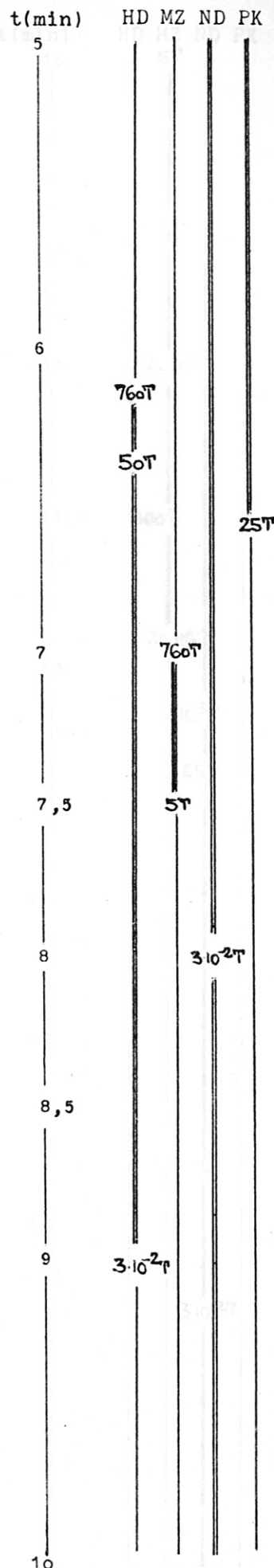
C. Evakuieren von Hochdruckteil und Membranzone

- 4(C) Einschalten der Wasserringpumpe für HD-Teil
Öffnen des el.magn. Ventils V_{25}
--- Bei 50 Torr im HD-Teil:
Einschalten der Rootspumpe für HD-Teil
- 5(B) --- Bei 25 Torr im Pufferkessel:
Automatisches Abschalten der Wasserringpumpe für den Pufferkessel
(V_{40} u. V_{41} schliessen bzw. öffnen dabei automatisch)
- 6(C) Öffnen des el.magn. HD-HV-Ventils V_{19} für Membranzone und Schliessen des Ventils nach ca. 30 sec

- 7(B) --- Bei ca. $3 \cdot 10^{-2}$ Torr im ND-Teil:
Öffnen der el.magn. Ventile V_{32} u. V_{33}
Schliessen der el.magn. Ventile V_{29} u. V_{30}
Abschalten von Rootspumpe und Wasserringpumpe für den ND-Teil

D. Vorbereitungen an der Hochdruckgasversorgung

- 8(D) Vorwählen der H_2 -Flasche durch Öffnen des Handventils (eines der Ventile $V_1 \dots V_{12}$) am HD-Bedienungsstand
- 9(C) --- Bei $3 \cdot 10^{-2}$ Torr im HD-Teil:
Schliessen des HD-HV-Ventils V_{23}
Schliessen des Ventils V_{25}
Abschalten von Rootspumpe und Wasserringpumpe für den HD-Teil

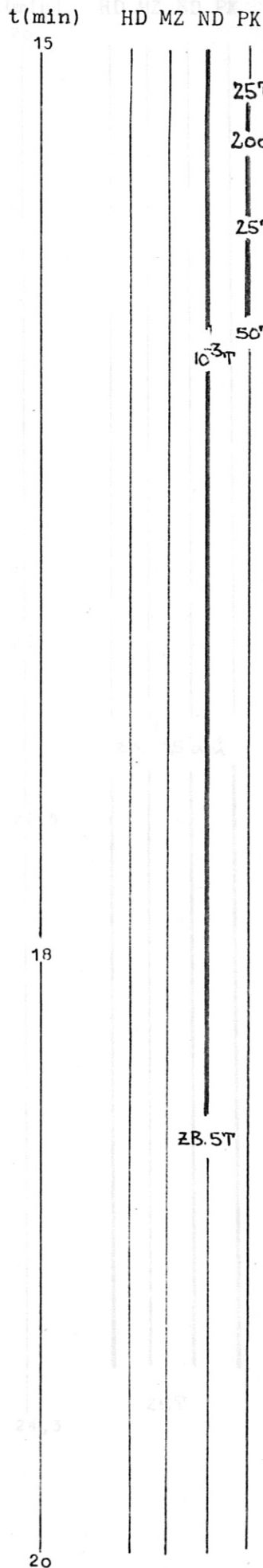


	t(min)	HD	MZ	ND	PK
10(D) Öffnen der Handventile V_{17} und V_{18} Vorfüllen der Membranzone und des Hochdruckteils mit 20 atü H_2 Schliessen der Handventile V_{17} und V_{18}	10		5T		
<u>E. Spülen der Membranzone</u>	11		2catk		
11(E) Öffnen des el.magn. HD-HV-Ventils V_{19} für Membranzone und Schliessen des Ventils nach ca. 30 sec Öffnen des Handventils V_{18} Füllen der Membranzone mit 20 atü H_2 Schliessen des Handventils V_{18}	11,5		100T		
<u>F. Spülen und Evakuieren des Niederdruckteils</u>	12		2catk		
12(F) Schliessen der el.magn. Ventile V_{32} u. V_{33} Langsames Öffnen des Handdosierventils V_{36} Füllen des ND-Teils (zB. mit 25 T Argon). Schliessen des Handdosierventils V_{36} Einschalten der Wasserringpumpe für ND-Teil Öffnen des el.magn. Ventils V_{30} Einschalten der Rootspumpe für ND-Teil Öffnen des el.magn. Ventils V_{29}				10^{-3} T 25T	
13(F) --- Bei $3 \cdot 10^{-2}$ Torr im Niederdruckteil: Öffnen der el.magn. Ventile V_{32} und V_{33} Schliessen der el.magn. Ventile V_{29} und V_{30} Abschalten der Wasserringpumpe und der Rootspumpe für den ND-Teil	14			$3 \cdot 10^{-2}$ T	
	15				

