

Vakuumphysik and Vakuumtechnologie

Was ist Vakuum?

Wozu brauchen wir Vakuum?

Wie erzeugt man Vakuum?

Wie misst man Vakuum?

Grundlagen der Vakuumphysik – Kinetische Gastheorie

Aspekte zur Vakuumtechnologie, Vakuumkammern

Vakuum: weitgehend luftleerer Raum

Gasdruck weniger als 300 mbar

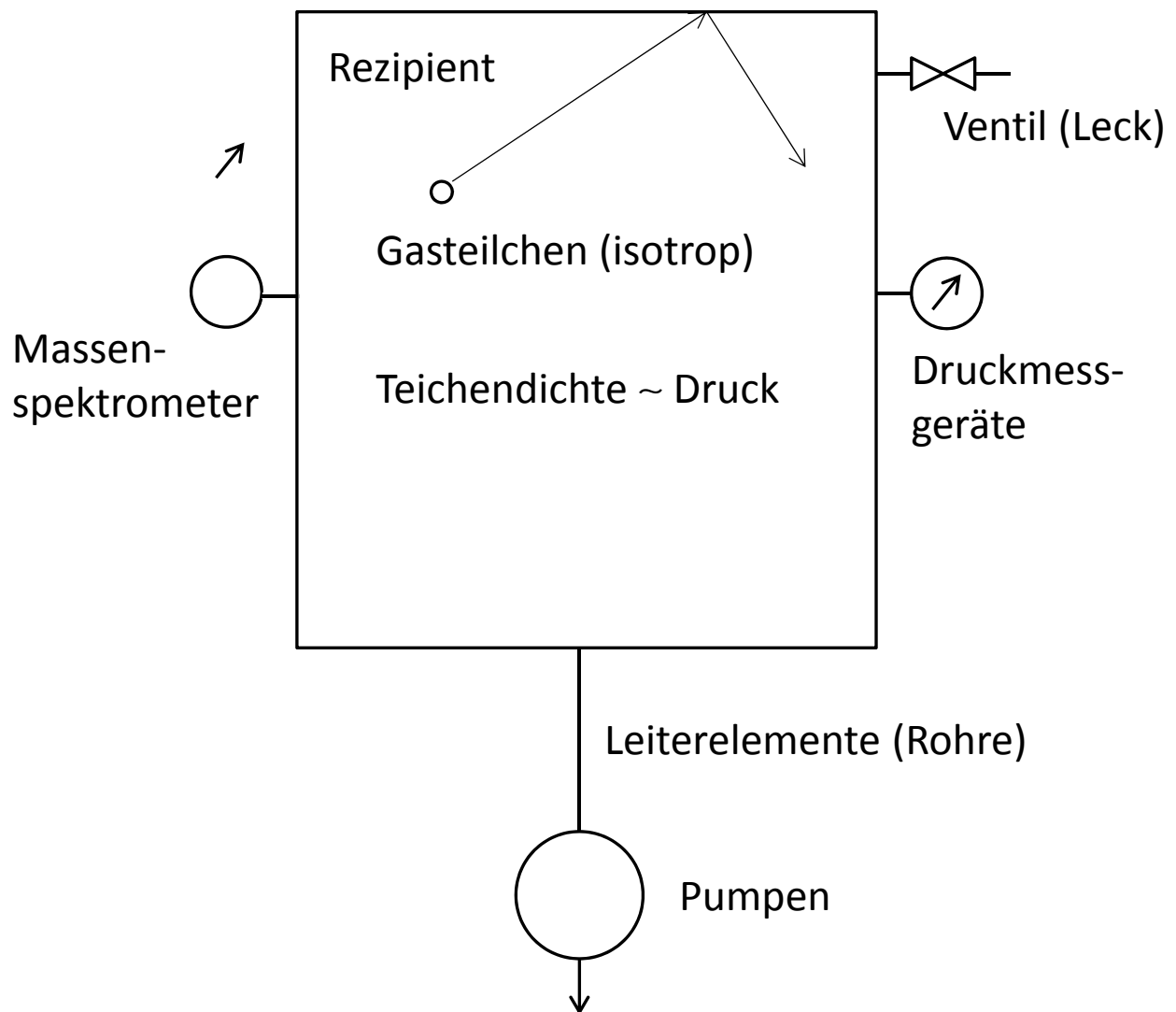
(niedrigster auf Erdoberfläche vorhandener Druck)

Ist komplett leerer Raum möglich?

Vakuumfluktuation in der Quantenfeldtheorie: Bildung von virtuellen Teilchen aus dem "Nichts".



Vakuumkammer



Wozu benötigt man Vakuum?

☐ Grobes Vakuum:

Druckunterschied: Vakuumhaftung, Staubsauger

Wenig Sauerstoff: Konservierung, Wärmebehandlung von Metallen, Vakuumverpackung

Gefriertrocknung

☐ Feines Vakuum:

Geringe Wärmeleitung: Vakuumisolierung, Dewargefässe

Geringe Oxidation: Glühlampen

Geringe Teilchendichte: Elektronenstrahlschweissen, Plasma

☐ Hochvakuum:

Geringe Teilchendichte, grosse freie Weglänge:

Elektronenmikroskop, Elektronenröhren, Oszilloskop, (ehemals) Fernseher, Aufdampftechnik, Mikroelektronik, CDs, DVDs,

☐ Ultrahochvakuum:

Geringe Auftrefferate, sehr grosse freie Weglänge:

Teilchenbeschleuniger, Oberflächenphysik, Weltraum-simulation, Fusionsreaktor

Vakuum: geringer Druck

Druck: Kraft/Fläche $p = F/A$

Druckeinheiten: $N/m^2 = \text{Pascal (Pa)}$

Atmosphärendruck: $101325 \text{ Pa} \approx 10^5 \text{ Pa}$ (Normdruck)

Alte Einheiten:

1 Atmosphäre (atm) $\approx 1,013 \text{ bar} = 1013 \text{ mbar} = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$

1 atm = 760 Torr = 760 mm Hg

1 atm $\approx 10 \text{ m Wassersäule (WS)}$

(Rechenbeispiel)

Aus Gaskinetik:

$$p = n_A k T$$

n_A : Loschmidt-Konstante = $2.69 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$

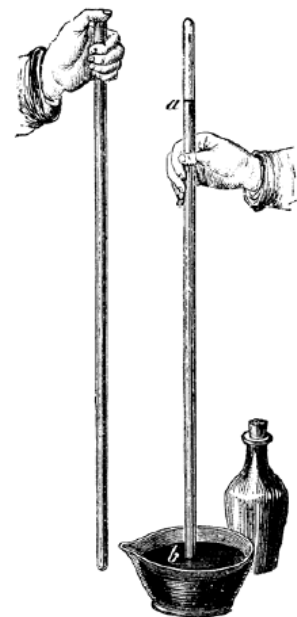
k : Boltzmann-Konstante = $1.38 \times 10^{-23} \text{ Ws/K}$

