

Interner Bericht
DESY HERA P-92/03

Dezember 1992

Vakuumtechnik bei DESY

Seminar-Unterlagen

Teil 2

**Vakuum-Pumpen, Vakuum-Behälter
Flansche, Dichtungen, Mechanische Bauteile
Grundgrößen, Formeln, Auspumpverhalten**

Christian Falland

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

Interner Bericht
DESY HERA P-92/03

Dezember 1992

Vakuumtechnik bei DESY

Seminar-Unterlagen

Teil 2

**Vakuum-Pumpen, Vakuum-Behälter
Flansche, Dichtungen, Mechanische Bauteile
Grundgrößen, Formeln, Auspumpverhalten**

Christian Falland

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

Vakuum-Pumpen

- Arbeitsbereiche einiger Vakuumpumpen (DESY)
- Einteilung der Vakuumpumpen nach dem Wirkungsprinzip (DESY)
- Maßeinheiten für Vakuumpumpen (fa)
- Drehschieberpumpe, Prinzip (DESY-PR)
 - Gasballast, Prinzip (LH)
- Diffusionspumpe, Arbeitsweise (LH)
- Turbomolekularpumpe, Prinzip, (DESY-PR/Pfeiffer)
 - Schnittdarstellung (Balzers)
- Turbomolekularpumpe und Molekularpumpe auf einer Achse (Osaka/Duval)
- Ionenzerstäuberpumpe (Ionengetterpumpe), mech. Aufbau (PW)
 - Merksätze (PR/Varian)
 - Funktion (Fa./LH)
 - Entladungsstromkurven (LH)
- Titan-Sublimations-Pumpe, Wirkungsweise (PR)
- Grundlage Kryopumpwirkung: Dampfdruckkurven (Balzers)

- Betrieb von Vakuumpumpen und - Anlagen. Praxistips (fa.)
- HERA-Turbopumpstand
 - Schema (C. Fa. u. a.)
 - Steuerung und Logik, Funktionsliste (fa.)

- Die Entwicklung der Drehschiebervakuumpumpe, (D. Oswald, V. i. d. P., 1989 1 36/40)
- Übersicht über Vakuumpumpen (DIN 28400/2)
- Gebräuchliche Arbeitsbereiche von Vakuumpumpen (Din 28400/2 S.3)

Vakuum-Mechanik

- Bauelemente eines Vakuumsystems, Übersicht (fa)
- Konstruktionswerkstoffe für Vakuumsysteme, Beispiele, Eigenschaften (fa)
- HERA-Vakuumrohr als Beispiel für Vakuumbehälter (PW)
- Lötverbindungen, Schweißverbindungen, Flanschverbindungen
- Verschiebung und Drehung im Vakuum (Vakuum-Durchführungen)
- Drehungen im Vakuum
- Isolierte Stromdurchführungen
- Tension de claquage sous vide (Paschengesetz für Durchschlagspannung) (Alc.)
- Vakuum-Ventile und Schieber (LH)
- Ultrahochvakuum-Eckventil, hoch ausheizbar (Var.)
- Reinigung und Zusammenbau von Vakuumbauteilen (fa)
- Das Vakuumlabor (fa)

Grundgrößen eines Vakuumsystems

- Grundformel der Vakuumtechnik (fa)
- Zahlenbeispiel zu: Grundformel Vakuumtechnik (fa)
- Berechnung von Leitwerten (fa)
- Rohrleitwerte im Hochvakuum, Nomogramm (LH)
- Berechnung des "Effektiven Saugvermögens" (fa)
- Zahlenbeispiele "Leitwertrechnung und "Bestimmung des eff. Saugverm. einer HV-Pumpe" (fa)
- Effektives Saugvermögen von Turbomolekularpumpen ... (Bz.)

Auspumpverhalten von Vakuumsystemen

- Abpumpen eines Behälters: Hauptbauteile, Gasquellen, Größen (fa)
- Auspumpzeit im Grobvakuumbereich (fa)
- Versuch: Auspumpzeit im Grobvakuum (fa)
- Nomogramm Auspumpzeit Grobvakuum (lh)
- Phasendiagramm von Wasser (lh)
- Vorvakuum-Auspumpzeit n. Kerspe, 1987
- Auspumpzeiten (Alc. 1980)
- Auspumpzeit .. m. Wälzkolben/Sperrschieberkombination (LH, 72)
- Auspumpzeit im Hochvakuum (fa)
- Auspumpdauer m. Turbo/Drehschieberkombination (LH)
- Desorptionsmessung HERA-Cu1 (Ha/Fa 86)
- Log / log - Formblatt zur Vakuumsystembeobachtung (Var. 1970)
- Metall-Gasabgabe (Wutz)
- Desorptions-und Permeationsdaten (Bz.)
- Auspumpen eines P-Dipols in der Magnetmeßhalle (A. Ladage 1989)

Dieses Kursmaterial ist durch viele Fragen und Anregungen von Kollegen entstanden.

Einschlägiges Informationsmaterial stammt von vielen Vakuum-Fachfirmen und wurde auch für diesen Kurs zur Verfügung gestellt.

Weiterhin wäre die Zusammenstellung nicht möglich gewesen ohne die Benutzung und Zitierung der Fachbücher und Fachzeitschriften sowie der Fachnormen.

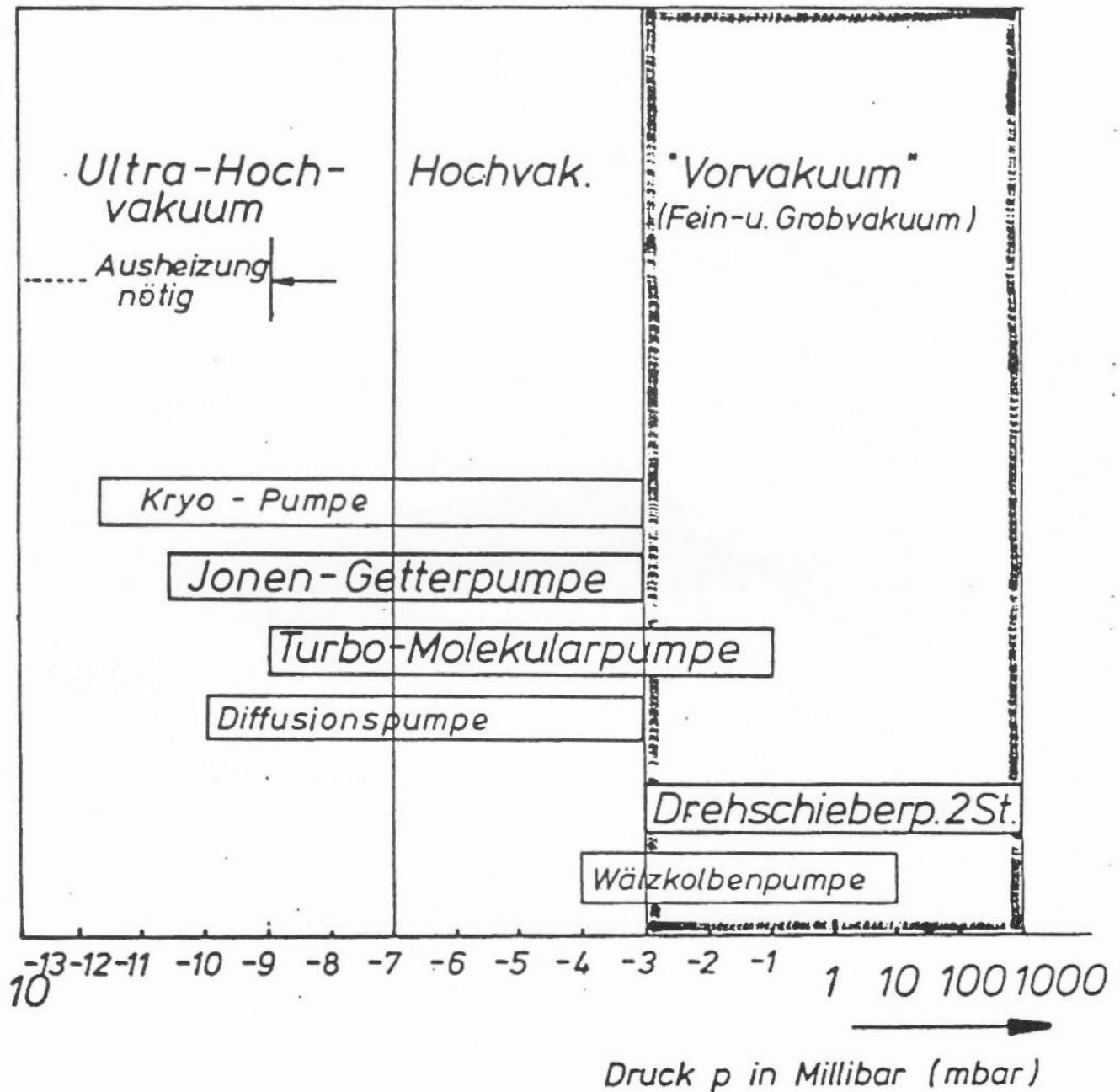
Sie sind im ersten Teil dieser Kursunterlagen zusammengestellt.

Herr Y. Holler übernahm das Schlußlektorat.

Allen, die so am Zustandekommen dieser Unterlagen mitgewirkt haben, danke ich, vor allem im Namen der Leser, recht herzlich. Chr. Falland.

Hamburg, im Dezember 1992

Arbeitsbereiche einiger Vakuum - Pumpen



Einteilung der Vakuum-Pumpen nach dem Wirkungsprinzip

Mit einigen Beispielen zu jeder Gruppe

Verdrängerpumpen ("Kolben")

Drehschieberpumpen

Wälzkolbenpumpen

Treibmittelpumpen (Flüssigkeits- oder Dampfstrahl)

Diffusionspumpe (Öl-) (Früher auch Quecksilber-)

Molekularpumpen (Schnellbewegte Flächen)

Turbo-Molekularpumpe

Sorptionspumpen (Oberflächenpumpen)

Adsorptionspumpen (Aktivkohle, Zeolith)

Titan- Verdampferpumpen ("Sublimationspumpen")

Ionenzerstäuberpumpen ("Ionengetterpumpen")

Kryopumpen (Kältepumpen)

Bad- Kryopumpen

Refrigerator- Kryopumpen (Mit eigener Kältemaschine)

Maßeinheiten für Vakuumpumpen

Saugvermögen S in l/s (Liter pro Sekunde)

Typenschild-Angabe einer Vorpumpe oft in "m³/h" (Kubikmeter pro Stunde)
Umwandlung: m³/h : 3,6 = l/s

Endvakuum in mbar

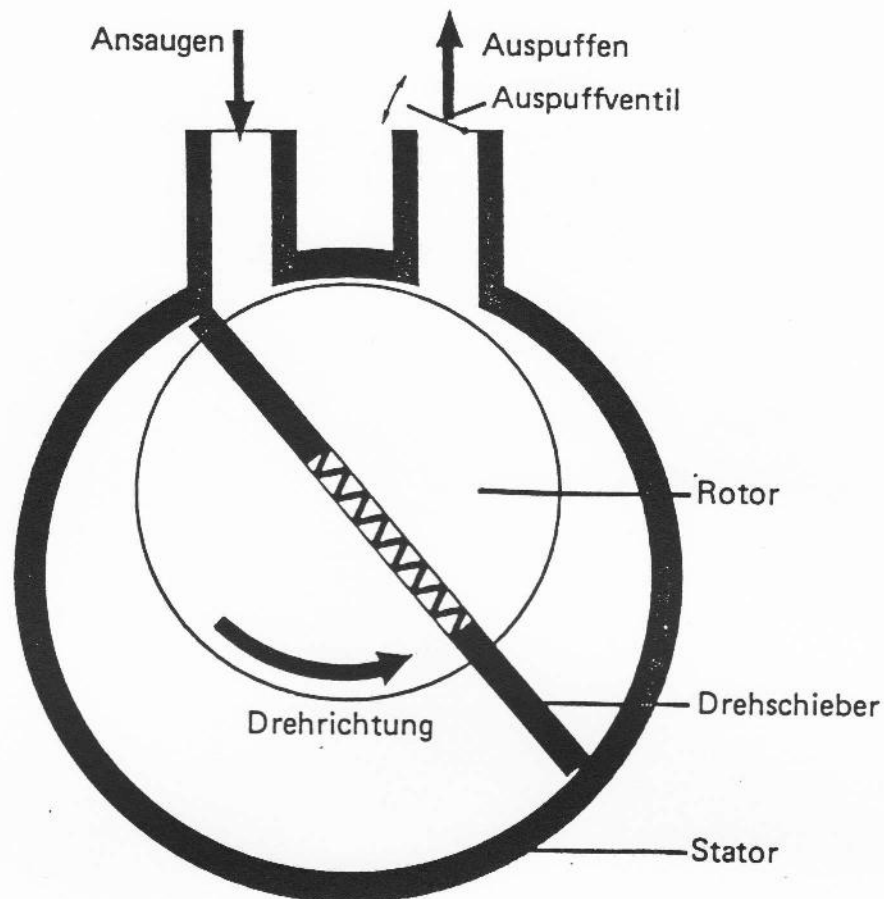
Katalogangabe. Meßbedingungen beachten!

Fördergasstrom Q in mbar.l/s (Millibar mal Liter pro Sekunde)

Erläuterungen an einem Beispiel mit Wasser:

Stellen Sie sich vor, Sie möchten eine mit Wasser gefüllte Badewanne ausschöpfen. Dazu steht Ihnen ein Eimer mit 10 Liter Inhalt zur Verfügung. Sie sind in der Lage, den Eimer pro Sekunde 1 mal zu füllen und wieder auszuleeren. Ihr "Schöpfvermögen" wäre dann 10 l/s (Zehn Liter pro Sekunde). Eine andere Frage ist nun, wie hoch ist Ihre wirkliche "Förderleistung"? Sind Sie sicher, den Eimer wirklich jedesmal randvoll zu bekommen? Bei abnehmendem Wasserstand in der Badewanne sicher nicht mehr!- Diese Eimerfüllung ist nun, in die Gasphysik übertragen, der Gasdruck. Multipliziert mit dem pro Sekunde bereitgestellten Schöpfraum, gibt er den wirklichen Gasdurchsatz der Pumpe an.

DREHSCHIEBERPUMPE



Die DREHSCHIEBERPUMPE wurde von Wolfgang Gaede 1909 erfunden.

Im exzentrischen Innenteil sind federnd zwei Schieber gelagert. Sie gleiten an der Wand des Außenringes entlang (Stator). Bei der Drehung des Innenteils (Rotor) entstehen Räume, die sich abwechselnd vergrößern und verkleinern.

Dadurch wird das Gas angesaugt, komprimiert und ausgestoßen.

Bei DESY werden meistens zweistufige Pumpen als "VORPUMPEN" für die Turbomolekularpumpen verwendet.

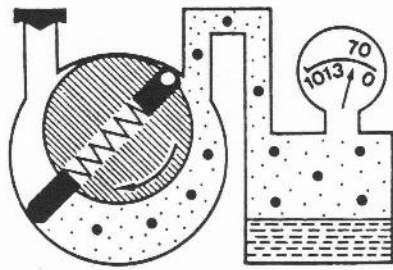
Technische Daten der Pumpe:

Betriebsdrehzahl: 1400 Umdrehungen/min

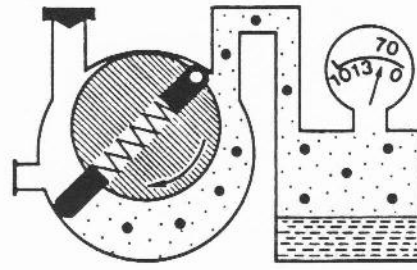
Arbeitsbereiche: Grob- und Feinvakuum

Endvakuum: 10^{-3} mbar

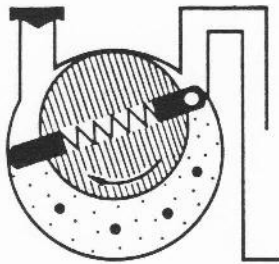
Dieser Pumpenteil bildet das Zentrum einer $30 \text{ m}^3/\text{h}$ - Vorpumpe



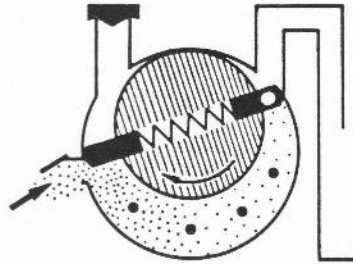
a₁



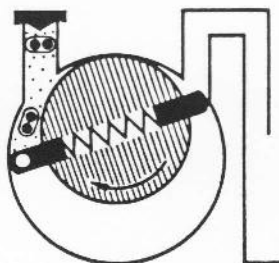
b₁



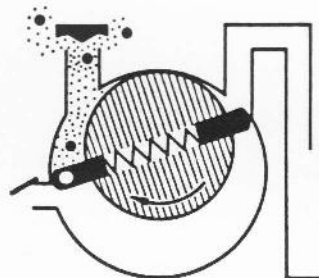
a₂



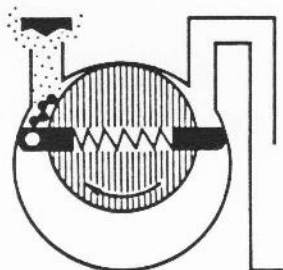
b₂



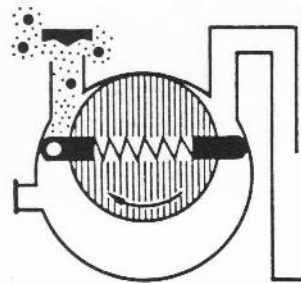
a₃



b₃

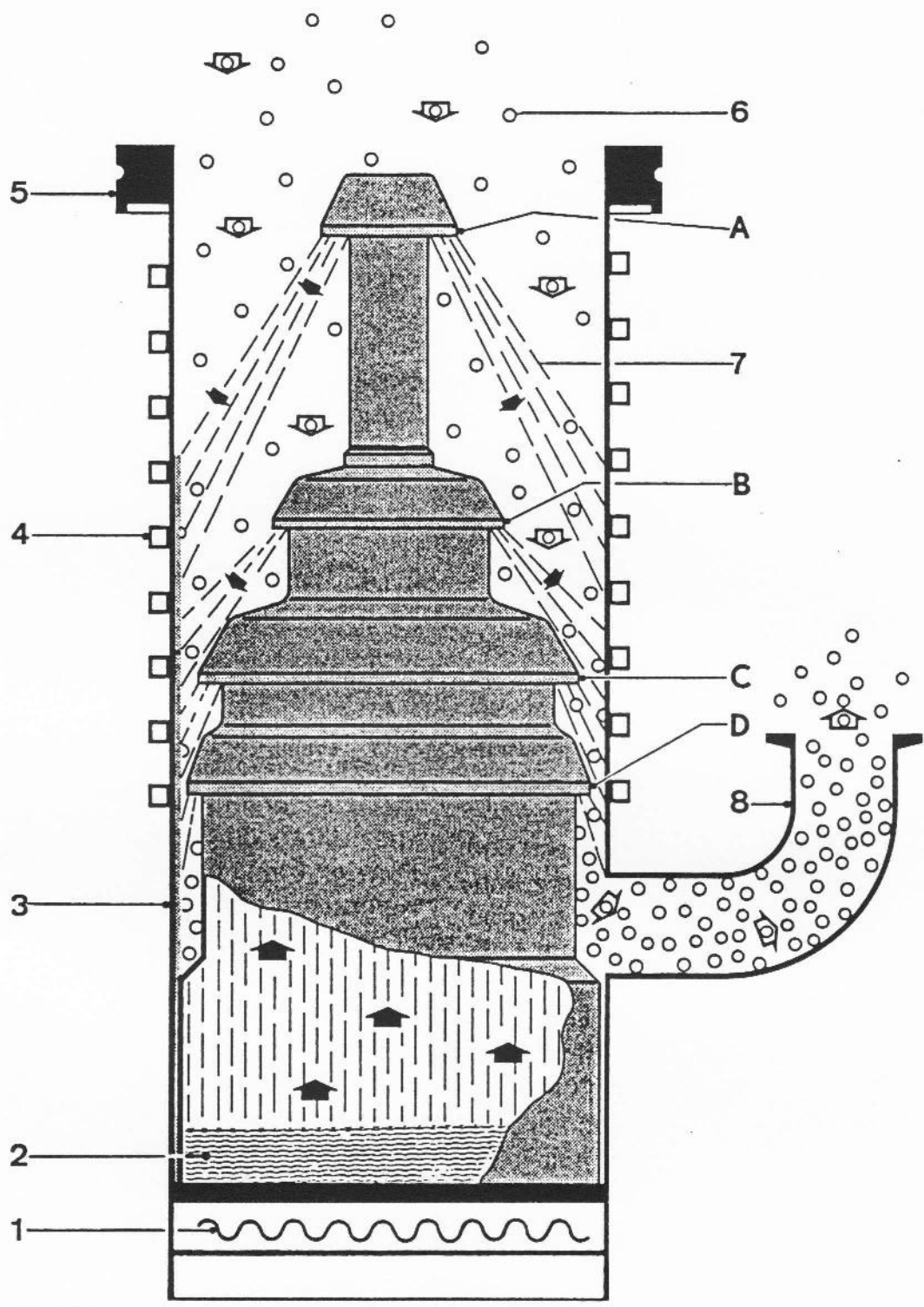


a₄



b₄

Veranschaulichung des Pumpvorganges in einer Drehschieberpumpe ohne (links) und mit (rechts) Gasballasteinrichtung beim Absaugen kondensierbarer Dämpfe
 ● = Dampfteilchen

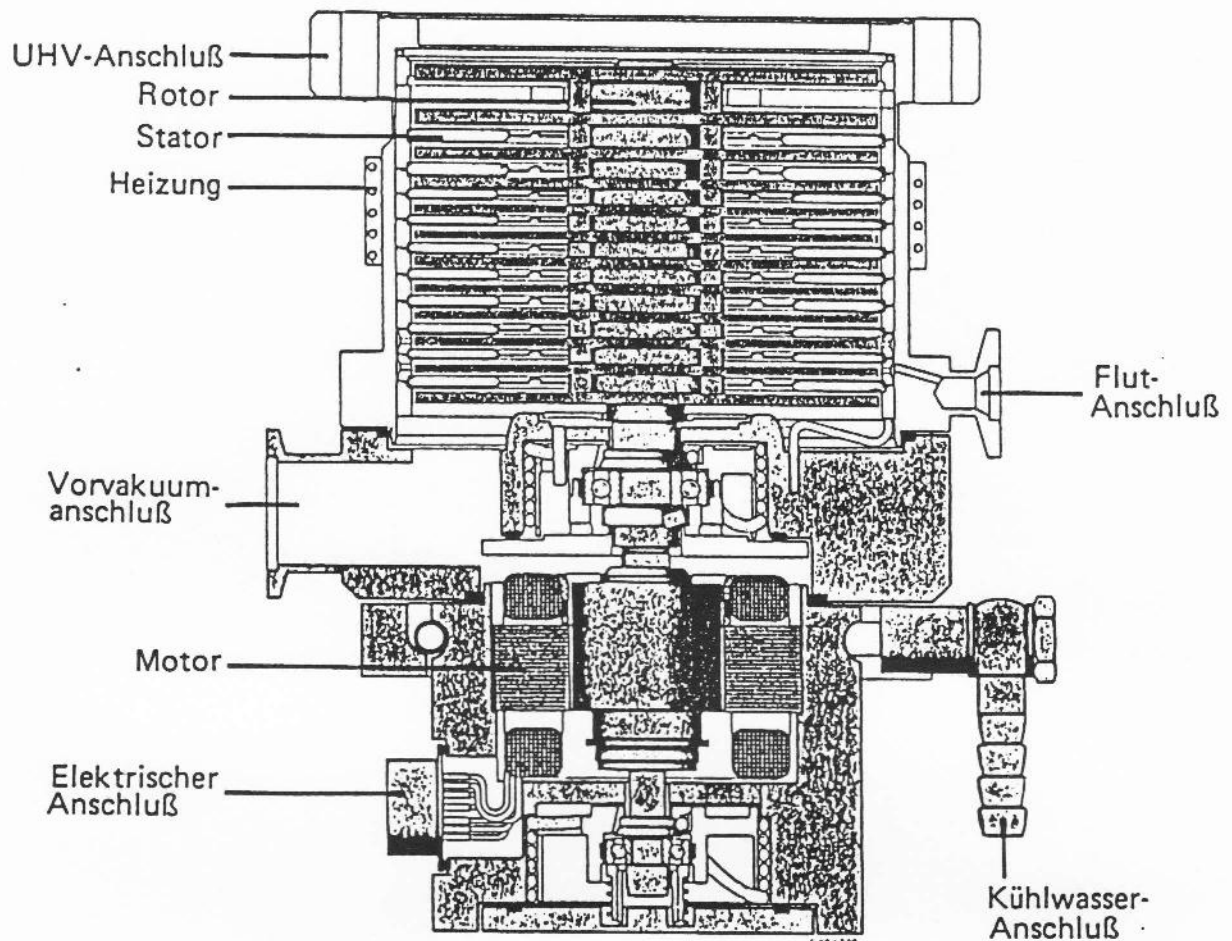


Zur Arbeitsweise einer Diffusionspumpe

- 1 Heizung
- 2 Siederaum
- 3 Pumpenkörper
- 4 Kühlrohre

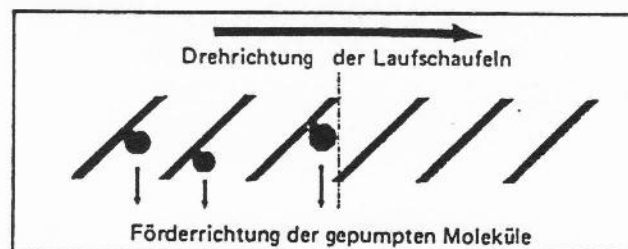
- 5 Hochvakuumflansch
- 6 Gasteilchen
- 7 Dampfstrahl
- 8 Vorvakuumstutzen
- A-D: Düsen

TURBO-MOLEKULARPUMPE



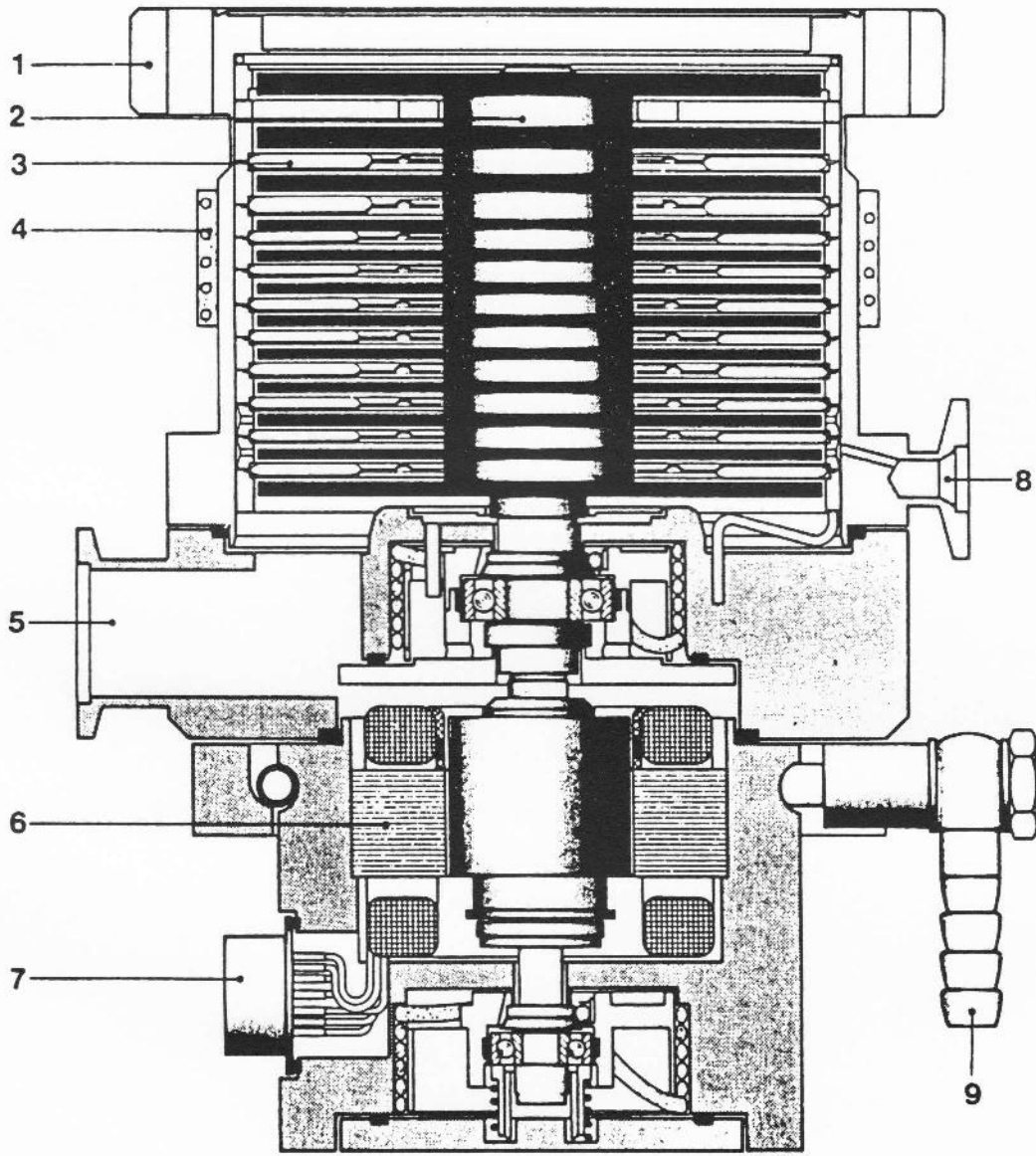
Die Turbo-Molekularpumpe wurde von W. Becker 1958 erfunden.