G. Spülen des Kessels

- 14(G) Oeffnen des el.magn. Ventils V_{43}
Oeffnen des Handventils am Reduzierer V_{42}
Füllen des Kessels mit N_2 bis 200 Torr
Einschalten der Wasserringpumpe für Kessel
(V_{40} öffnet automatisch mit)
--- Bei 25 Torr im Kessel:
schaltet Pumpe automatisch ab und V_{40} schliesst sich
Kessel füllt sich wieder mit N_2
--- Bei 50 Torr im Kessel:
Schliessen des Handventils V_{42} und des el.magn. Ventils V_{43}

- 15(F) --- Bei weniger als 10^{-3} Torr im ND-Teil:
Schliessen des HD-HV-Handventils V_{28}
Schliessen der el.magn. Ventile V_{32} und V_{33}
Füllen des Niederdruckteils mit Arbeitsgas des gewünschten Druckes durch Betätigung des Dosierhandventils V_{36}
Schliessen des HD-HV-Handventils V_{27}
Schliessen des Handventils V_{38} am Manometer



H. Füllen des Hochdruckteils und der Membranzone

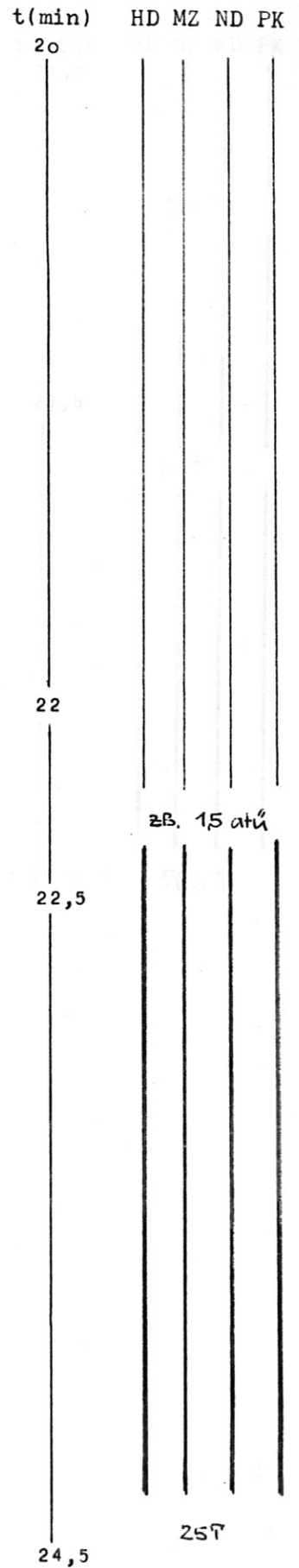
- 16 (H) Oeffnen der Handventile V₁₇ und V₁₈
Gleichzeitiges Füllen von HD-Teil und Membranzone (zB. auf 100 bzw. 50 atü)
Schliessen der Handventile V₁₇ und V₁₈

I. Schuss

- 17 (I) Kurzzeitiges Oeffnen des el.magn. Ventils V₁₉
PLATZEN DER MEMBRANEN
--- wenn dann Ueberdruck im Kessel ist:
Oeffnen des el.magn. Ventils V₄₄

K. Evakuieren und Lüften der Gesamtanlage

- 18 (K) Einschalten Wasserringpumpe Kessel
(V₄₀ öffnet automatisch mit)
--- Bei 25 Torr in der Gesamtanlage:
schaltet Pumpe automatisch ab (und V₄₀ schliesst sich)



19(K) Öffnen des el.magn. Ventils V₄₃
 Öffnen des Handventils am Reduzierer V₄₂
 Füllen des Kessels mit N₂ bis auf 200 Torr
 Schliessen der Ventile V₄₂ und V₄₃

20(K) Einschalten Wasserringpumpe Kessel
 (V₄₀ öffnet automatisch mit)
 --- Bei 25 Torr in der Gesamtanlage:
 schaltet Pumpe automatisch ab (und V₄₀
 schliesst sich)