T : 273 K (Normbedingung)

Daraus folgt: $p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$

Für 1 mol: Molvolumen: 22,4 l,

Anzahl der Teilchen in 1 mol: 6.03×10^{23} : Avogadro Konstante



Vakuumbereiche:

Großvakuum (GV): $10^5 \text{ Pa} - 10^2 \text{ Pa}$ (1 bar – 1 mbar)

Feinvakuum (FV): $10^2 \text{ Pa} - 10^{-1} \text{ Pa}$ (1 mbar – 10^{-3} mbar)

Hochvakuum (HV): $10^{-1} \text{ Pa} - 10^{-5} \text{ Pa}$ (10^{-3} mbar – 10^{-7} mbar)

Ultra-HV (UHV): $10^{-5} \text{ Pa} - 10^{-10} \text{ Pa}$ (10^{-7} mbar – 10^{-12} mbar)

Extrem-HV (XHV): $< 10^{-10} \text{ Pa}$ ($< 10^{-12}$ mbar)

Charakteristische Kenngrößen:

Strömung: Kontinuumsströmung in GV

Molekularströmung in HV und UHV

Knudsenströmung in FV

Mittlere freie Weglänge: $\lambda \sim 1/p \sim 1/n$

Bei Atmosphärendruck: $\lambda \approx 0.1 \mu\text{m}$

Bei 10^{-2} mbar: $\lambda \approx 1 \text{ cm}$

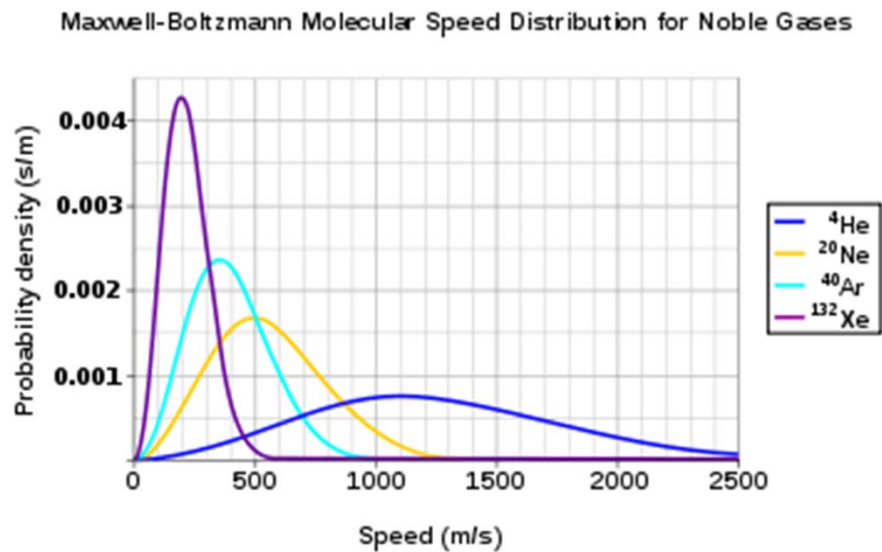
Bei 10^{-10} mbar: $\lambda \approx 1000 \text{ km!}$

Flächenstossrate: $Z_a \sim n \sim p$

Bei 10^{-6} mbar: $Z_a \approx 10^{15} \text{ Teilchen/cm}^2 \approx 1 \text{ Monolage (ML)}$

Weitere gaskinetische Grössen:

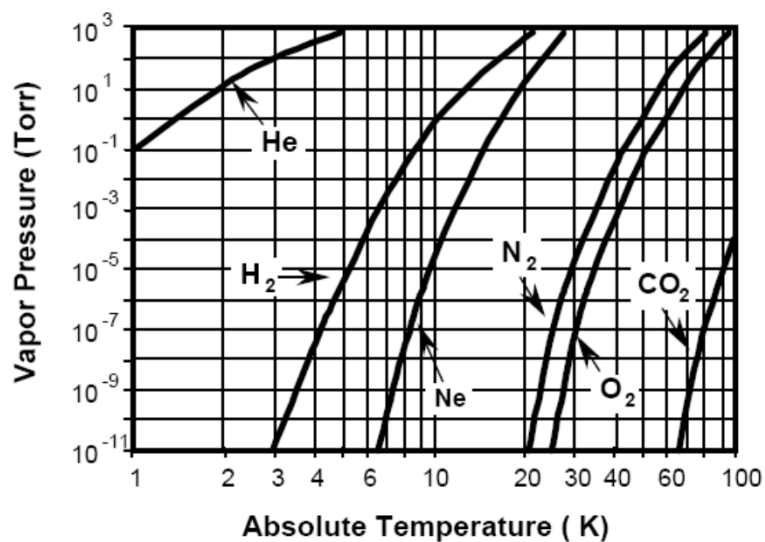
Geschwindigkeitsverteilung ist Maxwell'sch



$$f(v) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{m}{kT} \right)^{3/2} v^2 \exp \left(\frac{-mv^2}{2kT} \right)$$

Dampfdruck einer Substanz: $p_v \sim \exp(-Q_v/kT)$

Q_v : Verdampfungswärme



Vakuumpumpen:

Für Grob und Feinvakuum durch Luftverdrängung,
z.B. Kolbenpumpe. (Vorvakuumpumpen)

Häufigste technische Pumpen:
Drehschieberpumpe

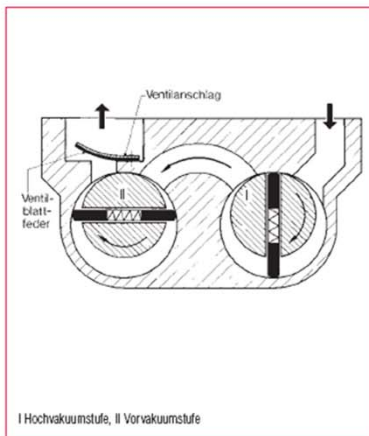


Abb. 2.7
Schnitt durch eine zweistufige Drehschieberpumpe,
schematisch

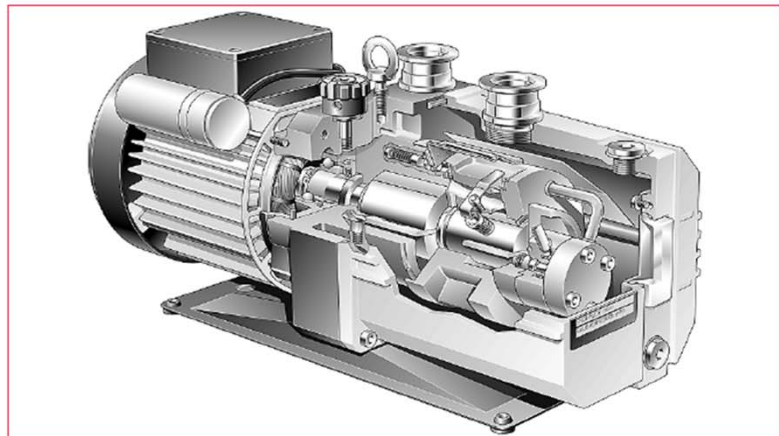


Abb. 2.8a
Schnitt durch eine zweistufige Drehschieberpumpe (TRIVAC E)