Die hohtourigen "Turbinenschaufeln" erreichen mit ca. 300 m/sec. fast Schallgeschwindigkeit. Damit sind sie in der Lage, den Molekülen im Vakuumraum einen Impuls in Förderrichtung zu geben. Die Skizze soll das verdeutlichen:



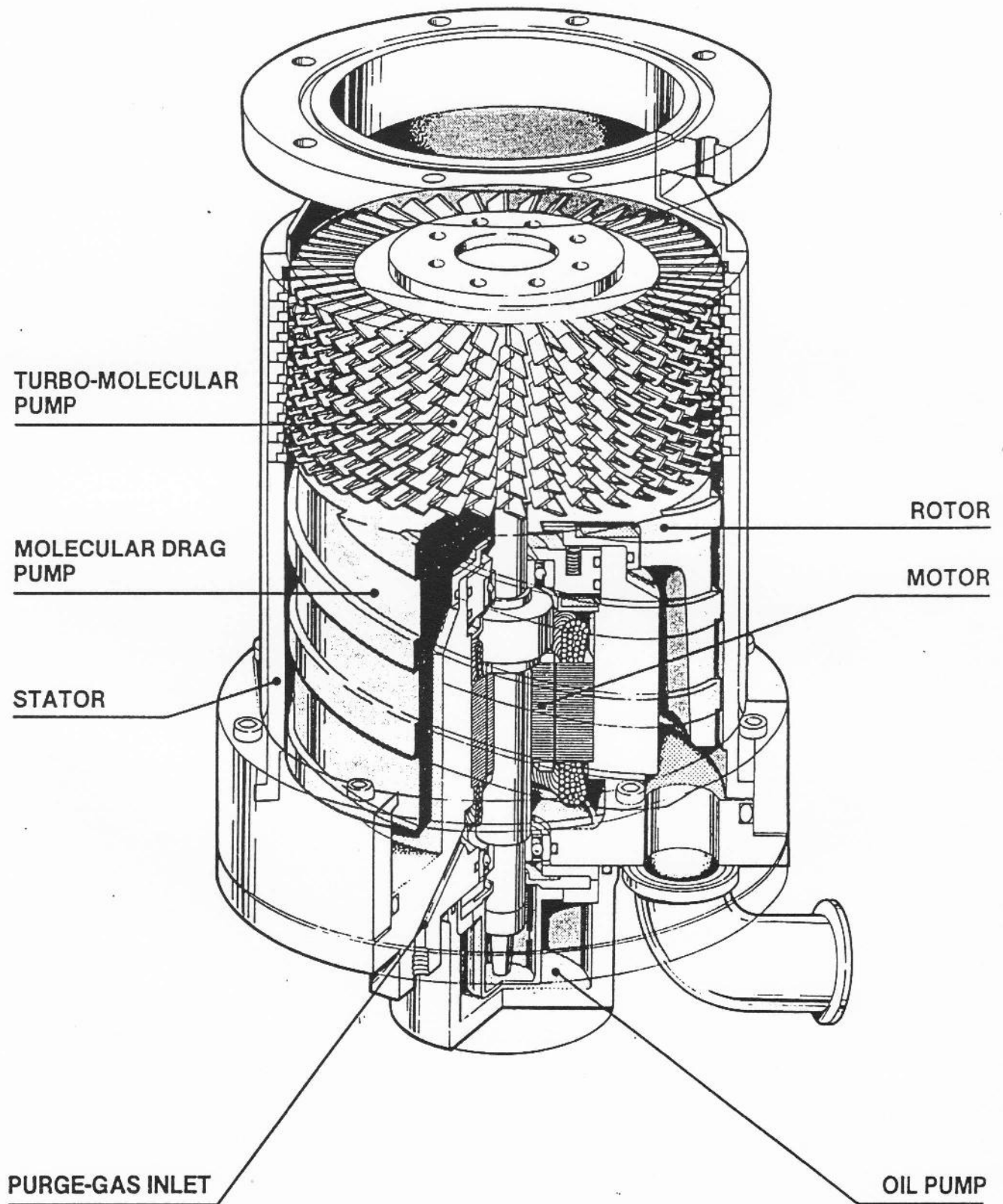
Man kann diesen Pumpentyp als eine Art "Superstaubsauger für Gasmoleküle" ansehen.

Technische Daten der Pumpe:
 Durchmesser: 100 mm
 Drehzahl: 43000 Umdrehungen /min
 Vakuumbereich: 10^{-2} – 10^{-9} mbar
 Saugvermögen: 110 l/sec.



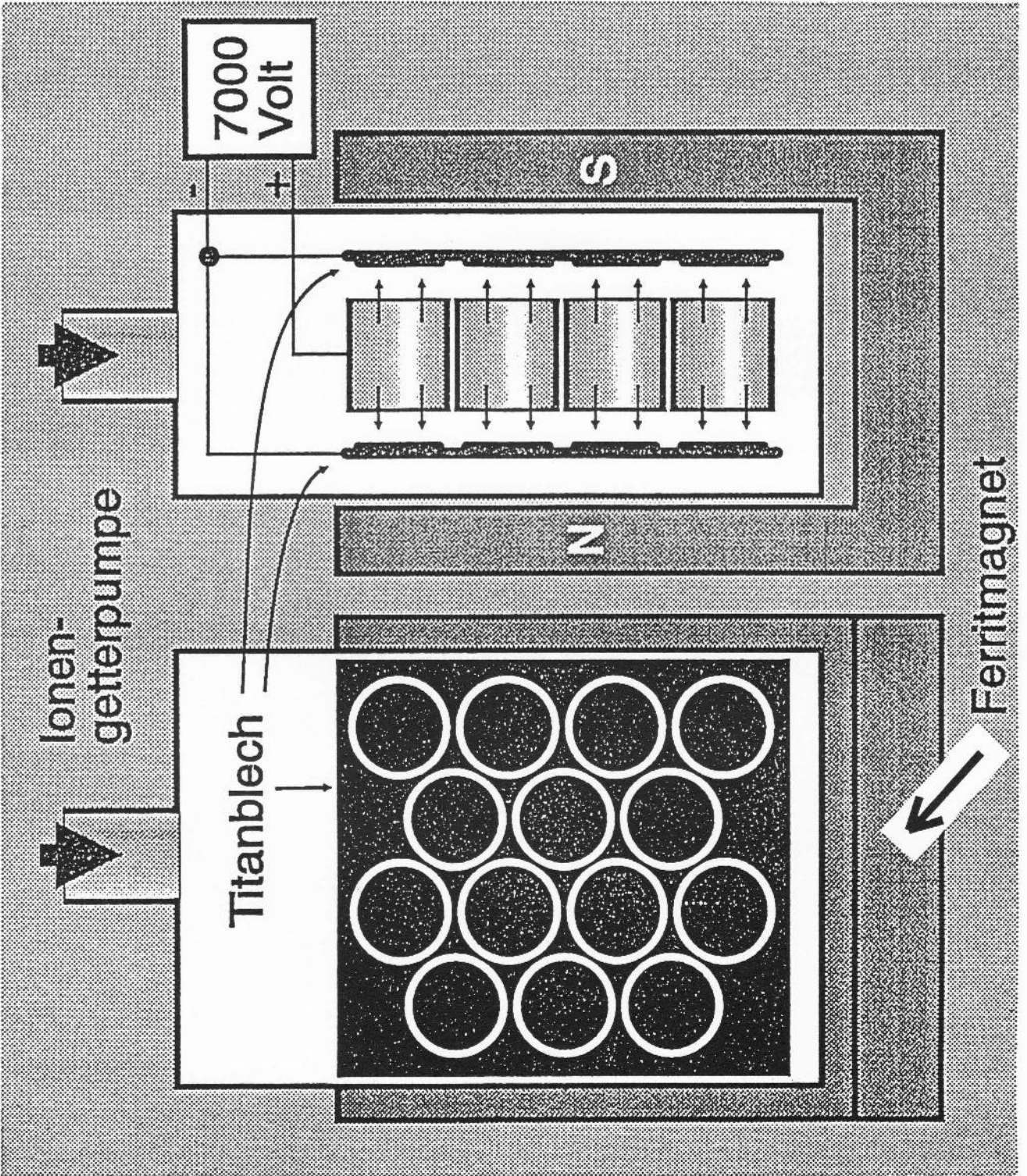
- | | | |
|-----------------|----------------------|--------------------------|
| 1 UHV-Anschluss | 4 Heizung | 7 Elektrischer Anschluss |
| 2 Rotor | 5 Vorvakuumanschluss | 8 Flutanschluss |
| 3 Stator | 6 Motor | 9 Kühlwasseranschluss |

Schnittdarstellung TURBO 170

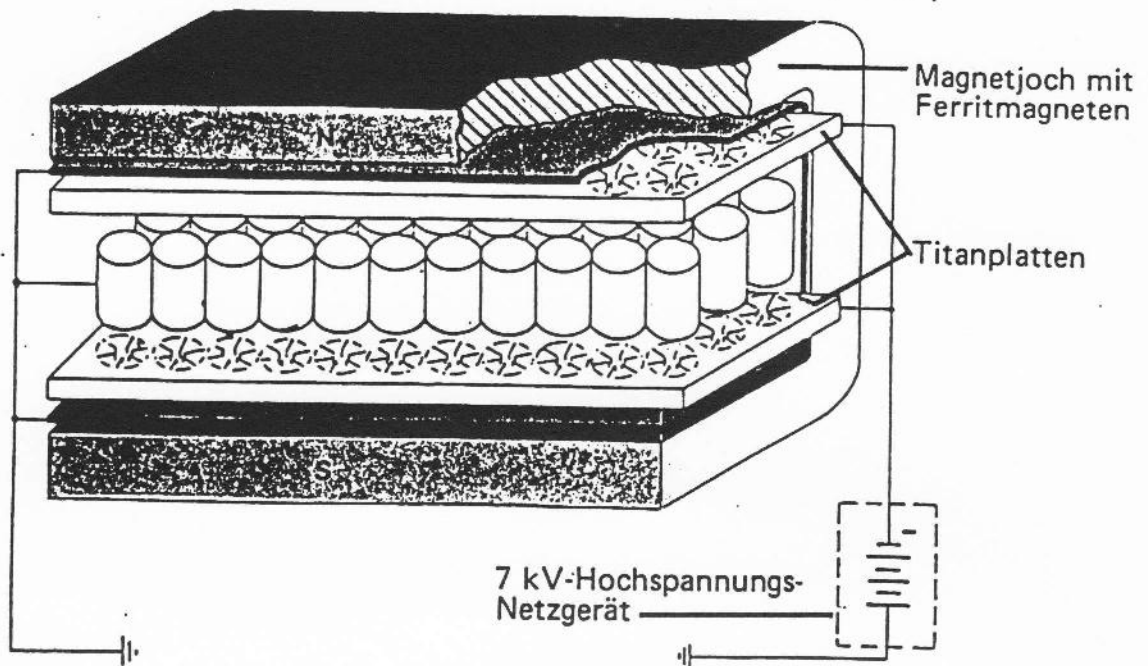


. Hybrid type turbomolecular pump (courtesy of Osaka Vacuum).

Turbomolekularpumpe und Molekularpumpe auf einer Achse



IONEN-GETTERPUMPE (IONEN-ZERSTÄUBERPUMPE)

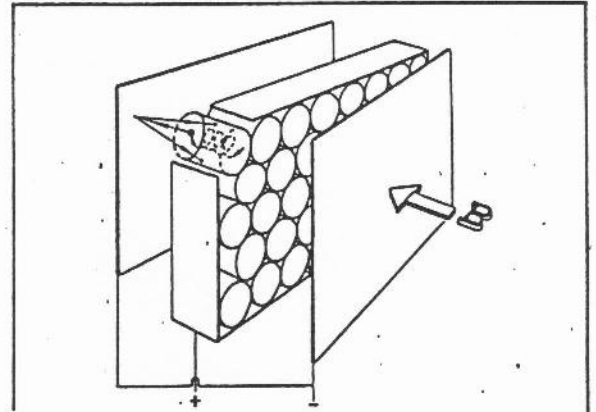


- Die IONEN-ZERSTÄUBERPUMPE hat keine mechanisch bewegten Teile
- Sie hat auch keinen Auspuff
- Sie wird durch HOCHSPANNUNG betrieben
- In ihr werden Gasmoleküle elektrisch aufgeladen = IONISIERT
- Die Ionisierung wird durch ein MAGNETFELD verstärkt
- Die entstandenen IONEN werden durch die Hochspannung auf die Wände des Pumpengehäuses geschossen
- Dort sind TITANPLATTEN angeordnet, deren Oberfläche durch die auftreffenden Ionen teilweise ZERSTÄUBT wird
- An dieser und in dieser zerstäubten Metalloberfläche binden sich sehr gut Gase. Man nennt dies GETTERWIRKUNG
- Aus diesem Grund wird die IONENZERSTÄUBERPUMPE auch oft IONEN-GETTERPUMPE genannt

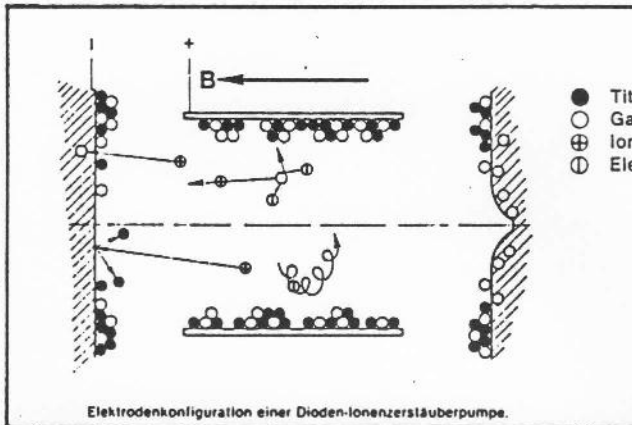
Technische Daten der Pumpe:

Flanschdurchmesser:	100 mm
Saugvermögen:	60 Liter/sec
Einsatzbereich:	10^{-3} mbar – 10^{-10} mbar
Zu dieser Pumpe gehört ein Hochspannungs-Betriebsgerät mit einer Spannung von 7000 V = (nicht ausgestellt).	
Pumpengewicht:	20 kg

Funktion von Ionenzerstäuberpumpen
- ("Ionengetterpumpen")

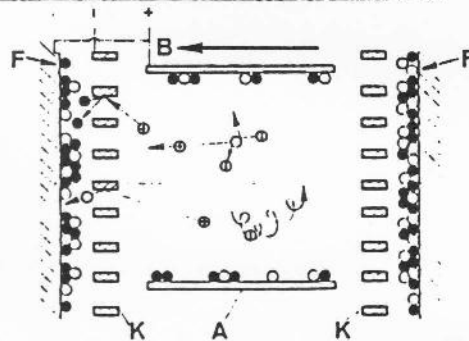


Einblick in eine Pumpenzelle
Links unten vergrößert



- Titanatome
- Gasteilchen
- ⊕ Ionen
- ⊖ Elektronen

Elektrodenkonfiguration einer Dioden-Ionenzerstäuberpumpe.

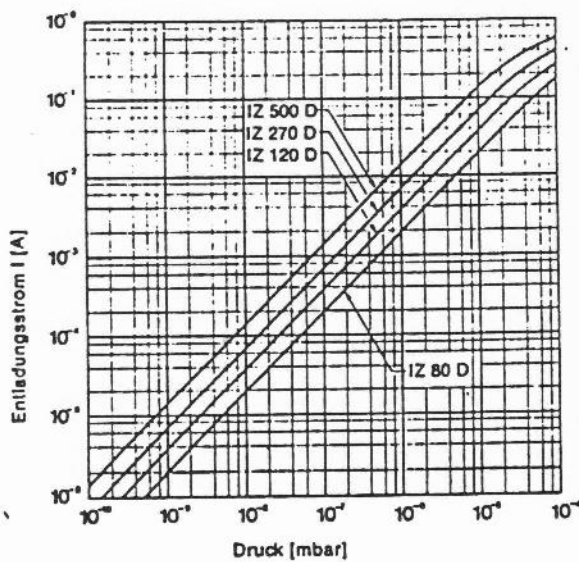


- Titanatome
- Gasteilchen
- ⊕ Ionen
- ⊖ Elektronen

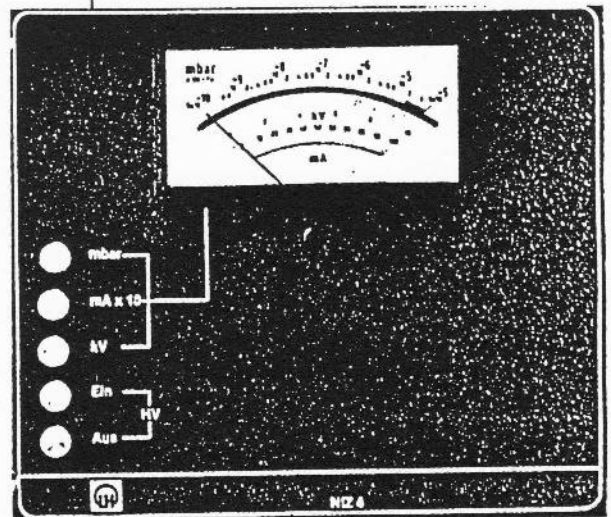
Elektrodenkonfiguration einer
Trioden-Ionenzerstäuberpumpe.

- A Anodenzylinder (wie bei der Diodenpumpe)
- K Kathodengitter
- F Auffänger (Pumpengehäuse) als dritte Elektrode
- B Magnetfeld

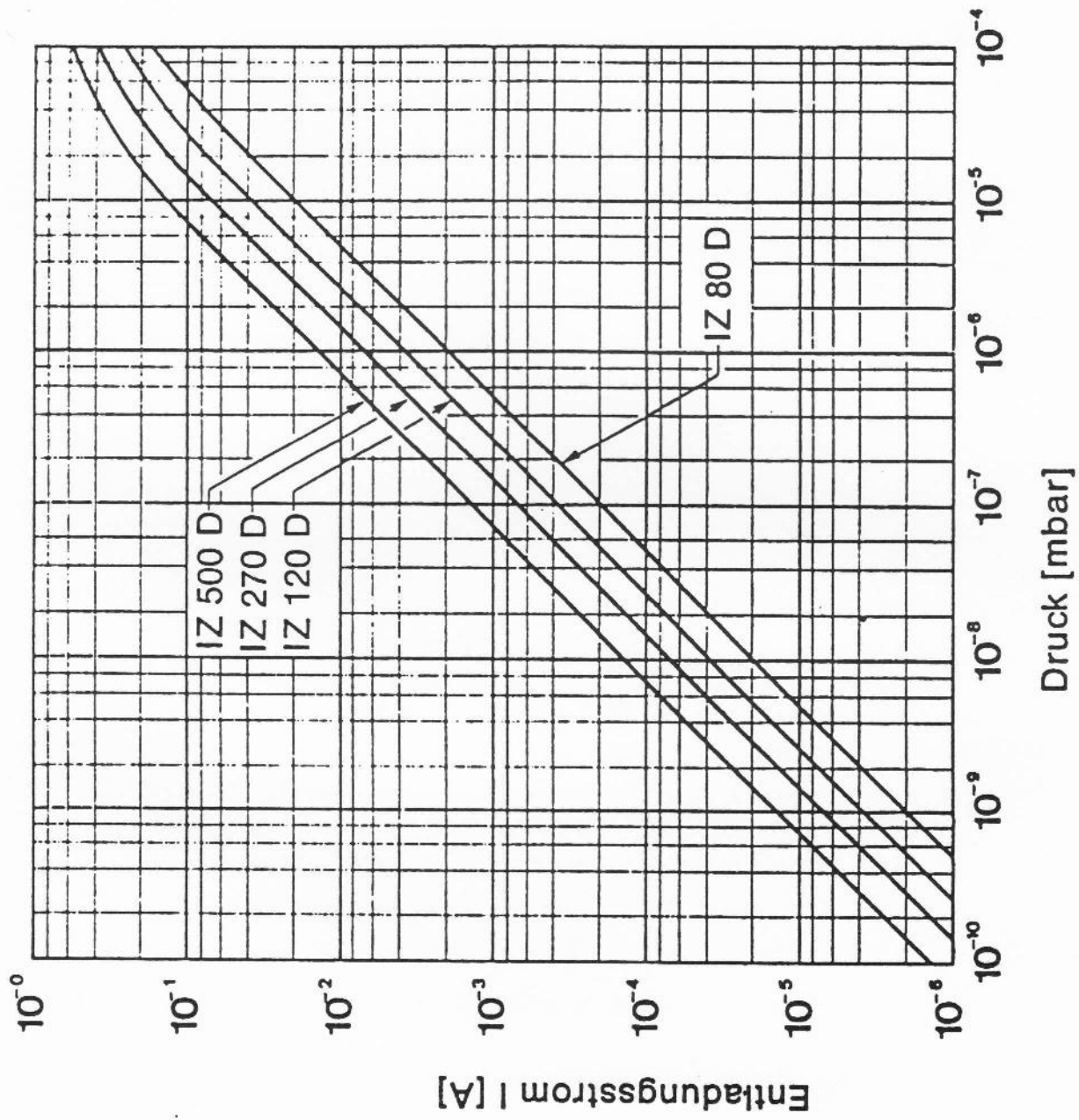
Der Entladungsstrom kann als Maß
für den Druck dienen



Entladungsstrom der Ionen-Zerstäuberpumpen IZ 80 D bis IZ 500 D in Abhängigkeit vom Ansaugdruck



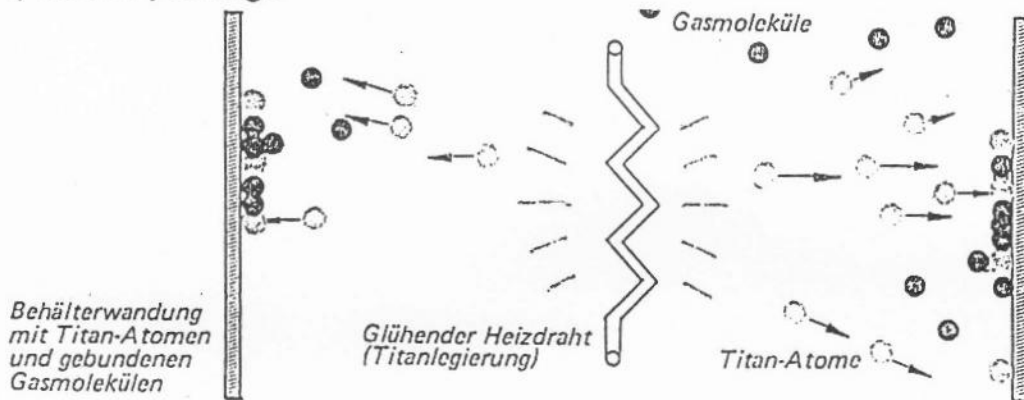
Hochspannungs-Netzgerät
mit Druck-Ablesung



Entladungsstrom der Ionen-Zerstäuberpumpen IZ 80 D bis IZ 500 D in Abhängigkeit vom Ansaugdruck

TITAN-SUBLIMATIONS-PUMPE ("Titan-Verdampferpumpe") — (TSP) —

Zusätzlich zu den bisher an den DESY-Beschleunigern und Speicherringen verwendeten Vakuumpumpen wird zur Erzeugung eines Ultra-Hochvakuums in den Strahlrohren des Protonen-Speicherringes von HERA ein weiterer Pumpentyp eingesetzt, die TITANSUBLIMATIONS-PUMPE (TSP). Dieser Typ gehört zu den "Sorptionspumpen", bei denen eine Gasbindung durch eine aktive Oberfläche ("Getter") erfolgt.



FUNKTION: Eine der auswechselbaren Heizwendel aus dickem Titan-Molybdän-Draht wird durch einen starken Strom auf Weißglut erhitzt. Dabei verdampft der Titan-Legierungsbestandteil. Dies nennt man "Sublimation".

An den erreichbaren kälteren Oberflächen des Pumpenraumes schlägt sich der Titandampf als sehr dünner Film von nur wenigen Atomlagen nieder. Dieser hat für "chemisch aktive Gase" (H_2 , N_2 , O_2 , CO , CO_2 , H_2O) sehr starke Gasbindungs-Eigenschaften.

SÄTTIGUNG: Durch diese chemische Bindung erschöpft sich der Titanfilm je nach Gasanfall. Die Pumpenfläche ist dann gesättigt.

REGENERIERUNG: Das Titanverdampfen geschieht nur kurzzeitig mit längeren Pausen durch ein elektrisches Kontrollgerät.

Technische Daten, Richtwerte

Heizstrom: 30 ... 60 A

Glühtemperatur: 1350 °C

Einschaltzeit im UHV: Sekunden bis Minuten

Pumpzeit im UHV: Tage bis Wochen

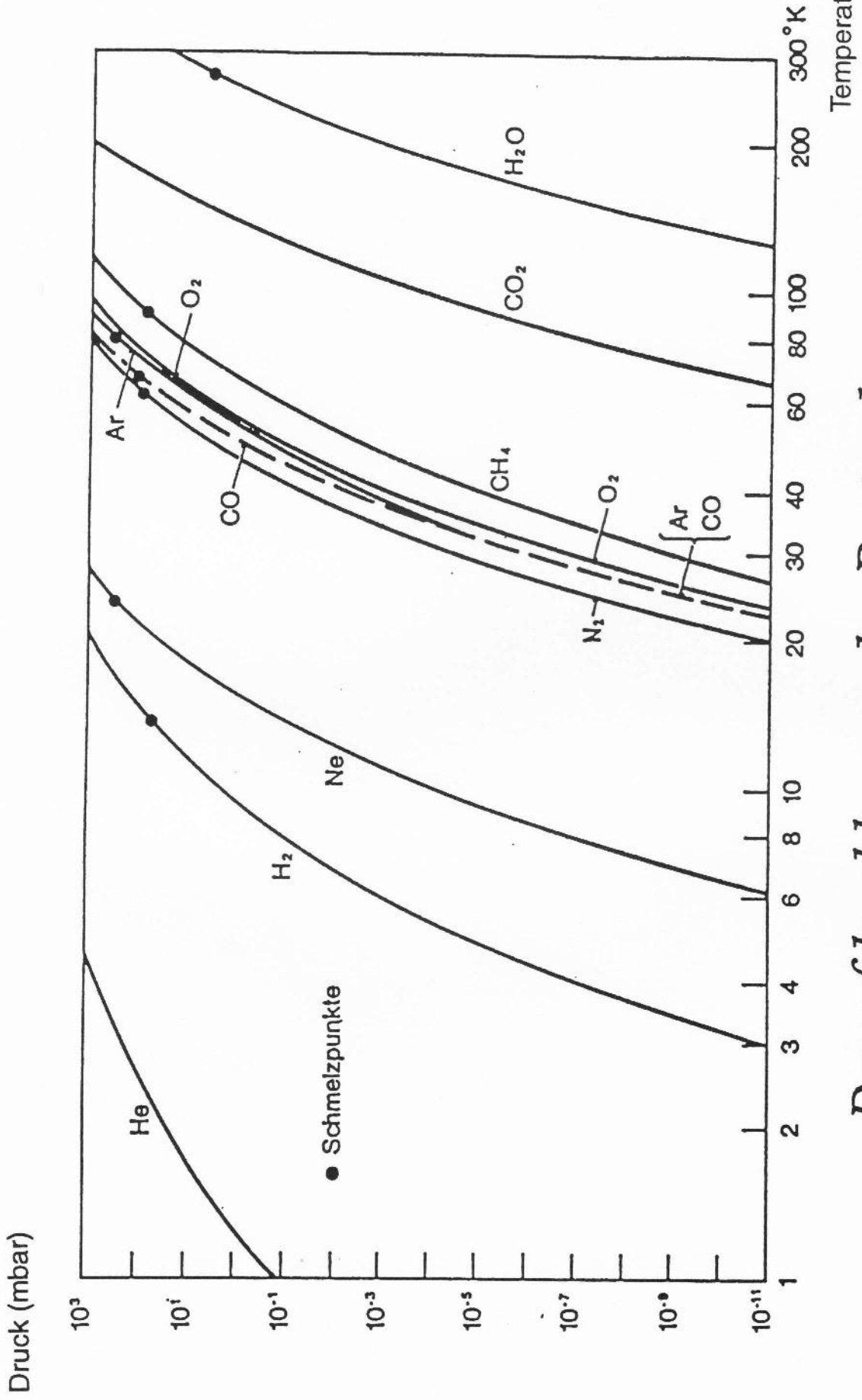
Enddruck: ca. 10^{-11} mbar

Titanvorrat pro Heizdraht: ca. 1 g

Titanverbrauch im Dauerbetrieb: ca. 0,1 g/h

Typ Saugvermögen in 150-mm-Rohr: 1000 Vs

Pumpentype: Balzers USP / DESY PVAK 1990 / cfa



Dampfdruckkurven der Restgaskomponenten

Die Dampfdruckkurven sind für die Wirkung der Kryopumpen maßgebend (Balzers)

Betrieb von Vakuumpumpen- und Anlagen

Tips von Praktikern für Praktiker

Vor dem Einschalten von Vorpumpen:

Ölstand prüfen / Ölwechseletikett vorhanden?