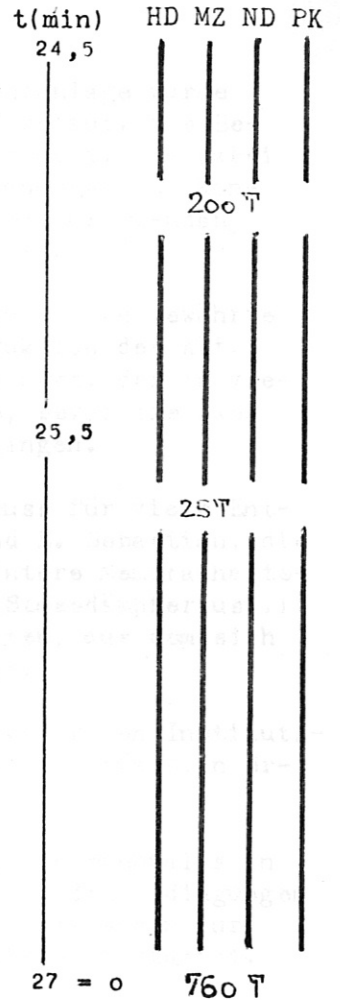
Öffnen des Handventils V₂₄ und des HD-HV-Hand-
 ventils V₂₃

--- Belüften der Gesamtanlage vom Hochdruckteil
her.

.....

Endzeit:

1(A) Öffnen des



VII. Schlussbemerkungen und Danksagungen

Die in den vorstehenden Kapiteln beschriebene Membranrohranlage wurde auf eine Anregung von Prof. Wienecke hin konzipiert und gebaut. Die Bedingungen, denen sie genügen sollte, wurden in 3 untersucht. Die dabei gewonnenen Ergebnisse stellten die Grundlage für die Planungs- und Konstruktionsarbeiten dar. Bei vielen Diskussionen in diesem Zusammenhang wirkte auch Dr. Javel mit und steuerte nützliche Ideen bei.

Bei der Konstruktion der einzelnen Bauteile der Stossrohranlage bewährte sich die sehr enge Zusammenarbeit mit der Gruppe Konstruktion der Abt. Technik ausgezeichnet. Besonders danken wir Herrn R. Zickert, der in vielen Besprechungen seine Entwürfe zur Diskussion stellte, bevor sie dann in endgültiger Form an eigene oder fremde Werkstätten gingen.

Auch den Ingenieuren und Technikern unserer Abteilung muss für viele Entwürfe gedankt werden, vor allem den Herren H. Schmid und E. Sebastian, die einzelne Bauelemente (Ventile, Teleskopverbindungen, hintere Membranhalterung, Prägevorrichtung für Membranen, Kesselhalterung, Stossdämpfer usw.) konstruierten und den Probetrieb des Rohres durchführten, aus dem sich schliesslich der Ablauf des Routinebetriebes entwickelte.

Hohes Lob gebührt auch der Abteilungswerkstatt und den zentralen Institutswerkstätten, die die Teile der Anlage, die besonders grosse Präzision erforderten, selbst herstellten.

Schon die ersten Ergebnisse des Experimentierbetriebes, die ebenfalls in 3 dargestellt sind, erwiesen, dass die Membranrohranlage die Bedingungen erfüllt, die am Anfang ihrer Planung standen, und der - inzwischen zur Routine gewordene - Betrieb der Anlage hat dies immer wieder bestätigt.

Bei der Zusammenstellung des Berichtes schliesslich hat uns Frau L. Elsholz tatkräftig unterstützt.

Literatur

- [1] Greene u. Toennies:
"Chem. Reakt. in Stosswellen"
Dietr. Steinkopf Verlag (1959)

- [2] Oertel:
"Stossrohre"
Springer Verlag (1966)

- [3] H. Nett:
"Bau einer Membranstossrohranlage für Plasmaexperimente und
Bestimmung der Plasmaparameter hinter der primären Stossfront"
Institut für Plasmaphysik, Bericht IPP 3/43 (1966)

- [4] E.B. Turner:
Dissertation Univ. Michigan (1956)

Anhang

1. Prägevorrichtung für Membranen

Im Abschnitt III.4. sind die Membranen und ihre Halterungen, die "Membranzonen" beschrieben. Die Membranen können prinzipiell in sehr unterschiedlicher Weise für ein regelmässiges und reproduzierbares Platzen präpariert werden. Metallmembranen werden hierzu üblicherweise mit einer Einkerbung als Sollbruchstelle versehen.

Sind nur sehr wenige Schüsse geplant, und werden genügend dicke Membranen benützt, so werden die Kerben zweckmässigerweise in die Metallplatten gefräst. Justierung und Bearbeitung der Platten auf einer Fräsmaschine sind aber ziemlich aufwendig und damit teuer. Die Herstellung einer der unter III.4. in Rede stehenden Membranen kostet auf diese Weise etwa 10,- DM. Dabei garantiert diese Art der Herstellung nicht einmal sonderliche Genauigkeit, denn die Gefahr, dass ein Fräswerkzeug aus dem Kupfer der Membran in unkontrollierbarer Weise Material herausreisst, ist recht gross. So platzen gefräste Membranen relativ ungleichmässig.

Diese Schwierigkeiten können umgangen werden, wenn die Sollbruchstelle, also z.B. ein Kerbenkreuz, in die Membran geprägt wird. Da ein Prägewerkzeug aber teuer ist, rentiert sich seine Anschaffung erst ab einer relativ hohen Schusszahl. Bei einem Beschaffungspreis von ca. 5000,- DM lohnt sich ein Prägewerkzeug für mehr als 500 Schuss. Das von uns für den obigen Preis beschaffte Werkzeug reduziert die Fertigungskosten der Membranen auf etwa 0.60 DM (Herstellung von 200 Stück: Rüstkosten < 20,- DM, Prägekosten pro Stück -,50 DM).