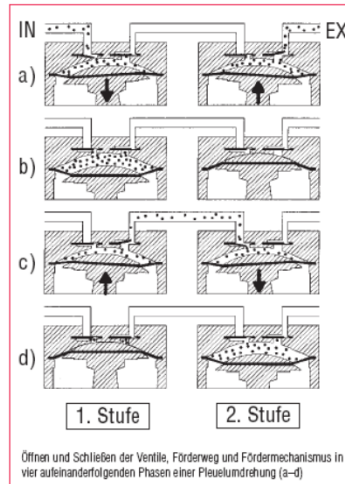
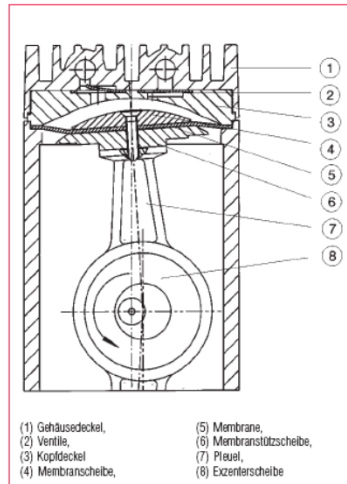
Exzentrisch gelagerter Rotor mit Schiebern in einem zylindrischen Gehäuse. Dadurch entstehen 3 Räume die sich zeitlich vergrößern und verkleinern: Ansaugen und auspuffen. Meist zweistufig ausgeführt.

Öl dient als Schmierung und Dichtung. Enddruck durch Öldampfdruck bestimmt: etwa 10^{-3} mbar.

Saugvermögen: mehrere m^3 pro Stunde

Mittels Gasballasteinrichtung können auch kondensierbare Dämpfe (Wasserdampf) gepumpt werden.

Membranpumpen:



Vorteile:

Komplett ölfrei, geräuscharm, hohe Betriebssicherheit

Nachteil:

Geringeres Endvakuum: 0.1 mbar

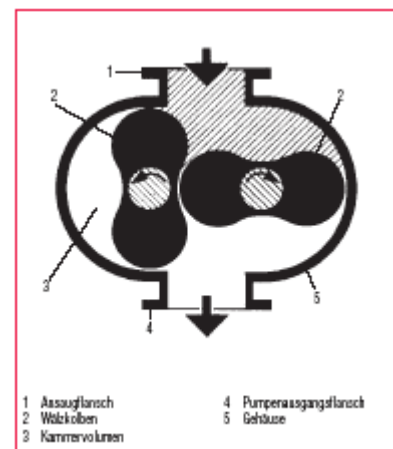
Auch Saugvermögen geringer

Weitere Vorvakuumpumpen:

Wälzkolbenpumpen (Rootspumpen)

Grosse Saugvermögen, aber geringer Enddruck

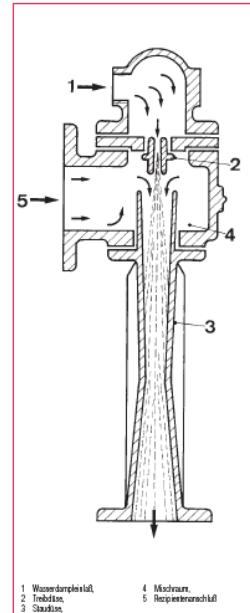
S einige 1000 m³/h



Wasserstrahlpumpen (kinetische Pumpe).

Einfach und billig.

Enddruck durch Wasserdampfdruck bestimmt:
Etwa 17 mbar bei 15 °C.



Adsorptionspumpe
(gasbindende Pumpe)

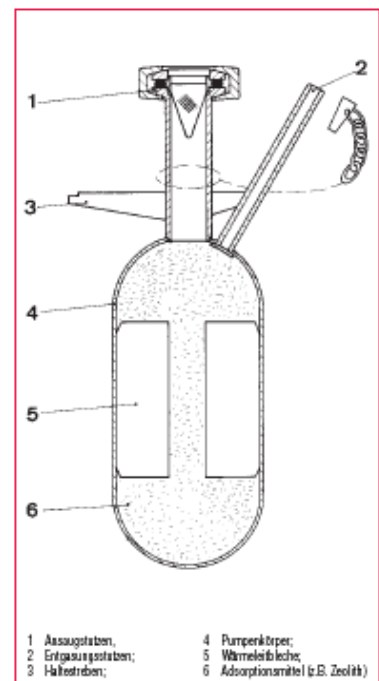
Behälter mit Zeolith gefüllt

Zeolith: feinporiges Al_2O_3 wird mit
flüssigem Stickstoff eingekühlt.

Hat grosse aktive Oberfläche: $\sim 10^3 \text{ m}^2/\text{g}$
Bindet Gasmoleküle über Physisorption
(Van der Waals Bindungen)

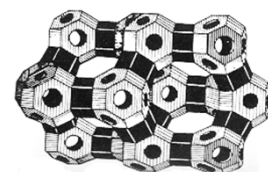
Enddruck: 10^{-2} mbar

Aber nur einmaliges Auspumpen pro
Einkühlung möglich



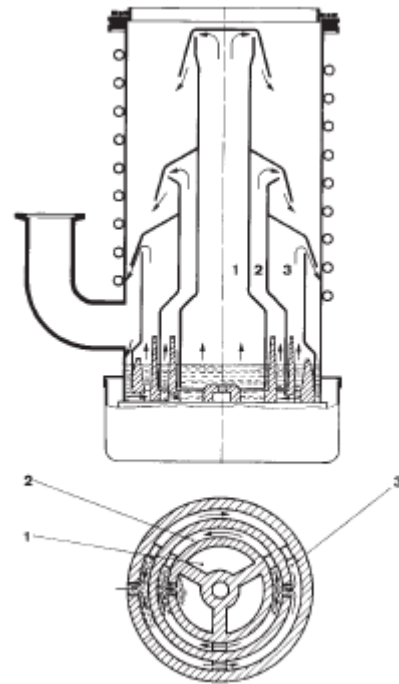
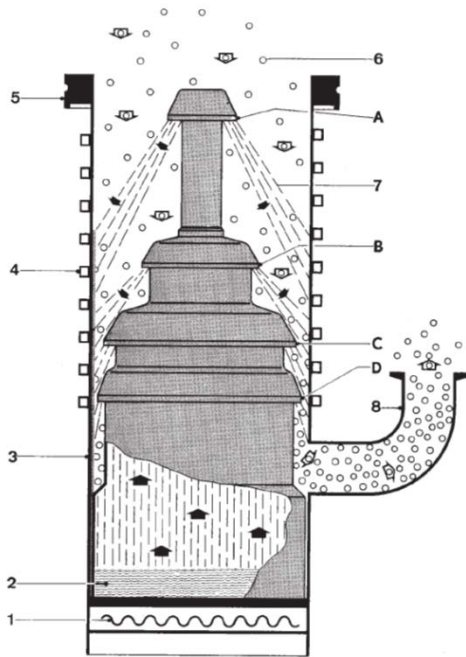
Beim Auftauen wird adsorbiertes Gas
über Überdruckventil abgeblasen

