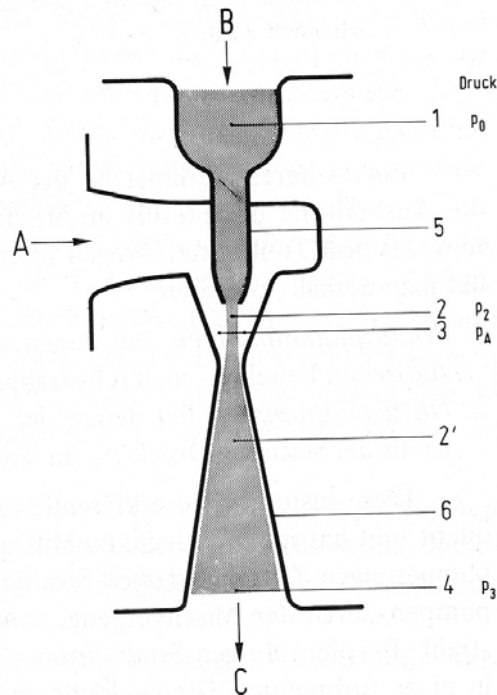


## Treibmittelpumpen

DIN: Eine Treibmittelpumpe ist eine Vakuumpumpe, bei der ein schnell bewegtes, gas- oder dampfförmiges Treibmittel zur Förderung des abzupumpenden Gases benutzt wird.

Prinzip Treibmittelpumpe

1. Druckraum
  2. Treibmittelstrahl
  3. Mischaum
  4. Kompressionsraum
  5. Treibdüse
  6. Staudüse
- A Vakuumschluß  
B Treibmittelanschluß  
C Vorvakuumschluß



Einteilung nach Treibmittel:

Flüssigkeitsstrahlpumpen  
Gasstrahlpumpen  
Dampfstrahlpumpen

oder nach der Arbeitsweise:

Strahlvakuumpumpen  
Diffusionspumpen

## 6. Flüssigkeitsstrahlpumpen

Prinzip siehe oben.

Bei Wasserdruck von 5 bar und Vorvakuum von 0.01 bar ergibt sich nach der Bernoulli-Gleichung eine Strahlgeschwindigkeit von 32 m/s

Grenzfläche Strahl-Vakuum zerfällt in Tröpfchen (Drallkörper)  
Tröpfchen und aufgewirbelte Grenzfläche transportieren das Gas durch Impulsübertrag

Enddruck (bedingt durch Wasser) ca 20 ... 30 mbar

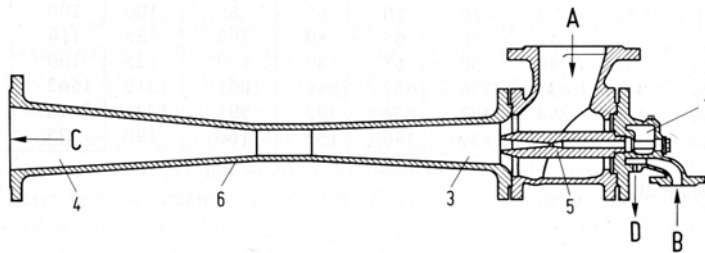
Wasserstrahlpumpen: Einfach und unproblematisch  
Wasserverbrauch (z.B. 400 ... 1500 l/h)  
Saugvermögen (250 ... 850 l/h)

## 7. Dampf- und Gasstrahlvakuumpumpen

Prinzip siehe oben.

Weiteste Anwendung: Wasserdampfstrahl-Pumpen

Düsengestaltung als sog. Lavaldüsen,

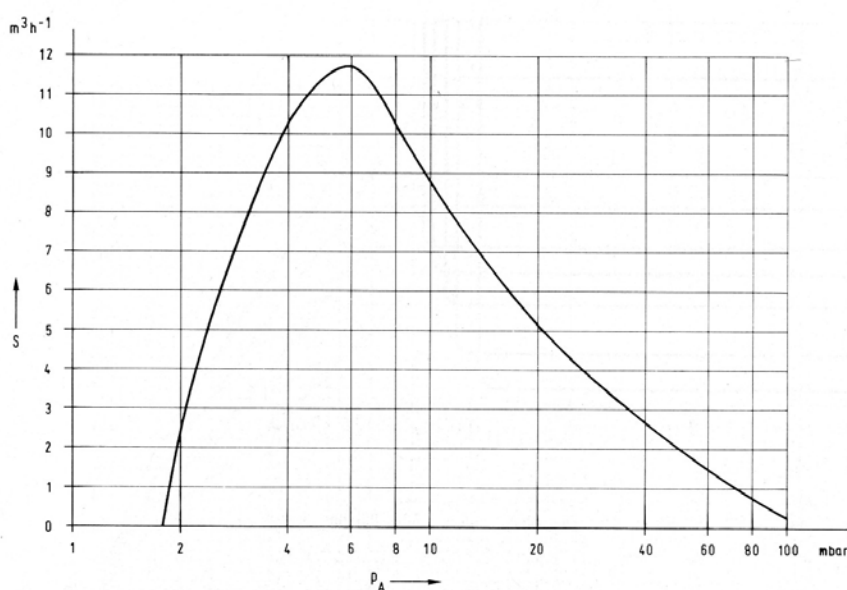


**Bild 6.4** Schnittbild einer Dampfstrahl-Vakuumpumpe. 1 Druckraum, 3 Mischraum, 4 Kompressorraum, 5 Treibdüse, 6 Staudüse. 4 und 6 bilden den Diffusor. A Vakuum-Anschluß, B Treibmittelanschluß, C Vorvakuum-Anschluß, D Anschluß für abgeschiedenes Kondensat.

maximaler Gegendruck  $p_0$ , wenn der Punkt Überschall-Unterschallgeschwindigkeit in den engsten Querschnitt wandert ...  
 Bei weiterer Erhöhung - Pumpe bricht durch

Dieser maximale Vorvakuumdruck  $p_v=p_0$  ist eine wichtige Kenngröße und abhängig von der Fördermenge

Saugvermögen:



**Bild 6.6** Saugvermögen  $S$  einer Wasserdampfstrahlpumpe in Abhängigkeit vom Ansaugdruck  $p_A$

maximales Verdichtungsverhältnis  $p_V/p_A$ :

im Grobvakuumbereich ca. 10, im Feinvakuumbereich ca. 20 jedoch unwirtschaftlich dort

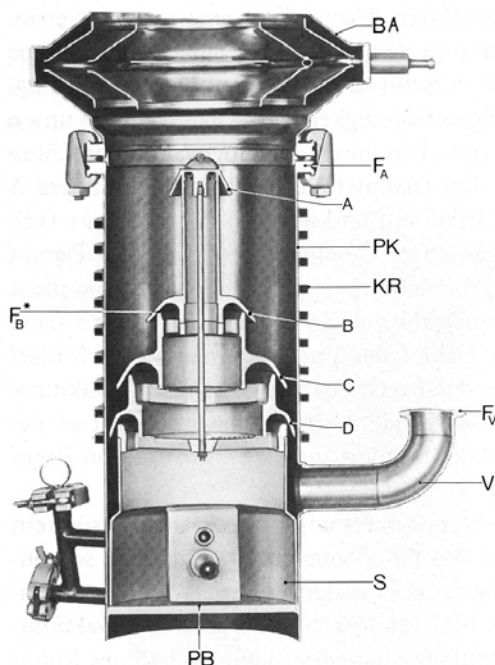
praktisch: Serienschaltung von Dampfstrahlpumpen

## 8. Diffusionspumpen



Prinzip ähnlich Dampfstrahlpumpe; zylindergeometrisch

Prinzipbild:



**Bild 6.9**

Schnitt durch eine vierstufige Diffusionspumpe mit aufgesetzter Dampfsperre (Baffle).