Die Erfahrungen zeigten inzwischen, dass ein Prägewerkzeug für Membranen ziemlich universell verwendbar ist: Es lassen sich sowohl Aluminium- als auch Kupfermaterialien prägen. Die Dicke der Membranplatten ist dabei in ziemlich weiten Grenzen variabel, und die Reproduzierbarkeit erwies sich als ausserordentlich gut.

Nachdem 2500 Membranen geprägt waren, mussten die Stanz- und Prägeteile nachgeschliffen werden; ansonsten wies das Werkzeug keine wesentlichen Abnutzungerscheinungen auf.

Die Konstruktionsprinzipien des Prägewerkzeugs sind den Abb. A1 und A2 zu entnehmen:

- (a) Abgesehen vom Vorbereiten der Blechstreifen und Einstellen des Werkzeugs werden die Membranen in einem Arbeitsgang hergestellt.
- (b) Ober- und Unterteil der Prägevorrichtung sind durch Führungen (durch 4 Säulen) ineinander geführt, weil nur so die geforderten Toleranzen garantiert werden können. Sonst würden die Toleranzen durch den Zustand der benützten Presse bestimmt.
- (c) Die Prägetiefe wird mit Hilfe des Pressenhubes eingestellt, aber ihre Gleichmässigkeit ist zusätzlich durch Aufschlagstücke sichergestellt. Durch Wahl der passenden Aufschlagstücke im Werkzeug und durch Einlegen von Papierstreifen ist damit auch die Einstellung der Prägetiefe kontrollierbar.
- (d) Die Folge der Arbeitsvorgänge bei einem Presszyklus ist:
- (α) Vorschub des Blechstreifens
 - (β) Anpressen der Niederhalter
 - (γ) Abschneiden der beim vorigen Zyklus geprägten Membran
 - (δ) Ausschneiden der Membranecken
 - (ϵ) Prägen der Kreuzkerbe

Der Berechnung der Prägevorrichtung lagen folgende Werte zugrunde:

<u>Schnittkräfte</u>		<u>Prägekräfte</u>	
für das Abschneiden der Membran	4,5 t	für das Eindrücken der Kreuzkerbe	
für das Ausecken	" " 4 t	max. 40 kg/mm ² x 300 mm ²	= 12 t