Molekularsieb



Hoch- und Ultrahochvakuumumpumpen

Kinetische Pumpen: Öldiffusionspumpen



Öl wird in einem Gefäß erhitzt, der Dampf steigt im Pumpenkörper (ineinandergeschachtelte Rohre) auf und tritt über Umlenkdüsen aus. Der nach unten strömende Dampfstrahl nimmt Gasteilchen auf und bleibt im Öl gelöst, das an den gekühlten Wänden kondensiert. Das Öl strömt an den Seitenwänden nach unten und wird am Boden wieder erhitzt, sodass die gelösten Gasteilchen ausgase. Diese werden von einer Vorvakuumpumpe abgesaugt.

Saugvermögen: $\sim 1000 \text{ l/s}$

Enddruck: 10^{-10} mbar

Turbomolekularpumpe:

Heute häufigste HV und UHV Pumpe
Moleküle bekommen durch
Zusammenstoß mit rotierenden
Flächen einen Impuls in Richtung
Auspuff.

Abwechselnd Rotor und Statorblätter
Hohe Umdrehungszahlen notwendig
(Umfangsgeschwindigkeit ~
Gasgeschwindigkeit (~1000 m/s)
 $U \approx 40.000 - 80.000 \text{ Hz}$
Vorpumpe notwendig

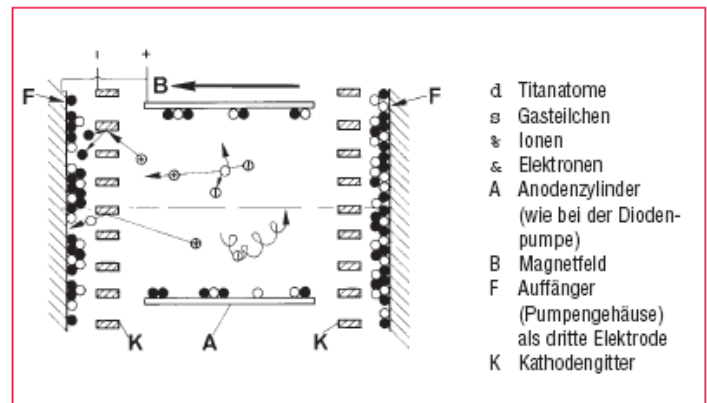
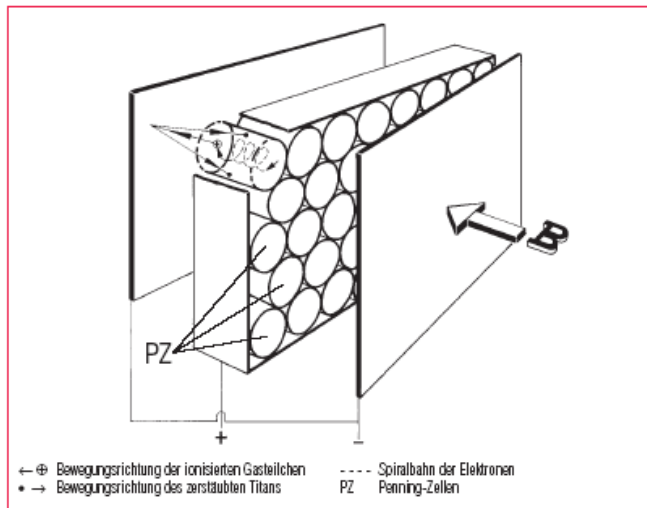


Saugvermögen: ~ 1000 l/s
Enddruck: 10^{-10} mbar

Kompression für schwere Teilchen besser als für leichte (daher schlechte Wasserstoffabsaugung)

Gute Lagerung notwendig (oft Magnetlager, Keramiklager)

Ionengeretterpumpe: (Gasbindende Pumpe)



Gasteilchen werden in einem elektrischen Feld zwischen zylinderförmigen Anoden und gitterförmigen Kathoden (5 kV) ionisiert (+) und auf die Kathode aus Titan beschleunigt, wobei sie Titan zerstäuben das auf den Pumpenkörper (Auffänger) fliegt. Dort bindet es die Gasteilchen über Chemisorption. Die für die Ionisation notwendigen Elektronen werden durch ein Magnetfeld auf Spiralbahnen gelenkt um die Ionisierungswahrscheinlichkeit zu erhöhen. Es gibt eine Dioden und eine Triodenausführung.

Saugvermögen: einige 100 l/s
Enddruck: kleiner 10^{-10} mbar.

Nur zum Start Vorvakuum notwendig



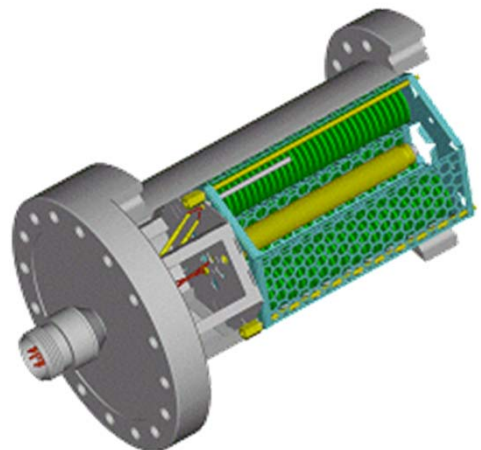
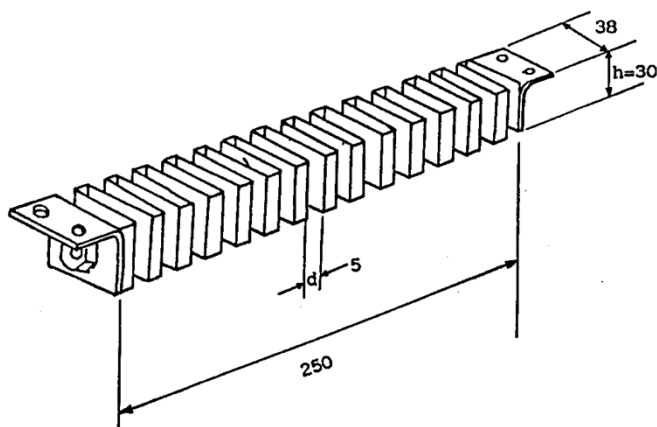
Titanverdampferpumpe:

Hier wird einfach Titan aus Ti-Draht verdampft und die Ti-Schicht bindet wieder die Gasteilchen (Chemisorption). Da i.a. nur eine Monolage adsorbiert werden kann, muss immer wieder neu verdampft werden.