Ölfarbe prüfen: Wenn sehr dunkel und undurchsichtig, wechseln! Milchigweißes Öl enthält Wasser!

Drehrichtung bei Drehstrommotor prüfen: Hand auf Auspuffstutzen, sehr kurz einschalten!

Stellung Gasballastventil prüfen. Luftspüventil zur Verhinderung / Entfernung von (Wasser-) Kondensat.

Auspuff-Filter oder Auspuffschlauch angeschlossen?

Auspumpzeit / Pumpendimension mit " $\frac{1}{3}$ - Formel " abschätzen.

Einschalten von Vakuumanlagen allgemein:

Ölschauglas an der Turbopumpe ? OK ?

Betriebsstundenzähler an der Turbopumpe ? Schmierstoffetikett ?

Pumpengeräusche beim Hochfahren wahrnehmen.

Neues oder geändertes Vakuumsystem ? Flansch lose oder Dichtung vergessen?

Sind eigentlich die Meßinstrumente und Kathoden heil ?

Dauerbetrieb von Vakuumanlagen mit mechanischen Pumpen:

Ölstand / Temperatur / Geräusche von Zeit zu Zeit prüfen.

Betriebsstundenzähler bei Turbopumpen prüfen / Wartung planen.

Bei TP mit Drehzahlreduktion reicht oft $n = 60\%$.

Turbopumpen im Betrieb nicht anstoßen. Kreiselkräfte.

Was geschieht bei Strom / Preßluftausfall. Test.

Stillsetzen / Fluten von Vakuumanlagen:

Beim Stillsetzen von Turbomolekularpumpen **muß** geflutet werden.

Kathoden und Meßinstrumente ausschalten !

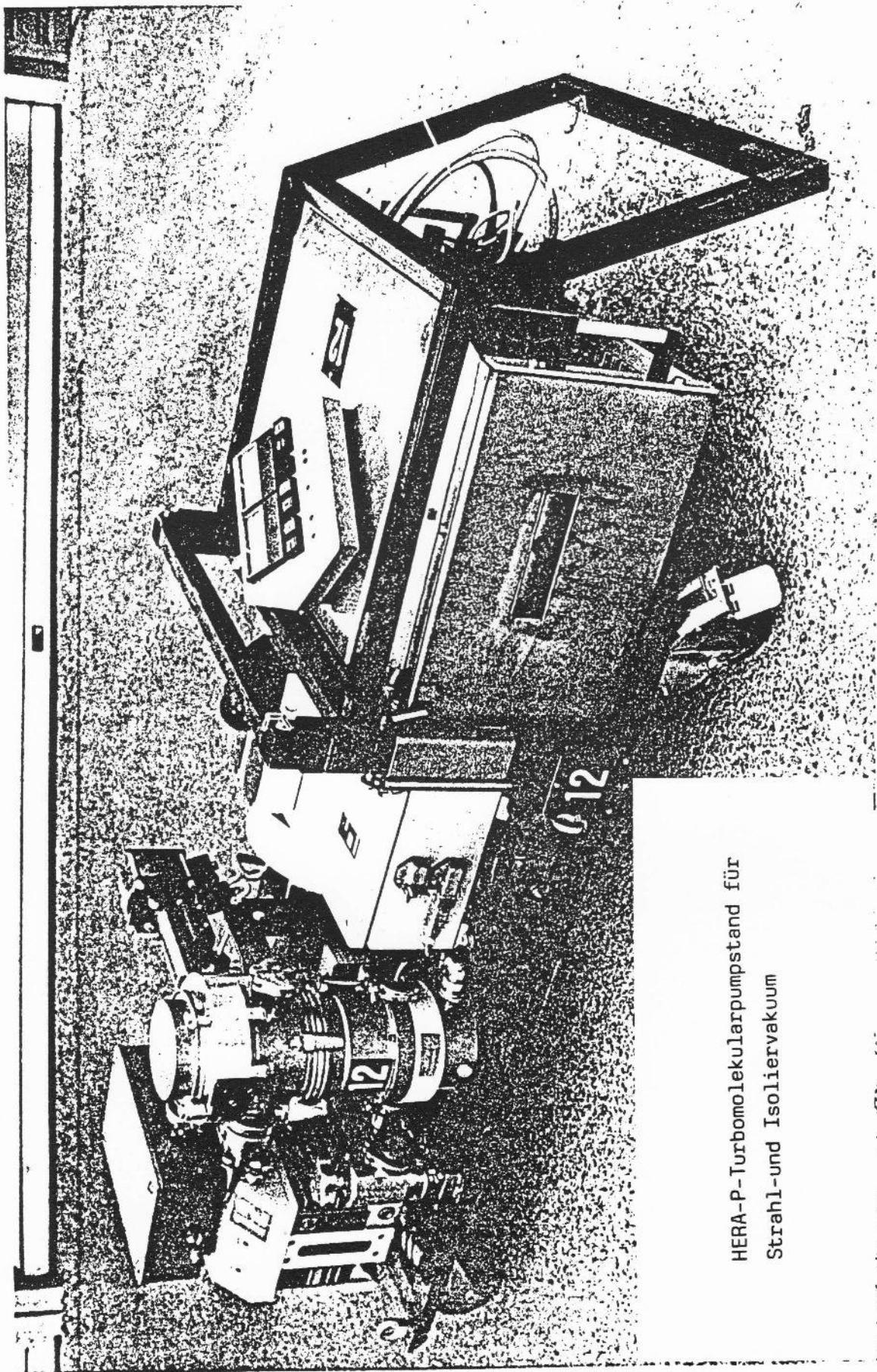
Vor Öffnen der Hochvakuumanlagen wird mit Trockenstickstoff geflutet.

Öffnungszeit kurz halten.

Während des Öffnens: Trockengasspülung.

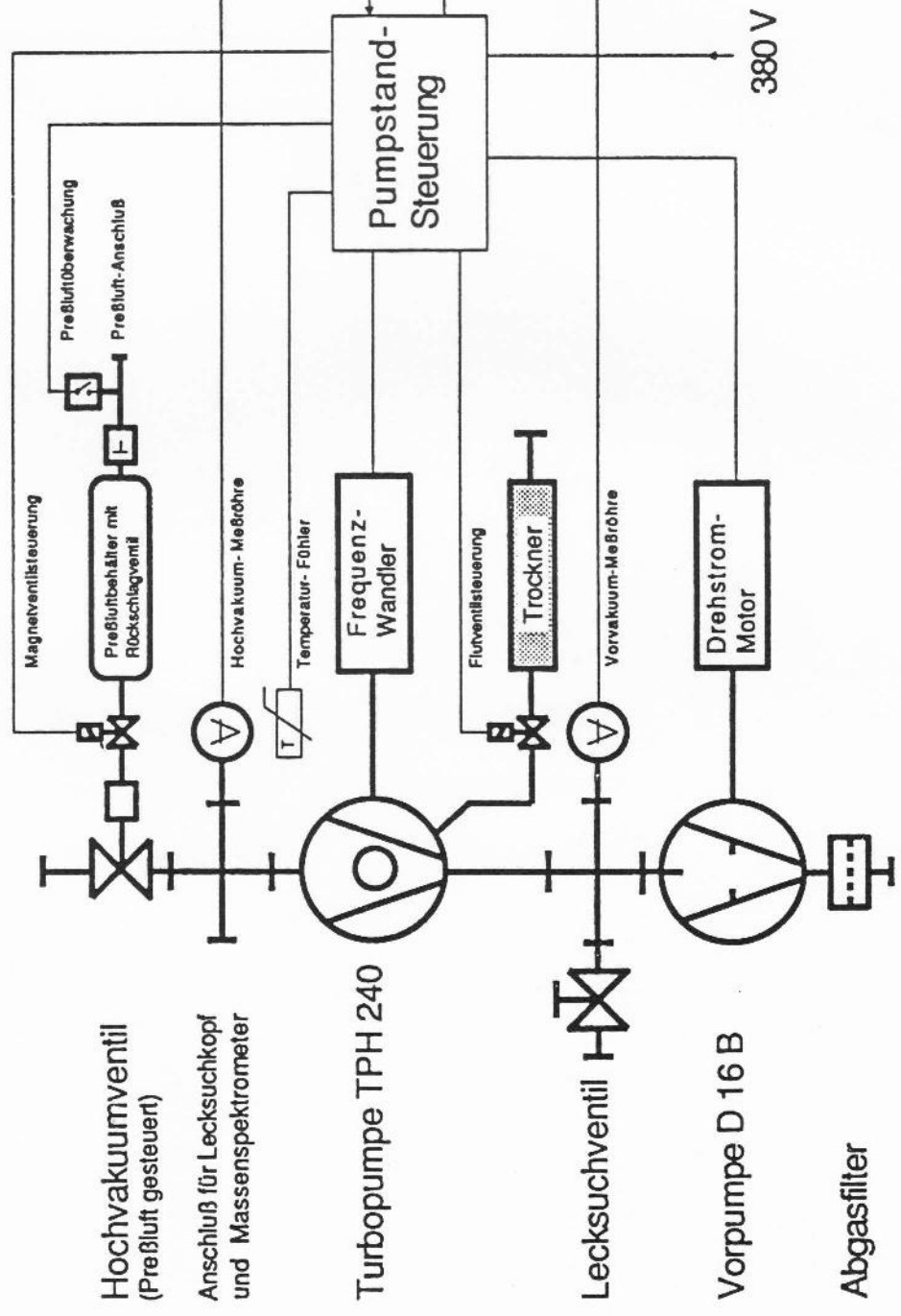
Nicht mit der bloßen Hand hineinfassen. Werkzeuge vorher reinigen.

Wenn Flansch fehlt: Grundsätzlich Schutzkappe aufsetzen.

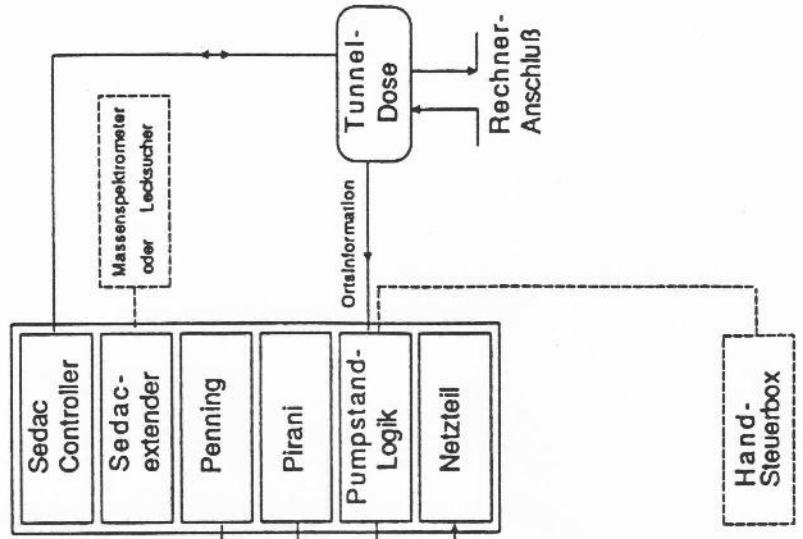


HERA-P-Turbomolekularpumpstand für
Strahl- und Isoliervakuum

Vakuumsystem



Sedac-Crate



HERA-P-Pumpstand mit Steuerung, Schema

Pumpstand, Steuerung und Logik

Unter "Pumpstand" wird bei DESY in den meisten Fällen "Turbopumpstand", das heißt die Kombination aus Drehschieberpumpe als Vorpumpe mit einer Turbo-Molekularpumpe verstanden. Hierzu Skizze "Aufbau".

Aufgaben des Pumpstandes :

Allgemein:

Erzeugung von Hochvakuum in den Beschleunigern und Speicherringen, so daß die Getterpumpen gestartet werden können.

Im einzelnen:

Abpumpen vom Atmosphärendruck.

Abpumpen der desorbierten Gase beim Ausheizen.

Abpumpen des Leckgasstromes zum Lecksuchen und zur massenspektrometrischen Untersuchung.

Aufgaben der Steuerung:

Die Steuer- und Logikfunktionen entsprechen der Einsicht in die "Kostbarkeit" des sauberen Beschleuniger- und Speicherringvakuums:

Prüfung, ob im Pumpstand selber alles in Ordnung ist.

Zwang zur richtigen Bedienung.

Vermeidung von Ölrückströmung aus dem Pumpstand,

Vermeidung von "Flutung" aus dem Pumpstand durch

"Ventilsteuerlogik" als wichtigster Bestandteil.

Definiertes Verhalten bei Stromausfall und Stromwiederkehr.

Definiertes Verhalten bei Ausfall von Pumpstandbauteilen.

Fernbedienung und Fernmessung.

Zentrale Bedienung und Datenerfassung:

Beim Beschleunigerbetrieb ist die Überwachung und Bedienung der Pumpstände nur vom zentralen Kontrollraum aus möglich. Hierzu dient ein Rechner, der auch die Datenerfassung der Vakuum-Meßwerte über lange Zeiten wahrnimmt. Diese Daten und ihre übersichtliche Darstellung sind eine wesentliche Hilfe bei der Beurteilung der Vakuumsysteme. (Siehe Abpumpkurven und Beurteilung der Dichtheit).

Die Entwicklung der Drehschiebervakuumpumpe

Dieter Oswald

Seit ihrer Erfindung durch Karl Wittig vor über 100 Jahren wurde die Drehschiebervakuumpumpe entsprechend der an sie gestellten Anforderungen stetig weiterentwickelt. Wurde sie anfänglich nur als „Luftpumpe“ in der physikalischen Forschung benutzt, so verlangte in den folgenden Jahren ihr größer werdender Einsatz als Prozessvakuumpumpe in der chemischen Industrie verstärkt Modifikationen, weniger des eigentlichen Pumpenprinzips als vielmehr der Details und der verwendeten Materialien.

Dieser Aufsatz soll keinen vollständigen Überblick über die historische Entwicklung der Drehschieberpumpe geben, sondern möchte lediglich wichtige Entwicklungsstufen aufzeigen.

Die Anforderungen aus Forschung und Industrie an die Drehschieberpumpe bestimmten die Richtung und das Tempo der Entwicklung. Immer wieder mußten die Pumpen neuen und schwierigen Aufgaben angepaßt werden.

Doch blicken wir kurz zurück. Nachdem Torricelli (1643) den „horror vacui“ überwunden hatte und die Luftpumpe von Otto von Guericke entwickelt worden war, sollte es noch gut zwei Jahrhunderte dauern, bis sich wesentliche Fortschritte in der Vakuumtechnik, speziell bei den mechanischen Vakuumpumpen, ergaben.

Alle Forscher und Erfinder versuchten bei ihren mechanischen Pumpen, das Problem des „schädlichen Raumes“ zu lösen. Darunter versteht man das Luftvolumen, das sich nicht vollständig verdrängen läßt, bevor der nächste Ansaugvorgang beginnt. Dieses Volumen expandiert in den Arbeitsraum der Vakuumpumpe und limitiert dadurch den Enddruck.

Um den „schädlichen Raum“ zu vermeiden, setzten bereits Robert Gill, Fleuss und Geißler (1857) Öl oder Quecksilber als Betriebsmittel ein.

Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts wurden Vakuumpumpen nahezu ausschließlich in der physikalischen For-

Die wichtigsten Entwicklungsschritte waren:

- der Laufring von Wittig
- das Gasballastprinzip
- der Einsatz von Kunststoffschiebern
- die Ölpumpe in der umlaufgeschmierten Version
- die Hinterschieberschmierung bei der frischölgeschmierten Drehschieberpumpe

schung eingesetzt. Grundlegende Entdeckungen, wie die des Elektrons der Röntgenstrahlung der Plasmaentladung in der Geißler'schen Röhre

und viele andere wurden erst mit Hilfe der Vakuumpumpe möglich. Zur selben Zeit begann die Entwicklung der Röntgenröhre Edison's Glühbirne und der Elektronenröhre.

An die dazu eingesetzten Vakuumpumpen wurden folgende Anforderungen gestellt:

kontinuierliche Arbeitsweise und Einsatz unter rauen industriellen Bedingungen.

Rotierende Vakuum- und Treibmittelpumpen waren die Antwort auf diese Herausforderungen.

Im Jahre 1885 entwickelte Karl Wittig die erste Drehschieberpumpe, die zur Gruppe der Vielschieberpumpen gehört (Abb. 1). Ihr Haupteinsatzgebiet war dabei nicht die Erzeugung von Vakuum als vielmehr die Erzeugung von Überdruck. Auch als Preßluftverdichter in Kohle- und

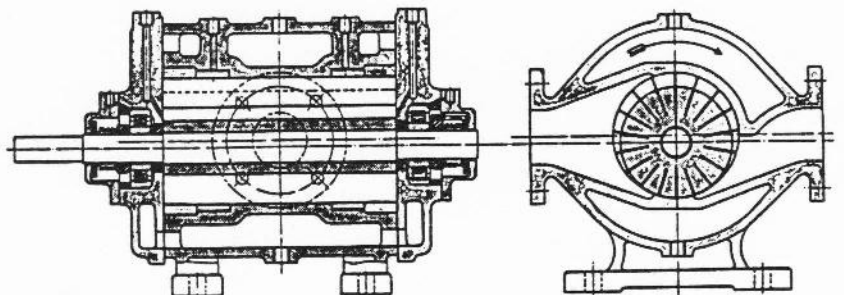


Abb. 1 Schnitt durch eine Vielschieberpumpe

Erzgruben und als Verdichter von Leuchtgas fanden diese Pumpen ihren Einsatz.

Der konstruktive Aufbau dieser Drehschieberpumpe änderte sich im Jahre 1908 durch die Idee der Gebrüder Wittig, Laufringe einzusetzen (Abb. 2), welche die Fliehkräfte auffangen und damit den Verschleiß wesentlich reduzieren. Gleichzeitig konnte dadurch die Pumpendrehzahl erhöht werden. Die Abdichtung der Arbeitsräume untereinander war durch die Vielzahl der Schieber von untergeordneter Bedeutung, weil durch sie die Druckdifferenzen zu den benachbarten Arbeitsräumen klein blieb. Rechts und links am Rotor gleiten die Schieber auf zwei Laufringen, die ihrerseits auf der Zylinderoberfläche gleiten. Dadurch ergeben sich verschiedene Relativgeschwindigkeiten zueinander.

Die Auslaßventile konnten entfallen und die Pumpe erreichte im Vakuumbetrieb einstufig bereits Drücke kleiner 50 mbar und zweistufig kleiner 5 mbar. Zur Schmierung der beweglichen Teile wurde Mineralöl eingesetzt. Seine Dosierung erfolgte in so geringer Menge, daß ein ausreichender Schmierfilm aufgebaut werden konnte und der Verschleiß minimal war.

Diese Pumpe fand später ihren Einsatz als Bremsvakuumpumpe, wie aus der „Schweizerischen Technischen Zeitschrift“ (Nr. 49, 1927) zu entnehmen ist. In der gleichen Zeitschrift wird eine weitere Anwendung beschrieben: Der Einsatz einer Pumpe zur Trocknung von 50% wasserhaltigem Kohlenstaub in einem Trommeltrockner.

Auch widrige Anwendungen hatte die Vakuumpumpe zu bewältigen, wie das folgende Beispiel zeigt:

Die Umweltprobleme unserer Vorfahren bestanden hauptsächlich in der Entsorgung menschlicher Fäkalien in größeren Städten. Um die Fäkalien anzusaugen, verwendete man auf Pferdefuhrwerke gepackte Behälter (ca. 3 m³), die durch Entzünden von Benzindämpfen unter Vakuum gesetzt wurden. Schon bald wurde für die Erzeugung des Vakuums eine benzinmotorbetriebene Vakuumpumpe eingesetzt. Das hohe Saugvermögen dieser Pumpe ließ größere Behälter zu. Gleichzeitig wurde durch die kontinuierlich saugende Pumpe die Befüllzeit reduziert (Abb. 3).

Einfachere Anwendungen waren das Abpumpen von Luft zur Herstellung von Glühbirnen. Auch als Bremsvakuumpumpe zur Betätigung von Eisenbahnbremsen

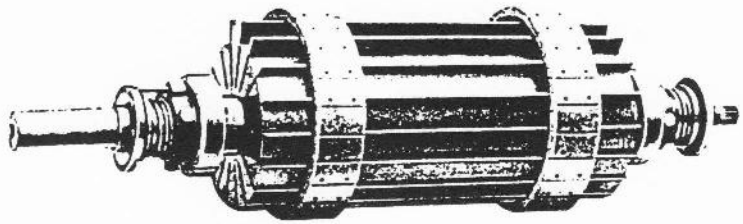


Abb. 2 Rotor einer Vielschieberpumpe nach Gebr. Wittig mit Laufringen und Lamellen (1908)

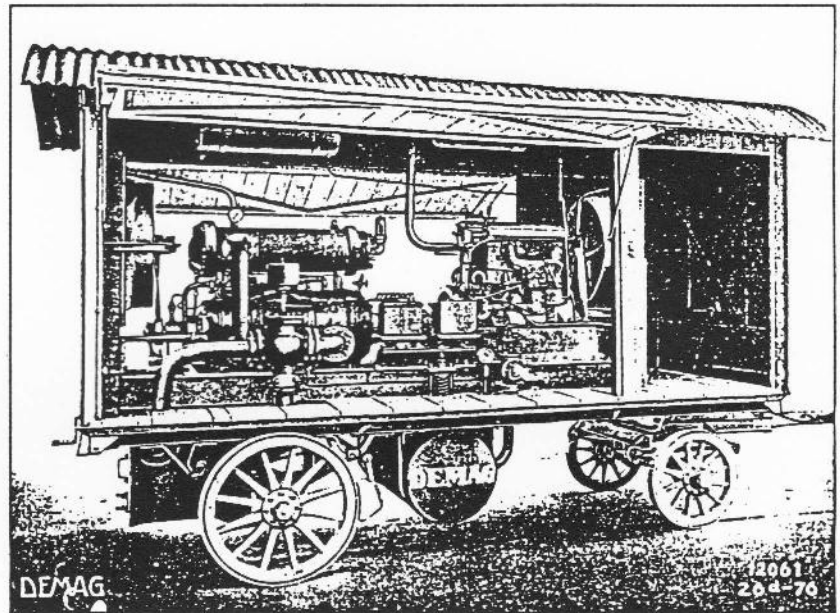


Abb. 3 Fahrbare benzinmotorbetriebene Vakuumpumpe

wurde und wird die Drehschieberpumpe auch heute noch eingesetzt (Abb. 4).

Ein viel schwierigeres Problem – das Abpumpen von Wasserdampf – wurde durch die Verwendung der systembedingten Frischölschmierung gelöst. Hierbei wird das Schmieröl nur einmal verwendet und bei dem Pumpvorgang kondensierendes Wasser wird mit dem Öl aus der Pumpe ausgetragen.

Fast gleichzeitig erfand Wolfgang Gaede (1878–1945) die klassische Drehschieberpumpe, die 1909 als Kapselpumpe in die Geschichte der Vakuumtechnik einging und die als Vorläufer unserer heutigen Drehschieberpumpe gilt.

Die Drehschieberpumpe von Gaede war eine ölumlaufgeschmierte Pumpe, d. h. sie besaß einen geschlossenen Ölkreislauf. Diese Pumpenart hatte im Vergleich zur

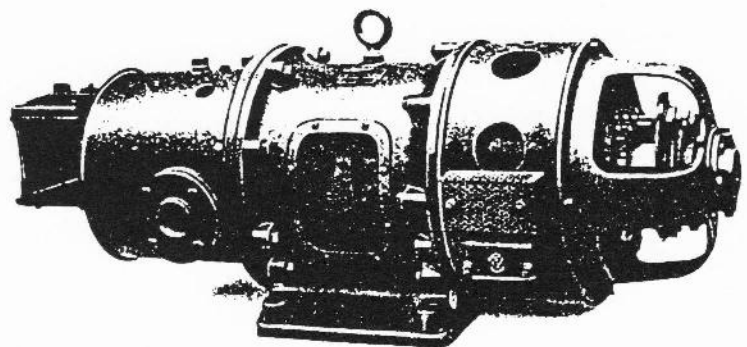


Abb. 4 Bremsvakuumpumpe

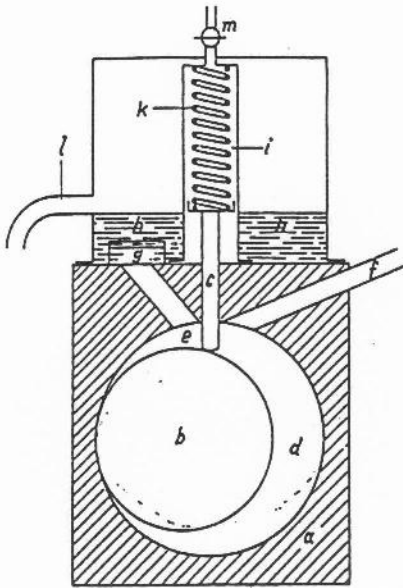


Abb. 5 Schnitt durch eine Einschieberpumpe

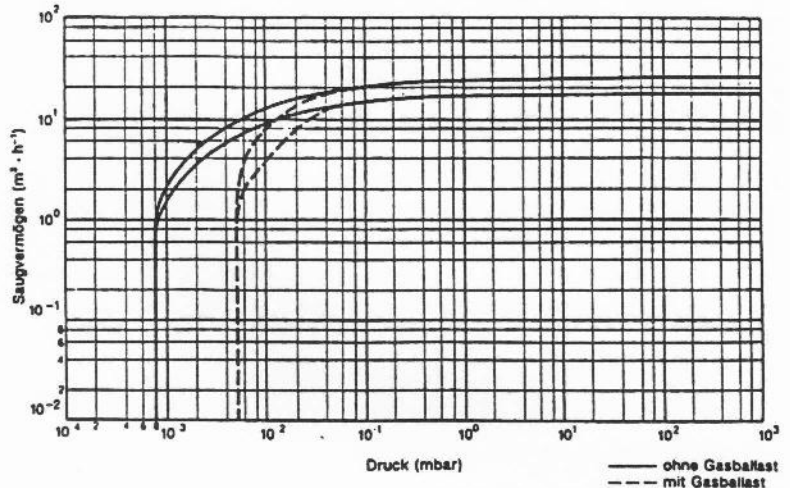


Abb. 7 Saugvermögenskurven einer modernen Drehschieberpumpe – mit und ohne Gasballast

Wittig-Pumpe nur wenige Schieber. In der Patentschrift Nr. 602097 von 16. 8. 1934 wird eine Pumpe beschrieben, die sogar nur einen Schieber hatte (Abb. 5).

Zwischen den Arbeitsräumen mußte die Drehschieberpumpe jedoch besser abgedichtet werden als die Vielschieberpumpe. Dieses Problem löste man durch eine höhere Öleinspritzmenge, die allerdings keine Frischölschmierung mehr zuließ. Zur Förderung von kondensierbaren Dämpfen war diese Pumpe nicht geeignet. Die Pumpen- und Öltemperatur lag bei 70–80 °C, so daß ab ca. 300 mbar während der Verdichtung Kondensation von Wasserdampf auftrat. Weil die Ölmenge in der Pumpe im Kreis gefördert wurde, erhielt man im Laufe der Zeit ein Gemisch aus Öl und Wasser, bis sowohl der Enddruck als auch die Schmiereigenschaften des Öls nicht mehr ausreichend waren.

1935 entwickelte Gaede das „Gasballastprinzip“, durch welches bis zu einem bestimmten Ansaugdruck 100% Wasserdampf abgepumpt werden konnte. Dieser Wert wird als Wasserdampfverträglichkeit bezeichnet.

In Abbildung 6 a)–d) ist der Abpumpvorgang von Wasserdampf ohne Gasballast dargestellt, e)–h) zeigen den gleichen Vorgang mit Gasballast. Über das Gasballastventil wird der Pumpenkammer atmosphärische Luft zugeführt, während der Ansaugstutzen durch den Schieber verschlossen wird. Diese Gasballastluft verdünnt den Wasserdampf und erhöht den Druck im angesaugten Volumen auf ca. 300 mbar, so daß nur mehr um den Faktor 3,3 komprimiert werden muß, um das Auspuffventil zu öffnen. Der Gasballast-

betrieb hat auch Auswirkungen auf die Pumpencharakteristik, besonders auf den Enddruck (Abb. 7).

Außer bei der reinen physikalischen Vakuumanwendung fand die Vakuumtechnik auch vermehrt in den chemischen Verfahrensprozessen Eingang. Zur Erzeugung des Vakuums werden anfangs vor allem Wasserring- und Dampfstrahl-Vakuumumpfen eingesetzt. Nach und

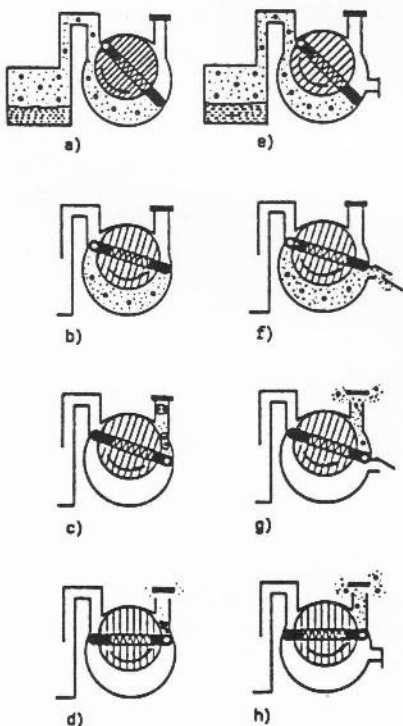


Abb. 6 Das Gasballastprinzip
a) bis d) Verdichtungsprozess ohne Gasballast
e) bis h) Verdichtungsprozess mit Gasballast

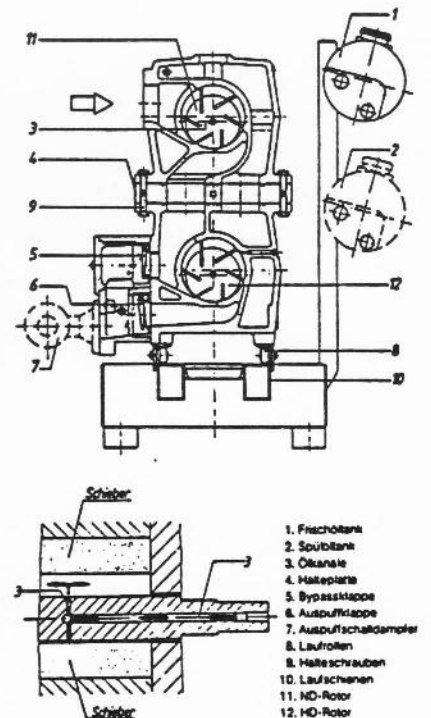


Abb. 8 Schnitt durch eine frischölschmierte Drehschieber-Vakuumpumpe mit Hinterschieberschmierung

nach verwendete man auch in der chemischen Verfahrenstechnik speziell angepaßte Drehschieberpumpen.

Die Vielschieberpumpe als eine Spezies der Drehschieberpumpe wurde in den letzten 20 Jahren ebenfalls erheblich modifiziert und den Erfordernissen angepaßt. Aus den vielen dünnen Stahlplatten mit den Laufringen entwickelten sich Pumpen mit wenigen dicken Kunststoffschiebern, wenig bewegten Teilen und einer Öldosierpumpe zur optimalen Einstellung der Frischölmenge beim Prozeß (Abb. 8).

Auch die „klassische“ Drehschieberpumpe, die hauptsächlich für physikalische Experimente im Fein- und Hochvakuum eingesetzt wurde, fand ihren Platz in der chemischen Technik. Beide Pumpentypen, sowohl die klassische Drehschieberpumpe mit dem geschlossenen Ölkreislauf als auch die Vielzellen- oder Vielschieberpumpe mit der Frischölschmierung werden immer aggressiveren Saugströmen ausgesetzt.

Für die Produktion des 1948 entwickelten Transistors und elektronischer Schaltkreise wurde die klassische Drehschieberpumpe zum wichtigen Arbeitspferd. Die Herstellung von diskreten und integrieren Halbleiterfunktionen mit unterschiedlichen reaktiven Gasen forderte immer ausgereifere Anlagentechnik für LP-CVD-Prozesse (low pressure chemical vapour deposition).

Das Prinzip der Drehschieberpumpe hatte inzwischen eine solche Perfektion erreicht, daß eine wesentliche technische Weiterentwicklung nicht mehr zu realisieren war. Dagegen galt es, durch Optimierung der eingesetzten Werkstoffe und Betriebsmittel die Einsetzbarkeit zu verbessern und die Lebensdauer auch für schwierigste Anwendungsfälle noch zu erhöhen. Dazu gehören z. B.

- Buntmetallfreiheit,
- Oberflächenschutz, z. B. Chromatierung von Al-Teilen und
- der Einsatz von chemisch inerten Ölen z. B. perfluorierten Polyäthern.

Auch entsprechende Komponenten, wie Ölfilteranlagen, die während des Betriebes die Pumpenöle reinigen, werden eingesetzt. Aus dieser Entwicklung entstand die moderne Drehschieberpumpe mit einer integrierten Ölkreislaufpumpe, die gleichzeitig auch externe Ölfilter betreiben kann (Abb. 9).

In der chemischen Verfahrenstechnik der letzten Jahre setzte man die Dreh-

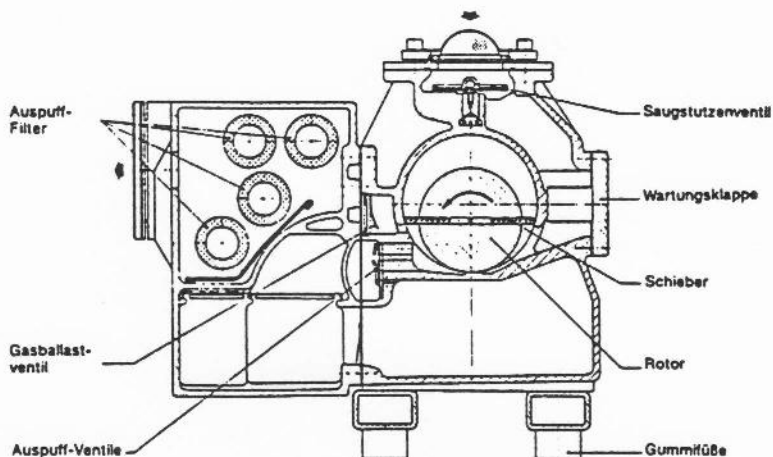


Abb. 10 Schnitt durch eine Drehschieberpumpe mit integrierter Ölpumpe und Ölfilter

schieberpumpe bevorzugt dort ein, wo besonders niedrige Prozeßdrücke verlangt werden. Auch bei der Erfüllung der von dem Gesetzgeber geforderten Umweltauflagen findet dieser Pumpentyp verstärkt Verwendung. Die ölumlaufgeschmierte Pumpe hat ihren Einsatz z. B. auch beim Trocknen temperaturempfindlicher Substanzen. Beim Einsatz in Trocknungsprozessen werden an die Pumpen zwei Hauptanforderungen gestellt:

- hohe Dampfverträglichkeit und
- kleiner Enddruck.

Diese Forderungen werden von den modernen gasballastbetriebenen Drehschieberpumpen gut erfüllt. Sogar Wasserdampfverträglichkeiten von 60 mbar sind zu erreichen.

Fast immer müssen chemisch und thermisch stabile Öle ausgewählt und eingesetzt werden, um den Anforderungen gerecht zu werden. Zusätzliche Ölfilter müssen im Kreislauf eingesetzt werden,

damit die Ölwechselintervalle erträglich bleiben. Aufgrund ähnlicher Anforderungen aus dem Bereich der chemischen Industrie konnten die Erfahrungen der Halbleitertechnik auf Pumpen mit größerem Saugvermögen (größer als 100 m³/h) übertragen werden. So setzt man auch auf diesem Gebiet Pumpen mit integrierter Ölpumpe und speziellem Ölfilter ein (Abb. 10).

Hier findet man auch die Vielschieberpumpe mit Frischölschmierung wieder, wobei diese flexibler an den entsprechenden Prozeß anzupassen ist. Das Öl wird nur einmal durch die Pumpe gefördert und kondensierende Stoffe, die bei Atmosphärendruck flüssig sind, werden zusammen mit dem Öl aus der Pumpe gefördert.

Weil immer wieder Schieber wegen Belagsbildung im Schlitz steckenbleiben, werden entsprechende Pumpen mit einer „Hinterschieberschmierung“ versehen, die auch bei Ölverdünnung durch Kondensation von öllöslichen Produkten einwandfreie, permanente Schieberschmierung gewährleistet (Abb. 8). Bei diesen Pumpen wird sich der Enddruck auch während des Prozesses nicht verschlechtern. In der ölumlaufgeschmierten Drehschieberpumpe, die das Öl vielfach während des Betriebes umwälzt, verdampft das im Öl gelöste Produkt auf der Saugseite und verschlechtert entsprechend seines Dampfdruckes, seiner Konzentration und der Betriebstemperatur der Pumpe den erreichbaren Enddruck.

Die Pumpen werden, wie oben erwähnt, auch zum Absaugen von Lösungsmittel und brennbaren Gasen oder Dämpfen eingesetzt. Sofern sie explosionsfähige

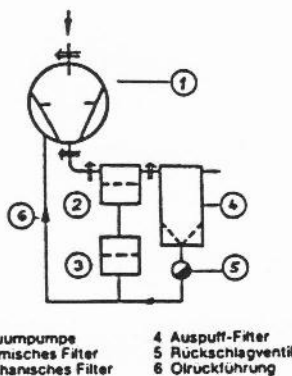
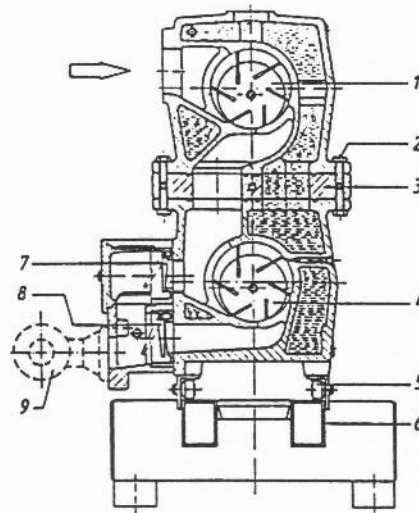


Abb. 9 Schema einer Vakuumpumpe mit Ölfiltereinrichtungen

Gasgemische fördern, müssen sicherheitstechnische Maßnahmen getroffen werden. Diese Forderung intensivierte die Entwicklung von Pumpen, die den Explosionsschutz-Richtlinien und den Unfallverhütungsvorschriften (UVV) entsprechen. Das Ergebnis sind druckstoßfeste Drehschieberpumpen.

Aus vielfältigen Gründen fordert die chemische Industrie verstärkt ein geeignetes „trockenverdichtendes“ Vakuumsystem zur Förderung aggressiver und giftiger Gase bzw. Dämpfe. Erste Entwicklungen sind auf dem Markt (Abb. 11). Es bleibt abzuwarten, ob der Erfolg der ölgeschmierten Drehschieberpumpe beim „Trockenläufer“ weiter Bestand hat.



- | | |
|-------------------|------------------|
| 1. ND-Rotor | 6. Laufschienen |
| 2. Halteschrauben | 7. Bypassklappe |
| 3. Halteplatte | 8. Auspuffklappe |
| 4. HD-Rotor | 9. Auspuff |
| 5. Laufrollen | |

Literaturnachweis

Schweizerische techn. Zeitschrift
(Nr. 48, 1927)

Schweizerische techn. Zeitschrift
(Nr. 49, 1927)

Technische Blätter der Schweizerischen
Lokomotiv- und Maschinenfabrik Winterthur
No. 2, 1925

Abb. 11 Schnitt durch eine trockenlaufende
Drehschieber-Vakuumpumpe

DR-Patentschrift Nr. 602097 vom
16. 08. 1934

Theorie und Praxis der Vakuumtechnik
(Wutz, Adam, Walcher) Vieweg-Verlag
1982, Braunschweig

Mechanische Vakuumpumpen und Pumpensysteme als maßgeschneiderte Vakuumeinheiten in der Chemie, Chemie-Technik Heft 12/87

Produktions-Drehschieberpumpen, Chemische Produktion Heft 1/2, 1987

Sicherheitstechnische Aspekte beim Einsatz von Drehschieber-Vakuumpumpen zum Absaugen reaktionsfähiger Gas- und Dampfgemische Lois J. Ripper, März 1988 Die Berufsgenossenschaft

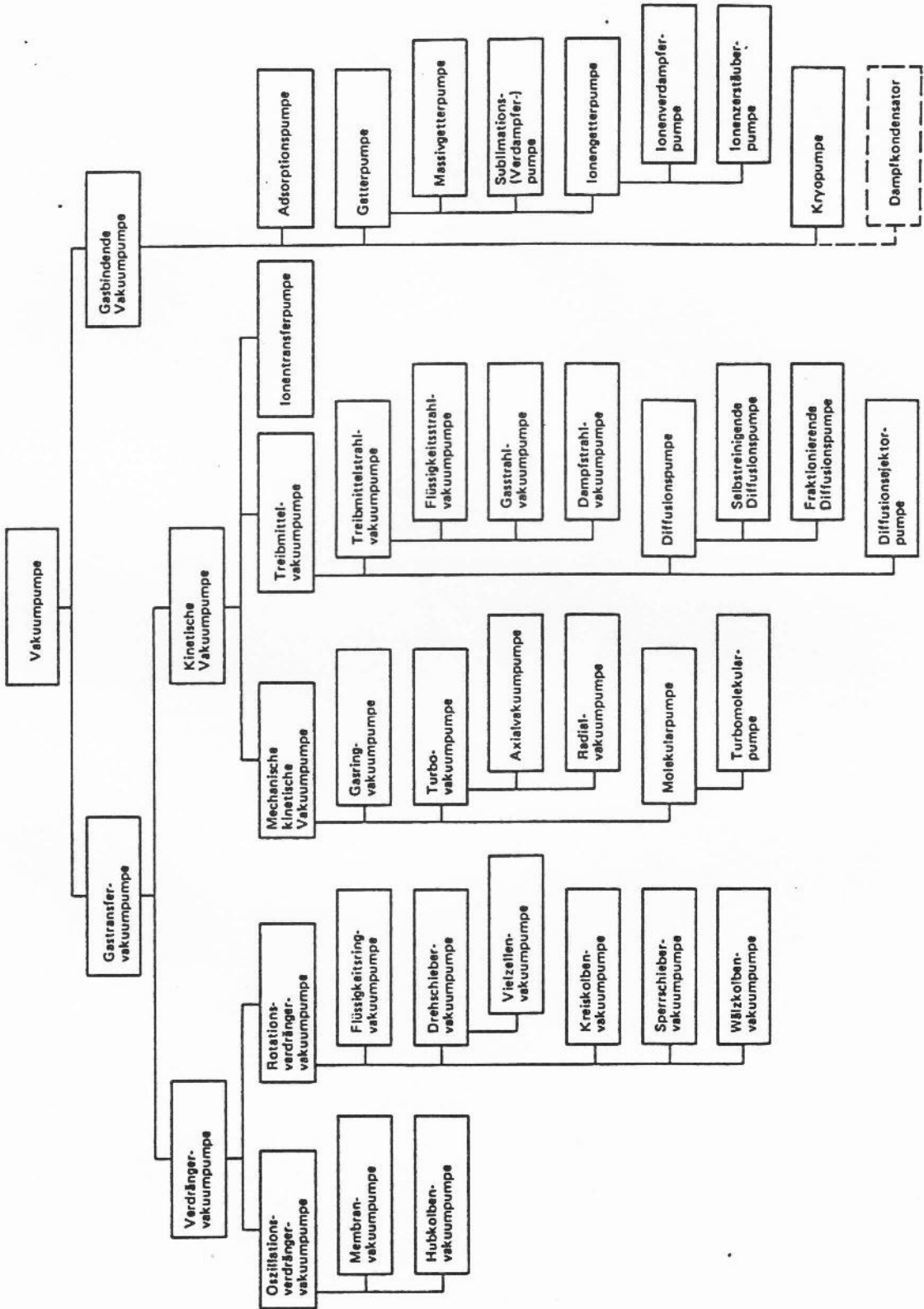
Frischölgeschmierte Drehschieber-Vakuumpumpe für den Chemieeinsatz (I. Schmidt, K. Busch GmbH/Maulburg, Vortrag gehalten bei der Schweizerischen Gesellschaft für Vakuum-Physik u. -Technik (SVG) in Basel am 25. 04. 1986, Swiss Chem 1986)

Kurzbiographie

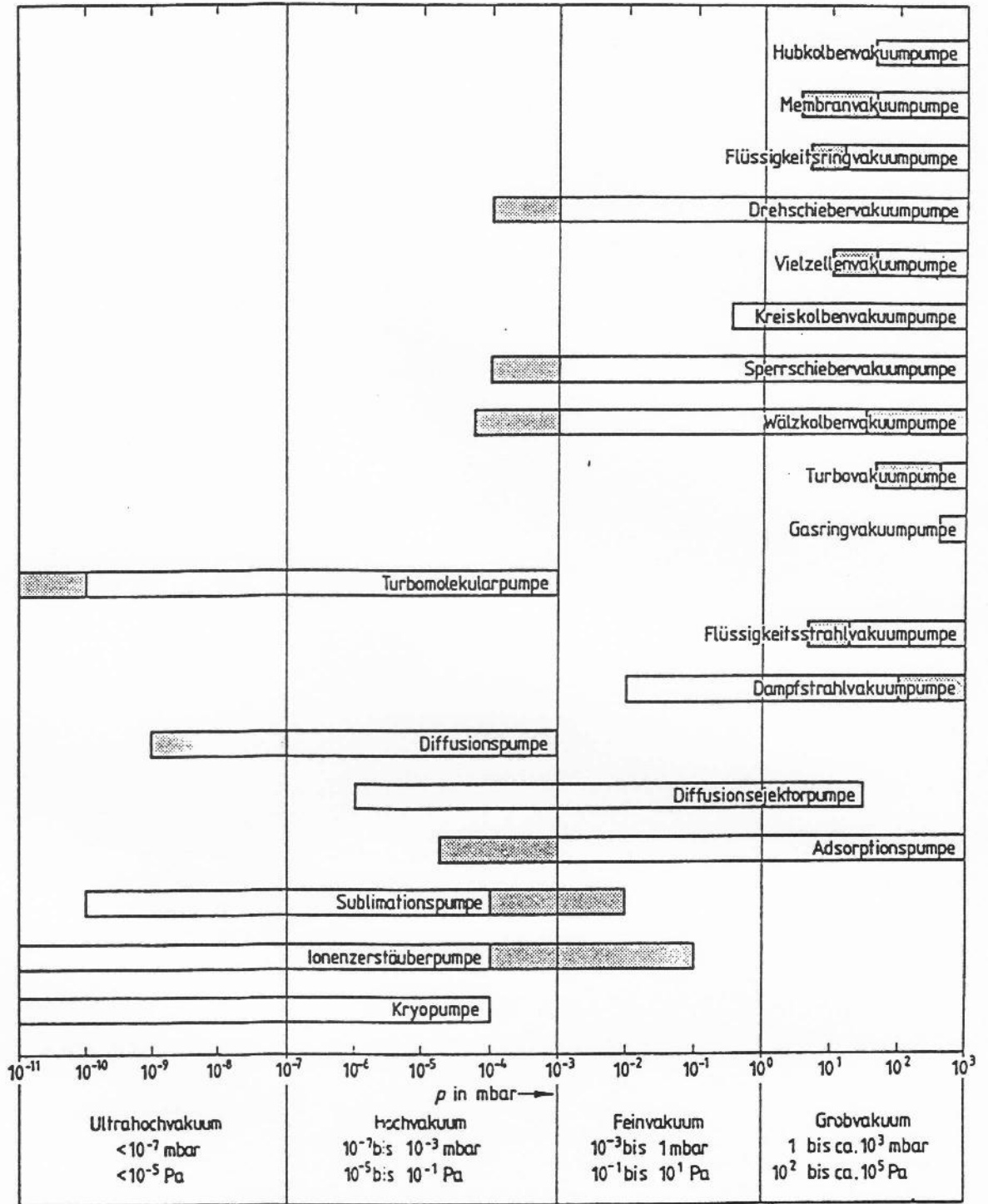
Dieter Oswald, geb. 1947 in München, aufgewachsen in München und Freiburg i. Br., Studium der Chemie in Bonn, 1979 Diplom, von 1979 bis 1988 als Vertriebsingenieur mit Schwerpunkt chem. Verfahrenstechnik bei Leybold AG, Köln. Z. Zt. Leiter Systemtechnik in der Fa. Dr. Ing. K. Busch GmbH, Maulburg.

VDP

Übersicht über Vakuumpumpen



Gebrauchliche Arbeitsbereiche von Vakuumpumpen



Arbeitsbereich bei Sonderausführung oder bei besonderen Betriebsdaten

Bauelemente eines Vakuumsystems, Übersicht

Konstruktionswerkstoffe für Vakuumsysteme

Metalle

Nichtmetalle

Dichtungsmaterialien

Hilfs-und Betriebsstoffe

Verbindungstechniken

Unlösbare Verbindungen: Schweißen und Löten, Kleben

Lösbare Verbindungen: Verbindungselemente

Rohre, Flansche, Dichtungen

Bewegliche Verbindungen: Bälge, Schläuche

Vakuum-Durchführungen

Mechanische Durchführungen: Dreh-, Schiebedurchführungen

Strom- und Spannungsdurchführungen: Glas-, Keramikisolation

Durchführungen für Flüssigkeiten und Gase

Fenster, Schaugläser

Ventile: Elastomer- und Metalledichtung

Küken- oder Kugelhähne

Eckventile

Schieber

Klappen

Drosselventile, Nadelventile für dosierten Gaseinlaß

Konstruktionswerkstoffe für Vakuumsysteme

Beispiele, Eigenschaften

Metallische Werkstoffe

Edelstahl
Kupfer-Legierungen
Aluminium-Legierungen
Niob

Nichtmetalle

Glas
Keramik
Kunststoff

Dichtungswerkstoffe

Nichtmetalle: Elastomere ("Gummi")
"Weiche" Metalle:
Kupfer, Aluminium, Silber, Gold
Blei, Indium

Erwartete Werkstoffeigenschaften für den Vakuumeinsatz:

Undurchlässig für Gase

Keine Gaseinschlüsse

Saubere Oberfläche: keine Gas-, Dampfabgabe

Korrosionsbeständig

Fest gegen Luftdruck und Kräfte aus dem System

Für Metalle:

Geringe Magnetisierbarkeit ("Permeabilität")

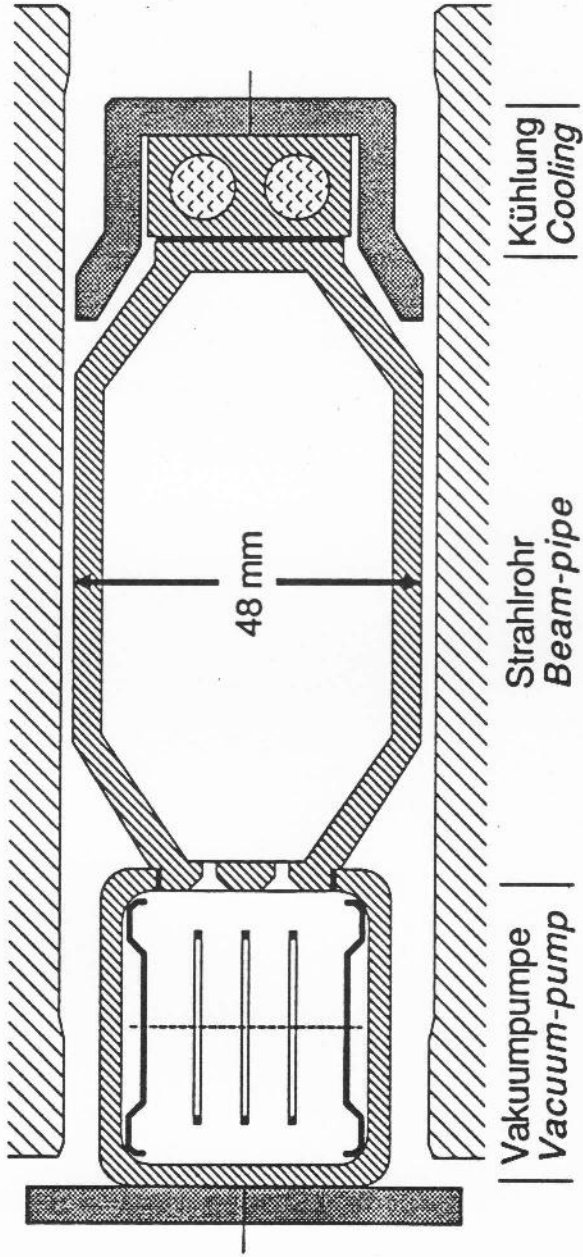
Schweißbar

Lötbar

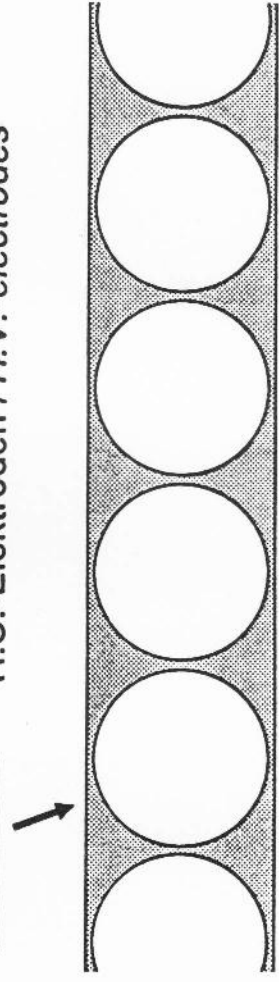
Bearbeitbar

Bezahlbar

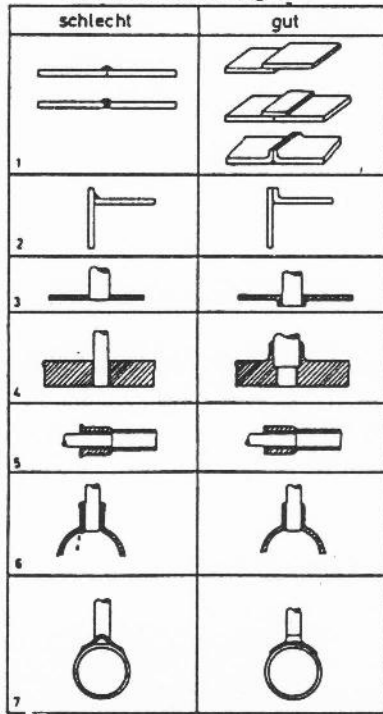
HERA-e Vakuumrohr / Vacuum-pipe



- Cu (2% Sn)
- Pb-Abschirmung / Shield
- Fe (Magnet)
- H₂O-Kühlung / Cooling
- Ti-Platten / Ti-plates
- H.S.-Elektroden / H.V.-electrodes
- Lötstellen
Soldering

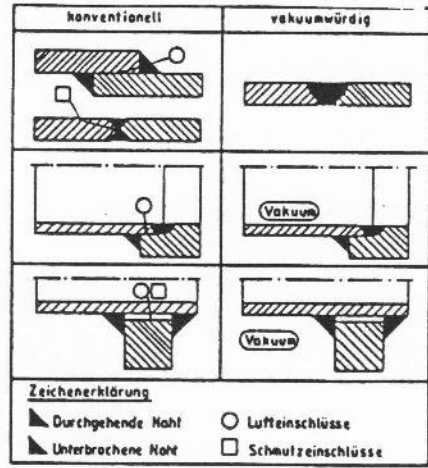


Lötverbindungen



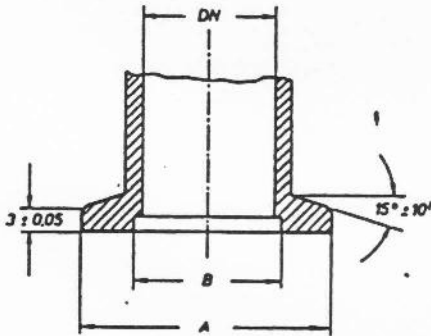
Unlösbare Verbindungen

Schweißverbindungen



Flanschverbindungen (Lösbar)

Als Standard-Nennweiten werden NW 10, 18, 25, 40, 50, 83, 100, 160, 250, 400, 630 und 1000 angeboten und eingesetzt.