A, B, C, D Ringdüsen; BA Dampfsperre (Baffle);  $F_A$  Hochvakuumflansch;  $F_V$  Vorvakuumflansch;  $F_B^*$  engster Querschnitt (s. Text); KR Kühlrohr (Wasserkühlung); PB Pumpenboden; PK Pumpenkörper; V Vorvakuumrohr; S Siederaum.

Schnittmodell (Aufbau)

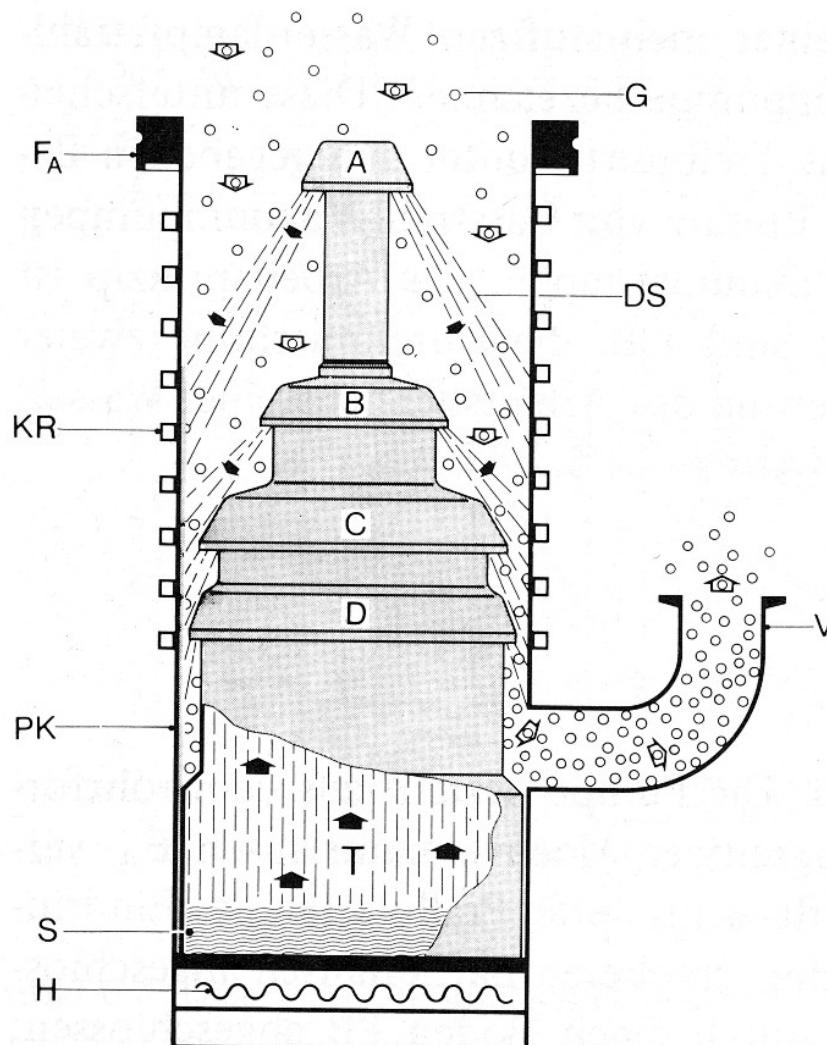
Treibmittelpumpe,

Treibmittel für den Dampfstrahl: früher fast immer Hg,  
(giftig, Dampfdruck)

heute fast ausschließlich Öle (Silikonöle  $p_E = 10^{-9} \dots 10^{-11}$  mbar)

Elektrischer Anschluß der Heizung, Kühlwasseranschluß

Wirkungsweise:



H Heizung, S Siederaum, PK Pumpkörper, KR Kühlrohre, FA Hochvakuumflansch, G Gasmoleküle des abzupumpenden Gases, DS Dampfstrahl, V Vorvakuumstutzen, A, B, C, D, Düsen, T Treibmitteldampf

A,B,C,D - Düsenstock einer vierstufigen Diffusionspumpe  
 Querschnittsverengung !

Geschwindigkeit der Öldampf-Teilchen:  
 3 ... 8fache Schallgeschwindigkeit

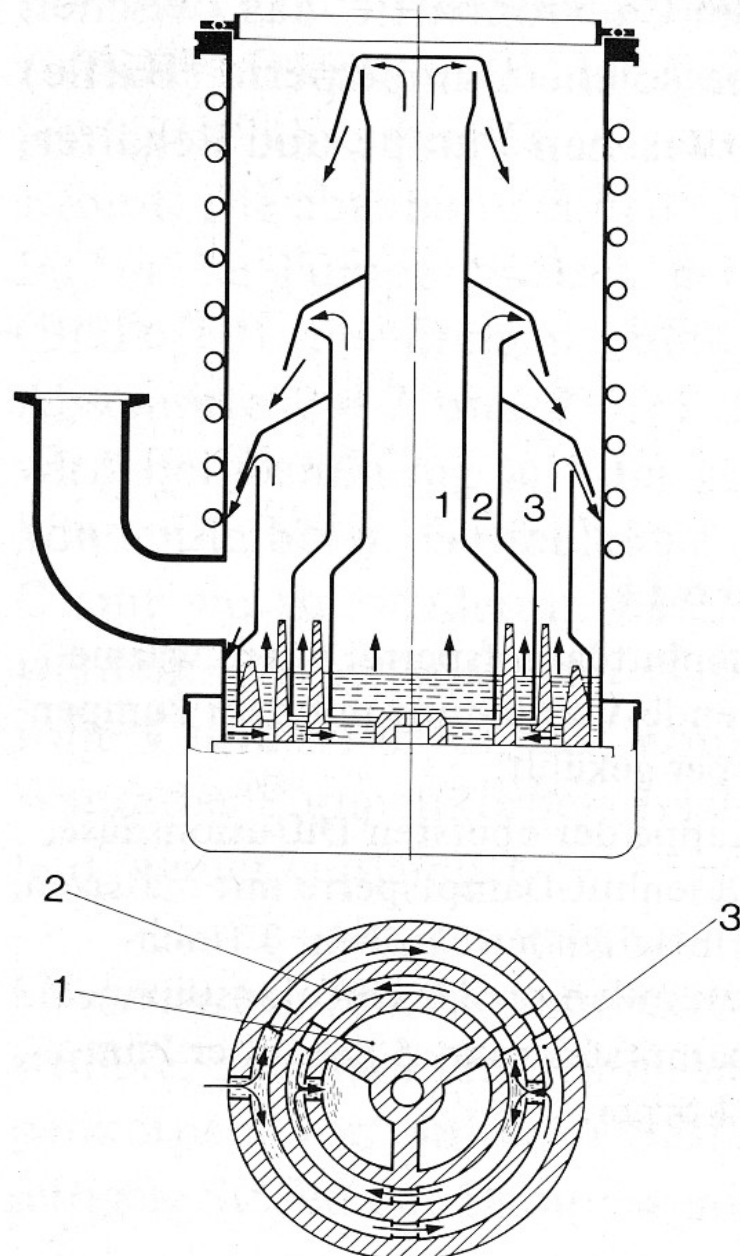
## Fraktionierung:

hochmolekulare Öle sind nicht homogen (Zerfallen durch Temperatur usw.)  
Leichte Ölmoleküle haben schlechtere Pumpwirkung und Dampfdruck -  
sollten nicht auf die Hochvakuumseite der Pumpe gelangen (Ansaugflansch)

deshalb:

fraktionierte Verdampfung

leichte Bestandteile verdampfen zuerst und betreiben die unteren  
Pumpstufen, schwere Öle verdampfen bei höheren Temperaturen und  
betreiben die oberen Pumpstufen:



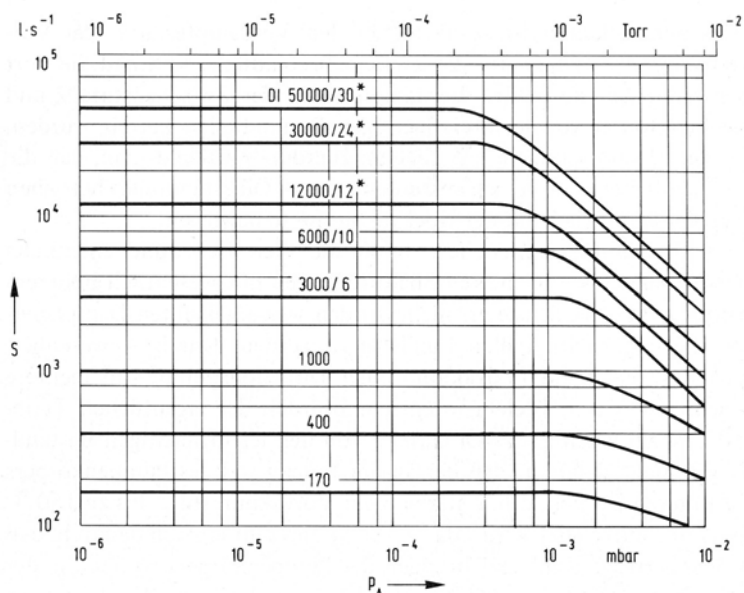
## Kohlenwasserstoffe im Vakuum

normalerweise Vorkehrungen gegen das Wandern von Ölteilchen ins Vakuum:

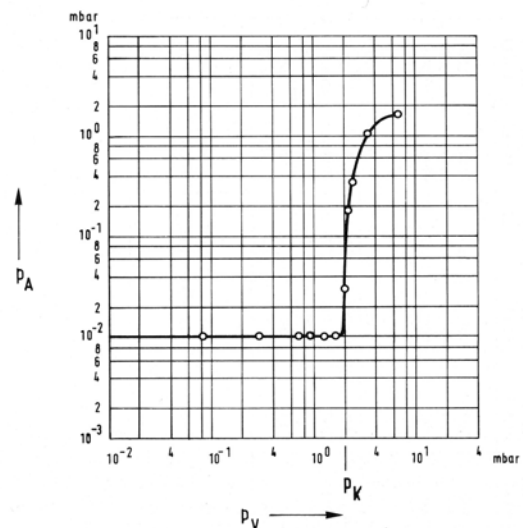
- Gekühlte Kappe auf dem obersten Düsenhut
- Wasserkühlfalle auf der Diffusionspumpe  
 (Optisch zu, kalte Flächen lassen Öl auskondensieren)
- Ventile, Automatisierung (Fehlbedienung)
- LN<sub>2</sub>-Kühlfallen

## Saugvermögen und Vorvakuumbeständigkeit

Saugvermögen in weitem Bereich konstant (anders als Dampfstrahlpumpen)



Pumpen benötigen eine Vorpumpe  
 (können nicht gegen Atmosphäre pumpen);  
 Parameter: Vorvakuumbeständigkeit  
 oder max. Vorvakuumdruck



Berechnungen der Diffusionspumpe durch die kinetische Gastheorie nur unzureichend möglich.

Verschiedene Vereinfachungen führen zu:

$$S = A_p \frac{\bar{c}}{4} \cdot \frac{1}{1 + a \frac{\bar{c}}{4u_2}} \quad \text{mit} \quad a = A_p \cos \vartheta \cdot d / A_2 x_{diff 2}$$

Größen laut Skizze;  $X_{diff 2}$  : Eindiffusionslänge (vereinfacht)  
diese Formel erklärt das Verhalten der Diffusionspumpe annähernd;

Berechnungen zur Form des Dampfstrahls (Verbiegungen bei hohen Ansaugdrücken und hohen Vorvakuumdrücken) helfen bei der Konstruktion

### **Praktische Hinweise:**

Diffusionspumpen sind einfache, gute Pumpen mit sehr gutem Enddruck (abhängig vom Öl) und großem Saugvermögen

einfach in der Bedienung

unempfindlich gegen nicht konstanten Vorvakuumdruck

geringe Gasartabhängigkeit der Pumpwirkung (Saugvermögen)

### **ABER:**

bezogen auf Saugvermögen, großer elektr. Verbrauch

Kühlwasser nötig

kein kohlenwasserstofffreies Vakuum-dazu LN<sub>2</sub>-Kühlfalle nötig

empfindlich gegen Fehlbedienung (heiß belüften)

Wartung, Ausfälle (Öl wechseln, Heizung)

heute Bedeutung abnehmend, wegen Turbomolekularpumpen



## 9. Turbomolekularpumpen

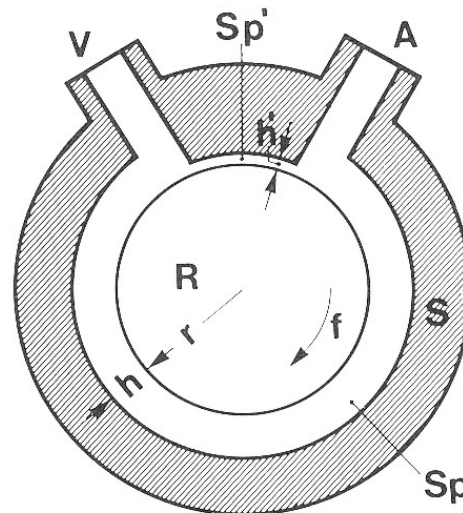
Grundprinzip der Gaedeschen Molekularpumpe:

Prinzip beruht auf:

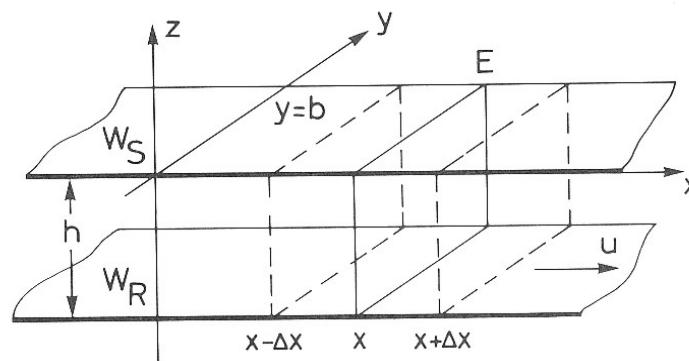
Gasmoleküle werden nicht sofort an einer Wand reflektiert, sondern verweilen (Adsorption, Desorption);

bewegt sich die Wand mit  $u$ , so ist diese Geschwindigkeit der mittleren thermischen Geschwindigkeit überlagert;

bewegte Wand führt zu einer Strömung - Pumpwirkung



Prinzipielle Berechnung:



Daraus ergibt sich, dass die Hälfte der zwischen den Platten befindlichen Teilchen die Geschwindigkeit haben, die andere ruht.

$$\text{Teilchenstrom: } q_n = \frac{1}{2} n \cdot u \cdot b \cdot h$$

oder Volumenstärke (=Saugvermögen)

$$S = \frac{q_n}{n} = \frac{1}{2} u \cdot b \cdot h$$

unter Vernachlässigung der Rückströmung



durch den Gastransport: Druckdifferenz  $p_V - p_A$ , die Triebkraft eines Gegenstromes ist.

Berechnung des Kompressionsverhältnisses:

$$k_0 = \frac{p_V}{p_A} = \exp \frac{u}{\bar{c}} \frac{L}{\alpha h}$$

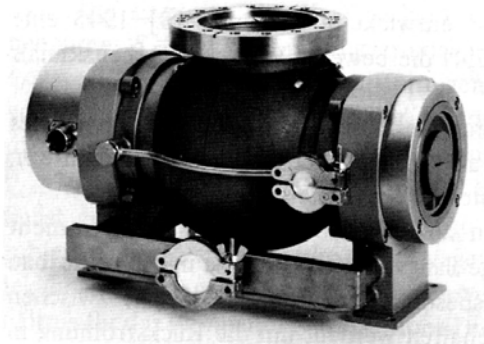
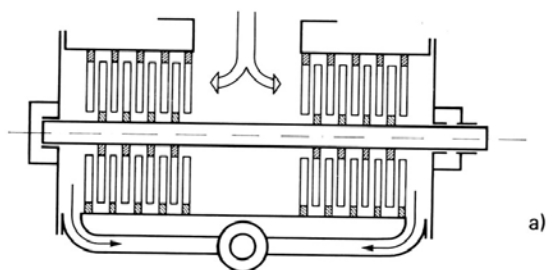
-> hohe Drehzahlen wegen Proportionalität zu  $\exp \frac{u}{\bar{c}}$

-> wegen  $\bar{c} \propto M_r^{-1/2}$  werden schwere Moleküle viel besser gepumpt

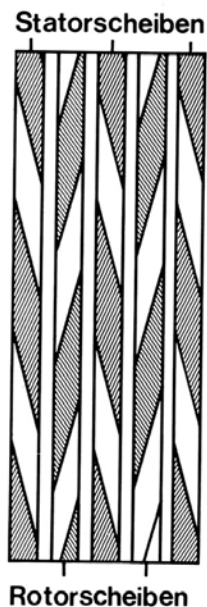
Kompressionsverhältnis für Pumpenöl ca. 2400fach größer als für  $H_2$

## Turbomolekularpumpe:

Erfunden von Becker 1956 (Turbinenrad -Prinzip)  
 Schnitt, Rotor und Stator, Bild:

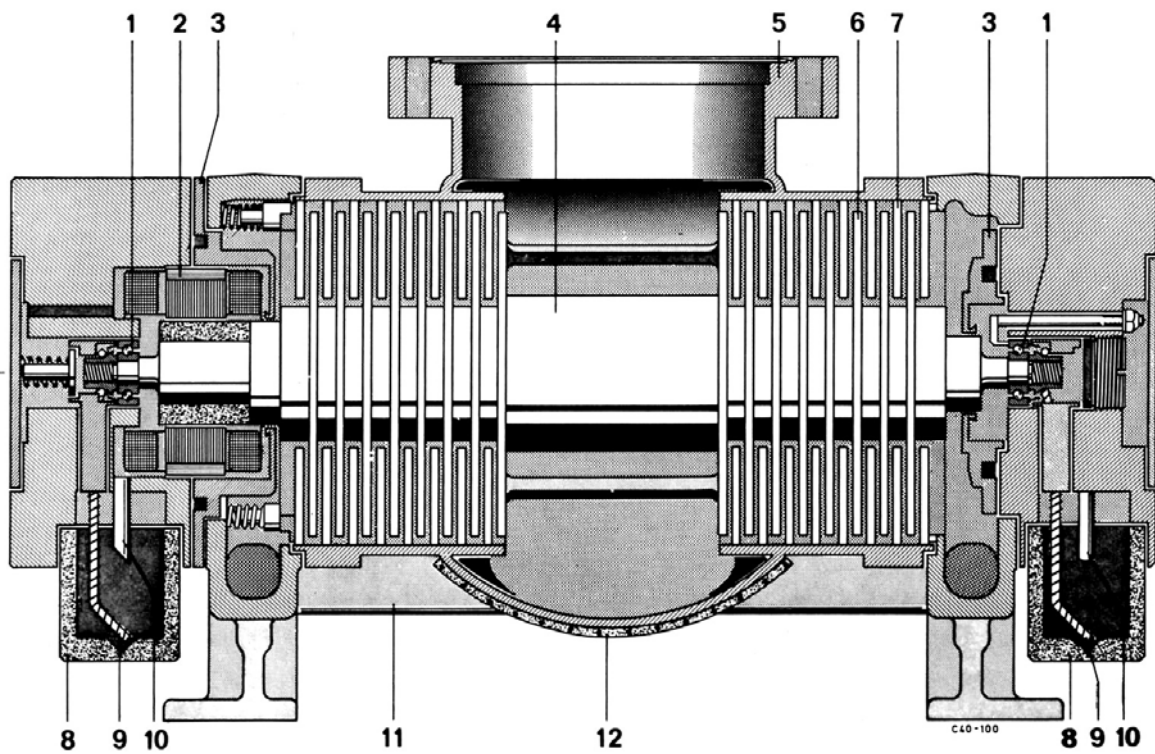


**Bild 7.5** a) Schema, b) Photo der Turbomolekularpumpe von Becker [4] (zweiflutig).



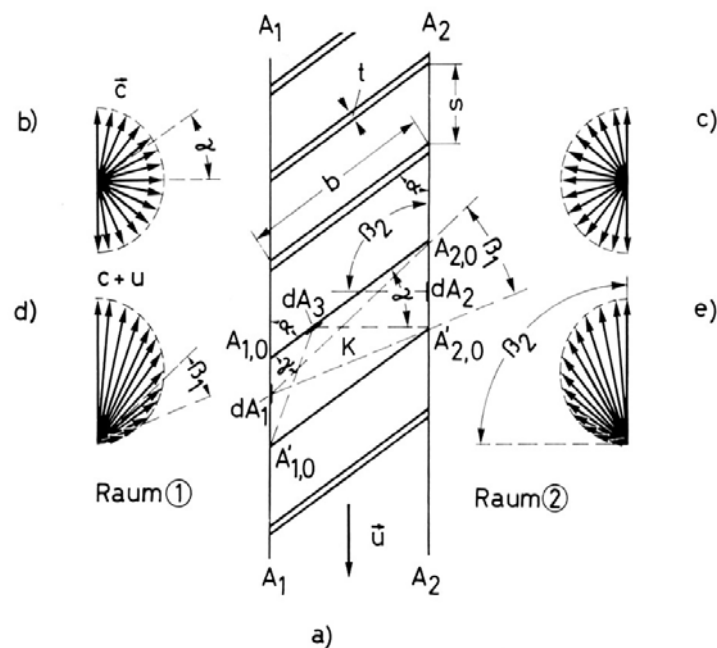
**Bild 7.6** Aufsicht auf die Peripherie des Rotor-Stator-Pakets der Beckerschen Turbomolekularpumpe

Schnittdarstellung einer zweiflutigen Turbomolekularpumpe:



**Bild 7.7** Schnittdarstellung der zweiflutigen Turbomolekularpumpe TPU 200 nach Becker. 1 Lager, 2 Motor, 3 Labyrinthkammern, 4 Rotor, 5 Hochvakuumanschluß, 6 Rotorscheibe, 7 Statorscheibe, 8 Ölbehälter, 9 Ölzufuhr zum Lager, 10 Ölrücklauf, 11 Vorvakuumkanal, 12 Heizung.

Wie funktioniert eine Turbomolekularpumpe:



b) und c) isotrope Verteilung der Geschwindigkeiten

„Sitzt“ man auf der mit  $u$  bewegten Schaufel, dann scheinen d) und e) die Geschwindigkeitsverteilungen zu sein

- 1) Freiflugwahrscheinlichkeit von 1 nach 2 größer !
- 2) das auf  $dA_3$  adsorbierte Teilchen gelangt auch mit höherer Wahrscheinlichkeit nach 2; auf der gegenüberliegenden Wand geringere Adsorption
- 3) Mehrfachadsorptionen kompliziert

Nach „Durchfliegen“ des Rotors haben die Teilchen eine überlagerte Driftgeschwindigkeitskomponente in  $u$ ; das erleichtert ihnen das Passieren des Stators (Flügel andersherum angestellt);

Durch Adsorption an der Statorwand erhalten die Teilchen nach Desorption wieder Normalverteilung der Geschwindigkeitsvektoren und die Prozesse 1) bis 3) wiederholen sich;

Theoretische Berechnungen zur Turbomolekularpumpe:  
 nicht analytisch beschreibbar,  
 viele Rechnungen, numerische Berechnungen liefern:

mit größerem Anstellwinkel  
 fällt das Kompressionsverhältnis  
 wächst das Saugvermögen

deshalb: hochvakuumseitige Schaufeln steiler angestellt

## Leistungsdaten einer Turbomolekularpumpe

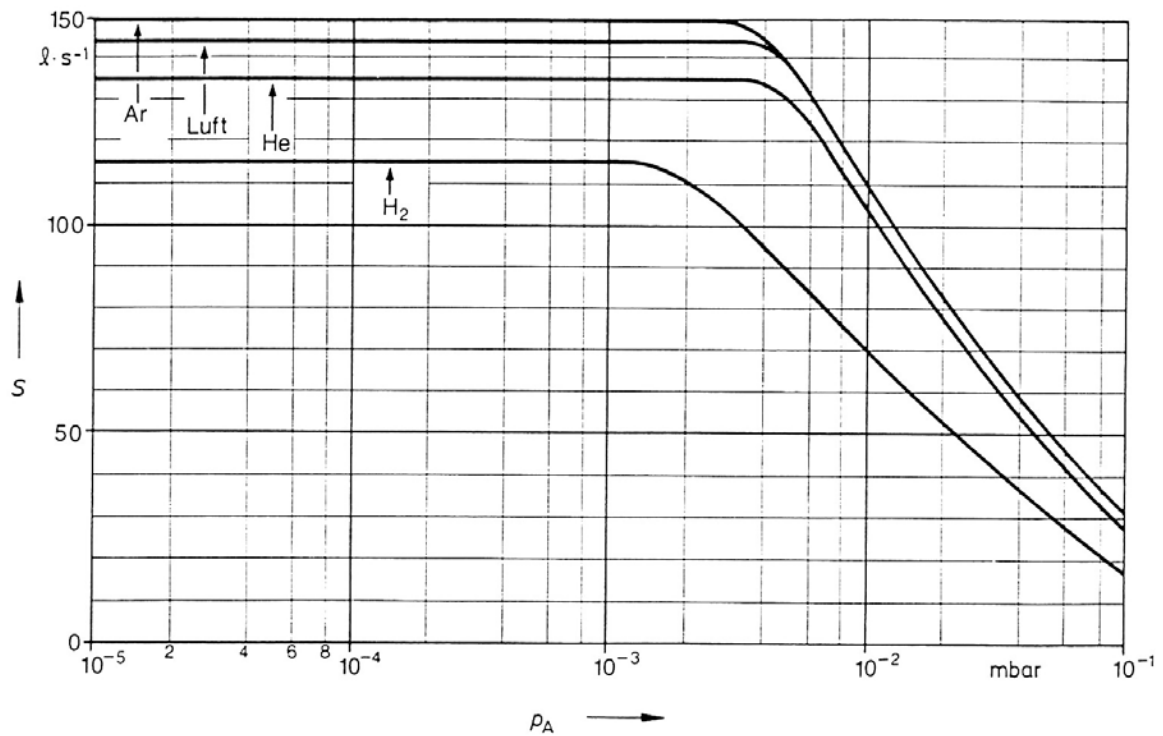
Tabelle zeigt typische Leistungsdaten

Tabelle 7.2 Kenngrößen und Leistungsdaten der TURBOVAC-Pumpen

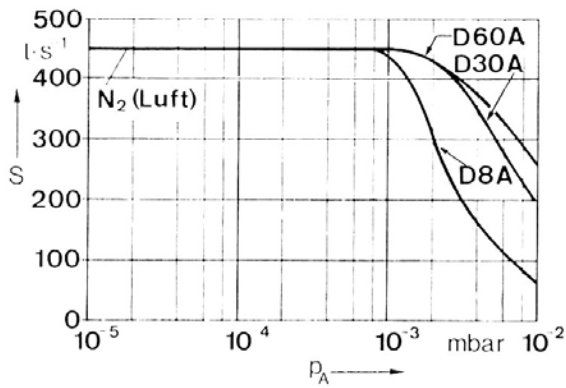
| TURBOVAC Typ                    |                   | 50 <sup>1)</sup> 2) | 150 <sup>1)</sup> | 360 <sup>1)</sup>     | 450       | 1000 <sup>1)</sup> 2) | 1500                | 3500                |
|---------------------------------|-------------------|---------------------|-------------------|-----------------------|-----------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| Ansaugflansch                   | DN                | 40/65               | 65/100            | 100/150               | 150       | 150/200/250           | 250                 | 400                 |
| Höhe x Durchmesser              | mm                | 150 x 92            | 203 x 130         | 240 x 170             | 415 x 240 | 328 x 258             | 439 x 325           | 600 x 496           |
| Gewicht                         | kg                | 2                   | 7                 | 11                    | 30        | 25                    | 50                  | 160                 |
| Drehzahl                        | min <sup>-1</sup> | 72000               | 50000             | 45000                 | 24000     | 36000                 | 21000               | 15000               |
| Hochlaufzeit                    | min               | 2                   | 1,5               | 2                     | 4...5     | 4                     | 10                  | 20                  |
| Kühlung                         |                   | entfällt            | Luft/Wasser       | Luft/Wasser           | Wasser    | Luft/Wasser           | Wasser              | Wasser              |
| Einbaulage                      |                   | beliebig            | beliebig          | beliebig              | senkrecht | beliebig              | senkrecht           | senkrecht           |
| Saugvermögen für N <sub>2</sub> | ℓs <sup>-1</sup>  | 33/55               | 115/145           | 345/400               | 450       | 850/1100/1150         | 1450                | 3600                |
| Saugvermögen für H <sub>2</sub> | ℓs <sup>-1</sup>  | 28/30               | 110/115           | 340/370               | 310       | 900/970/1000          | 1150                | 3300                |
| Kompression für H <sub>2</sub>  |                   | 10 <sup>2</sup>     | 850               | 3,5 · 10 <sup>3</sup> | 630       | 2 · 10 <sup>3</sup>   | 1 · 10 <sup>4</sup> | 2 · 10 <sup>4</sup> |
| Empfohlene Vorpumpe             |                   | S 2A oder D 2A      | D 4 B             | D 16 B                | D 25 B    | D 40 B                | D 65 B              | WAU 250/ D 65 B     |

<sup>1)</sup> fettgeschmiert; <sup>2)</sup> Spindeleinheit mit Kugellager (sog. „Spindellagerung“)

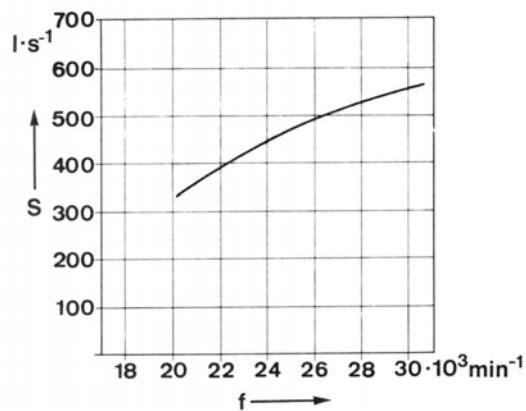
Saugvermögenskurven:



**Bild 7.12** Saugvermögen  $S$  einer Turbomolekularpumpe (Nenn-Saugvermögen  $S_n = 145 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ ) für verschiedene Gase in Abhängigkeit vom Ansaugdruck  $p_A$ .



**Bild 7.13** Abhängigkeit des Saugvermögens  $S$  der Pumpe TURBOVAC 450 von der Größe der Vorpumpe



**Bild 7.15**  
 Saugvermögen  $S$  der Pumpe TURBOVAC 450 für Luft in Abhängigkeit von der Drehfrequenz  $f$

Kompressionsverhältnis als wichtige (und problematische !) Kenngröße der Turbomolekularpumpen:

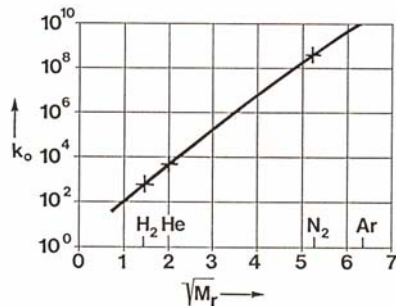
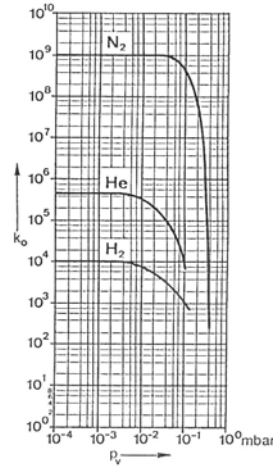


Bild 7.17 Abhängigkeit des Kompressionsverhältnisses  $k_0$  von der relativen Molekülmasse  $M_r$  ( $p_v \approx 10^{-1}$  mbar vgl. Bild 7.16)



## Restgaszusammensetzung:

leichte Gase (H<sub>2</sub>, He .. )

## Rechnung für Enddruck:

wenn 0.1% H<sub>2</sub> in Atmosphäre wären:

Vorvakuum durch Drehschieberpumpe: 10<sup>-2</sup> mbar

ohne Gasartabhängigkeit, davon 0.1% entspricht 10<sup>-5</sup> mbar H<sub>2</sub> - Partialdruck

Kompressionsverhältnis einer kleinen Turbomolekularpumpe

für H<sub>2</sub>: z.B. 500

Partialdruck H<sub>2</sub> = Enddruck der Pumpe = 2\*10<sup>-8</sup> mbar

bei kleinen Pumpen ist das Kompressionsverhältnis noch schlechter !

Aber in der Atmosphäre nicht 0.1% H<sub>2</sub>

## praktische Aspekte:

Luft- und Wasserkühlung möglich (abhängig von der Leistung)

geringer Elektroenergieverbrauch

Kohlenwasserstofffreies Vakuum

Hochvakuum- und Ultrahochvakuumumpumpen !

Große Einsatzgebiete; löst Diffusionspumpe immer mehr ab

ABER: Lärm, Vibrationen, Restgaszusammensetzung

evtl. mechanische Zerstörung bei Schockbelüftung

Belüftungsventil, Ölsicherheit

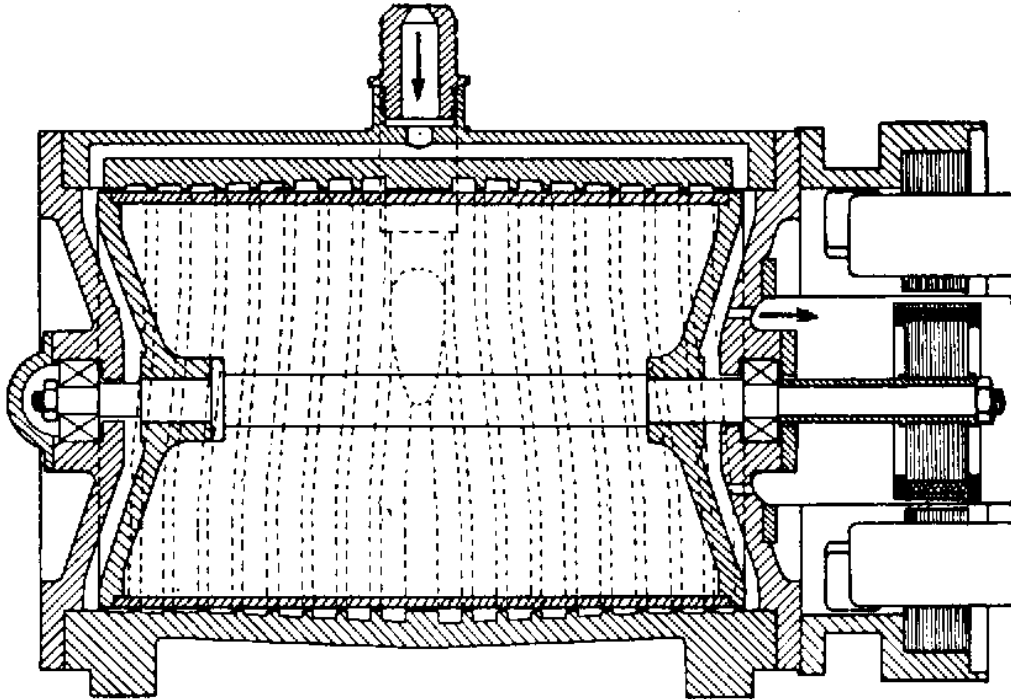
Turbopumpen müssen immer laufen (Abpumpzeiten ...)

Schondrehzahl (3/4 ... 2/3)

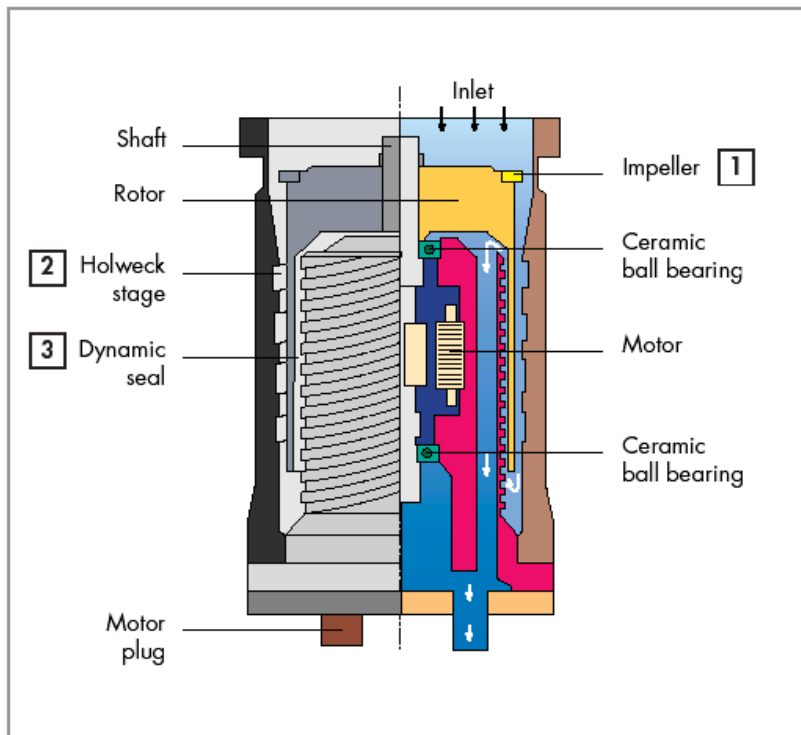
Wartung (Lager)

## 10. Die Drag-Pumpe

(Holweck-Prinzip, MDP Molecular Drag Pump)

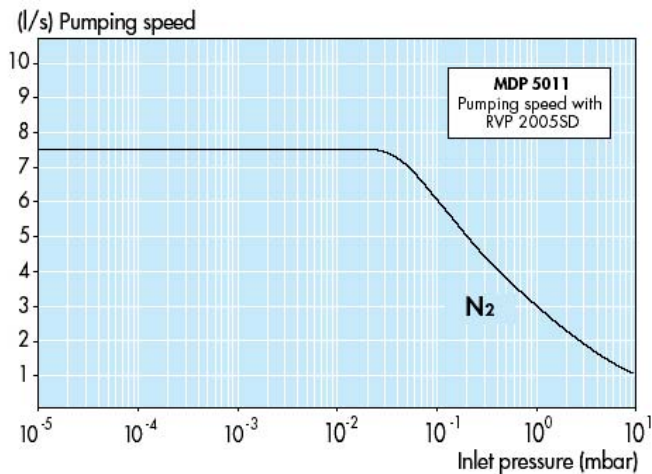


Holweck - Pumpe (1923)



Cross section

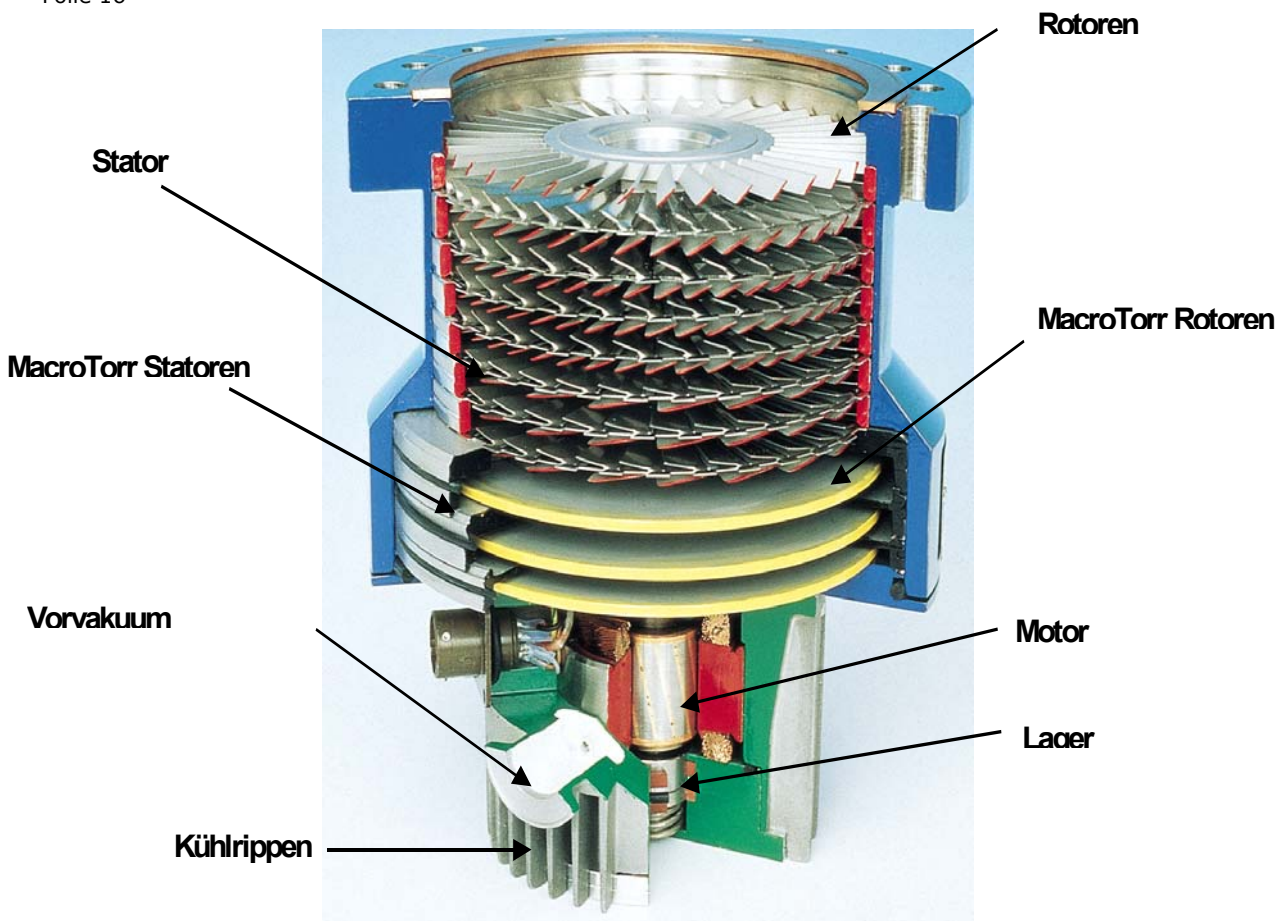
Aufbau einer Drag.Pumpe



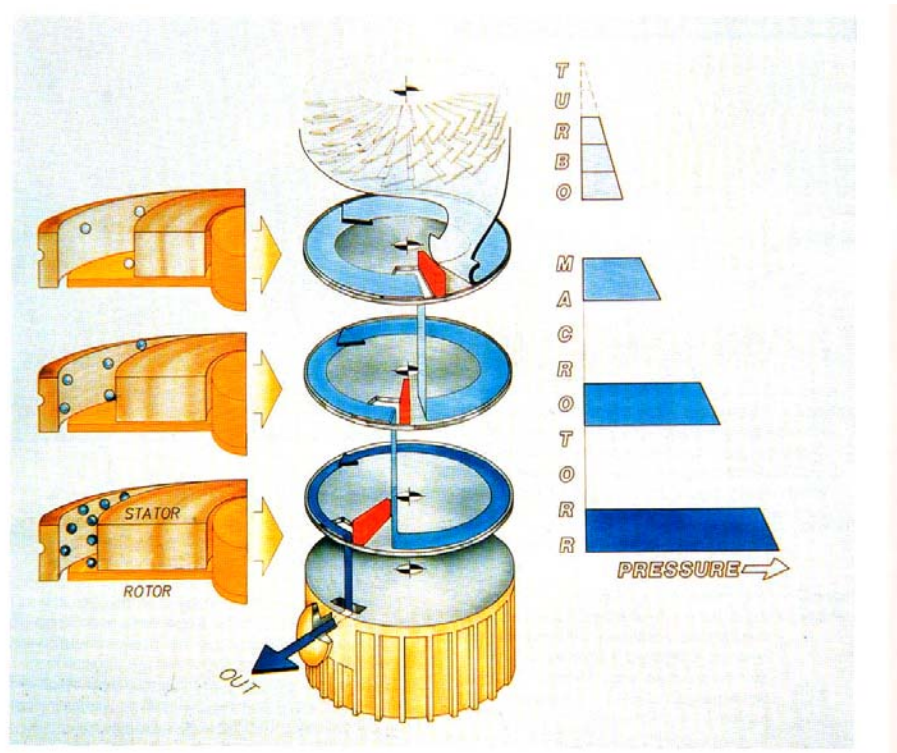
### Saugvermögen und Ansicht einer Drag-Pumpe

| Characteristics   |                    | Units | MDP 5011                    | MDP 5011CP        |
|---|--------------------|-------|-----------------------------|-------------------|
| Pumping speed   | N <sub>2</sub>     | l/s   | 7.5                         |                   |
|   | He                 | l/s   | 4                           |                   |
|   | H <sub>2</sub>     | l/s   | 3                           |                   |
| Compression ratio   | N <sub>2</sub>     |       | 1.10 <sup>9</sup>           | 1.10 <sup>6</sup> |
|   | He                 |       | 2.10 <sup>4</sup>           | 250               |
|   | H <sub>2</sub>     |       | 1.10 <sup>3</sup>           | 50                |
| Ultimate pressure measured to Pneurop standards with purge    | ambient air cooled | mbar  | 1.10 <sup>6</sup>           | 1.10 <sup>5</sup> |
|   | forced air cooled  | mbar  |                             |                   |
|   | water cooled       | mbar  |                             |                   |
| Maximum continuous N <sub>2</sub> inlet pressure              | ambient air cooled | mbar  | 1.10 <sup>1</sup>           |                   |
|   | forced air cooled  | mbar  | 10                          |                   |
|   | water cooled       | mbar  | 10                          |                   |
| Maximum exhaust pressure (pumping speed >=4m <sup>3</sup> /h) | ambient air cooled | mbar  | 40                          | 5                 |
|   | forced air cooled  | mbar  |                             |                   |
|   | water cooled       | mbar  |                             |                   |
| Recommended rotary vane pump or membrane pump                 |                    |       | ultimate pressure < 20 mbar |                   |
| Starting time   |                    | mn    | <1                          |                   |
| Rotational speed  |                    | rpm   | 27,000                      |                   |
| Maximum ambient temperature                                   | ambient air cooled | °C    | 35                          |                   |
|   | forced air cooled  | °C    | 35                          |                   |
|   | water cooled       | °C    | 50                          |                   |
| Exhaust flange  |                    |       | DN 16                       |                   |
| Controller  |                    |       | ACT 100                     |                   |
| Weight  | ambient air cooled | kg    | 2.3                         |                   |
|   | forced air cooled  | kg    | 3                           |                   |
|   | water cooled       | kg    | 2.5                         |                   |
| Controller weight   |                    | kg    | 2                           |                   |
| Power supply  |                    | V     | 100/115/200/230             |                   |
|   |                    | Hz    | 50/60                       |                   |
| Power consumption   |                    | VA    | 75                          |                   |

### typische Kenngrößen einer Dragpumpe



Molekularpumpe auf der Vorvakuumseite einer Varian-Turbomolekularpumpe



MakroTorr - Pumpstufe zur Erhöhung der Vorvakuumfestigkeit (Prinzip der Molekularpumpe)



## 11. Scrollpumpe

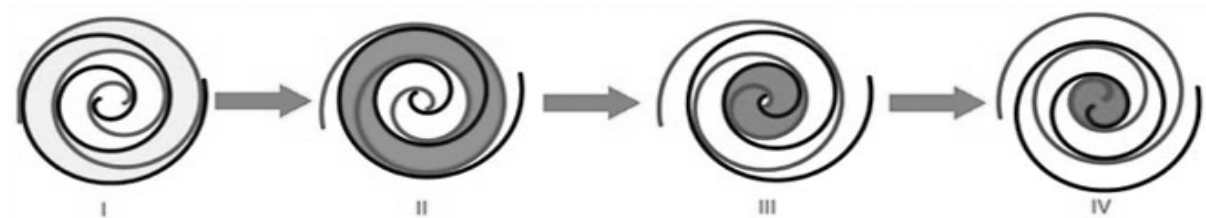
zwei ineinandergeschachtelte Spiralen:

eine Spirale fest (Stator)

eine Spirale taumelt um den Stator (d.h. sie dreht sich nicht, kreiselt aber; oder: dreht sich nicht, aber die Mittelpunktskoordinaten beschreiben eine Kreisbewegung)



Bei der ‚Drehung‘ des einen Spiralzylinders in der Kammer entstehen Bereiche, die sich abwechselnd vergrößern und verkleinern. Auf diese Weise wird Gas in die Pumpe gesaugt, eingeschlossen, verdichtet und ausgestoßen. Öffnungen sorgen dafür, dass immer nur aus einem Raum Luft entnommen und in den anderen gepumpt wird.



### **Kenngrößen:**

Enddruck einer einstufigen Scrollpumpe: ca.  $7 \cdot 10^{-2}$  mbar

Saugvermögen:  $10 \text{ m}^3/\text{h}$

minimale Vibrationen, deshalb:

sehr leise Pumpe (wegen kontinuierlicher Förderung), 65dbA, leiser als Spülmaschine

langlebig, kaum Verschleiß (4 bewegte Teile, keine Ventile), 40.000 h

keine Wartung

Energie-effizient

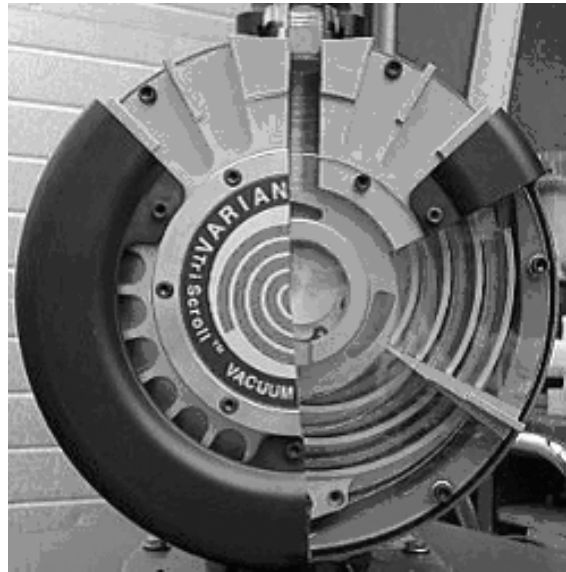
keine Kühlung nötig, kaum Erwärmung

Gasballast möglich

Öl-freies Vakuum, korrosionsbeständig

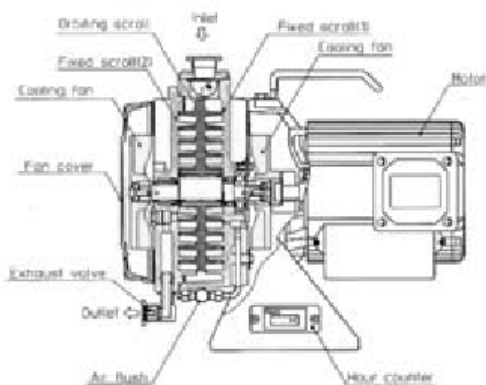
2000 rpm, 100rps (Micropumpe)

Anwendungen: Gefriertrocknung, Vorpumpe, Kältetechnik, Gloveboxen u.v.a.m.



halbaufgeschnittene Scrollpumpe

ISP-250B



### Links:

<http://www.limno.biologie.tu-muenchen.de/lehre/material/pdfs/Vakuumtechnik%20f%FCr%20SEM%20FIB.pdf>

<http://avt-vakuumtechnik.de/lexikon/erzeugung/>

[http://www.bestechind.com/dry\\_scroll\\_pump.htm](http://www.bestechind.com/dry_scroll_pump.htm)

[http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/publication/JNST2002/No.1/39\\_101-107.pdf](http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/publication/JNST2002/No.1/39_101-107.pdf)

<http://cot.marine.usf.edu/hems/workshop/Workshop%203rd/Presentations%203rd/Moore/moore.pdf>

<http://www.scrollabs.com/Website/AboutFrameset.htm>

[http://xfel-wissen.desy.de/vakuum/vakuumpumpen/index\\_text.html](http://xfel-wissen.desy.de/vakuum/vakuumpumpen/index_text.html)