Nur im UHV einsetzbar. Gut für reaktive Gase. Oft durch Kühlen der Getterschicht mit LN₂ Saugwirkung verbessert.

Massivgetterpumpen (NEG: non evaporable getter):

Hier wird ein poröses spezielles Material (z.B. Zirkon-Aluminium Legierung) in Form von Blechstreifen in das Vakuum gegeben und durch Aufheizen aktiviert. Es kann dann grosse Mengen (im UHV) pumpen, vor allem H₂.



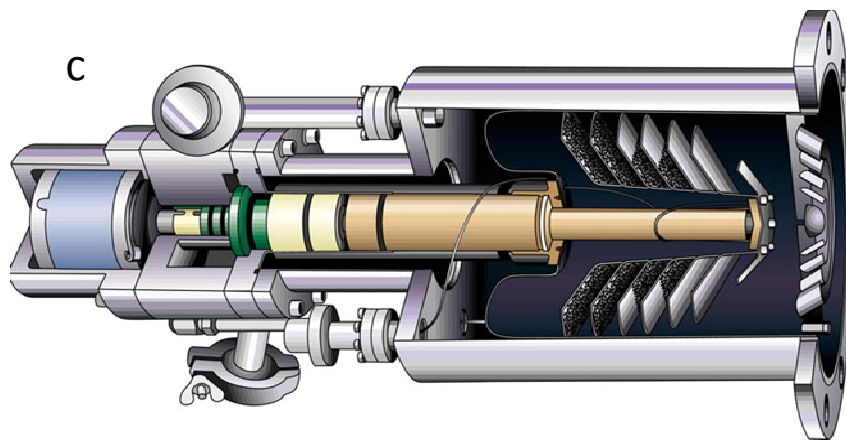
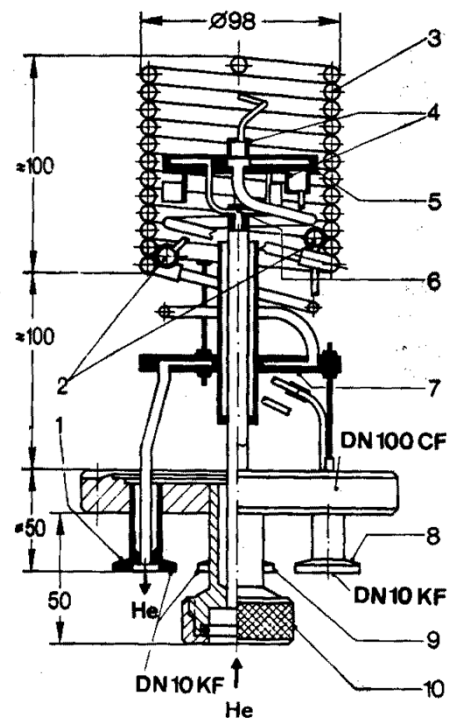
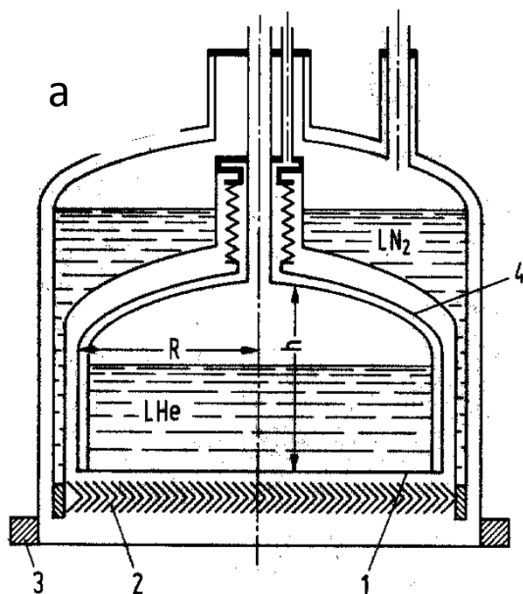
Kryopumpen

Durch Kühlen von aktiven Materialien auf sehr niedrige Temperaturen (flüssiges He: 4 K) können fast alle Gase kondensieren: Kryosorption

Badkryopumpen (a)

Verdampferkryopumpen (b)

Refrigeratorkryopumpen (c)



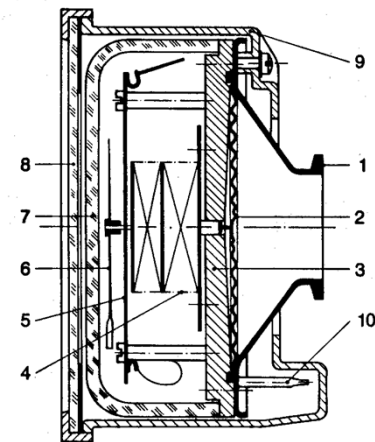
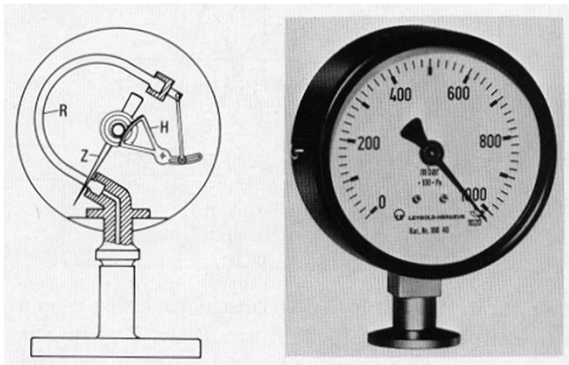
Druckmessung:

Vakuumbereich von atm bis UHV (13 Grössenordnungen)

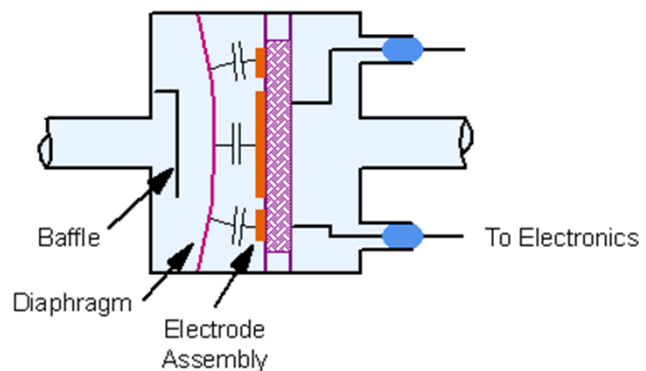
Kein einzelnes Messgerät für gesamten Bereich möglich