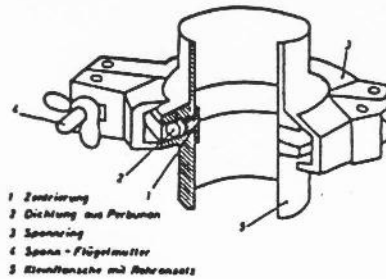
Genormter Kleinflansch



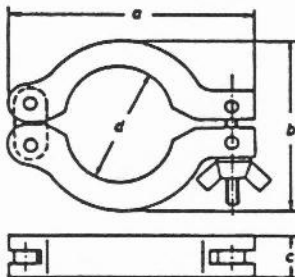
Zentrier- und Dichtring



Außenzentriererring

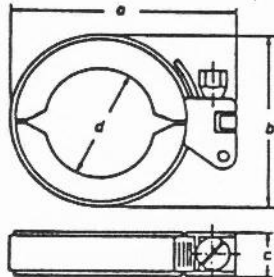


- 1 Zentrierung
- 2 Dichtung aus Perbunan
- 3 Spanner
- 4 Spanna-Flügelmutter
- 5 Kleinflansche mit Rohransatz

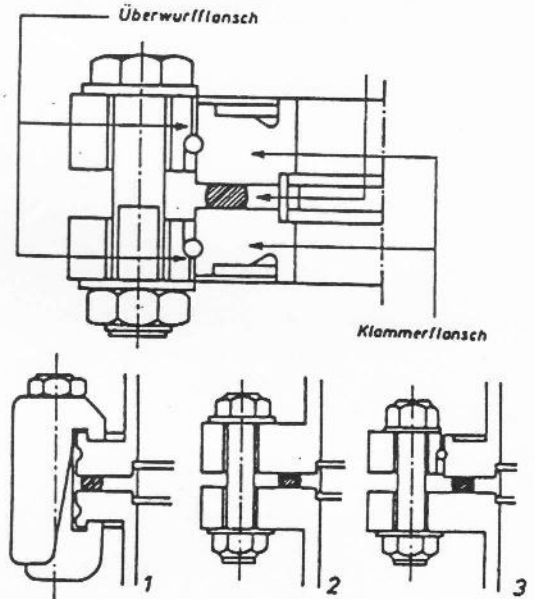


Normalspannung

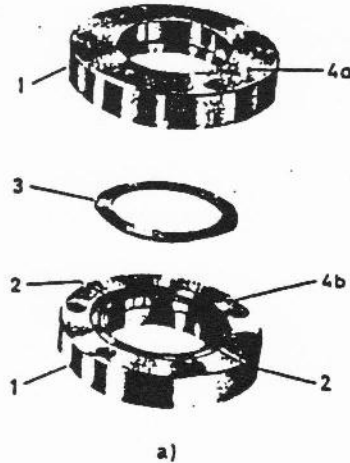
Kleinflanschverbindung



Spannbandspannung

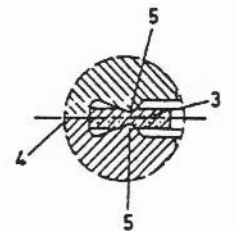


- 1- Klammerflansch / Klammerflansch
- 2- Festflansch / Festflansch
- 3- Festflansch / Klammerfl. mit Überwurf



a)

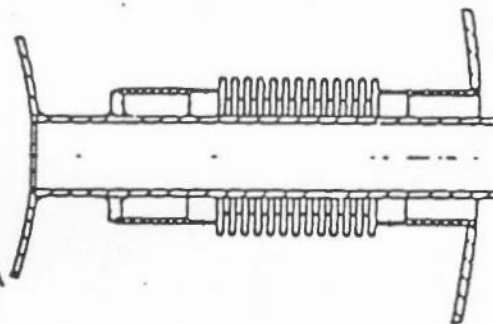
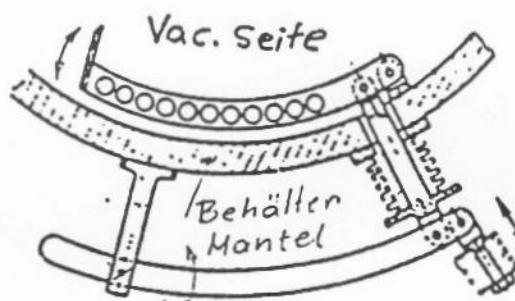
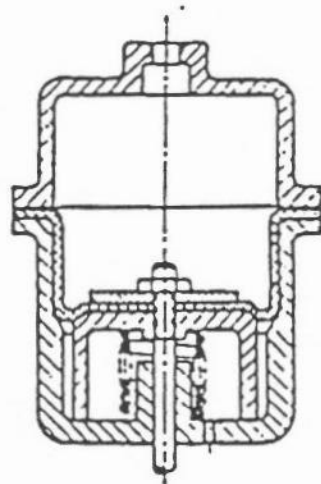
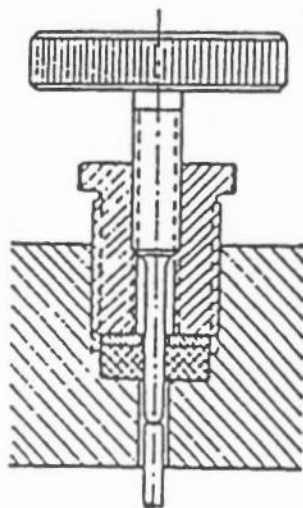
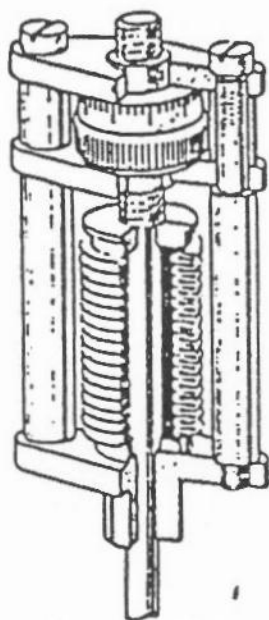
Ausheizbare UHV-Flanschverbindung mit Metall-(Cu-) Dichtung. 1 zwei gleiche Flansche aus nichtrostendem Spezialstahl; 2 Nut zur Dichtheitsprüfung; 3 Dichtscheibe aus OFHC-Kupfer; 4 (a, b) Flanschfläche mit Lochkreis; 5 Dichtschneide, gegenüber Flanschfläche 4 zurückliegend.



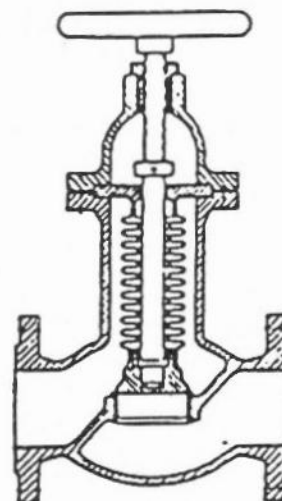
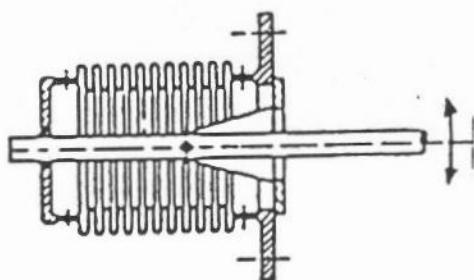
b)

Verschiebung und Drehung im Vakuum, 1

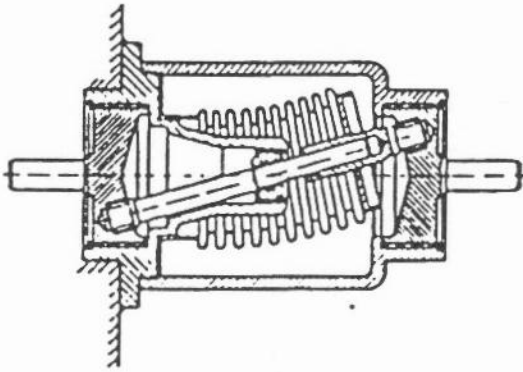
Verschiebungen im Vakuum



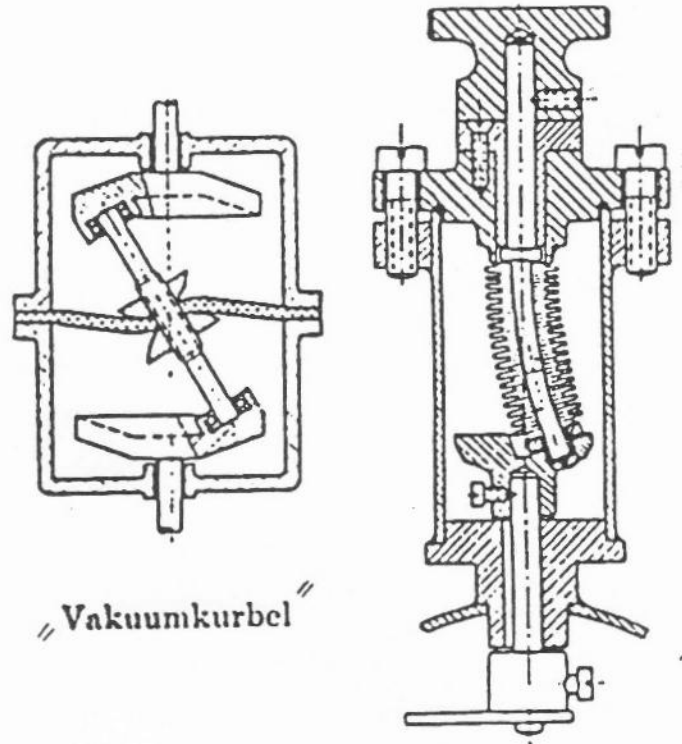
Druckfeste und vakuumdichte Durchführung an Mantelbehältern, Autoklaven usw. für axiale Bewegungsaufnahme



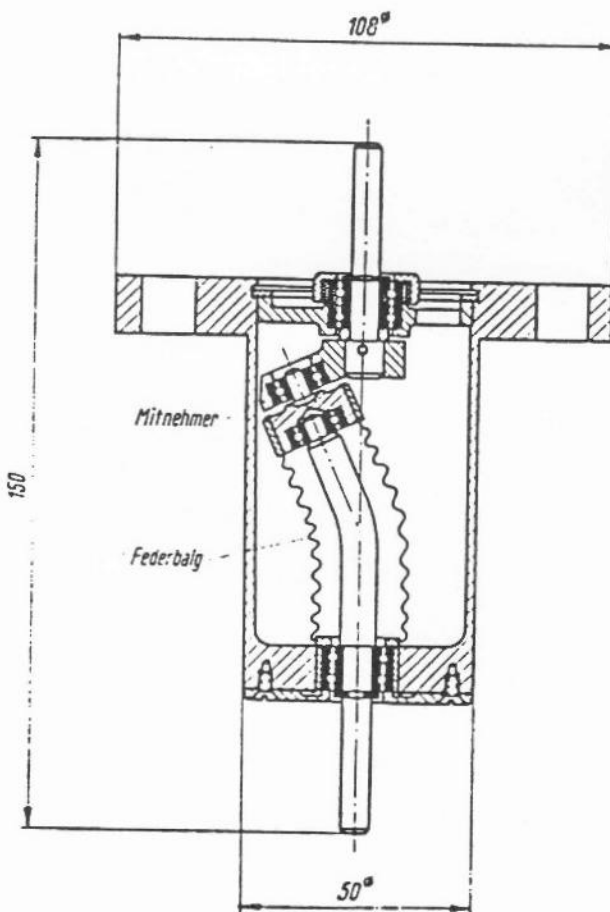
Stopfbuchlose Spindelabdichtung in Ventilen für Hochvakuum, Säuren usw.



Vakuumdichte Wellendurchführung



„Vakuumkurbel“



Mechanische Drehdurchführung nach dem Katzenschwanzprinzip (Balzers AG)

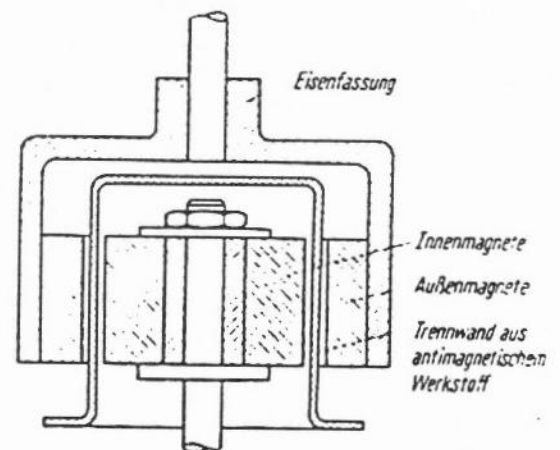
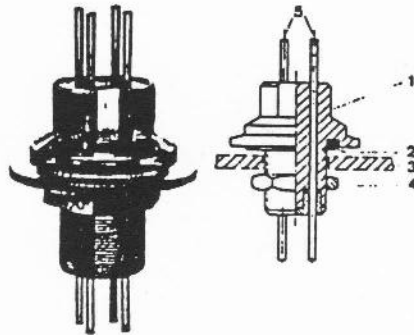


Abb. 132. Magnetische Drehdurchführung (Deutsche Edelstahlwerke, Varian AG)

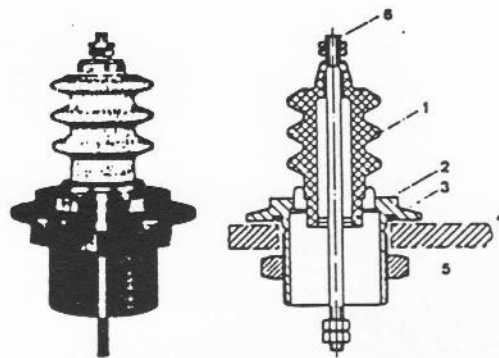
Zur Übertragung schnellerer Drehbewegungen eignet sich dagegen eine Magnetkupplung entsprechend Abb. 132, mit der theoretisch beliebig hohe Rotationsgeschwindigkeiten bei allerdings sehr beschränktem Drehmoment (einige 10 bis 100 cm kp) übertragen werden können. Da heute Spezialmagnete zur Verfügung stehen, die Temperaturen bis zu 500 °C aushalten, ist auch diese Drehdurchführung im Ultrahochvakuumbereich voll einsatzfähig.

Isolierte Stromdurchführungen

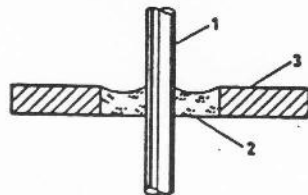
Bauelemente der Vakuumtechnik und ihre Verbindungen



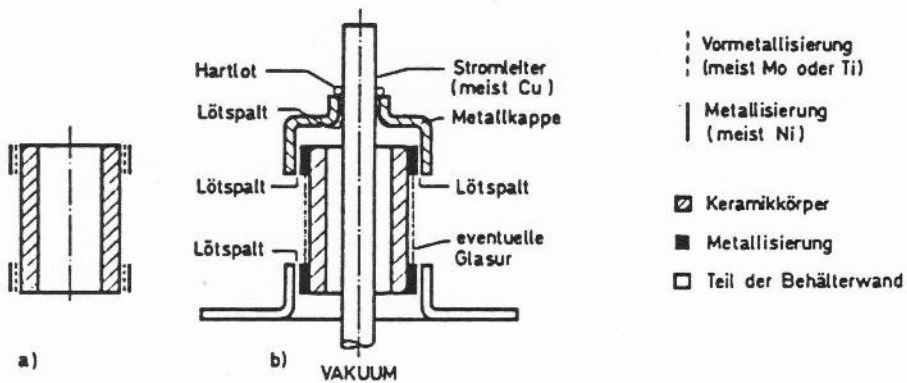
Mit Kunststoff isolierte Mehrfach-Stromdurchführung. 1 Kunststoffkörper, als Kleinflansch ausgebildet; 2 Gummielastischer Dichtring; 3 Wand mit Bohrung; 4 Befestigungsmutter; 5 Metallstäbe oder -Rohre.



Mit Keramik isolierte Hochspannungsdurchführung (Prüfspannung 25 kV).
1 Keramikkörper
2 Kleinflansch mit Rohr-ansatz
3 Gummielastische Dichtung
4 Wand mit Bohrung
5 Befestigungsmutter
6 Metallstab oder Metallrohr

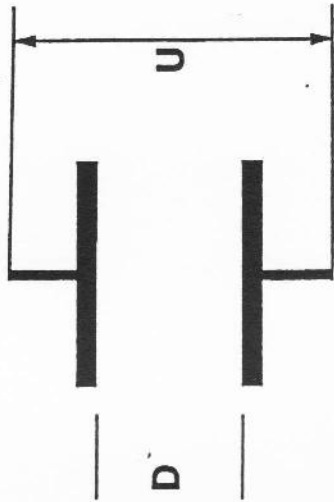


Druckglas-Einschmelzung. 1 Legierter Innenleiter (α_1); 2 Glas ($\alpha_2 < \alpha_1$); 3 Äußerer Druckring ($\alpha_3 > \alpha_2$); ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ mittlere lineare thermische Ausdehnungskoeffizienten)

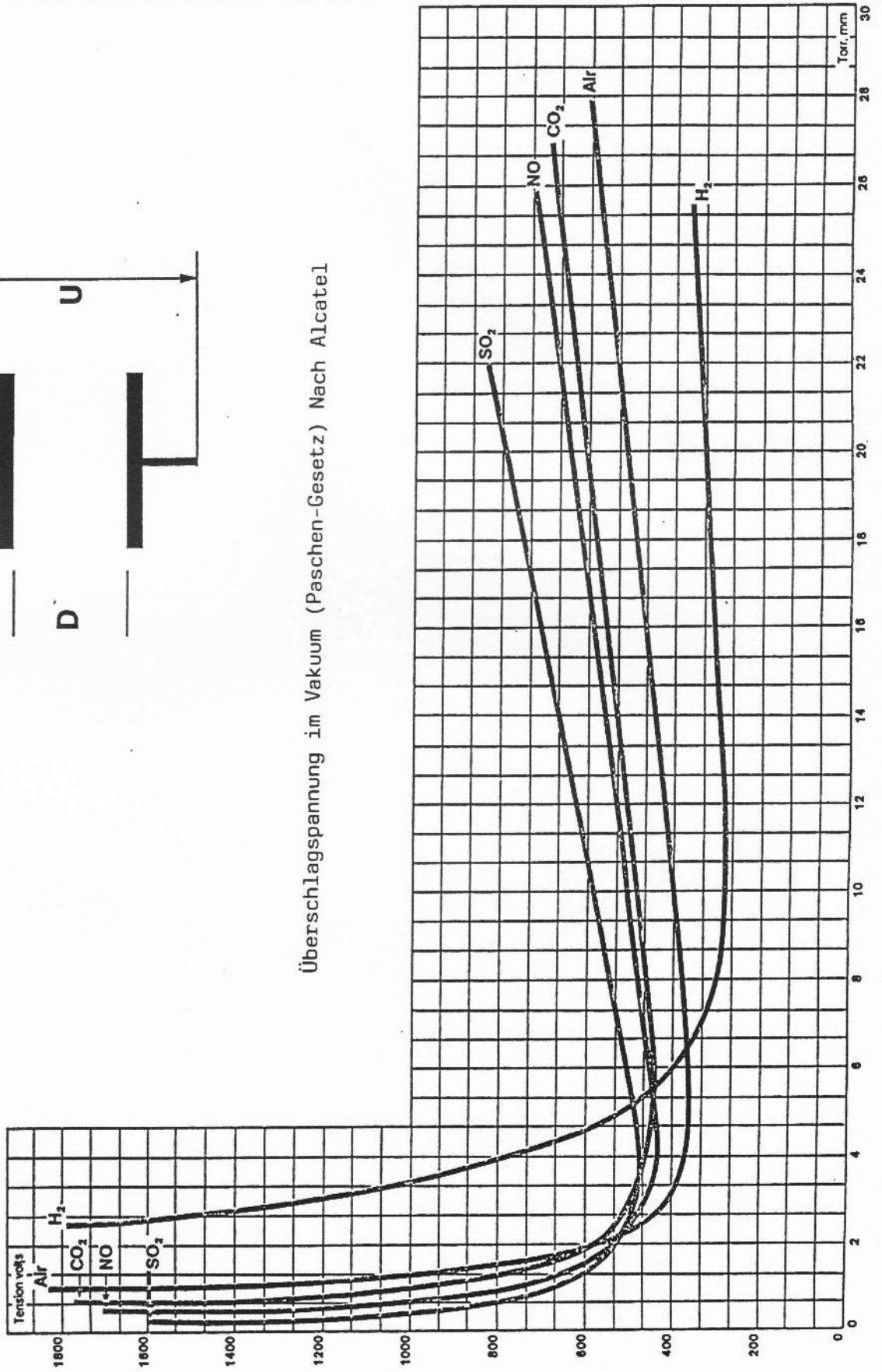


Metallisierung eines Keramikkörpers (a) und keramische Stromdurchführung (b)

Loi de Paschen pour gaz divers



Überschlagspannung im Vakuum (Paschen-Gesetz) Nach Alcatel



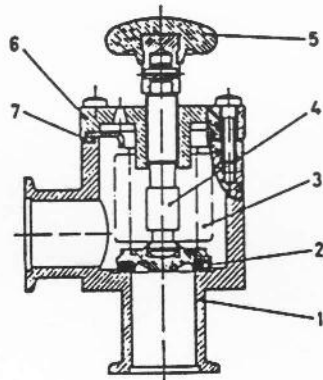
Vakuum-Ventile und Schieber



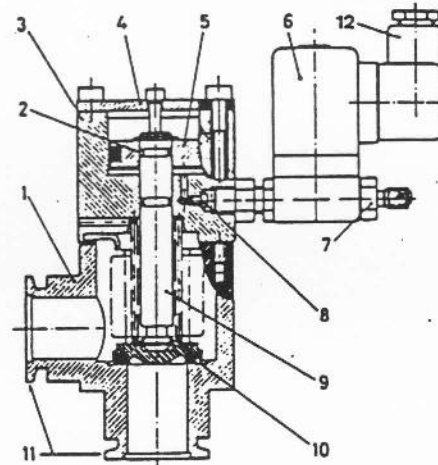
Eckventil DN 25 KF, handbetätigt



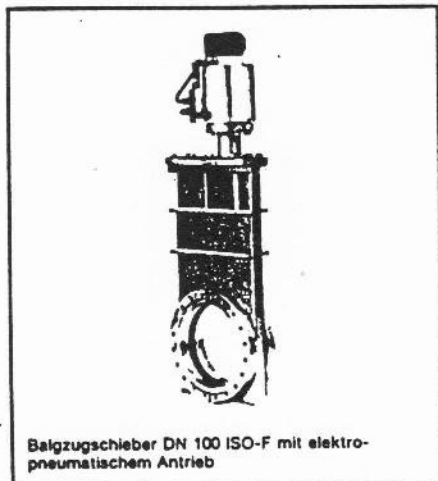
Eckventil DN 63 ISO-K, handbetätigt



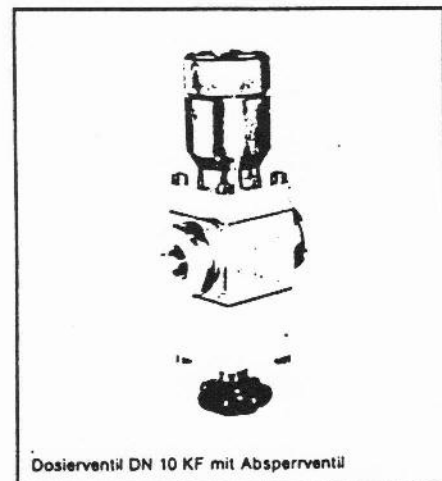
Handbetätigtes Eckventil.
 1 Al-Gehäuse (oder Edelstahlgehäuse) mit 2 Kleinflanschen; 2 Ventilteller mit gummielastischem Dichtring; 3 Federbalg; 4 Bewegliches Innenteil; 5 Handrad; 6 Führungsflansch; 7 Dichtring.



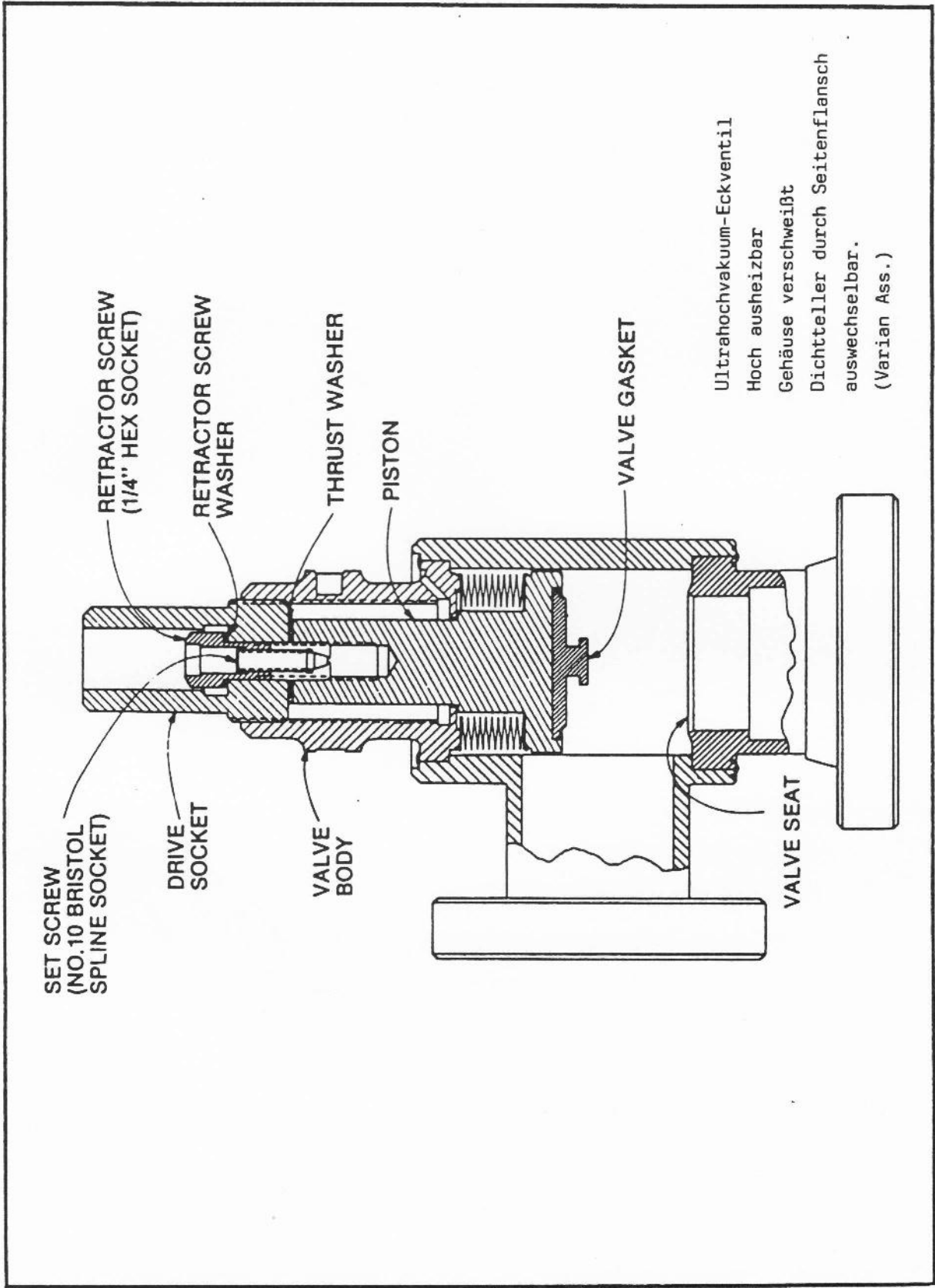
Pneumatisch betätigtes Eckventil mit Federbalgabichtung. 1 Edelstahlgehäuse; 2 Vitonabdichtung; 3 Preßluft-Aufnahmezylinder; 4 Deckel; 5 Kolben; 6 3/2 (= 2-)Wegeventil; 7 Preßluftanschluß; 8 Düse; 9 Bewegliches Innenteil; 10 Ventilteller mit Viton-Dichtung; 11 Kleinflanschanschlüsse; 12 Elektrischer Anschluß.



Balgzugschieber DN 100 ISO-F mit elektro-pneumatischem Antrieb



Dosierventil DN 10 KF mit Absperrventil



CROSS SECTION DRAWING OF 35 AND 63 mm VALVES

Reinigung von Vakuumbauteilen und Zusammenbau von Vakuumsystemen

Vakuumbauteile müssen frei von Staub, Spänen, Kohlenwasserstoffen (Ölen, Fetten, Weichmachern), und hygroskopischen (wasseranziehenden) Stoffen sein. Das muß schon bei der Herstellung bedacht werden, da manche Bauteile später kaum noch zu reinigen sind (Bälge o. ä.).

Reinigungsverfahren: (Teilweise mit Oberflächenverbesserung)
Glaskugelstrahlen, Beizen, Elektropolieren
Entfettung mit Lösemitteln, soweit noch zulässig
Alkalische Entfettung (Trinatriumphosphat, P3, i.d. Spülmaschine)
Entfettung mit Detergentien ("Spülmittel")

Ausheizung oder Herstellung im Vakuumofen

Zusammenbau von Vakuumteilen

Zur Montage vorgesehene Teile müssen kritisch angesehen werden. Verschmutzungen, Risse u.s.w. sind oft mit dem Auge sichtbar! Wischprobe mit weißem Tuch!
Zum Montieren muß ein gut beleuchteter und sauberer Arbeitsplatz da sein, an dem Ordnung herrscht.

Hochvakuumbauteile dürfen nicht mit bloßen Händen angefaßt werden. Auch die Handschuhe müssen sauber sein.

Flansche und Dichtungen müssen kratzerfrei sein.
Flansche vor Arbeitsunterbrechung erst fertig anziehen.

Das Vakuumlabor- ein Hochtechnologie-Arbeitsplatz

Aufgaben, Notwendigkeiten, Gestaltungsvorschläge

Es gibt viele Vakuumlabors bei DESY. Für die "Vakuummechanik" sind sie im Allgemeinen ein Gemisch aus den Funktionsbereichen

Werkstatt, Montage und Prüfung.

Aus den

Sauberkeitsregeln

ergibt sich die Forderung nach der Abtrennung des Werkstattbereiches: Späne, Öldämpfe, Maschinen-Schneidöle können tödlich für Vakuumapparaturen sein. Für die Ultrahochvakuumtechnik, um die es hier hauptsächlich geht, gelten scharfe Reinheitsvorschriften.

Bei der Montage von Vakuumapparaturen:

Völlige Fettfreiheit. Saubere Apparaturen stets verschließen, nach Möglichkeit metallisch. undefinierte Lappen verboten. Es gibt spezielle faserfreie Wischtücher.

Berühren der Innenflächen mit der bloßen Hand verboten. Weiße Handschuhe.

Ölkännchen in der Nähe der Arbeitsfläche verboten.

Auspacken von Kartons im Arbeitsbereich verboten. (Achtung, Plastikchips)

Keine Werkzeuge verwenden, mit denen vorher "normaler" Maschinenbau stattfand.

Am Arbeitsplatz nicht essen, trinken, rauchen. Hände waschen, Schuhe reinigen.

Werkstückreinigung: Fluor/Chlorkohlenwasserstoffe als Lösemittel meist unzulässig.

Alternativen: wässrig (+ Ultraschall, + Wärme) + Trocknung durch Wärme oder Alkohole zum Wischen. PLasmareinigung? Bei DESY noch nicht eingeführt.

Viele dieser und weiterer Regeln oder Gebote ergeben sich von selbst, wenn man die Besonderheiten, Rahmenbedingungen und Ansprüche der Ultrahochvakuumtechnik versteht.

Viele der

Arbeitsplatzregeln für Feinarbeitsplätze

müssen selbstverständlich und konsequent für den Ultrahochvakuumarbeitsplatz adaptiert werden. Erinnerung sei an Gebote für:

Blendfreies, helles, augenschonendes Licht (Mancher schwere Vakuum-Systemfehler ist allein durch genaues Hin- und Hineinsehen zu vermeiden).

Lupenleuchten und Handlampe zur Hand. Ordnung und Übersicht am Arbeitsplatz.

Staubfreie Raumreinigungsmethoden. Heizung und Lüftung zweckentsprechend:

Vakuumgeräte brauchen Wärmeabfuhr.

Lagerung von Einzelteilen:

Ein übersichtliches und sauberes Lagersystem mit ausreichend Platz ist nötig.

Auch hierfür, wie für die Protokollierung der Tätigkeiten, ist ein Schreibplatz zur

Verwaltung notwendig. Hilfen durch PC mit Erfassungssystemen. Im einfachsten Fall hilft schon ein Wortprozessor (Textprogramm mit Such- und Änderungshilfen).

Versuchsarbeiten:

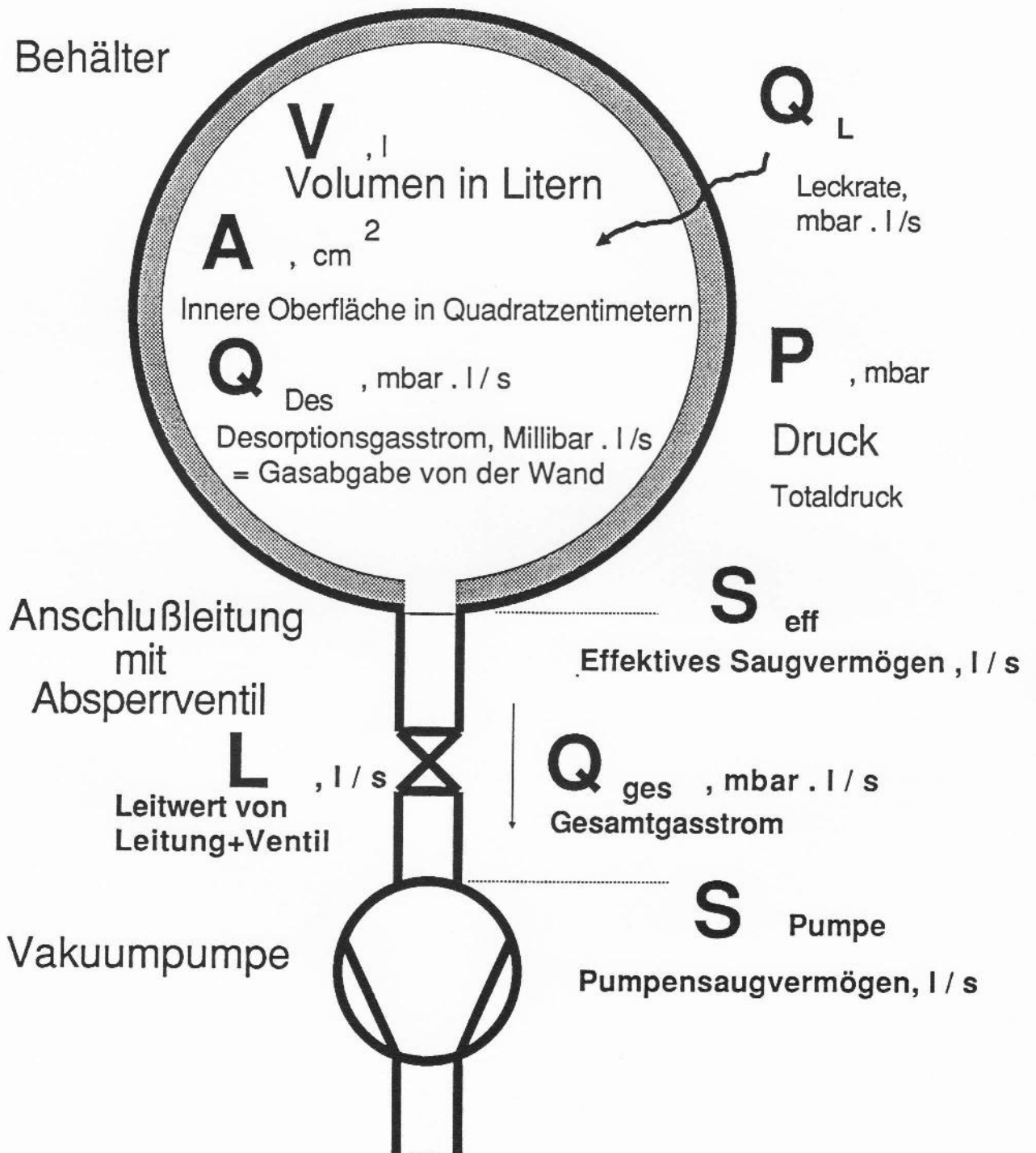
Sicherheitsregeln beachten. Elektroverteilung, Stromkreise, Absicherung durchden-

ken. Kabelwirrwarr auf dem Boden macht Übersicht und Raumreinigung unmöglich:

Überkopfverteilung löst das Problem. Kabel, Schläuche und dazugehörige Stecker u.

Schalter bzw. Absperrventile deutlich (d.h. für andere verständlich) kennzeichnen.

Grundgrößen eines Vakuumsystems



Grundformel der Vakuumtechnik

$$\boxed{Q = P \times S} \quad (\text{mbar} \cdot \text{l} / \text{s})$$

Gasstrom = Druck x Saugvermögen

$$\text{mbar} \cdot \text{l} / \text{s} = \text{mbar} \times \text{l} / \text{s}$$

Der Fördergasstrom an einer Vakuumpumpe setzt sich aus verschiedenen Teilgasströmen zusammen

$$\begin{aligned} & Q_{\text{des}} \quad (\text{Desorption} = \text{Gasabgabe v. Wand, Inhalt}) \\ + & Q_{\text{perm}} \quad (\text{Permeation, Elastomerdurchdringung}) \\ + & Q_{\text{leck}} \quad (\text{Gasstrom aus Lecks}) \\ \hline = & Q_{\text{ges}} \quad (\text{Gesamtgasstrom durch die Pumpe}) \end{aligned}$$

Der Druck P wird meistens am Meßgerät abgelesen

Das Saugvermögen S kann vom Typenschild oder aus den Unterlagen der Vakuumpumpe abgelesen werden. Meistens ist die Vakuumpumpe aber nicht direkt am System angeschlossen, sondern über Leitungen und Ventile. Das Saugvermögen wird dadurch reduziert und muß durch Rechnung oder Tabelle ermittelt werden.

Umstellungen obiger Formel sind:

$$\begin{aligned} P &= Q / S \quad \text{mbar} = (\text{mbar} \cdot \text{l} / \text{s}) / \text{l} / \text{s} \quad \text{und} \\ S &= Q / P \quad \text{l} / \text{s} = (\text{mbar} \cdot \text{l} / \text{s}) / \text{mbar} \end{aligned}$$

Zahlenbeispiel zu : Grundformel Vakuumtechnik

Schon seit einer Stunde läuft die Vorpumpe an dem kleinen Labor- Vakuumbehälter. Der Vakuumtechniker Lars Leermann wird nervös: das Vorvakuum- Meßgerät steht wie angemauert auf "0,5 mbar", die Turbopumpe will sich kaum drehen bei diesem schlechten Druck.

Lars erinnert sich an seinen Grundkurs Vakuumtechnik und beschließt, den Gasstrom einmal nachzurechnen. Wie hieß noch gleich die Formel:

$$Q = P \times S, \text{ mbar} \cdot \text{l} / \text{s}$$

Gasstrom = Druck mal Saugvermögen

Lars putzt das Typenschild seiner Vorpumpe : 16 Kubikmeter / h steht da. Diese Zahl teilt er durch 3,6 und erhält "4,5 Liter / s".

Den Druck mit 0,5 mbar hat er schon seit einer Stunde als ärgerliche Tatsache vor der Nase. Er macht sich an's Rechnen:

$$4,5 \text{ mal } 0,5 = 2,25 \text{ mbar} \cdot \text{l} / \text{s}$$

Ein Gasstrom, den man "sehen" müßte: Leermann besorgt sich einen etwa 1 cm dicken Plastikschlauch und steckt ihn auf den Auspuff seiner Vorpumpe. Er füllt seine leergetrunkene Brauseflasche nun mit Wasser und hält mutig das Schlauch- Ende hinein:

Nach einer Weile blubbert ein gleichmäßiger Blasenstrom heraus und mit Hilfe seiner Armbanduhr zählt Lars "20 Blasen in 10 Sekunden", also 2 Blasen pro Sekunde. Eine Blase schätzt er auf etwa 1 Kubikzentimeter, Ergebnis also $Q = 2 \text{ mbar} \cdot \text{l} / \text{s}$. *

Was Leermann aus diesem Versuch lernte:

Die Vakuumpumpe fördert

Der Vorvakuum- Messer zeigt richtig an

Er hat richtig gerechnet

Sein Vakuumsystem hat ein Leck, welches vielleicht schon durch Abhören gefunden werden kann.

* Siehe Blatt: Umwandlung von Gasstromeinheiten

Berechnung von Leitwerten

Der Leitwert eines ("langen") Rohres im Hochvakuum ist

$$L = 12,1 \cdot \frac{d^3}{l} \quad , \frac{l}{s}$$

Rohr- Innendurchmesser und Länge in cm eingesetzt.

Der Leitwert einer "Blende" (Kurze, scharfkantige Platte, Grenzfall des kurzen Rohres) im Hochvakuum ist

$$L = 11,6 \cdot A \quad , l / s$$

A ist die Blendenfläche in Quadratzentimetern.

Bei diesen Leitwertformeln ist wie bei allen Vakuumformeln eine Reihe von speziellen Gültigkeitsbedingungen zu beachten: Druckbereich, Gasart (hier Luft bei 20 Grad C), definierter Druck- oder Strömungsbereich.

Benutzung der Formeln: siehe " Beispiele Leitwertrechnung".

Die Leitwertformeln wurden der Broschüre "Grundlagen der Vakuumtechnik... Leybold AG, Köln 1987" entnommen. Formel Nr. 53b und 54a.

Rohrleitwerte im Hochvakuum, Nomogramm

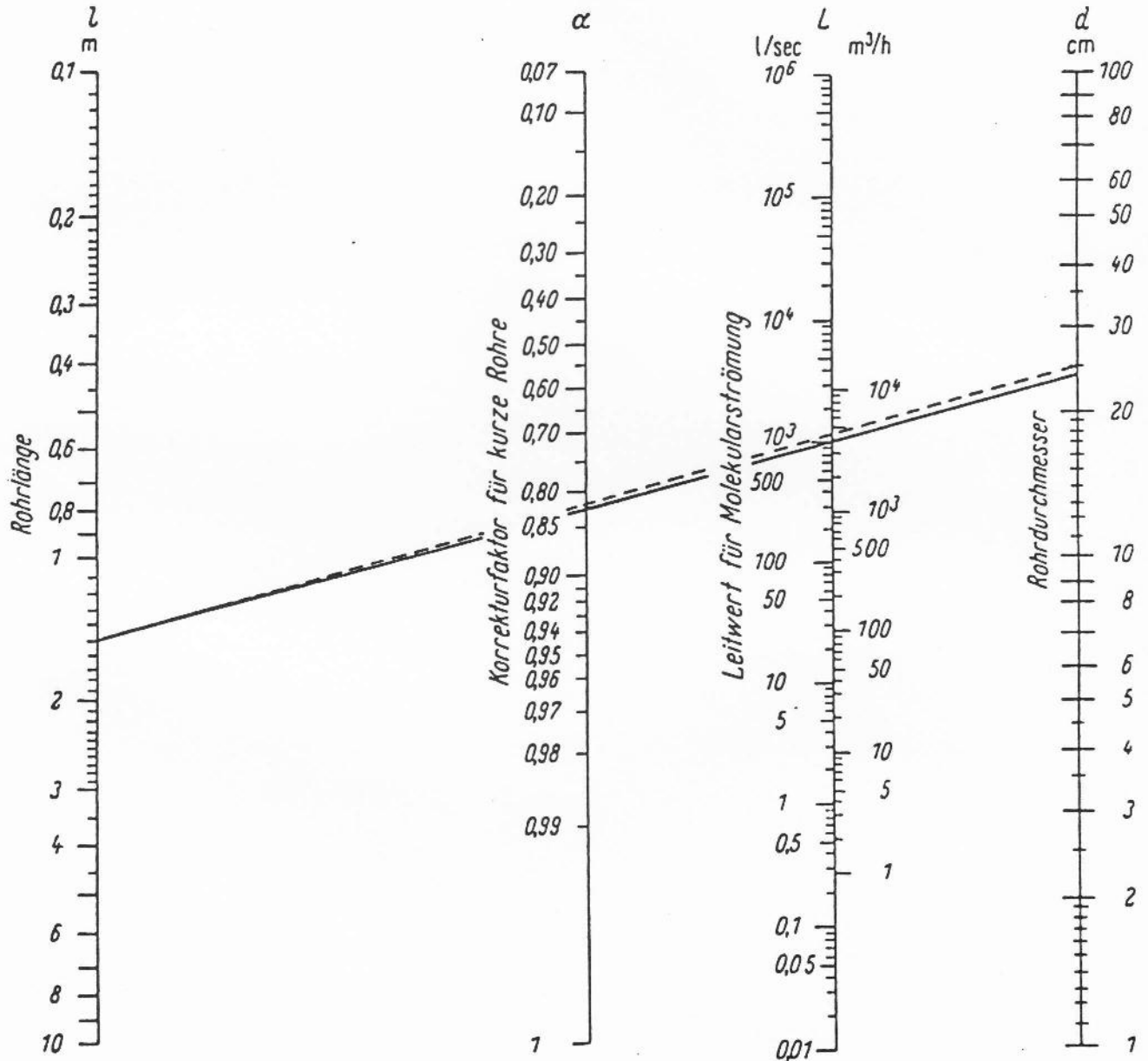


Abb 84 1 Nomogramm zur Ermittlung der Leitwerte von Rohren mit kreisförmigem Querschnitt für Luft bei 20 °C im Gebiet der Molekularströmung (nach J. DELAFOSSE und G. MONGODIN. Les calculs de la Technique du Vide, Sondernummer „Le Vide“, 1961).

Beispiel: Welchen Durchmesser d muß eine 1,5 m lange Rohrleitung haben, damit sie im Gebiet der Molekularströmung einen Leitwert von etwa $L = 1000$ l/sec hat? Man verbindet die Punkte $l = 1,5$ m und $L = 1000$ l/sec miteinander und verlängert die Gerade bis zum Schnittpunkt mit der Skala für den Durchmesser d . Man erhält $d = 24$ cm. Der Eingangleitwert des Rohres, der vom Verhältnis d/l abhängt und bei kurzen Rohren nicht vernachlässigt werden

darf, wird durch einen Korrekturfaktor α berücksichtigt. Für $d/l < 0,1$ kann α gleich 1 gesetzt werden. In unserem Beispiel ist $d/l = 0,16$ und $\alpha = 0,83$ (Schnittpunkt der Geraden mit der α -Skala). Damit erniedrigt sich der effektive Leitwert der Rohrleitung auf $L \cdot \alpha = 1000 \cdot 0,83 = 830$ l/sec. Vergrößert man d auf 25 cm, so erhält man einen Leitwert von $1200 \cdot 0,82 = 985$ l/sec (gestrichelte Gerade).

Berechnung des "Effektiven Saugvermögens"

Das effektive Saugvermögen ist das am Vakuumsystem tatsächlich vorhandene Saugvermögen.

In den seltensten Fällen kann die Vakuumpumpe direkt an das Vakuumsystem angeflanscht werden. Meistens ist mindestens ein Schieber, oft noch ein Federungskörper oder gar ein langer Wellenschlauch dazwischen. Immer tritt dabei ein vakuumtechnisch und wirtschaftlich bedauerlicher Verlust an Pumpensaugvermögen auf. Besonders bei teuren Hochvakuumumpumpen gilt:

Grundregel für Vakuumleitungen:
"kurz und weit"

Das am Vakuumsystem vorhandene Saugvermögen errechnet sich nach

$$S_{\text{eff}} = \frac{1}{\frac{1}{S_{\text{Pumpe}}} + \frac{1}{L_{\text{Leitung}}}} \cdot \frac{l}{s}$$

Der "Leitwert L" der Leitung kann berechnet werden. (Siehe Sonderblatt).

Für gängige Pumpengrößen und Leitungslängen gibt es Tabellen der Pumpenhersteller, die das effektive Saugvermögen angeben (Anlage).

Zahlenbeispiele "Leitwertrechnung" und " Bestimmung des Eff. Saugvermögens einer Hochvakuumpumpe"

Wegen des geringen Platzes im HERA- Protonenring müssen die Turbo-Molekular-Pumpstände in dem schmalen Raum unter den Elektronenring-Magneten aufgestellt werden. Hierdurch wird eine Vakuumleitung zwischen Pumpstand und Ring von etwa 1,5 m nötig. Der Durchmesser der Wellrohrleitung wird wie der Pumpenansaugflansch mit 100 mm dimensioniert.

Der Leitwert dieser Leitung im Hochvakuum ist

$$L = 12,1 \cdot (d^3 / l) \quad , \text{ l/s} \quad , \text{ Maße in cm}$$

$$L = 12,1 \cdot (10^3 / 150)$$

$$L = 12,1 \cdot 6,666$$

$$\underline{L = 80,66 \text{ l/s für Luft}}$$

Mit dieser Kenntnis kann nun auch das "Effektive Saugvermögen" der Turbomolekularpumpe nachgerechnet werden. Die zum Einsatz kommende Pumpe wird mit " 240 l/s" angegeben.

$$S_{\text{eff}} = 1 / (1 / S_{\text{pu}} + 1 / S_{\text{ltg}}) \quad , \text{ l/s}$$

$$S_{\text{eff}} = 1 / (1 / 240 + 1 / 80)$$

$$S_{\text{eff}} = 1 / 0,00416 + 0,0125$$

$$\underline{S_{\text{eff}} = 1 / 0,0166 = 60 \text{ l/s}}$$

Der Ausnutzungsgrad der Vakuumpumpe ist in diesem Fall 25 %.

Als Faustregel gilt : Ausnutzung 50% : $L_{\text{Ltg}} = S_{\text{Pu}}$

Ausnutzung 90% : $L_{\text{Ltg}} = 10 \cdot S_{\text{Pu}}$

Wählt man den Leitwert der Anschlußleitung viel zu klein

$$L_{\text{Ltg}} \ll S_{\text{Pu}} \quad \text{so wird} \quad S_{\text{eff}} \sim L_{\text{Ltg}}$$

Eine weitere Vergrößerung der Vakuumpumpe ist dann sinnlos ohne Anschlußleitung mit besserem Leitwert. Eine wichtige Erkenntnis für das Abpumpen der langen, dünnen Strahlrohre bei DESY! Verteilte Pumpen.

Effektives Saugvermögen von Turbomolekularpumpen unter Berücksichtigung des Leitungswiderstandes

In den nachfolgenden Tabellen soll gezeigt werden, welche effektiven Saugvermögen bei verschiedenen Turbomolekularpumpen zu erwarten sind, wenn zwischen Rezipienten und Turbomolekularpumpen Vakuumleitun-

gen verschiedener Querschnitte, geometrischer Formen und Längen installiert sind.

Zur Berechnung der effektiven Saugvermögen nach der Gleichung 11

$$S_{\text{eff}} = \frac{S_p}{1 + \frac{S_p}{L}} \left[\frac{l}{s} \right]$$

wurden für die Ermittlung der Leitwerte die Gleichungen der Anwendungsfälle 2.1.7.1, 2.1.7.2 und 2.1.7.4 unter Berücksichtigung der Öffnungsverhältnisse der verschiedenen Pumpentypen benutzt.

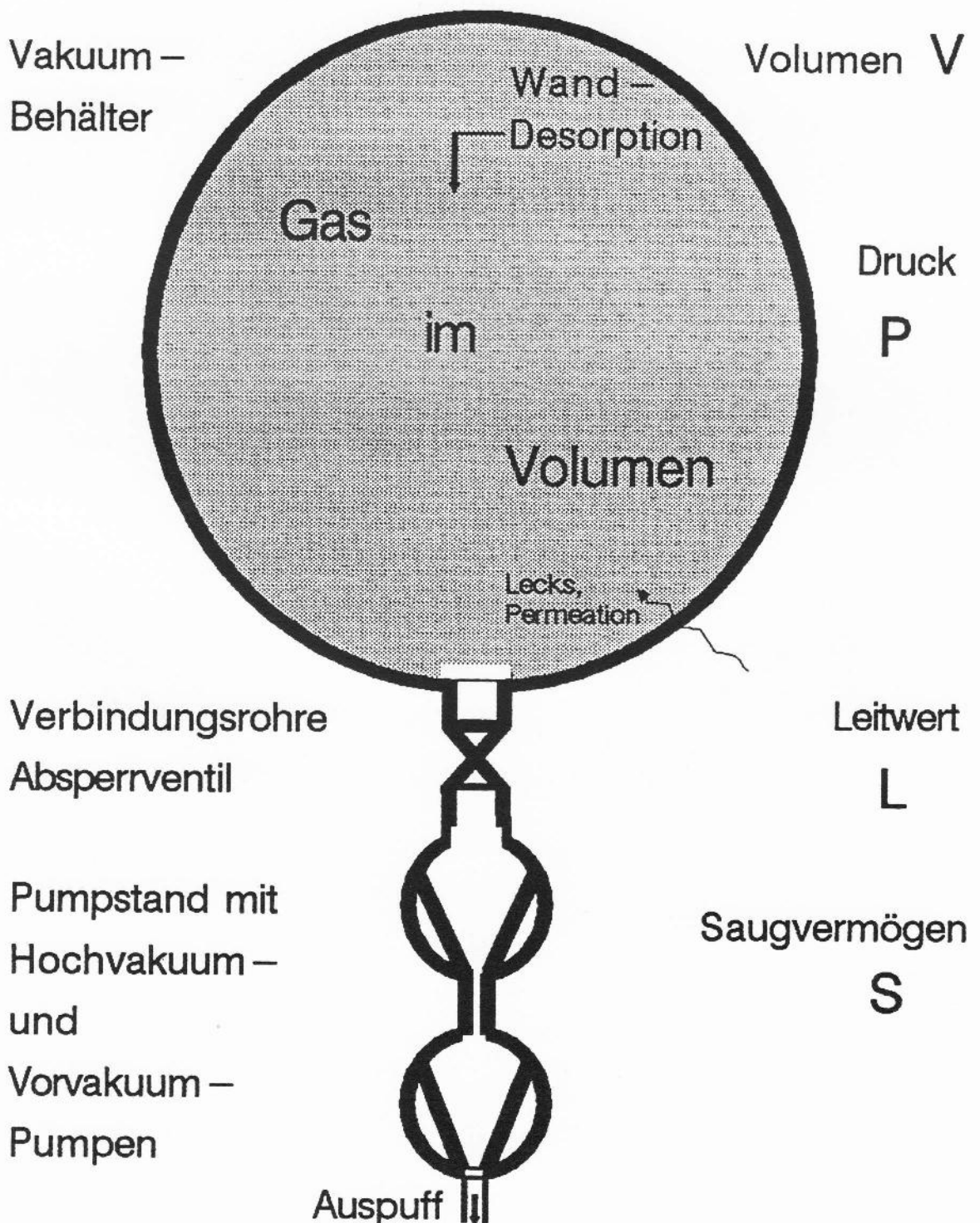
Leitung		Effektives Saugvermögen für Luft [l/s]							
φ [mm]	Länge l [mm]	TPH 040 DN 40	TPH 040 TPU 040 DN 63	TPH 170 TPU 170	TPH 330 TPU 330	TPH 510 TPU 510	TPH 2200 TPU 2200	TPH 5000 DN 400	TPH 5000 DN 500
500	→ 0								6500
	250								5880
	500								5370
	1000								4570
	2000								3525
400	→ 0							4800	5610
	200							4279	4911
	400							3860	4367
	800							3228	3575
	1600							2431	2623
250	→ 0						2200	3180	3520
	125						1925	2640	2870
	250						1710	2250	2420
	500						1400	1740	1840
	1000						1026	1200	1245
150	→ 0					500	1310	1610	1690
	75					458	1060	1250	1295
	150					422	890	1020	1050
	300					366	674	745	760
	600					288	453	485	490
100	→ 0			170	300	382	733	820	840
	50			159	267	331	565	615	625
	100			149	241	291	459	490	500
	200			133	202	235	335	350	375
	400			110	152	169	217	225	225
63	→ 0		40	133	200	233	332	350	355
	30		38	115	168	190	273	260	265
	60		37	106	144	160	202	210	210
	120		35	83	113	121	145	150	210
	240		30	65	78	82	93	95	95
40	→ 0	25	34	86	110	119	142	145	146
	20	24	32	71	86	91	104	106	106
	40	22	29	60	71	74	82	83	83
	80	20	26	46	52	53	58	59	59
	160	17	20	31	34	34	37	37	37
25	→ 0	20	25	45	51	52	57	57	54
	12,5	18	22	35	38	39	41	42	42
	25	16	19	28	30	31	33	33	33
	50	13	15	21	22	22	23	23	23
	100	10	11	13	14	14	14	14	14
16	→ 0	13	15	21	22	22	23	23	23
	8	11	12	16	16	16	17	17	17
	16	9	10	13	13	13	13	13	13
	32	7	8	9	9	9	9	9,5	9,5
	64	5	5	6	6	6	6	6	6
10	→ 0	7	8	9	9	9	9,2	9,2	9,2
	5	5	6	7	6,6	6,6	6,6	6,7	6,7
	10	4	5	5	5,2	5,2	5,3	5,3	5,3
	20	3	3	4	3,6	3,6	3,7	3,7	3,7
	40	2	2	2	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
80	1	1	1	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	

Effektives Saugvermögen für N₂

Informationen zur Vakuumtechnik

Abpumpen eines Behälters

Hauptbauteile: Gasquellen: Größen:



Auspumpzeit im Grobvakuumbereich (1000 bis 1 mbar)

Diese kann z.B. in Sekunden berechnet werden nach der Formel:

$$t = (V / S) \cdot \ln (p_{\text{anfang}} / p_{\text{ende}})$$

Hierin ist t die Pumpzeit bis p_{ende} , V das Systemvolumen z. B. in Litern, S das effektive Saugvermögen in l/s, \ln der "natürliche Logarithmus" zur Basis $e = 2,7$; p_{anfang} z.B. der Atmosphärendruck in mbar.

Ein wichtiger Zusammenhang wird durch die Größe V / S dargestellt. Es ist die

$$\text{Zeitkonstante } \tau (\text{Tau}) = V / S$$

Wird das Volumen in Litern und das Saugvermögen in l / s eingegeben, so erhält man τ in Sekunden.

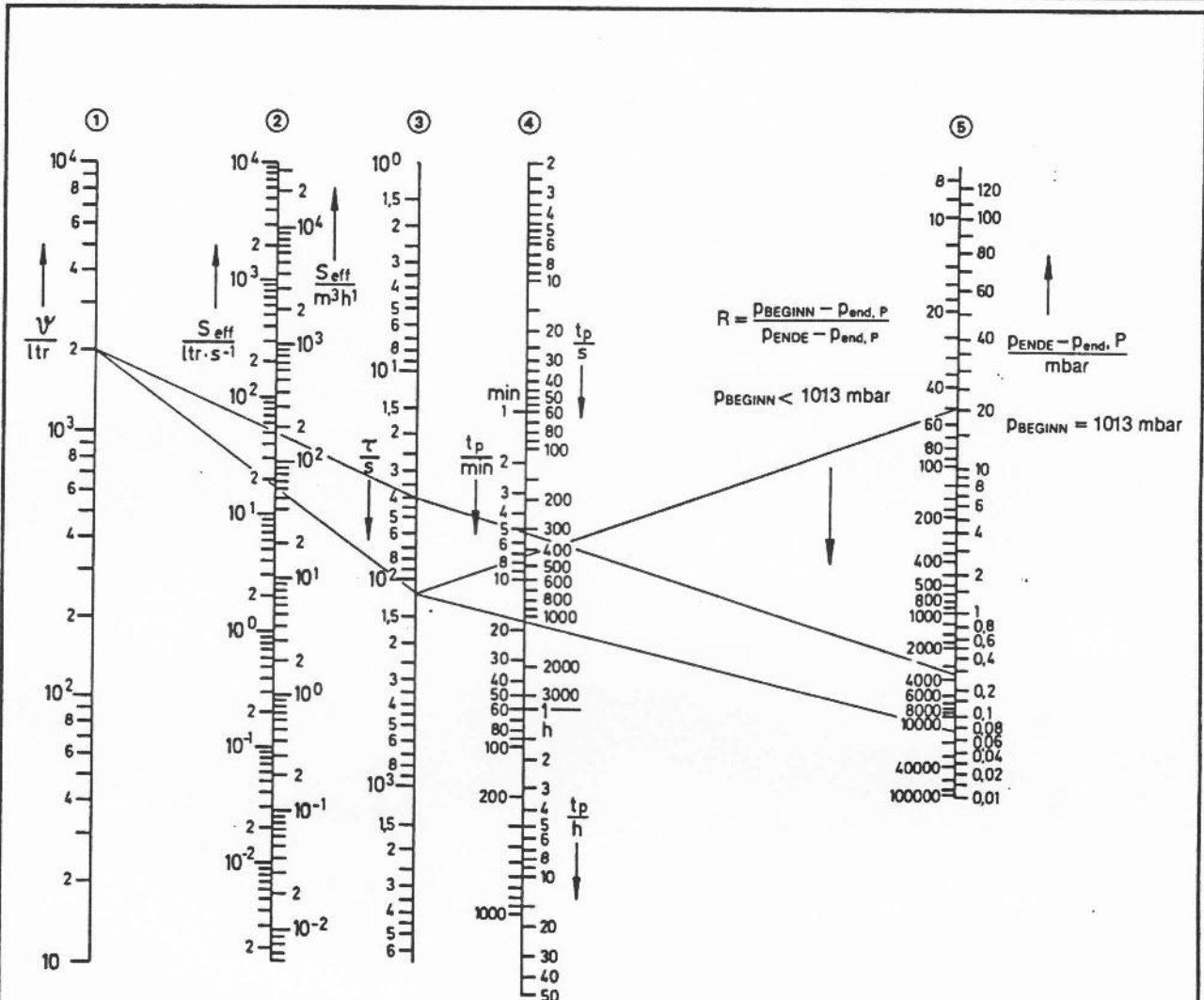
Nach einer **Faustformel** läßt sich mit Hilfe der Zeitkonstante die Grobvakuum-Auspumpzeit abschätzen:

Im Verlauf einer Zeitkonstante fällt der Druck auf ca. 1/3 des Ausgangsdrucks

Korrekt betrachtet fällt der Druck auf $1/e = 1/2,7 = 0,37$, also 37 %. Je nach Ansatz benötigt man danach 6 ... 7 Zeitkonstanten, um von Atmosphärendruck auf 1 mbar zu pumpen.

Eine weitere einfache Möglichkeit zur Auspumpzeitermittlung ist die Benutzung von Nomogrammen (Rechentafeln, wie anliegendes Beispiel) oder spezieller Rechenscheiben.

Wie bei allen Vakuumformeln müssen die dabei angegebenen Einschränkungen der Gültigkeit beachtet werden!



Nomogramm zur Ermittlung der Abspumpzeit t_p eines Behälters im Grobvakuumbereich.

Leiter ①: Kesselvolumen V in Litern.

Leiter ②: Maximum des effektiven Saugvermögens $S_{eff, max}$ am Kessel in (links) Liter durch Sekunde bzw. (rechts) Kubikmeter durch Stunde.

Leiter ③: Abspumpzeit t_p in (rechts oben) Sekunden, bzw. (links Mitte) Minuten, bzw. (rechts unten) Stunden.

Leiter ④: Rechts: Druck P_{ENDE} in Millibar am ENDE der Abspumpzeit, wenn zu BEGINN der Abspumpzeit der Atmosphärendruck $P_{BEGINN} = P_a = 1013$ mbar geherrscht hat. Der gewünschte Druck P_{ENDE} ist um den Enddruck der Pumpe $P_{end, P}$ zu vermindern, mit dem Differenzwert ist in die Leiter einzugehen. Falls Einströmung $Q_{ev, max}$ vorhanden, ist in die Leiter mit dem Wert $P_{ENDE} - P_{end, P} - Q_{ev, max} / S_{eff, max}$ einzugehen.

Links: Druckminderungsverhältnis $R = (P_{BEGINN} - P_{end, P} - Q_{ev, max} / S_{eff, max}) / (P_{ENDE} - P_{end, P} - Q_{ev, max} / S_{eff, max})$, wenn zu Beginn des Pumpvorgangs der Druck P_{BEGINN} herrscht und auf den Druck P_{ENDE} abgepumpt werden soll.

Die Druckabhängigkeit des Saugvermögens geht in das Nomogramm ein und kommt durch $P_{end, P}$ in Leiter ④ zum Ausdruck. Ist der Pumpendruck $p_{end, P}$ klein gegen den Druck P_{ENDE} , den man am Ende des Abspumpvorganges zu erreichen wünscht, so entspricht das einem konstanten Saugvermögen S bzw. S_{eff} während des ganzen Pumpprozesses.

Beispiel 1 zum Nomogramm 83.1:

Ein Kessel mit dem Volumen $V = 2000$ l soll durch eine Sperrschieberpumpe mit dem am Kessel wirkenden Saugvermögen $S_{eff, max} = 60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} = 16,71 \cdot \text{s}^{-1}$ vom Druck $P_{BEGINN} = 1000$ mbar (Atmosphärendruck) auf den Druck $P_{ENDE} = 10^{-1}$ mbar abgepumpt werden. Die Abspumpzeit gewinnt man aus dem Nomogramm in zwei Schritten:

- 1) Bestimmung von t_p : Man legt durch $V = 2000$ l (Leiter ①) und $S_{eff, max} = 60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} = 16,71 \cdot \text{s}^{-1}$ (Leiter ②) eine Gerade, und liest am Schnittpunkt dieser Geraden mit Leiter ④ den Wert $T = 120 \text{ s} = 2 \text{ min}$ ab (man beachte, daß die Unsicherheit dieses Verfahrens etwa $\Delta T = \pm 10 \text{ s}$ beträgt, die relative Unsicherheit also etwa 10% ist).
- 2) Bestimmung von t_p : Der Enddruck der Rotationspumpe sei nach Angabe des Herstellers $P_{end, P} = 3 \cdot 10^{-2}$ mbar, die Apparatur sauber und die Lecke vernachlässigbar ($Q_{ev, max} = 0$ zu setzen); dann ist $P_{ENDE} - P_{end, P} = 10^{-1} \text{ mbar} - 3 \cdot 10^{-2} \text{ mbar} = 7 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$. Man legt nun eine Gerade durch den unter 1) gefundenen Punkt $T = 120 \text{ s}$ (Leiter ④) und den Punkt $P_{ENDE} - P_{end, P} = 7 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$ (Leiter ⑤) und liest den Schnittpunkt dieser Geraden mit Leiter ④ $t_p = 180 \text{ s} = 3 \text{ min}$ ab. (Wieder beträgt die relative Unsicherheit des Verfahrens etwa 10%, so daß die relative Unsicherheit von t_p etwa 15% betragen wird). Mit einem Sicherheitszuschlag von 20% wird man mit der Pumpzeit $t_p = 18,5 \text{ min} \cdot (1 + 15\% + 20\%) = 18,5 \text{ min} \cdot 1,35 = 25 \text{ min}$ rechnen.

Beispiel 2 zum Nomogramm 83.1:

Die saubere und trockene Vakuumanlage ($Q_{ev, max} = 0$) mit $V = 2000$ l (wie in Beispiel 1) soll auf den Druck $P_{ENDE} = 10^{-2}$ mbar abgepumpt werden. Da dieser Druck kleiner als der Enddruck der Sperrschieberpumpe ($S_{eff, max} = 60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} = 16,71 \cdot \text{s}^{-1}$, $P_{end, P} = 3 \cdot 10^{-2}$ mbar) ist, muß die Hintereinanderschaltung einer Sperrschieberpumpe und einer Wälzkolbenpumpe verwendet werden. Letztere hat einen Einschaltdruck $p_1 = 20$ mbar, das Saugvermögen $S_{eff, max} = 200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} = 55,1 \cdot \text{s}^{-1}$ sowie $P_{end, P} = 4 \cdot 10^{-2}$ mbar. Man wird also von $P_{BEGINN} = 1000$ mbar bis $p = 20$ mbar mit der Sperrschieberpumpe arbeiten und von $p_1 = 20$ mbar bis $P_{ENDE} = 10^{-2}$ mbar die Wälzkolbenpumpe zuschalten, wobei die Sperrschieberpumpe als Vorpumpe wirkt. Für den ersten Pumpschritt findet man aus dem Nomogramm wie in Beispiel 1 (Gerade durch $V = 2000$ l, $S_{eff, max} = 16,71 \cdot \text{s}^{-1}$) die Zeitkonstante $T = 120 \text{ s} = 2 \text{ min}$. Verbindet man diesen Punkt der Leiter ④ mit dem Punkt $p_1 - P_{end, P} = 20 \text{ mbar} - 3 \cdot 10^{-2} \text{ mbar} = 20 \text{ mbar}$ ($P_{end, P}$ ist hier vernachlässigt, d.h. die Sperrschieberpumpe hat im ganzen Bereich 1000 mbar... 20 mbar konstantes Saugvermögen der Leiter ②), so findet man $t_{p1} = 7,7 \text{ min}$. Die Wälzkolbenpumpe muß den Druck von $p_1 = 20$ mbar auf $P_{ENDE} = 10^{-2}$ mbar mindern, also ist das Druckminderungsverhältnis $R = (20 \text{ mbar} - 4 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}) / (10^{-2} \text{ mbar} - 4 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}) = 20/6 \cdot 10^{-2} = 3300$.

Die Zeitkonstante findet man (Gerade $V = 2000$ l auf ①, $S_{eff, max} = 55,1 \text{ s}^{-1}$ auf ②) zu $T = 37 \text{ s}$ (auf ③). Verbindet man diesen Punkt auf ① mit $R = 3300$ auf ⑤, dann liest man auf ④ $t_{p2} = 290 \text{ s} = 4,8 \text{ min}$ ab. Setzt man für die Umschaltzeit noch $t_s = 1 \text{ min}$ in Rechnung, so ergibt sich die Abspumpzeit $t_p = t_{p1} + t_s + t_{p2} = 7,7 \text{ min} + 1 \text{ min} + 4,8 \text{ min} = 13,5 \text{ min}$.

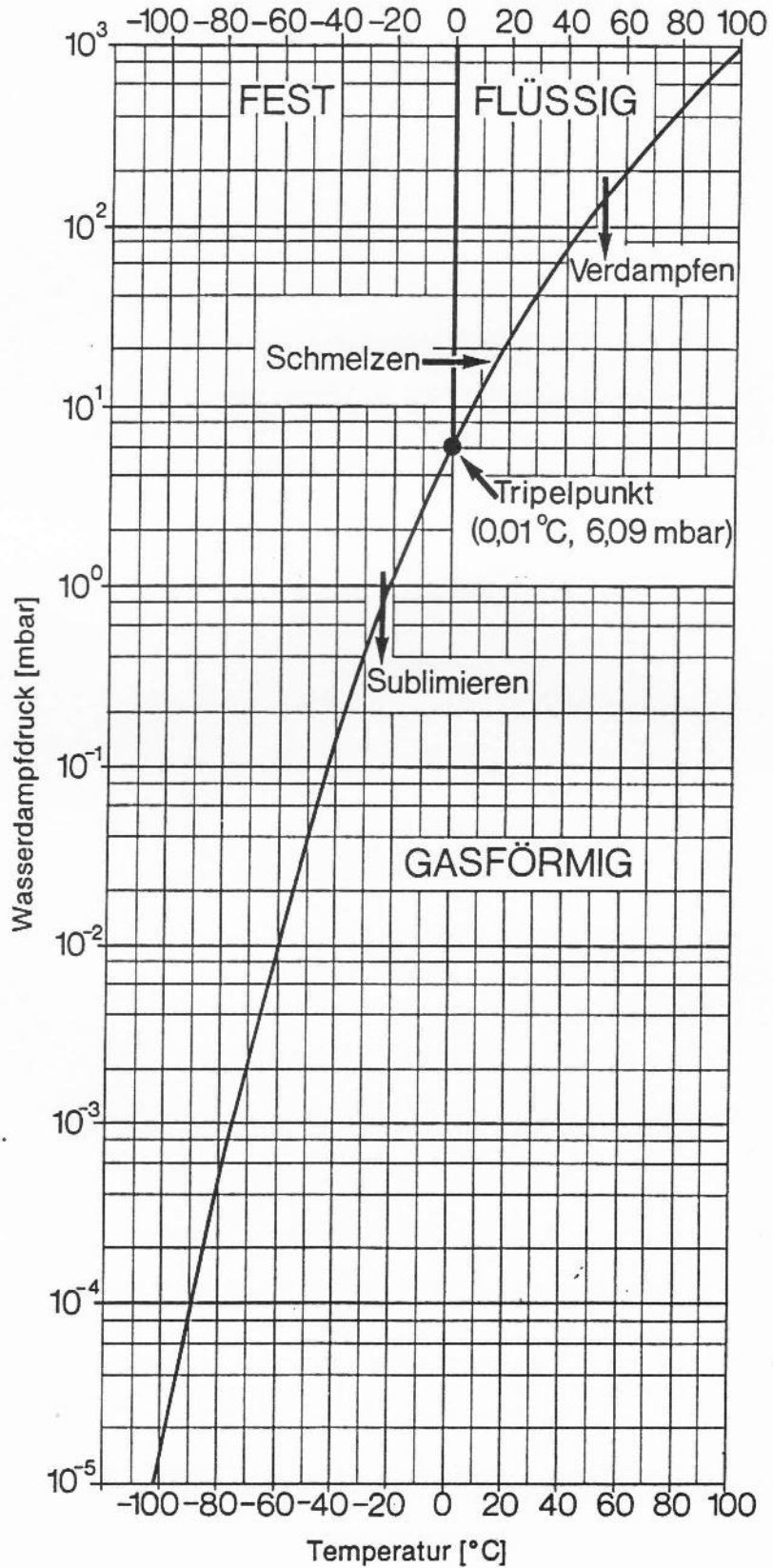
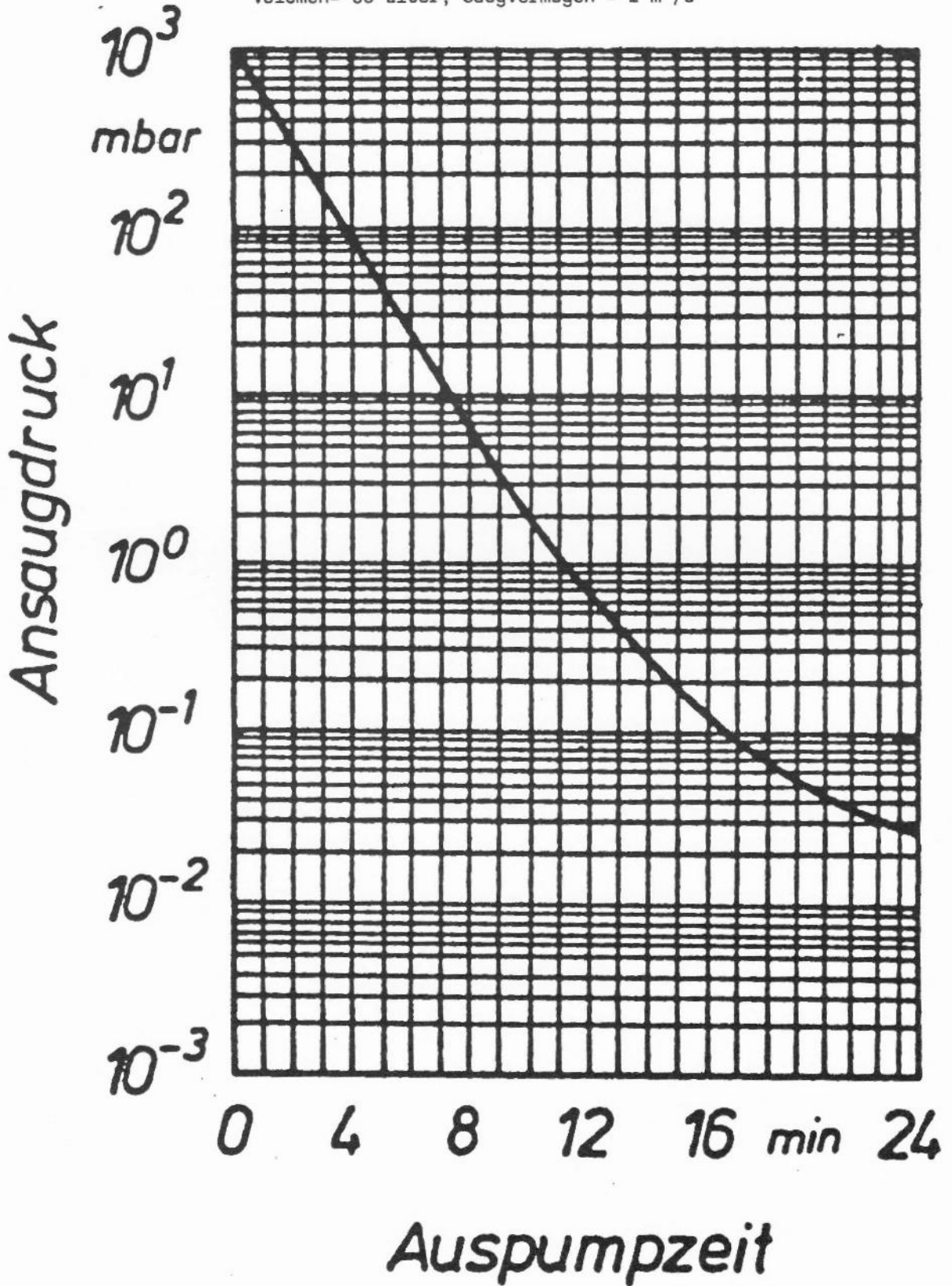


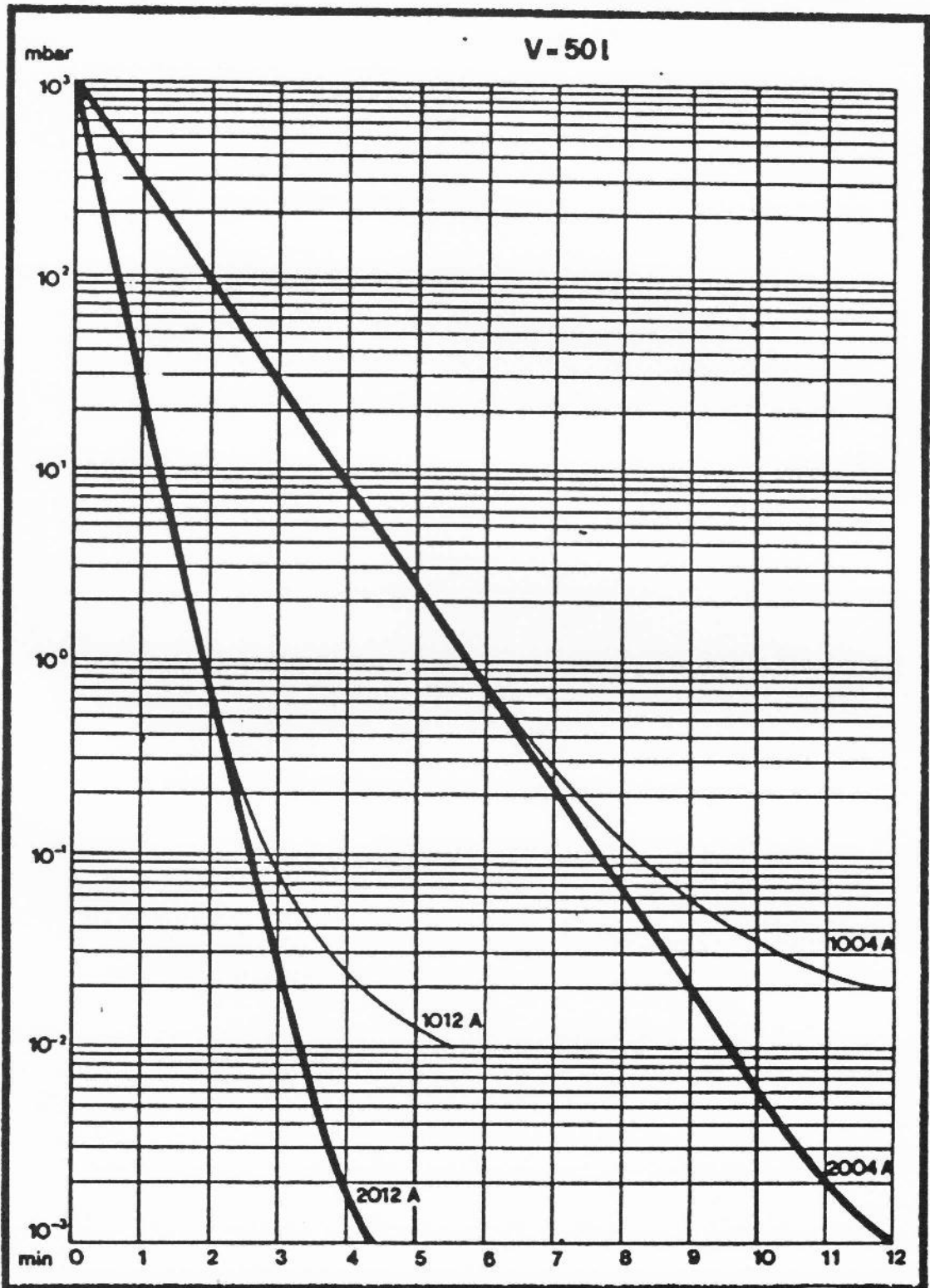
Abb. 92.1 Phasendiagramm von Wasser

Vorvakuum-Auspumpzeit nach Kerspe, 1987

Volumen= 50 Liter, Saugvermögen = 2 m³/s



Auspumpzeiten



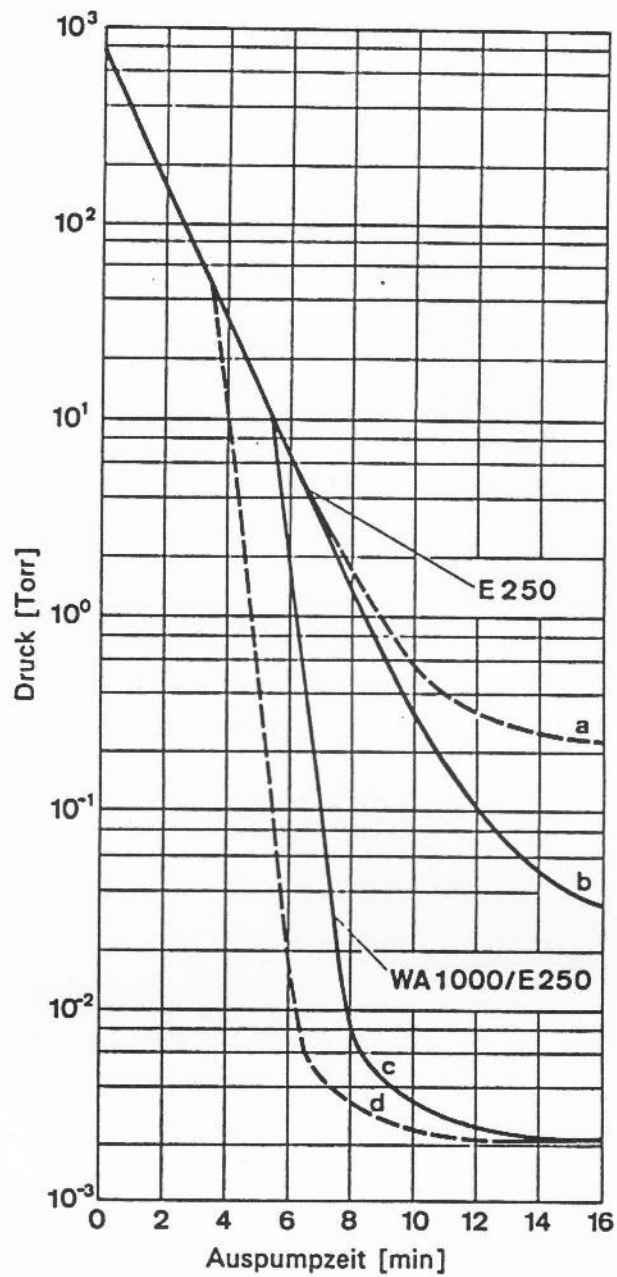


Abb. 38.1 Auspumpzeit eines 5 m³-Behälters mit einer Sperrschieberpumpe E 250 mit einem Nennsaugvermögen von 250 m³ · h⁻¹ und mit einer Wälkolben-/Sperrschieberpumpen-Kombination Ruvac WA 1000/E 250
 a – E 250 m. Gasballast
 b – E 250 o. Gasballast
 c – WA 1000/E 250 o.G., Einschaltdruck 10 Torr
 d – WA 1000/E 250 o.G., Einschaltdruck 50 Torr

LH, 72

Auspumpzeit im Hochvakuum (Kleiner als 10^{-3} mbar)

Druck und Druckverlauf im "dichten" Hochvakuumraum ergeben sich aus der Grundformel

$$P = Q_{\text{des}} / S_{\text{eff}} \text{ , mbar}$$

S_{eff} ist das effektive Saugvermögen am Vakuumkessel, der Gasstrom Q_{des} ist bei den meisten Beschleuniger- und Speicherringanwendungen bei DESY die Gasabgabe von der "reinen Metalloberfläche".

Die Gasabgabe ("Desorption") ist eine zeitabhängige Größe, die Kurven oder Tabellen entnommen werden kann (Vakuum- Fachbücher, viele "Desorptions- Meßkurven" aus den DESY- Vakuumlabors, Beispiele anliegend) .

Für die reine Metalldesorption, wie oben angegeben, gilt die **Faustregel** der "linearen Beziehung im doppelt logarithmischen Maßstab"

An einem laufenden Hochvakuumssystem wird die Pumpzeit notiert, die von einer Zehnerpotenz bis zur nächsten gebraucht wird. Die Voraussage ist dann : " Zehnfache Pumpzeit bis zur nächsten Zehnerpotenz".

Beispiel:

An einer Laborvakuumapparatur wurden folgende Meßwerte notiert:

Druck $1 \cdot 10^{-4}$ mbar nach 1 h

Die Voraussage für den "nächsten Morgen" wäre dann:

Druck $1 \cdot 10^{-5}$ mbar nach 10 h

Nach dem "Wochenende" wäre zu erwarten:

Druck $1 \cdot 10^{-6}$ mbar nach 100 h

Selbstverständlich würde das Auftreten eines Lecks einen Strich durch die Rechnung machen- die Kurve knickt in die Horizontale ab, der Druck bleibt "stehen". Ebenso geht die Rechnung schief, wenn die Vakuumpumpe in die Nähe ihres "Endvakuum" kommt. Abweichungen vom linearen Verlauf können die Anwesenheit von "Dämpfen", Kunststoffen, Gaseinschlüssen ... anzeigen.

Für die genannten Beobachtungen ist ein " doppelt logarithmisch geteiltes" Papier günstig (liegt bei).

Wo immer möglich, soll eine automatische Meßwerterfassung erfolgen, deren dargestellte Werte im Falle einer Vakuumstörung die Diagnose erleichtern.

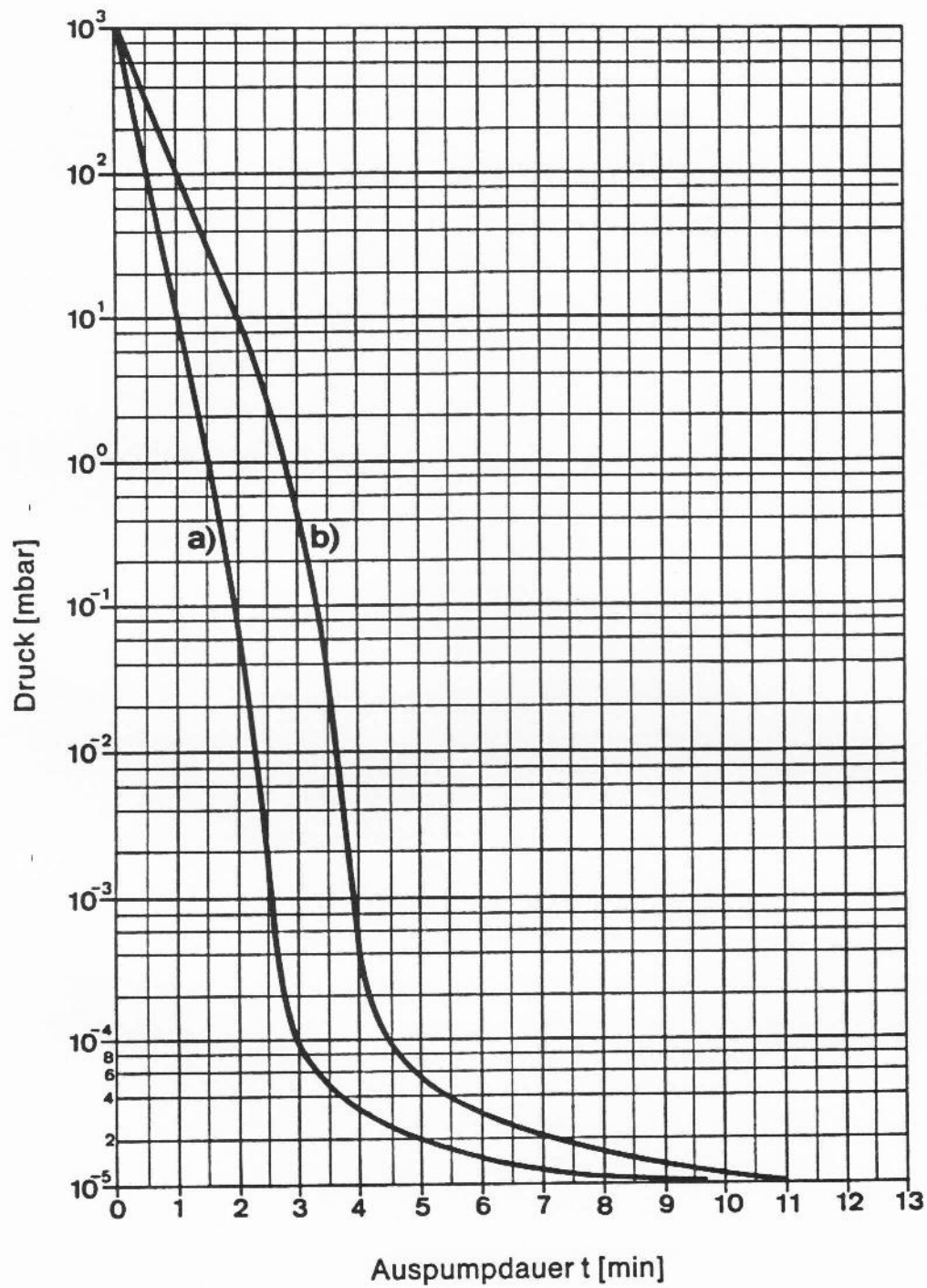
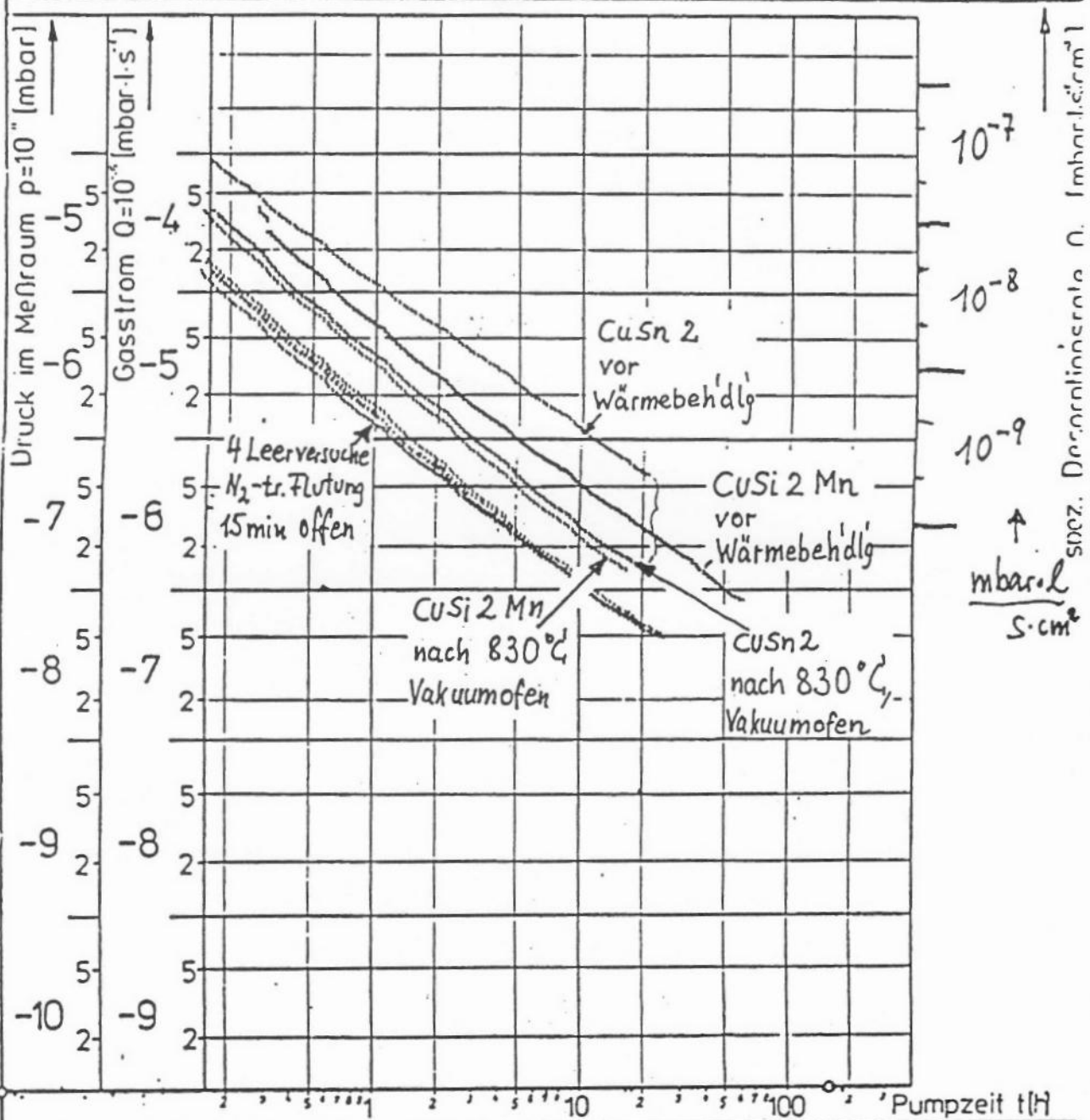


Abb. 22
 TURBOVAC 200; Auspumpkurven eines 100-l-Rezipienten bei unterschiedlichen Vorpumpen: zweistufige Drehschieberpumpe: a) D 30 A ($30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$); b) D 16 A ($16 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)

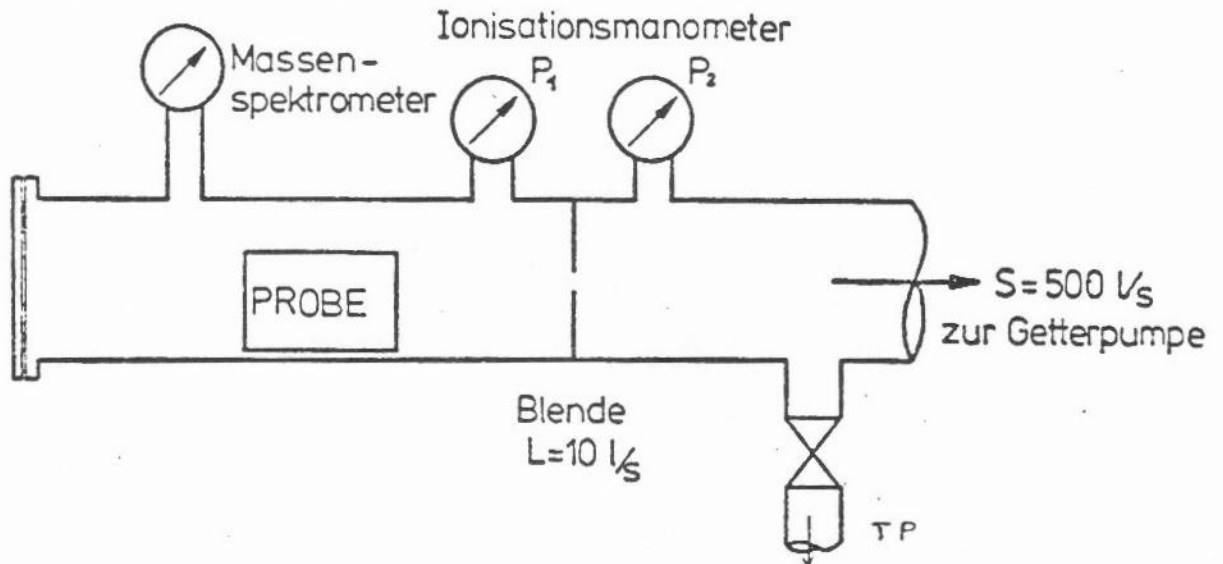
DESY MVA	Desorptionsmessung HERA - Cu 1	
Gegenstand:	HERA Kupfer	Datum: 14.3.86
Material:	S.H.	A: 23000 cm ²
Herkunft / Verwendung:	OS, PL; HERA e ⁻ -kammer	V: cm ³
		Name: He / Flu



„Vor Wärmebehandlung“: „P3“-gewaschen (Kiele) $S = 10 \text{ l/s}$
 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ -geätzt, getrocknet

Die „Leer versuche“ zeigen den Äquivalenzgasstrom von ca 4000 cm² Edelstahlfläche. Während der „offenen“ Zeit des Meßraumes wurde eine Labor-Luftfeuchte von ca 40% bis ca 60% gemessen. Siehe M-S.

Meßanordnung



MESSVERFAHREN

Die zu untersuchende Probe wird nach Abklärung von Herkunft, Eigenschaften und Vorbehandlung durch eine Flanschöffnung in den Messraum eingelegt.

Nach dem Verschrauben wird mit einem Hilfs-Turbopumpstand bei etwa 10^{-5} mbar die Ionengetterpumpe zur Gasstrom-Messung gestartet.

Durch die Blende mit einem Leitwert von $L = 10$ l/s wird das Gas aus dem Messraum abgepumpt.

Die Druckmessung erfolgt mit zwei Ionisationsmanometern.

Der Druckverlauf wird während der Messzeit registriert.

Mit Hilfe eines Quadrupol-Massenspektrometers können Aussagen über die Art des gemessenen Gasstromes und über die Reinheit des Prüflings gemacht werden.

Messbedingungen

Druckdifferenzmessung zwischen Proben- und Pumpenraum :

$$p_1 - p_2 = \Delta p ; \quad \text{wenn } p_2 \ll p_1 \quad (\text{Praktisch Faktor } 10) :$$

$$\Delta p \approx p_1$$

Gasstrom-Messung aus dem Probenraum :

$$Q_{\text{ges}} = \Delta p \cdot L \approx p_1 \cdot L = p_1 \cdot 10 \text{ mbar} \cdot \text{l/s} \text{ für eingeb. Blende}$$

$$Q_{\text{probe}} = Q_{\text{ges}} - Q_{\text{leer}} ; \quad \text{wenn Probengröße richtig } Q_{\text{leer}} \ll Q_{\text{probe}} :$$

$$Q_{\text{probe}} \approx Q_{\text{ges}}$$

Spezifische Desorptionsrate :

$$Q_{\text{spez}} = Q_{\text{probe}} / F_{\text{probe}} \quad \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$$

Dimensionen und Geräte

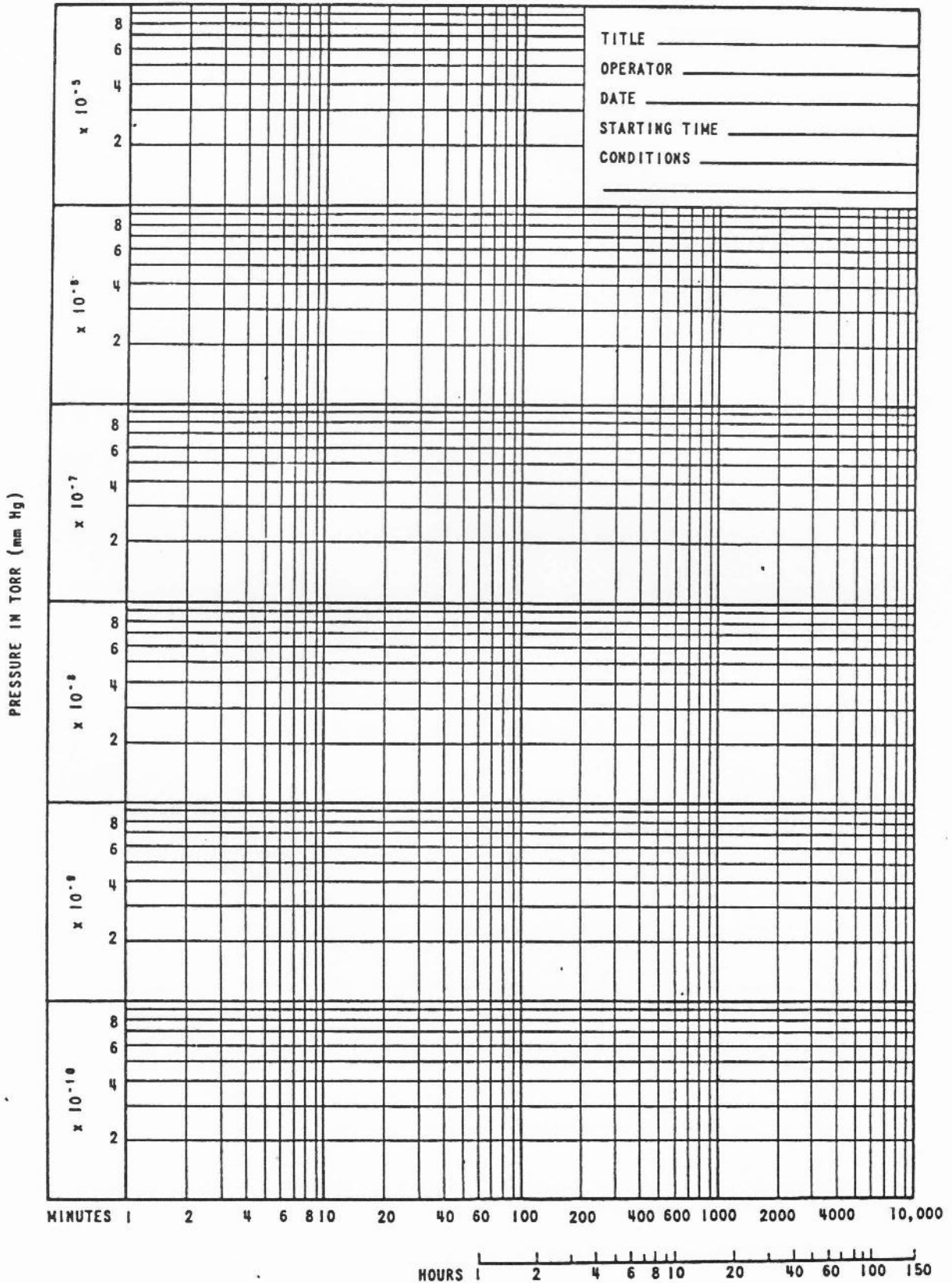
Messraum 15 cm \varnothing , 54 cm lg , F_{int} ca. 3700 cm². Blende 1cm \varnothing

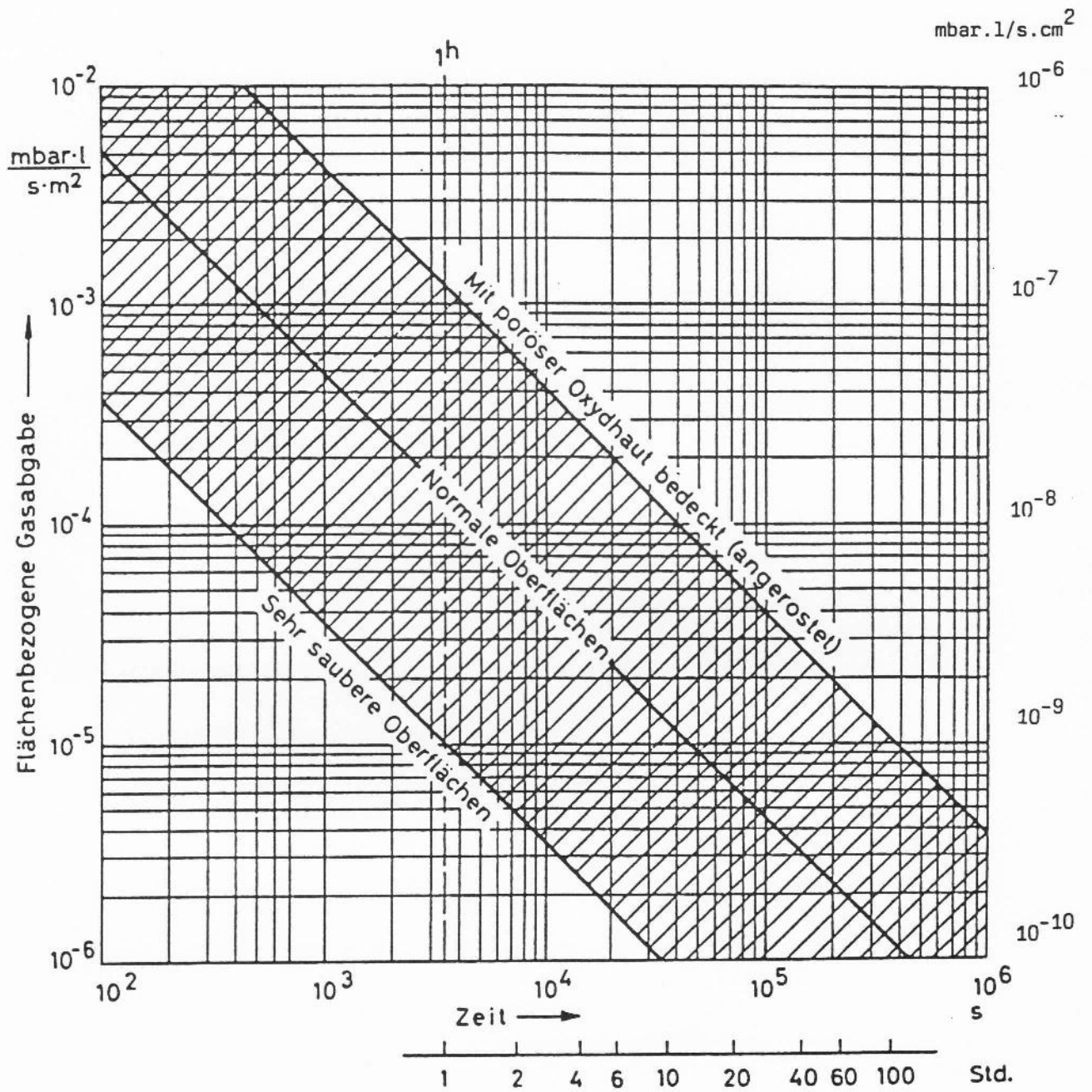
Ionengenetterpumpe 921-0037 500 l/s (Varian)
 Ionisations-Manometer I M 51 (Leybold-Heraeus)
 Massenspektrometer QMG 111 B (Balzers)

Beispiel für Formblatt als wichtiges Beobachtungsmittel



PRESSURE vs. TIME
(log-log Number 953-0021)





Metall-Gasabgabe = Desorption", nach Wutz

4. Desorptions- und Permeationsraten Zusammensetzung der Atmosphäre

Werkstoff	Oberflächenbeschaffenheit	Zustand der Oberflächen	Desorptionsraten $\left[\frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2} \right]$		
			1 h	5 h	10 h
Stahl, rostfrei	blank	gereinigt	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$5,4 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$
Stahl, rostfrei	gebeizt	ausgeheizt 1h, mit normaler Luft geflutet	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$2,8 \cdot 10^{-10}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$
Stahl, rostfrei	kugelgestrahlt		$3 \cdot 10^{-10}$	$6,5 \cdot 10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-11}$
Stahl, Ni-plattiert	poliert	gereinigt	$2 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-9}$
Stahl, Cr-plattiert	poliert	gereinigt	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$
Stahl		verrostet	$6 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Stahl	blank	gereinigt	$5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$
Stahl	kugelgestrahlt	gereinigt	$4 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-8}$	$3,8 \cdot 10^{-8}$
Aluminium		gereinigt	$6 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$
Messing		gereinigt	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$
Kupfer		gereinigt	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$9,5 \cdot 10^{-8}$	$5,5 \cdot 10^{-8}$
Porzellan	glasiert		$8,7 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$
Glas		gereinigt	$4,5 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$	$5,5 \cdot 10^{-10}$
Acrylglas			$1,6 \cdot 10^{-6}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$
Neopren			$4 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Perbunan			$4 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$
Viton			$1,2 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$
Viton		4h ausgeheizt bei 100 °C	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{-8}$
Viton		4h ausgeheizt bei 150 °C	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$3,3 \cdot 10^{-10}$	$2,5 \cdot 10^{-10}$
Teflon		entgast	$8 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$

Desorptionsraten

Werkstoff	Permeationsraten $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$ bei 20 °C					
	CO ₂	H ₂	He	O ₂	N ₂	Ar
Viton A	$6 \cdot 10^{-12}$	$3,5 \cdot 10^{-12}$	$7,5 \cdot 10^{-12}$	—	—	—
Perbunan	—	$7,5 \cdot 10^{-12}$	$7,5 \cdot 10^{-12}$	$6 \cdot 10^{-13}$	—	$1,3 \cdot 10^{-12}$
Neopren	$2 \cdot 10^{-11}$	$7,5 \cdot 10^{-12}$	$7,2 \cdot 10^{-12}$	$1,4 \cdot 10^{-12}$	$1,9 \cdot 10^{-13}$	$1,2 \cdot 10^{-12}$
PTFE	$1,2 \cdot 10^{-13}$	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$5,3 \cdot 10^{-10}$	$7,5 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$4,4 \cdot 10^{-12}$
Gummi	$7 \cdot 10^{-11}$	$3,4 \cdot 10^{-11}$	$2,2 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-11}$	$5,3 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{-11}$
Vespal (Polyamide)	$2 \cdot 10^{-13}$	—	$1,9 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-14}$	—
Silicon	$25 \cdot 10^{-10}$	$9,5 \cdot 10^{-10}$	$2,9 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$2,7 \cdot 10^{-10}$	$5,3 \cdot 10^{-10}$

Permeationsraten

Werte aus div. Veröffentlichungen von Barton, R.S., J Vac, Sc, Technol, Vol 17, No. 1, Jan. Feb. 1980, Espe, Werkstoffkunde

Partialdrucke der in der Atmosphäre vorhandenen Gase

Stickstoff	$P_{N_2} = 787 \text{ mbar}$	Helium	$P_{He} = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$
Sauerstoff	$P_{O_2} = 213 \text{ mbar}$	Krypton	$P_{Kr} = 11,2 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$
Argon	$P_{Ar} = 9,4 \text{ mbar}$	Wasserstoff	$P_{H_2} = 5,1 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$
Wasserdampf	$P_{H_2O} = 6,7 - 40 \text{ mbar}$	Xenon	$P_{Xe} = 8,1 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$
Kohlendioxid	$P_{CO_2} = 2 - 4 \cdot 10^{-1} \text{ mbar}$	Ozon	$P_{O_3} = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ mbar}$
Neon	$P_{Ne} = 1,81 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$		

Zusammensetzung der Atmosphäre

1

Auspumpen eines p-Dipols in der

Messzelle: Start am 16.7.87

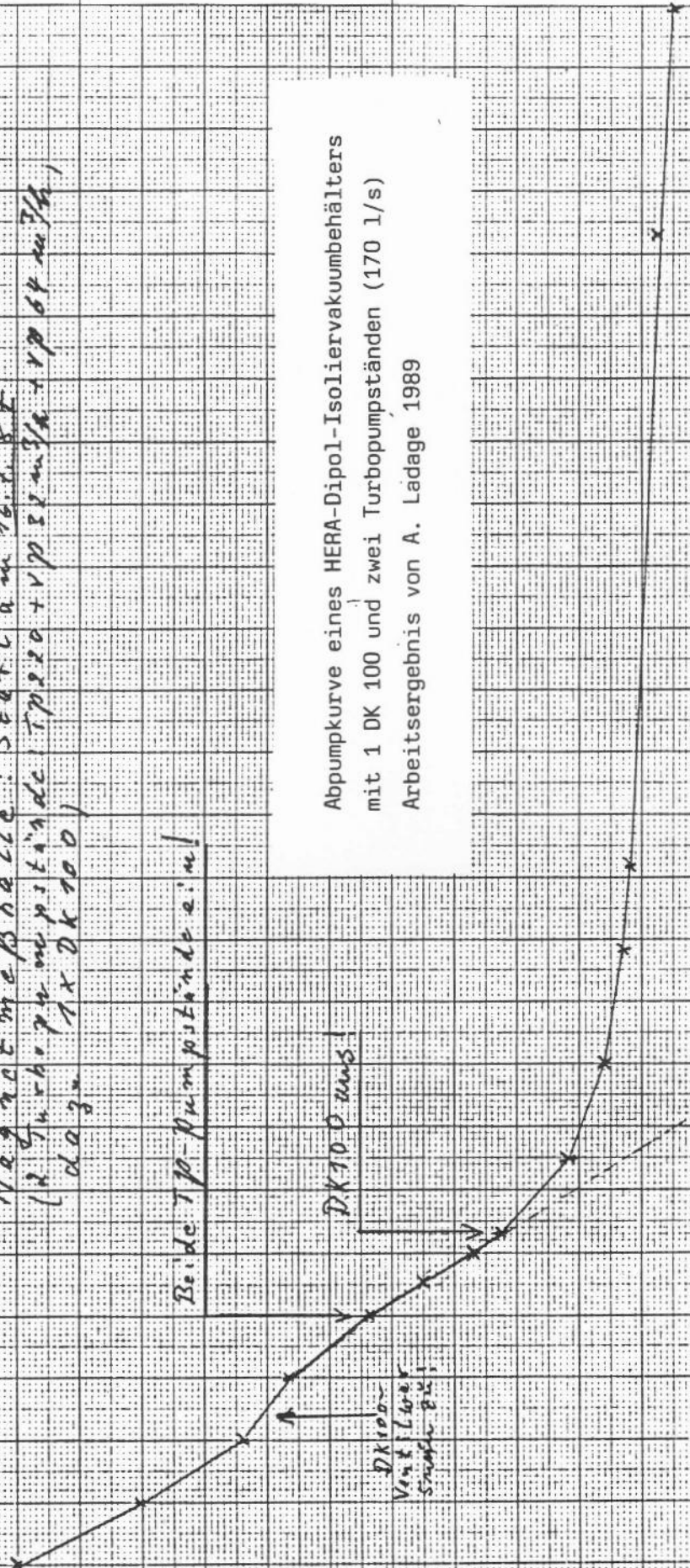
(2 Turbo-pumpstände TP220 + VP 30 m³/h + VP 64 m³/h, dazu 1 x DK 100)

Beide TP-Pumpstände ein!

DK 100 aus!

DK 100 -
Voll-Löscher
Stufen 2x!

über
1000
100
10
1
10⁻¹
10⁻²
10⁻³
10⁻⁴
10⁻⁵



Abpumpkurve eines HERA-Dipol-Isoliervakuumbehälters mit 1 DK 100 und zwei Turbopumpständen (170 l/s) Arbeitsergebnis von A. Ladage 1989