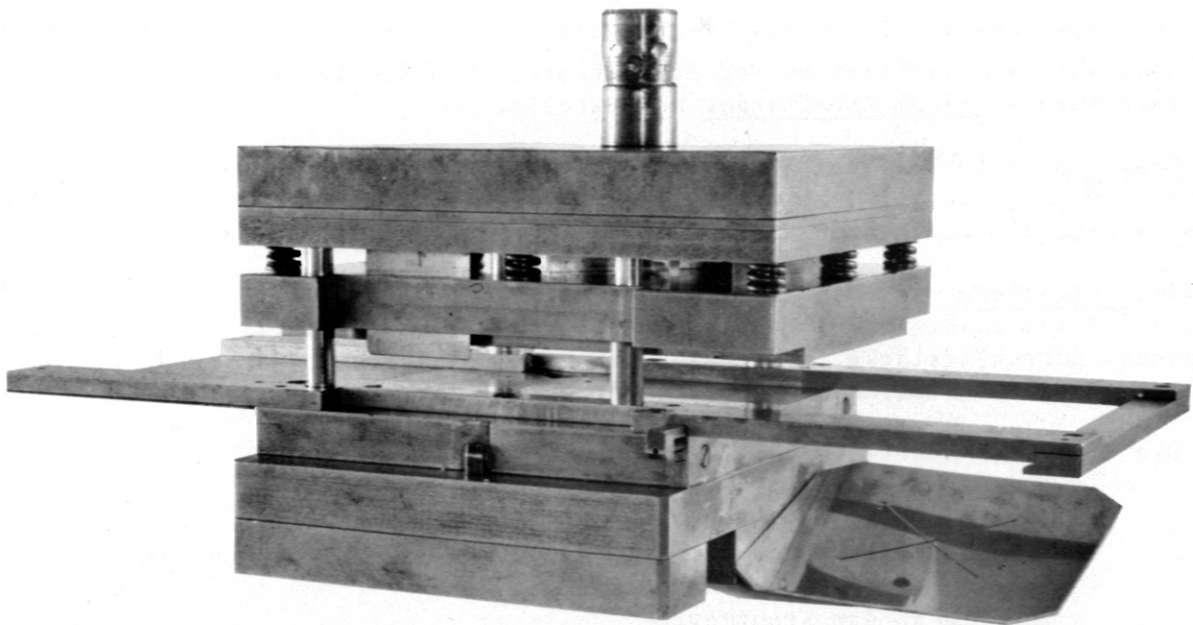
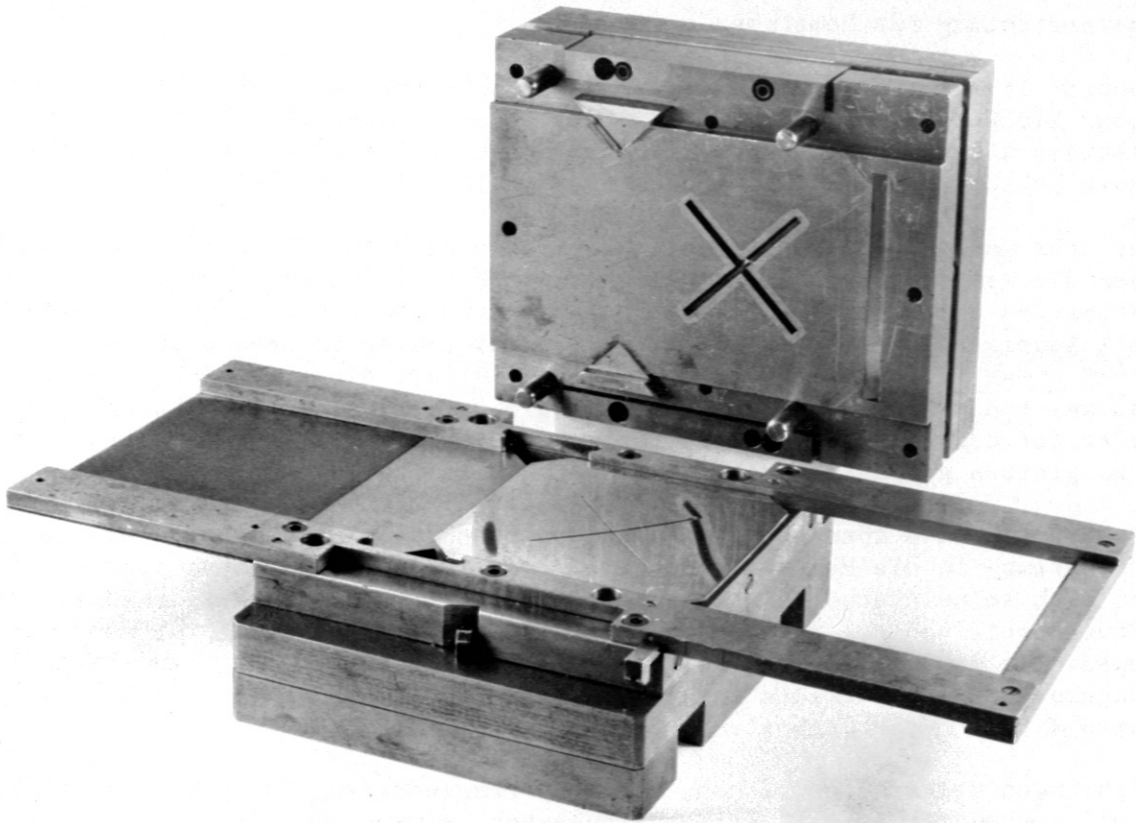


Abb. A1

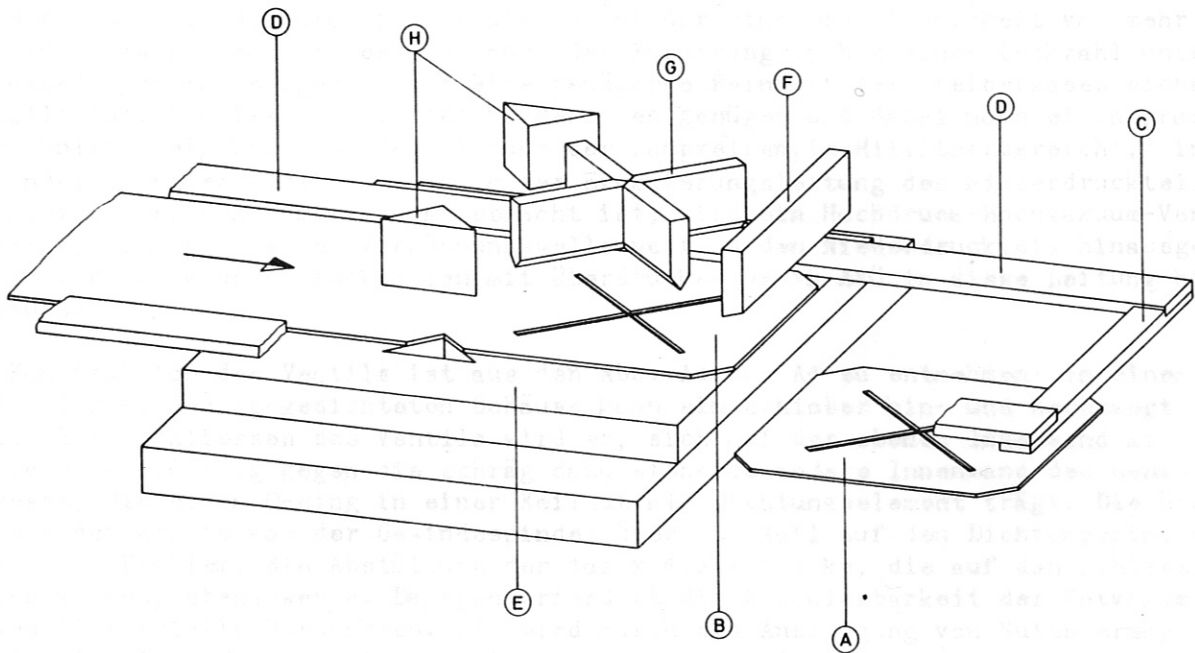


Abb. A2

Abb. A1 Fotografien des Prägwerkzeuges (mit abgenommenem Oberteil bzw. in einbaufertigem Zustand).

Abb. A2 Prinzipskizze des Prägwerkzeuges

- A Geprägte und abgeschnittene Membran
- B Geprägte Membran, die beim Prägen der nächsten gleichzeitig abgeschnitten wurde.
- C Endanschlag für den Streifenvorschub
- D Seitliche Streifenverschiebung
- E Schnittplatte (unter der Prägestelle und an den Schnittkanten befinden sich gehärtete Einsätze)
- F Schnittstempel zum Abschneiden der geprägten Membran
- G Prägstempel für die Kreuzkerbe (dieser Stempel ist oben 15 mm und unten im Niederhalter 40 mm hoch geführt, so dass keine Gefahr des Ausknickens besteht.
- H Schnittstempel zur Formung der Membranecke

Der Niederhalter, die Führungen für die Präge- und Schnittstempel, die Säulen zur Führung des gesamten Oberteiles und die Aufschlagstücke sind nicht gezeichnet.

2. Hochdruck-Hochvakuum-Ventil

Vom Hochdruckteil des Stossrohres wird nicht nur eine Druckfestigkeit von mehr als 100 Atü verlangt, sondern es muss auch der Forderung nach kleiner Leckzahl unter Vakuumbedingungen genügen, damit eine genügende Reinheit des Treibergases sichergestellt ist. Ventile, die beiden Forderungen genügen und dabei noch einen grossen Querschnitt freigeben (zur Reduzierung der Pumpzeiten im Millitorrbereich), sind im Handel nicht erhältlich. Auch in der Evakuierungsleitung des Niederdruckteils, die kurz hinter den Membranen angebracht ist, wird ein Hochdruck-Hochvakuum-Ventil benötigt, da der Fuss der Verdünnungswelle weit in den Niederdruckteil hinausgespült wird. So können Druckwellen mit Überdrücken um 50 Atü in diese Leitung hineinlaufen.

Die Konstruktion des Ventils ist aus den Abb. A3 und A4 zu entnehmen: In einem zweiteiligen, O-Ring-gedichteten Gehäuse kann ein Schieber hin- und herbewegt werden. Beim Schliessen des Ventils wird er, sich auf der ebenen Innenwand abstützend, keilförmig gegen die schräg dazu stehende andere Innenwand des Gehäuses gepresst, die einen O-Ring in einer Keilnut als Dichtungselement trägt. Die Übertragung der Kräfte von der Gewindespindel über den Keil auf den Dichtungsring ist somit kein Problem, die Abstützung der $100 \times 6,3 = 630$ kp, die auf den Schieber wirken können, ebensowenig. Dagegen erfordert die Evakuierbarkeit der Totvolumina im Ventil spezielle Massnahmen. Sie wird durch die Anbringung von Nuten ermöglicht, die diese Volumina immer mit relativ grossem Querschnitt (nicht nur durch enge Spalte) mit der Vakuumseite verbinden. Dass das Ventil in geöffnetem Zustand eine geradlinige, völlig freigegebene Öffnung zwischen den beiden Seiten darstellt, ist eine zusätzliche Annehmlichkeit, die in anderem Zusammenhang wichtig sein könnte.

3. Not-Auslassventil

Das bei der Beschreibung des Sicherheitssystems erwähnte Notventil zum schnellen Ablassen des hochkomprimierten Wasserstoffs ins Freie soll eine Öffnung von einigen cm^2 Querschnittsfläche praktisch momentan freigeben. Bis zum Eintreten eines Notfalles aber soll das Ventil diese Öffnung hochvakuumdicht und hochdruckfest verschliessen und praktisch keiner Wartung bedürfen.

Zuerst wurde eine Lösung des Problems unter Verwendung von Membranen versucht, dem Prinzip des Membranstossrohres selbst entsprechend. Als Membranmaterialien wurden verschiedene Plastikwerkstoffe, Bleche und Glasplatten einem Test unterzogen: Bei einem Gefässinnendruck von 100 Atü wurden sie durch einen Schlagbolzen zum Platzen gebracht. Alle Versuche waren unbefriedigend: Entweder war die Reproduzierbarkeit des Platzens ungenügend oder die Sicherheit gegen zufälliges Platzen nicht gewährleistet. Hinzu kommen viele andere Nachteile.

Deshalb wurde ein mechanisches Ventil konstruiert, das eine Leckrate besser als 10^{-5} Torr·Liter/sec aufweist, einigen 100 Atü widerstehen kann und auch durch Fernbedienung zu öffnen ist. Seine konstruktiven Merkmale sind den Abb. A5 und A6 zu entnehmen: Der Ventildeckel (A) wird durch eine Nocke (B) auf den Ventilsitz gepresst. Die Drehung der Nockenwelle (C) wird über den kurzen Hebel (D) durch eine weitere Nocke (E) solange verhindert, bis (E) durch Betätigen eines Öffnungshebels gedreht wird. Dann öffnet der Überdruck selbst den Ventildeckel (A) schlagartig.

Das Gasauslassrohr, das das Gas über Dach ins Freie leitet, muss relativ weit und stabil sein, um der sich bildenden Stosswelle standhalten zu können.

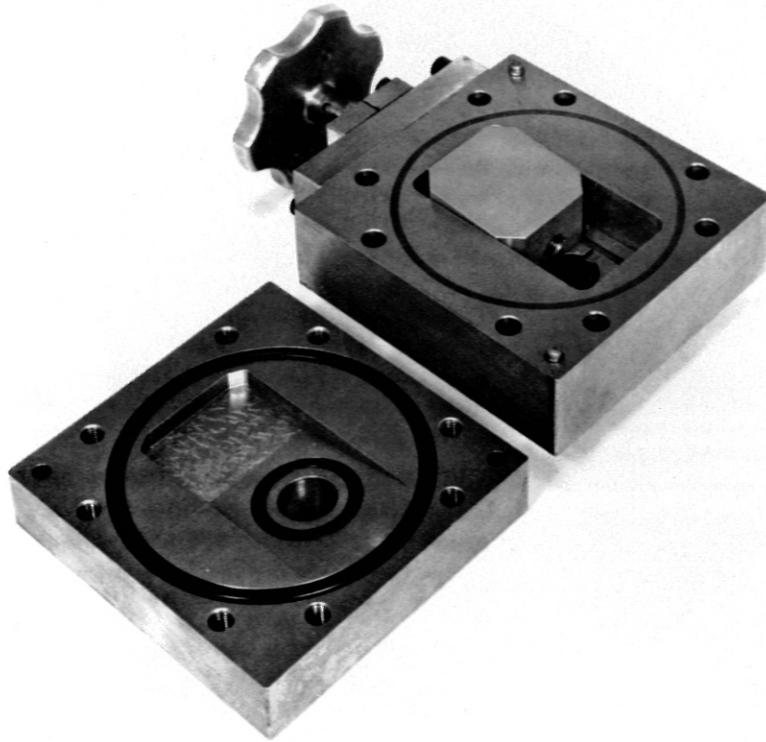


Abb. A3

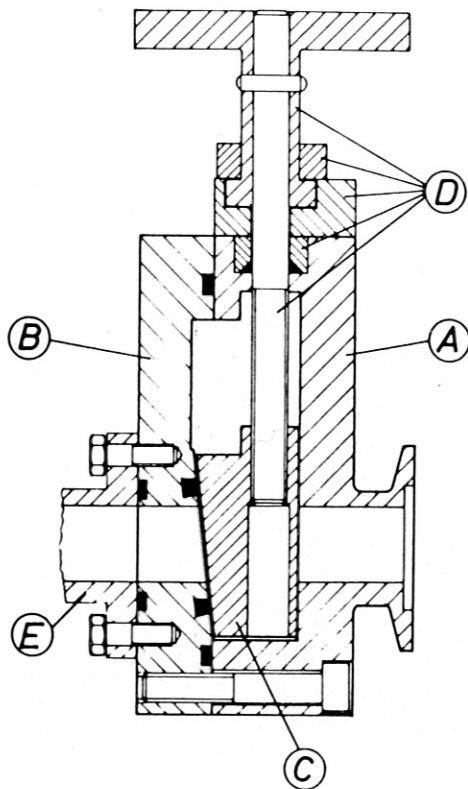


Abb. A3

Fotografie des Hochdruck-Hochvakuum-Ventils

Abb. A4

Schnitt durch das Ventil

- A Hauptteil des Gehäuses mit Gleitbahnen und Anschlussflansch
- B Gehäusedeckel mit O-Ring-Nuten für Dichtungsringe
- C Keilschieber
- D Spindel (mit Führungs- und Dichtungsmechanismus) zum Bewegen des Keilschiebers
- E Flansch des Hochdruckanschlusses

Abb. A4

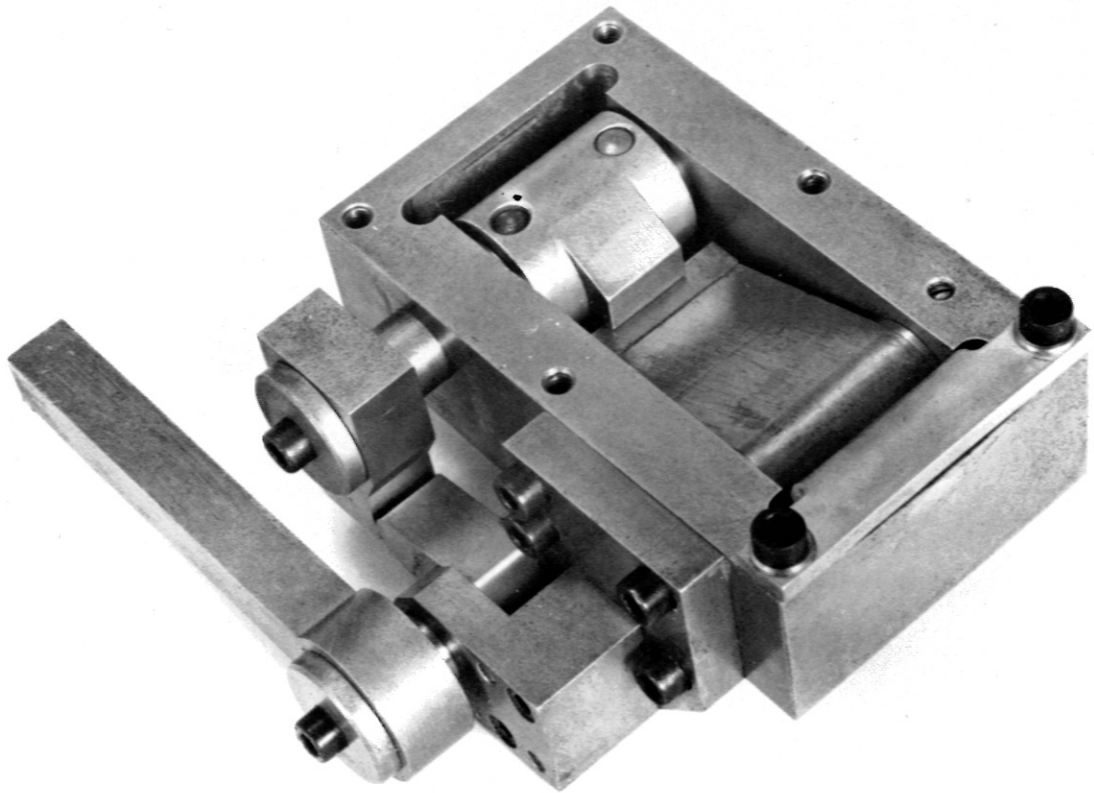


Abb. A5

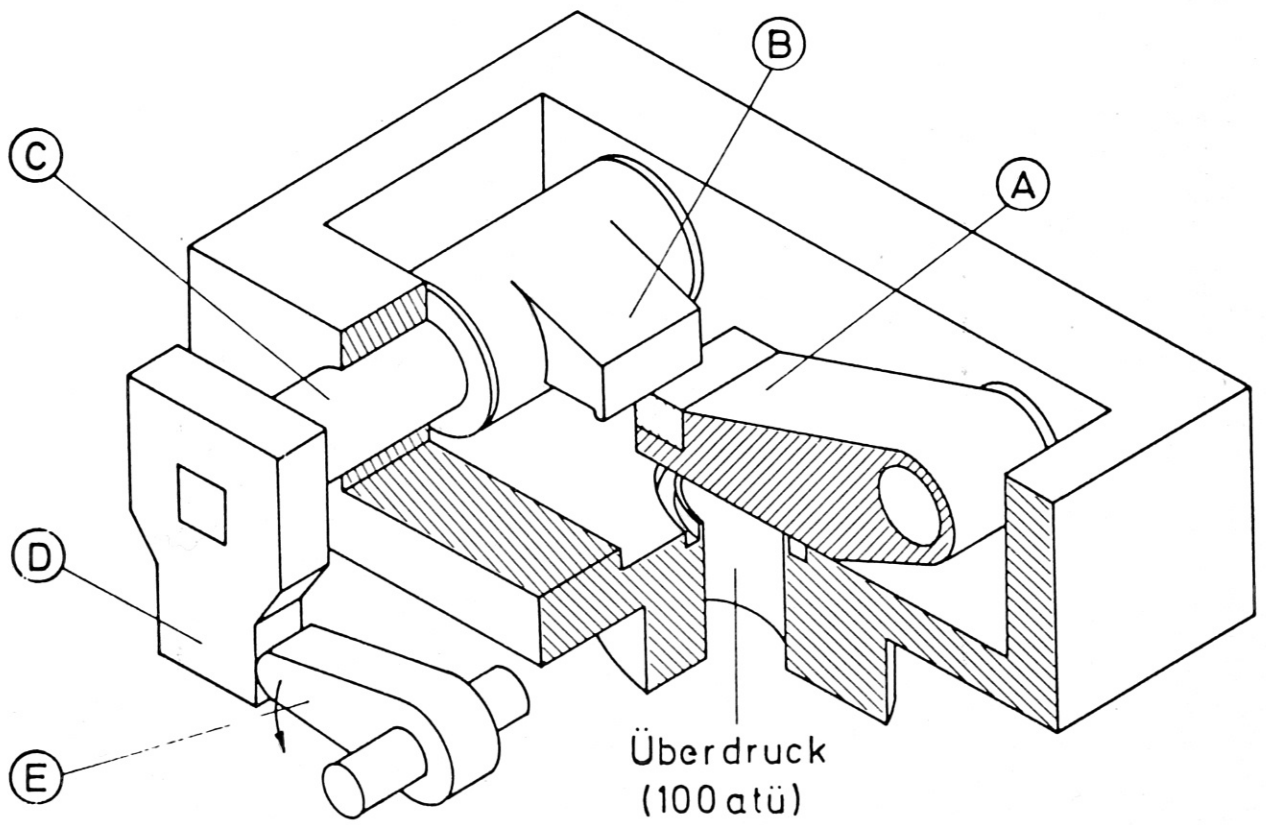


Abb. A6