- a) Direkte Druckmessung (Kraft/Fläche)
- b) Indirekte Druckmessung (Wärmeleitung, Gasreibung, elektrische Leitung)

Direkte Messung: Verbiegung von Membranen oder Federn
(Messbereich: 1 bar – 1 mbar)



Kapazitätsmanometer



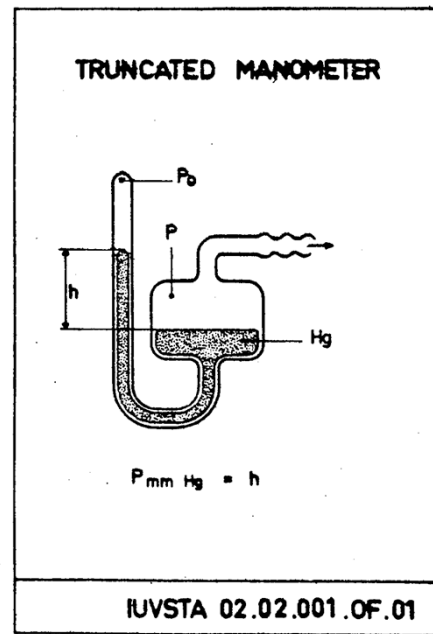
Flüssigkeitsmanometer (Quecksilbermanometer)

U-Rohr Manometer

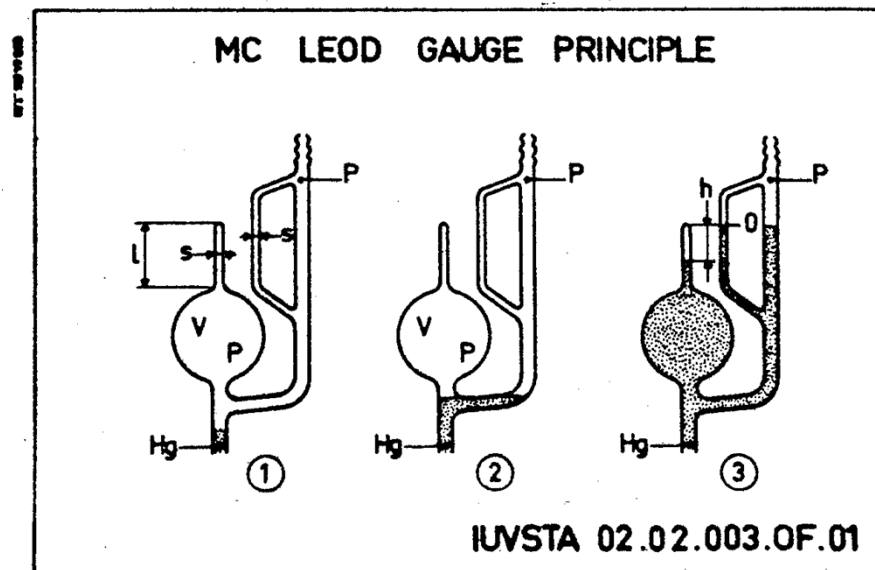
$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

p_0 : Dampfdruck von Hg
 2×10^{-2} mbar bei 20 °C

Messbereich:
 1 bar – 1 mbar



Kompressions-Manometer (McLeod)

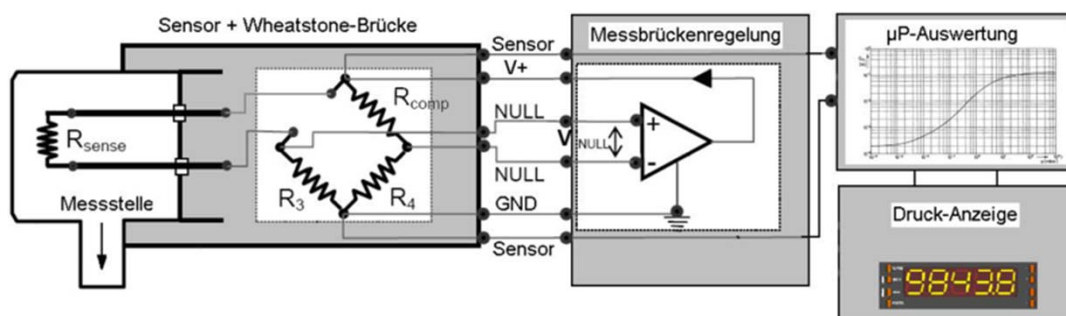


Messbereich bis 10^{-4} mbar
 Dient als Kalibriermessgerät

Indirekte Druckmessgeräte:

Wärmeleitungsmanometer (Pirani Manometer)

Wärmeleitung eines Gases ist in einem bestimmten Bereich ($10 \text{ mbar} - 10^{-3} \text{ mbar}$) proportional zur Teilchendichte. Ein geheizter Wolframdraht ist Teil einer Brückenschaltung (Wheatstone-Brücke). Bei Temperaturänderung (wegen veränderter Wärmeableitung) ändert sich der Widerstand. Dies kann mit der Brücke gemessen werden. Die Druckmessung ist (leicht) gasartabhängig



Reibungsmanometer

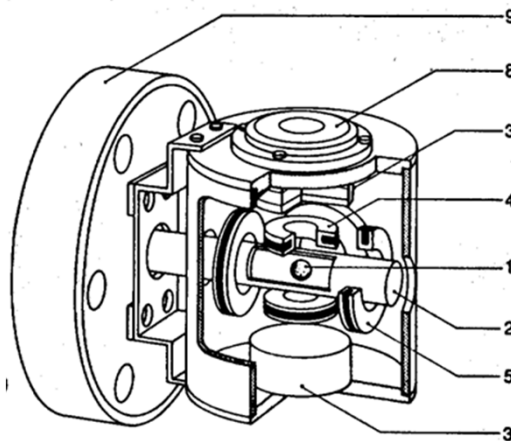
In einem horizontalen Rohrstutzen wird eine Metallkugel (3 mm Ø) aktiv magnetisch gelagert und in Umdrehung (400 Hz) versetzt und der Antrieb abgeschaltet. Durch auftreffende Gasteilchen verringert sich die Umdrehungsfrequenz. Dies ist proportional zum Druck

$$\frac{\dot{\omega}}{\omega} = \frac{10 \cdot p}{a \cdot \rho \cdot \pi \cdot \bar{c}}$$

Ist auch gasartabhängig , aber erlaubt Absolutdruckmessung

Messbereich: 10^{-4} - 10^{-8} mbar

Wird zur Kalibrierung von Ionisationsmanometer verwendet.



Ionisationsmanometer

a) Kaltkathoden Ionisationsmanometer

Zwischen 2 Elektroden wird eine hohe Spannung (2 kV) gelegt.

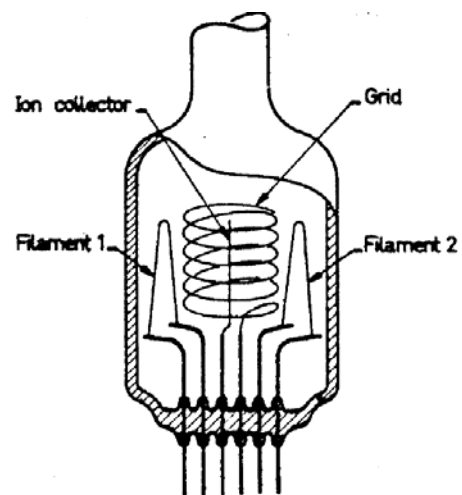
Es kommt zur kalten Gasentladung, (Penning Entladung) wobei der Entladungsstrom proportional zur Teilchendichte ist. Zur Erhöhung der Stosswahrscheinlichkeit wird auch ein Magnetfeld angelegt.

Messbereich: 10^{-2} mbar – 10^{-10} mbar

b) Glühkathodenmanometer

Benötigt 3 Elektroden. Aus einer Glühkathode werden Elektronen emittiert und wandern zur gitterförmigen Anode. Auf dem Weg ionisieren sie Gasteilchen, die über den (negativ gepolten) Ionenfänger abgesaugt werden. Wieder ist der Ionenstrom proportional zur Gasdichte (Druck)

Messbereich: 10^{-4} - 10^{-11} mbar



Vakuumsysteme

Grundlegendes:

Saugvermögen: $S = dV/dt$ [l/s], Schöpfvolumen

Saugleistung: $Q = p \cdot dV/dt$ [mbar l/s], abgesaugte Gasmenge

Leckrate: $Q_L = p \cdot dV/dt$ [mbar l/s], einfließende Gasmenge

Reelle Lecks: Undichtigkeiten, z.B. an Schweissnähten, Dichtungen, Verbindungen, etc., Diffusion

Virtuelle Lecks: Ausgasen von Innenwänden, Dampfdruck,...

Leitwert L: Durchflussmenge $Q = L \cdot \Delta p$

(Analog zum Ohm'schen Gesetz: $I = L \cdot \Delta U$)

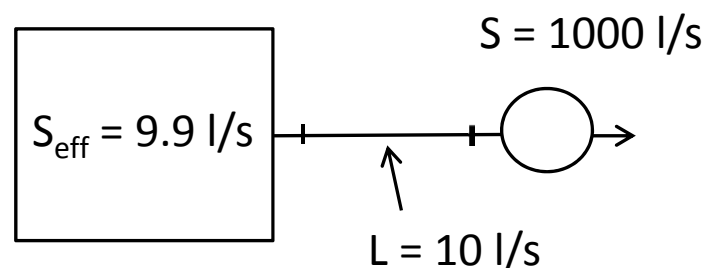
Leitwert dimensionsgleich zu Saugvermögen [l/s]

Parallelschaltung der Leitwerte: $L_{\text{ges}} = \sum L_i$

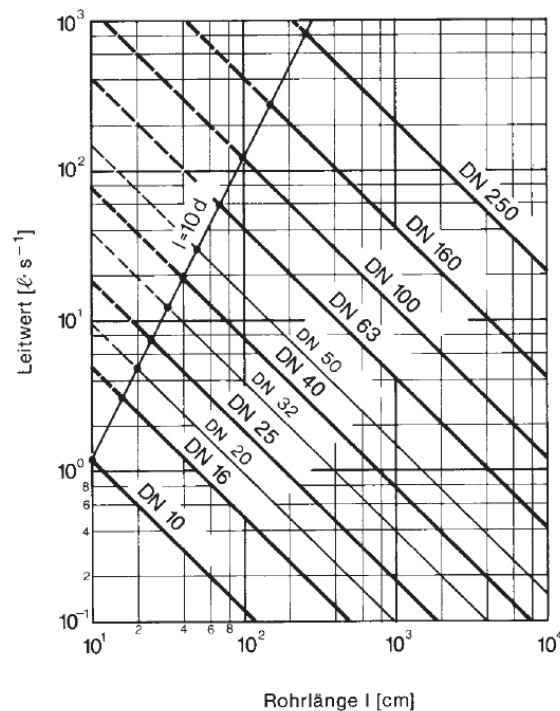
Reihenschaltung der Leitwerte: $1/L_{\text{ges}} = 1/\sum L_i$

Aber auch:

$$1/S_{\text{eff}} = 1/S + 1/L$$



Leitwerte kreisrunder, gerader Rohre oder Bälge,
für Molekularströmung



Daher, immer möglichst kurze und weite Bauelemente verwenden.

Leitwert von Blendenöffnung ($l \ll$) im HV und UHV: 10 l/cm^2

Weiters, reelle Lecks weitgehend ausschliessen und virtuelle vermeiden. D.h. keine Materialien mit hohem Dampfdruck oder Verunreinigungen in der Vakuumkammer

Auspumpen eines Rezipienten im Grobvakuum

$$p(t) = p(\text{atm}) \cdot \exp((-S/V) \cdot t)$$

Beispiel: Ein 500 l Rezipient soll in 10 min auf 1 mbar evakuiert werden. Dafür ist eine Pumpe mit etwa 20 m³/h Saugvermögen notwendig.

Auspumpzeit im Hochvakuum besonders von virtuellen Lecks bestimmt (z.B. Wasserdampf)

Enddruck p_{end} : Ist abhängig von Pumpleistung, Rückströmung, Summe aller realen und virtuellen Lecks

$$Q_L = S \cdot p_{\text{end}}$$

Spezielle Aspekte der Ultrahochvakuumtechnik (UHV):

Nur Materialien mit niedrigem Dampfdruck verwenden:
Stahl, Aluminium, Glass, Kupfer, Keramik

Kein Plastik, Gummi, Fett, Messing,.. verwenden
Sehr sauber arbeiten (Fingerabdrücke)

Flanschdichtung mittels Kupferringen
Typisches Pumpsystem: Drehschieber + Turbo
Oder: Adsorptionspumpe + Ionenzerstäuberpumpe

Ausheizen der Anlage notwendig zum Desorbieren des
kondensierten Wassers (150 °C für 24 h)

Beispiel:

$P_{\text{end}} = 10^{-8} \text{ mbar}$, $S = 1000 \text{ l/s}$, mit $Q_L = S \cdot p$ folgt: $Q_L = 10^{-5} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$

Dies entspricht 10^{14} Teilchen/s (1 mbar·l = $2 \cdot 10^{19}$ Teilchen)

Annahme: 1 Monolage Wasser ist adsorbiert an den
Innenwänden: 1 ML $\approx 10^{15}$ Teilchen/cm².

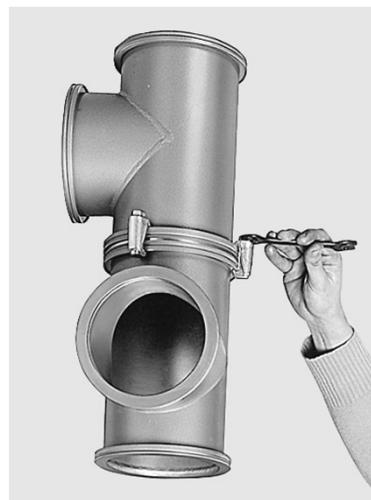
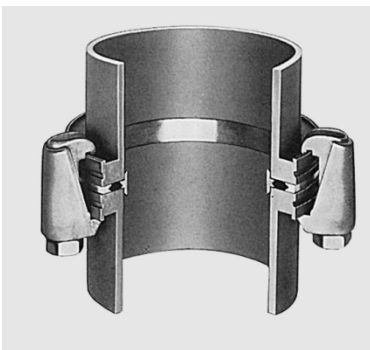
Wenn Innenwandoberfläche etwa 1 m² (10^4 cm^2)
sind 10^{19} Teilchen abzupumpen:
Dauer: weit mehr als 100000 s.

Vakuumkomponenten:

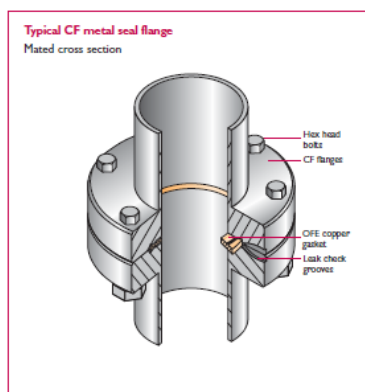
Klammerflansche mit O-Ring Dichtungen (ISO-KF)



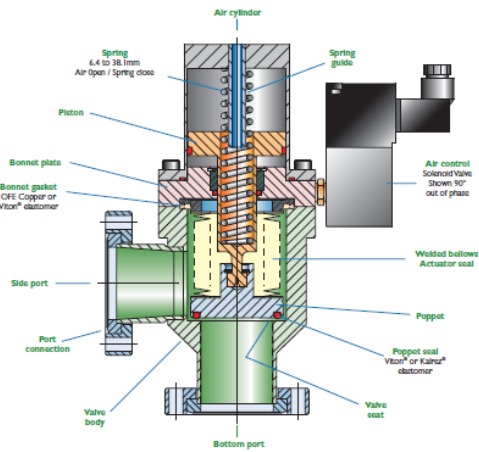
ISO-K Flansche



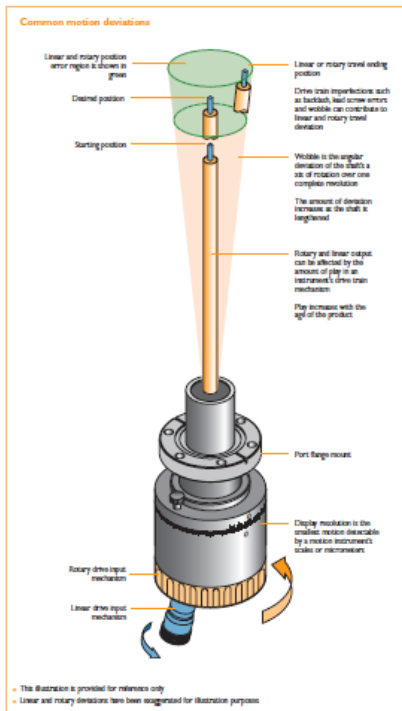
UHV CF Flansche (Kupferdichtung)



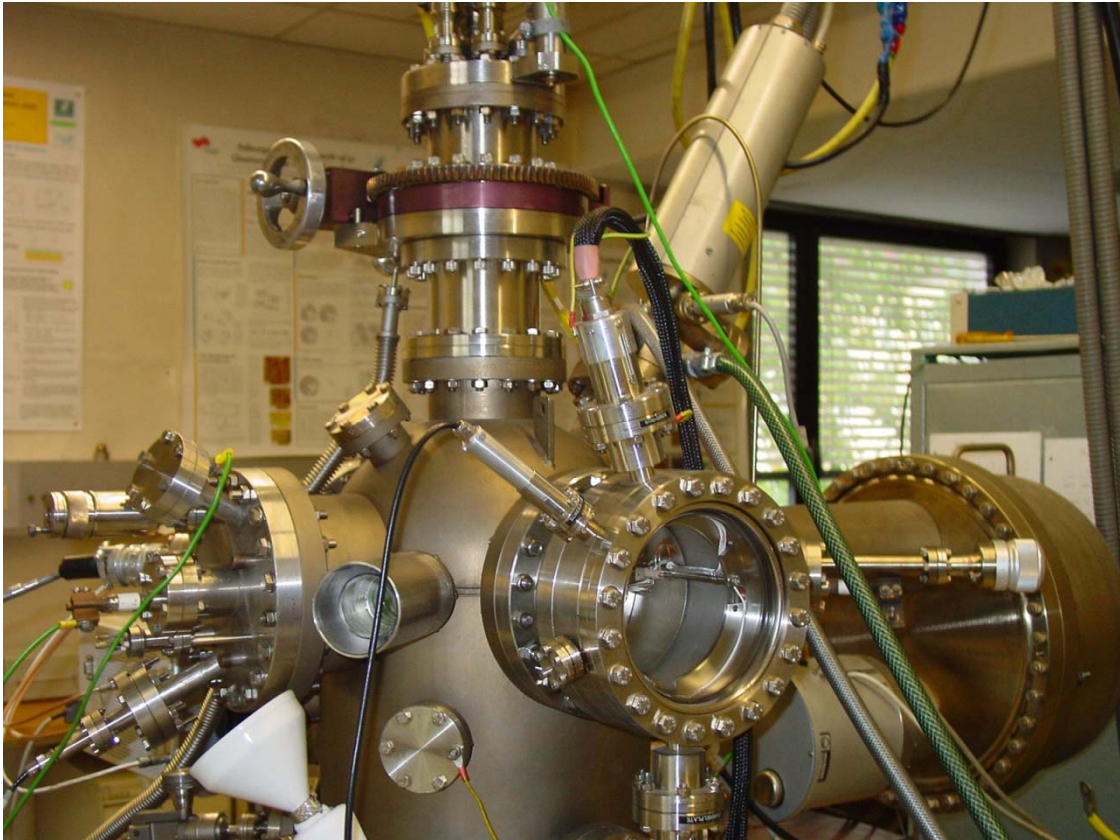
Vakuümventile:



Durchführungen (Dreh-, schiebe, elektrische D., Schaugläser)



Komplette UHV Anlage



Mögliche Folgen schlechter Vakuumtechnik:

