

Vakuum

Was ist Vakuum?

Philosophisch wird Vakuum als grundsätzlich vollkommen leeren Raum angesehen.

Naturwissenschaftlich ist dies allerdings nicht mehr haltbar (Quantenfeldtheorie)

Technisch gesehen ist es ein weitgehend Gasfreier Raum.



Santo Vacuum Cleaner

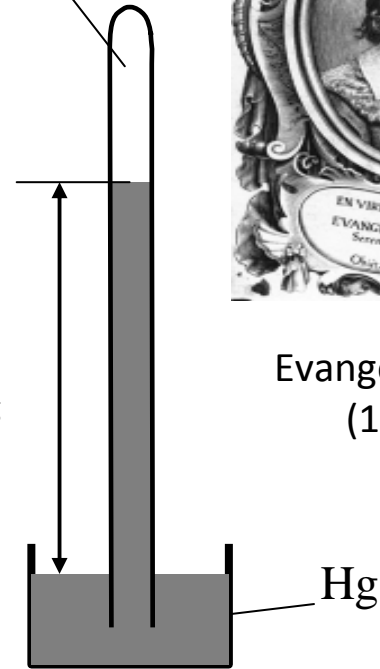


Vakuum

p_0
 760mmHg
 =760Torr
 =1013hPa



Evangelista Torricelli
 (1608-1647)



- Der Luftdruck wird auch heute noch oftmals in Torr angegeben.
- 1 Torr =133Pa , wobei 1 Torr einem Millimeter Quecksilbersäule entspricht.
- Der Normdruck ist 760mmHg =760Torr =1013mBar=101'325Pa =1013hPa.
- Torricelli hat das Vakuum postuliert



Magdeburger Halbkugeln

1654: Otto von Guericke demonstriert Halbkugeln und zeigt den Einfluss der Erdatmosphäre und die Existenz von Vakuum

Widerlegung der Aether-Theorie (horror vacui)

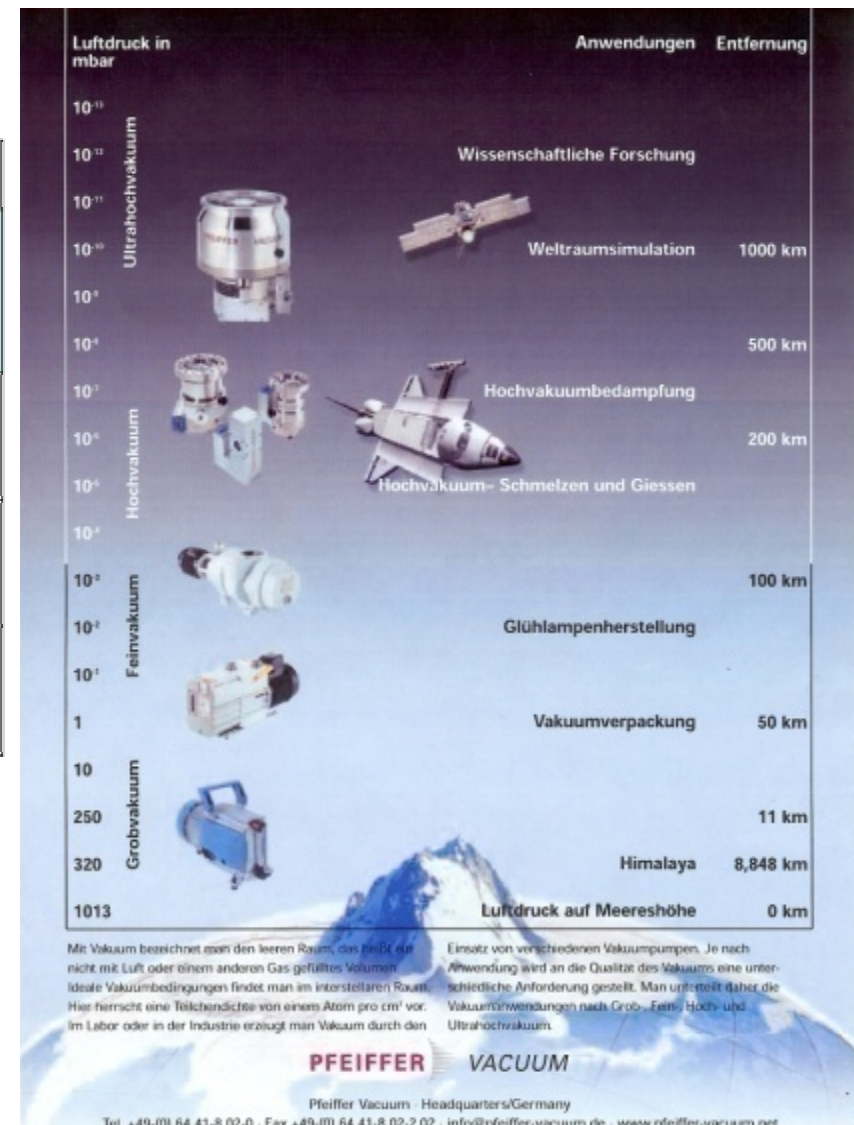
Die „Barometrische Höhenformel“

	Einheit	
$p(h) = p_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0 \cdot g \cdot h}{p_0}}$	1 N/m ²	Barometrische Höhenformel
$\rho_0 = 1,2928$	1 kg/m ³	Dichte der Luft bei 0 ⁰ C in Höhe des Meeresspiegels
$p_0 = 0,101325$	1 MPa	Luftdruck bei 0 ⁰ C in Höhe des Meeresspiegels (h=0 m)
$g = 9,81$	1 m/s ²	Fallbeschleunigung

0°C = 273,15 K und 101.325 Pa bezeichnet man als „Normalbedingungen“
 englisch: STP Standard Temperature and Pressure

Somit gilt für Luft auf unserer Erde:

$$p = p_0 \cdot \exp\left(-\frac{h}{8.005 \text{ m}}\right)$$



Druck

Ein beliebiges, in einem Volumen eingeschlossenes, Gas verteilt sich immer gleichmäßig. Die einzelnen Gasteilchen bewegen sich in dem Volumen dauernd mit hohen Geschwindigkeiten hin und her. Sie üben, wenn sie auf die Behälterwand mit der Fläche A auftreffen, auf diese durch Impulsübertragung eine Kraft F aus.

$$p = F / A$$

Allgemeine Gasgleichung

Die **Boltzmann-Konstante** erlaubt die Berechnung der mittleren thermischen Energie eines Teilchens aus der **Temperatur**

$$p \cdot v = m/M \cdot R \cdot T = n \cdot v \cdot k \cdot T$$

$$p = n \cdot k \cdot T$$

P = Druck [Pa; N/m²]

V = Volumen [m³]

m = Masse [kg]

M = Molare Masse [g/mol]

R = Allgemeine Gaskonstante
= 8,314510 J/(mol K)

T = Thermodynamische
Temperatur [K]

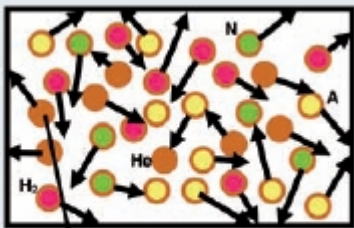
n = Teilchenzahldichte [1/m³]

k = Boltzmannkonstante
= 1,380 · 10⁻²³ J/K

	Druck (bei 273 K) (mbar)	Teilchendichte (cm ⁻³)	Mittl. freie Weglänge	Flächenstosshäufigkeit (Teilchen s ⁻¹ cm ⁻²)
Vakuumeinteilung grob fein hoch hoch hoch ultrahoch	100	25'000'000'000'000'000'000'000'000	66 nm	3 * 10 ²³
	1	25'000'000'000'000'000	66 μm	3 * 10 ²⁰
	0.001	25'000'000'000'000	6.6 cm	3 * 10 ¹⁷
	10 ⁻⁶	25'000'000'000	66 m	3 * 10 ¹⁴
	10 ⁻⁹	25'000'000	66 km	3 * 10 ¹¹
	10 ⁻¹²	25'000	66'000 km	3 * 10 ⁸
	10 ⁻¹⁵	25	66'000'000 km	3 * 10 ⁵

Partialdruck

Besteht das Gas aus verschiedenen Gasarten, so übt jedes Gas entsprechend seiner Konzentration einen Druck, den Partialdruck, aus. Alle Partialdrücke addieren sich zum Totaldruck.



- ▶ Teildruck
- ▶ Summe der Teildrücke aller vorhandenen Gase ergeben Totaldruck
- ▶ Massenspektrometrischer Nachweis aller vorhandenen Gase

$p_p = F/A$

Typische Anwendungen in der Industrie

Glühbirne

Produktion von Gasentladungsröhren

Elektronenröhren

Verpackung

Trocknen (Gefriertrocknen)

Isolation z.B. thermische Vakuumkollektoren

Metallurgie

Plasmaätzen zur Reinigung und Aktivierung von Oberflächen

Beschichtungstechnologien wie: Aufdampfen, Sputtern, CVD

Halbleitertechnologie

Photovoltaik

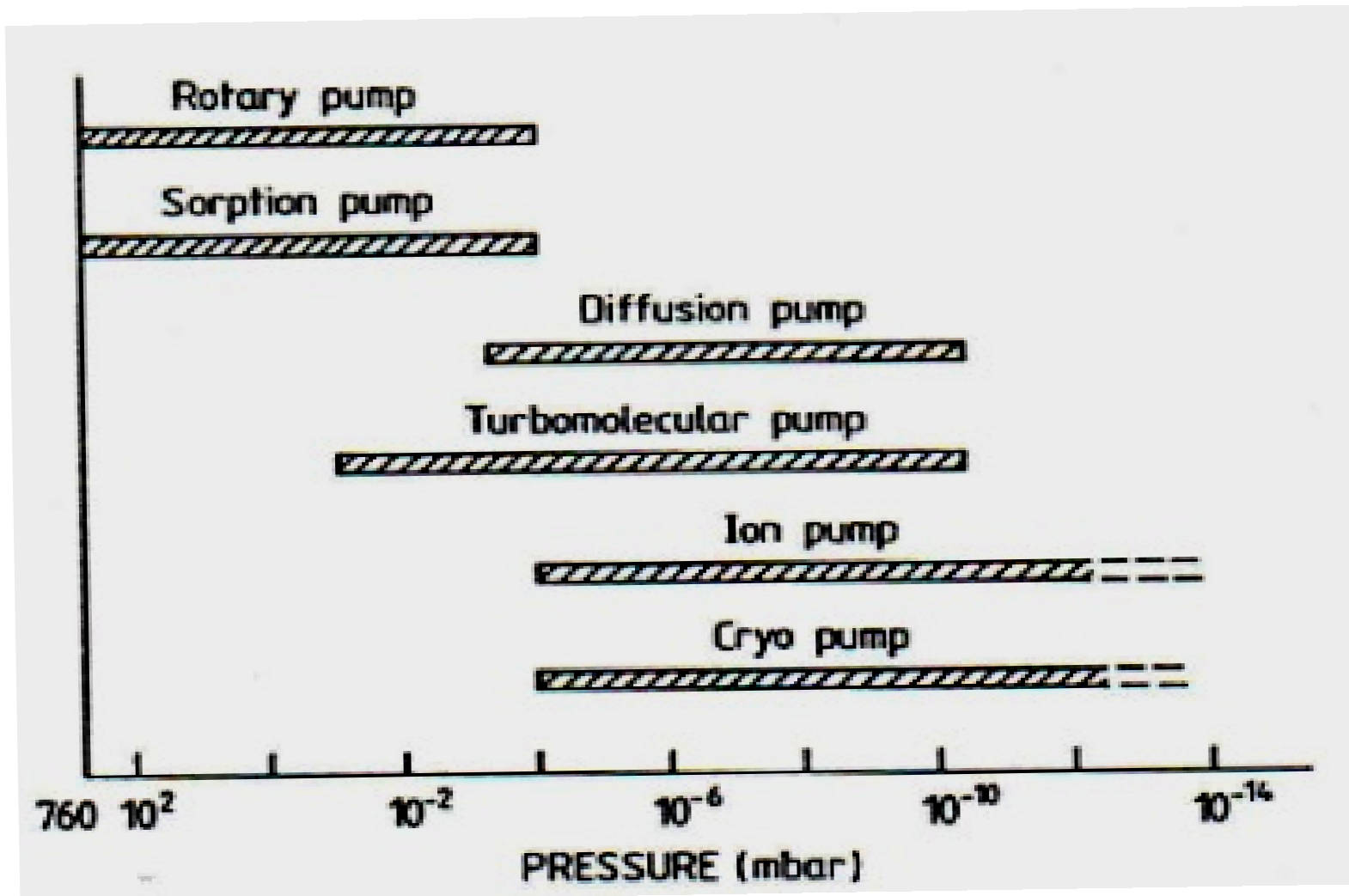
Röntgen

Elektronenmikroskopie, ESCA, RHEED, LEED,

Massen-Spektrometrie

Teilchenbeschleuniger

Vakuumtechnik



Vorvakuum

Bis ca. 10^{-3} mbar, laminare Strömung

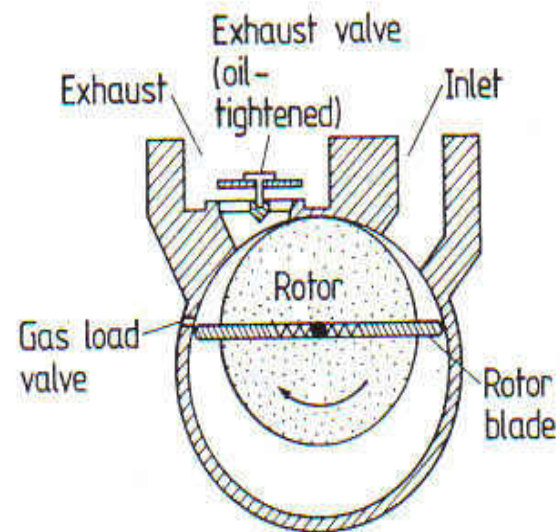
Druckmessung: Pirani, Baratron, Macload, Gasreibungsvacuummeter

Drehschieberpumpe, Membranpumpe, Kolbenpumpe, Scrollpumpe,

Rootsgebläse, Wasserstrahlpumpe,



(rotary pump)



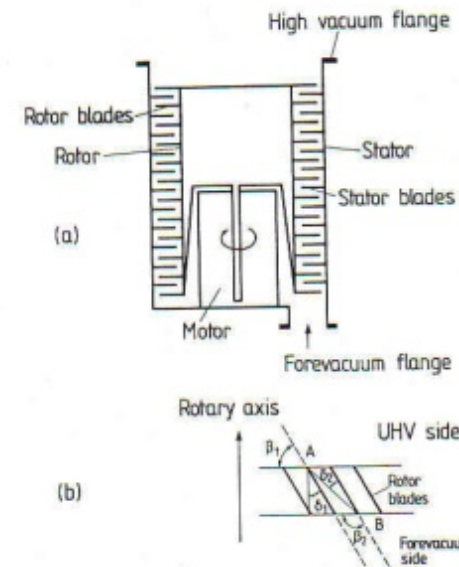
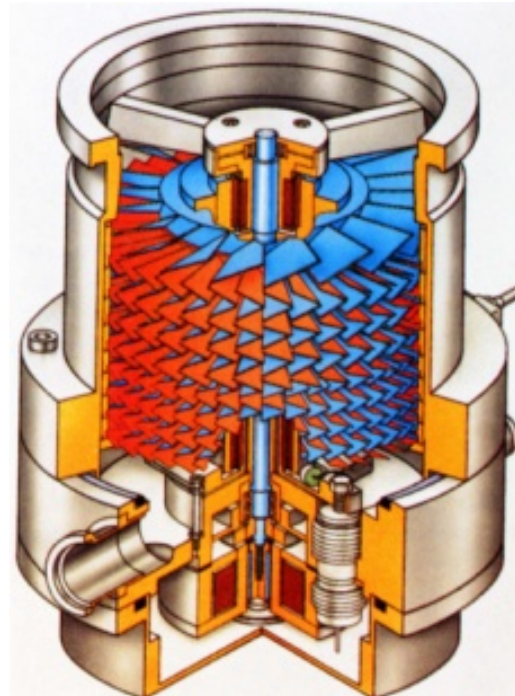
Drehschieberpumpe (Erfindung: Pfeiffer Ölpumpe, 1908)

Hochvakuum

10^{-3} mbar bis 10^{-7} mbar (10^{-10} mbar), molekulare Strömung

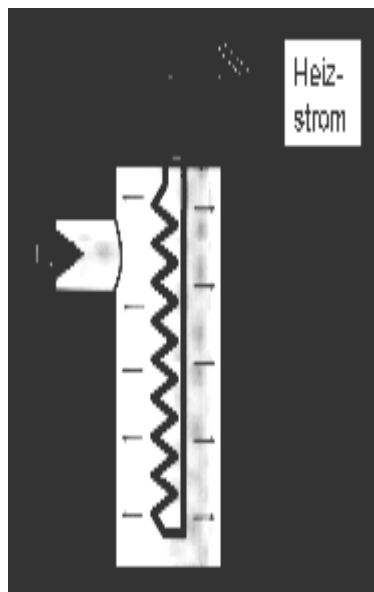
Druckmessung: Penningdruckmesszelle, versch. Ionisationsmanometer (Triode, Baiard-Alpert.....)

Turbopumpe (entwickelt und patentiert 1957 von Dr. W. Becker)

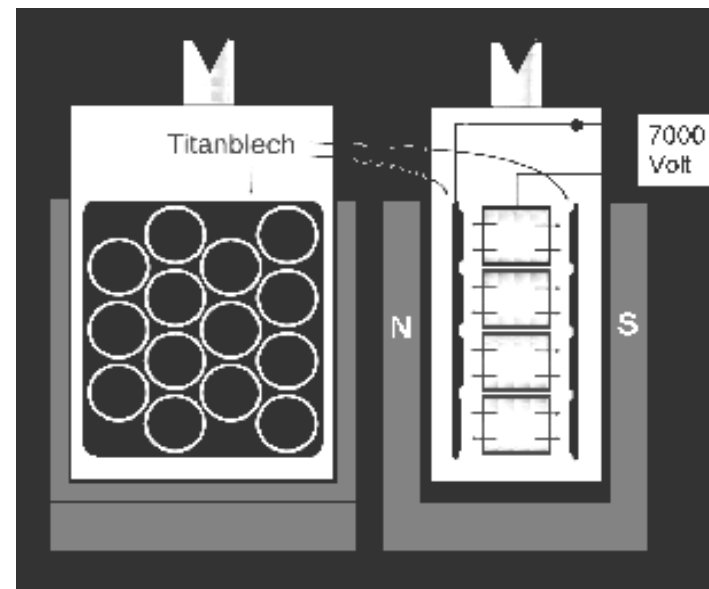


Ultra-Hochvakuum

Ab 10^{-7} mbar, molekulare Strömung (*Gasteilchen stossen vor allem mit den Kammerwänden!*) Die **mittlere freie Weglänge** ist zwischen 0,5 und 10'000 km)
Turbomolekularpumpen, Ionengetterpumpen (Diode und Triode), Cryopumpen.
Zusätzliche „Hilfspumpen“: Titansublimationspumpen mit flüssig-N₂ Kühlfalle.

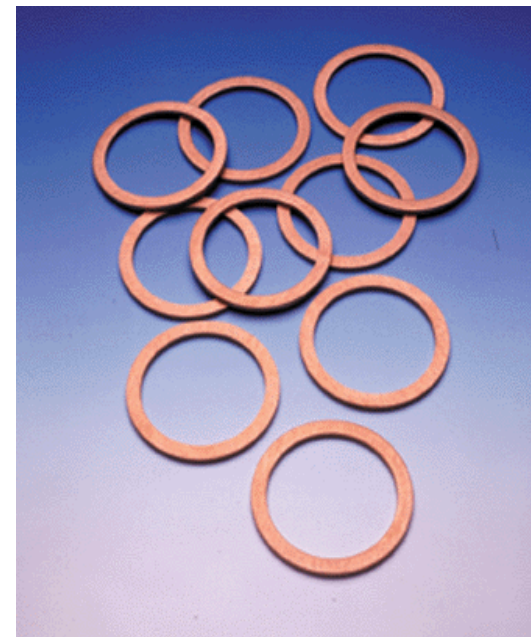
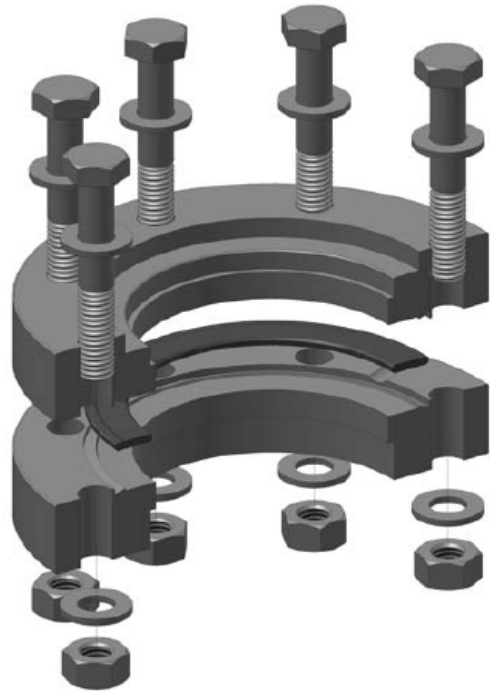


Titansublimationspumpe



Ionengetterpumpe

UHV-Technologie

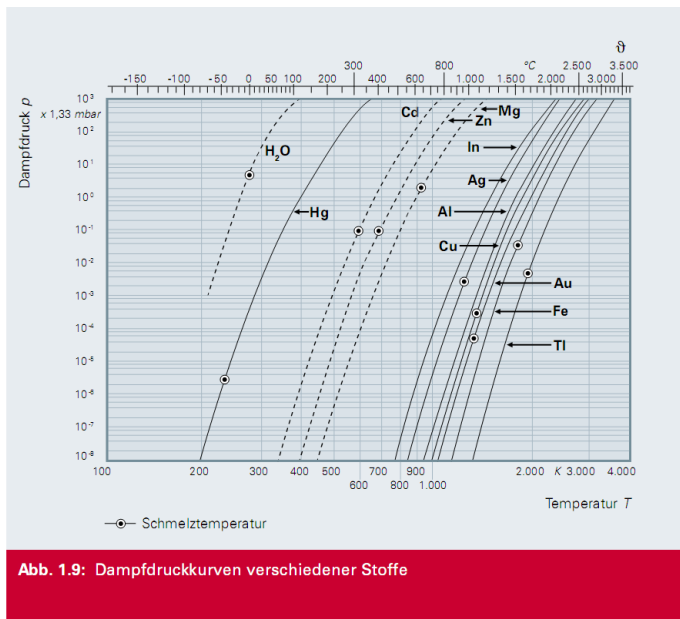


Conflat-Dichtungen (CF)

Störende Nebeneffekte

Verunreinigungen: Alle im Vacuumraum eingebaute Bauteile müssen Sauber und fettfrei sein. Bei der Montage Handschuhe tragen!

Kondensieren und Verdampfen (Adsorption und Desorption): Ein frisch ausgepumptes Vakuumsystem weist an den Oberflächen grosse Mengen **Adsorbate** auf. Vor allem stellt Wasser wegen der starken Polarität der Wassermoleküle ein Problem dar. Um es abzulösen und über die Pumpen endgültig abzuführen, müssen sämtliche Oberflächen über mehrere Stunden mit ca. 150 °C **“ausgeheizt“** werden. Ein UHV-System sollte mit trockenem Stickstoff belüftet werden.



Quelle: Jousten (Hrsg.) Wutz Handbuch Vakuumtechnik, Vieweg Verlag

Der Gasanfall lässt sich damit beschreiben als:

$$Q_{des} = q_{des} \cdot A \cdot \frac{t_0}{t}$$

Hierin ist q_{des} die flächenbezogene Desorptionsrate des Werkstoffes, A die innere Oberfläche des Vakuumbehälters, t_0 der Startzeitpunkt und t die Zeit.

Diffusion, Permeation und Lecks

Bei Betrieb unterhalb von 10^{-6} mbar erhält die Desorption von Kunststoffflächen, insbesondere bei Dichtungen, eine grössere Bedeutung. Kunststoffe geben hauptsächlich die in ihnen gelösten Gase ab.

Dichtungen und sogar Metallwände können von kleinen Gasmolekülen wie z.B. Helium durch Diffusion durchdrungen werden. Dieser Prozess ist zeitunabhängig und führt zu einer dauernden Erhöhung des angestrebten Enddruckes.

Restgasspektrum (Massenspektrometer)

In gut ausgeheizten Kammern findet man Wasserstoff ($M=2$), Kohlenmonoxid ($M=28$), Kohlendioxid ($M=44$), und immer noch Wasser ($M=17$ und 18)

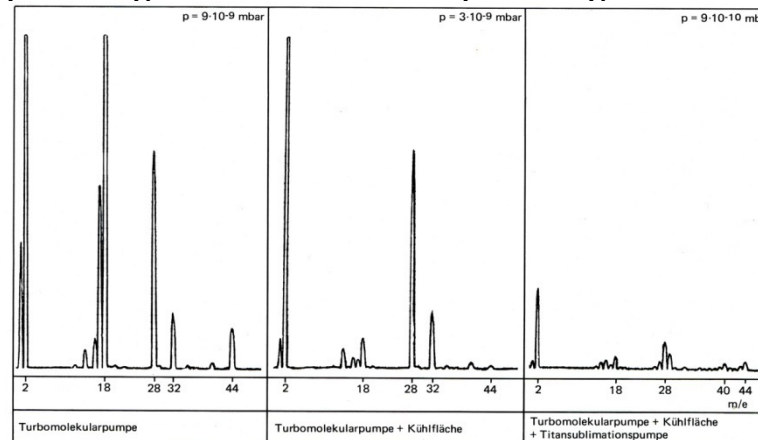
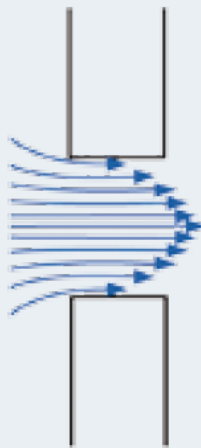


Abb. 21
Unterschiedliche Wirkung verschiedener Pumpmethoden

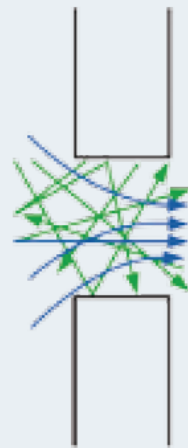
Abb. 22 zeigt das Restgas in einem ausgeheizten UHV-System mit Turbomolekularpumpe. Der Totaldruck lag bei $7 \cdot 10^{-10}$ mbar. Hier wurde ein Quadrupol mit versetzt angeordnetem SEV benutzt (Abb. 9, Abschnitt 2.3.3.). Das Spektrum wurde durch Einzelionenzählung

aufgenommen. Die Zählrate für H_2^+ war etwa 10^6 sec^{-1} , der Untergrund kleiner als 10 sec^{-1} , entsprechend einer Nachweisgrenze von einigen 10^{-15} mbar. Störend macht sich bei dieser Empfindlichkeit der Dampfdruck der Rheniumkathode (bis Re_7^+) bemerkbar.

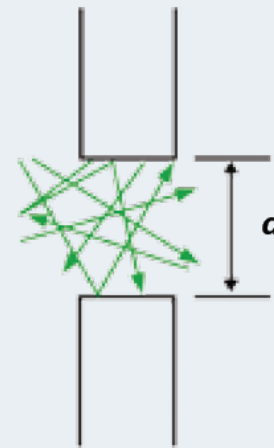
Strömungsarten



Kontinuumströmung
 $Kn < 0,01$
 Grobvakuum



Knudsenströmung
 $0,01 < Kn < 0,5$
 Feinvakuum



Molekulare Strömung
 $Kn > 0,5$
 Hoch- / Ultrahochvakuum

► **Kontinuumströmung**

- laminar, $Re < 2.300$,
für kreisrunde Rohre
- turbulent, $Re > 4.000$,
für kreisrunde Rohre

► **Knudsenströmung**

► **Molekulare Strömung**

► **Knudsenzahl** $Kn = \frac{\bar{l}}{d}$

\bar{l} = mittlere freie Weglänge

l_{ohar} = charakteristische lichte Weite
eines durchströmten Bauteils

Abb. 1.5: Strömungsarten im Vakuum

Quelle: Jousten (Hrsg.) Wutz Handbuch Vakuumtechnik, Vieweg Verlag

Leitwerte von Rohren

Rohr mit laminarer Strömung

$$L_{RI} = \frac{\pi \cdot d^4}{256 \cdot \eta \cdot l} \cdot (p_1 + p_2) = \frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot \eta \cdot l} \cdot \bar{p}$$

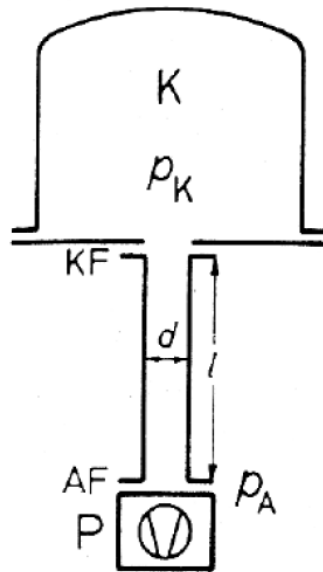
Rohr mit molekularer Strömung

$$L_{Rm} = \frac{\bar{c} \cdot \pi \cdot d^3}{12 \cdot l}$$

- L_{Rm} = Rohrleitwert [m³/s]
- d = Rohrdurchmesser [m]
- l = Rohrlänge [m]
- \bar{p} = $(p_1 + p_2) / 2$ Druck [Pa]
- p_1 = Druck am Eintritt der Rohrleitung [Pa]
- p_2 = Druck am Ende der Rohrleitung [Pa]
- η = Zähigkeit des Gases [Pa · s]
- \bar{c} = Mittlere thermische Geschwindigkeit [m/s]

Vakuumsystem

Alle Gasleitungen im Vakuumsystem stellen einen Strömungswiderstand dar!



$Q \sim \Delta p$ Der Gasstrom ist proportional zum Druckabfall

$W = \Delta p / Q$ Strömungswiderstand

$L = Q / \Delta p$ Leitwert ($= 1 / W$)

Serienschaltung $W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots$

Parallelschaltung $L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots$

Die Sauggeschwindigkeit $S = Q/p$ der Pumpe wird durch die Leitung zwischen Pumpe und Kessel reduziert.

Die Pumpe hat über das Ansaugrohr die Sauggeschwindigkeit:

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

$$S_{\text{eff}} > 0,9 S, \text{ wenn } L > 10 S$$

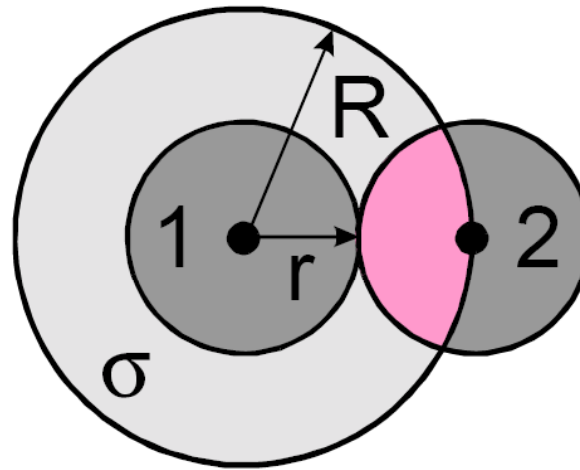
Wenn die Sauggeschwindigkeit durch Leitungen nicht wesentlich reduziert werden soll, dann müssen die Widerstände der Leitungen sehr gering, sein d.h. die Leitwerte größer als die Sauggeschwindigkeit der Pumpe.

Faustregel: Die Leitungen müssen möglichst kurz und weit sein

apl.Prof. Dr. D.J. As

Mittlere Freie Weglänge I

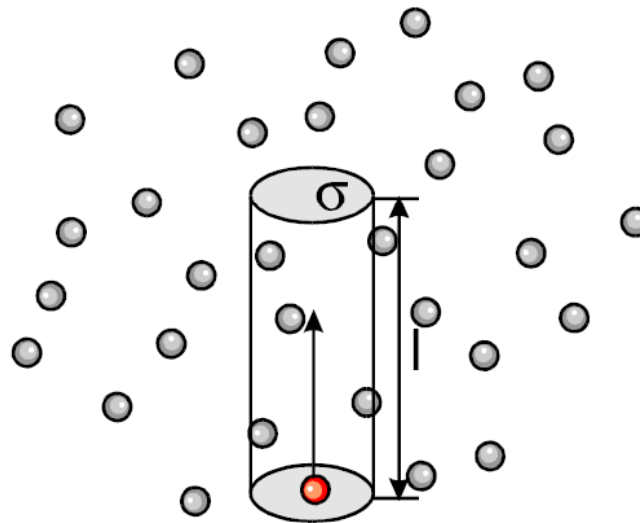
Stoss zweier Teilchen 1 und 2 mit Radius $r = R/2$:



Werden beide Teilchen als **punktförmig** gedacht, so kommt es immer dann zum Stoss, wenn sich Teilchen 1 innerhalb einer Scheibe mit der **Fläche** $\sigma = \pi \cdot R^2$ befindet. σ wird als **Stossquerschnitt** bezeichnet.

Mittlere Freie Weglänge II

Das Teilchen bewegt sich geradlinig eine Strecke l durch ein Gas. Innerhalb eines **Zylinders des Volumens $V = l \cdot \sigma$** wird es mit **jedem** dort vorhandenen Teilchen stossen.



Im Zylinder befinden sich **$N = n \cdot V$** Teilchen, bei geradliniger Bewegung entspricht das genau der **Stosszahl**.

Mittlere Freie Weglänge III

Ein Stoss tritt dann auf wenn für die Stosszahl gilt $N = 1$.
Damit ergibt sich die **mittlere Freie Weglänge λ** zu:

$$N \equiv 1 \Rightarrow n \cdot V = n \cdot \lambda \cdot \sigma = 1$$

$$\lambda = \frac{1}{n \cdot \sigma} = \frac{1}{\pi \cdot n \cdot R^2} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot n \cdot r^2}$$

- **Makroskopische Information:** Teilchendichte n , aus allgemeiner Gasgleichung.
- **Mikroskopische Information:** Stossquerschnitt σ , enthält Energieabhängige Atom/Molekülradien bzw. ganz allgemein Wirkungsquerschnitte der Stosspartner.

Mittlere Freie Weglänge - Rechenbeispiel

$$\lambda = \frac{l}{4 \cdot \pi \cdot n \cdot r^2} \quad p \cdot V = N \cdot k_B \cdot T \Rightarrow \frac{N}{V} = n = \frac{p}{k_B \cdot T}$$

$$p = 0.1 \text{ Pa}$$

$$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$T = 300 \text{ K}$$

$$r = 1.5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{k_B \cdot T}{4 \cdot \pi \cdot p \cdot r^2} =$$

$$= \frac{1.38 \cdot 10^{-23} [\text{J/K}] \cdot 300 [\text{K}]}{4 \cdot \pi \cdot 0.1 [\text{J} \cdot \text{m}^{-3}] \cdot 1.5 \cdot 10^{-10} [\text{m}^2]} =$$

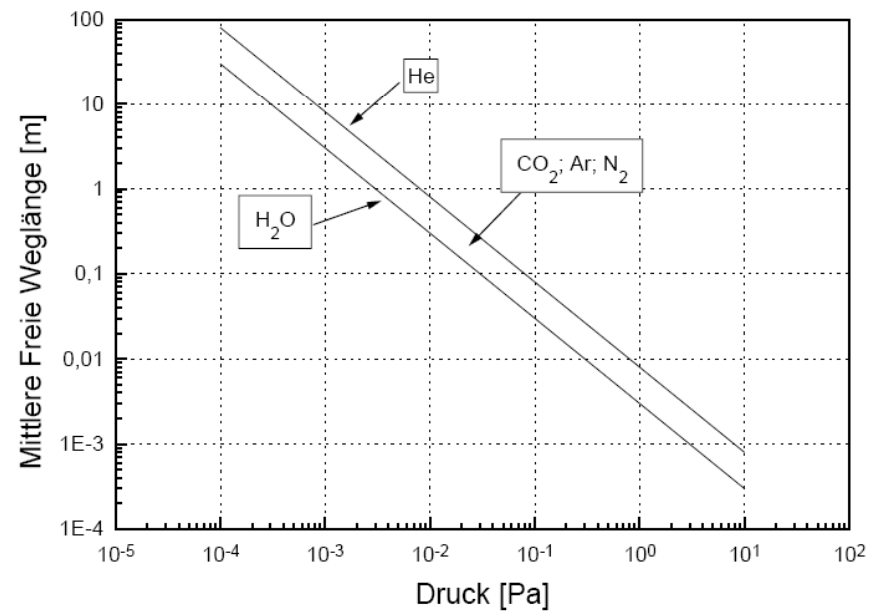
$$= 14.6 \text{ cm}$$

Mittlere Freie Weglänge - Faustformel

$$\lambda p = 5 \text{ mm Pa}$$

$$p = 1 \text{ Pa} \rightarrow \lambda = 5 \text{ mm}$$

$$p = 10^{-4} \text{ Pa} \rightarrow \lambda = 50 \text{ m}$$

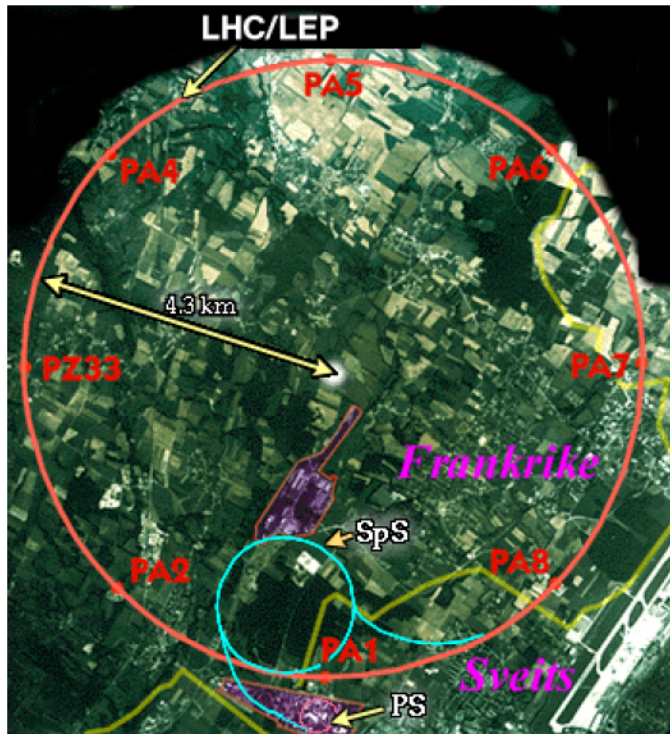


www.xphys.tuwien.ac.at

Mittlere Freie Weglänge: Dimensionierung

CERN – LHC:

$$U = 2 \cdot 4.3 \cdot \pi = 27 \text{ km}$$



$$\lambda p = 5 \text{ mm Pa}$$

$$\lambda[\text{mm}] = \frac{5}{p[\text{Pa}]}$$

$$p[\text{Pa}] = \frac{5}{\lambda[\text{mm}]} = \frac{5}{2.7 \cdot 10^7} =$$
$$= 1.8 \cdot 10^{-7} \text{ Pa} = 1.8 \cdot 10^{-9} \text{ mbar}$$

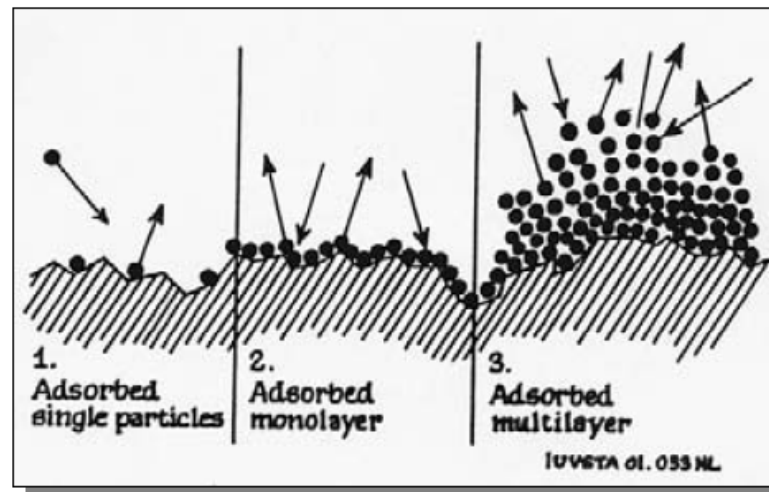
Innerhalb des LHC muss
Ein Druck von ca. **10^{-9} mbar**
herrschen, um Stossfreiheit
zu gewährleisten.

www.xphys.tuwien.ac.at

Monomolekulare Schichten (1)

- Monomolekulare Schicht

- Teilchendichte n_{mono}
- Monoatomare Schicht besitzt typisch etwa 10^{19} Teilchen / m^2 bzw. 10^7 Teilchen / μm^2 (10 Millionen pro μm^2)
- bei geringerer Bedeckung spricht man von einem Bedeckungsgrad
- bei höherer Bedeckung (mehrere Schichten) von Kondensation



Monozeit

Physikalische Experimente zur Bestimmung der Eigenschaften der Oberfläche von Festkörpern benötigen besonders reinliche Bedingungen, bereits eine **Monolage** kann zu verfälschten Ergebnissen führen. In der Praxis hat sich verbunden damit der Begriff der **Monozeit** t_{mono} verbreitet. Die Definition der Monozeit geht davon aus, dass jedes auf die Oberfläche auftreffende Teilchen mit der Wahrscheinlichkeit 1 adsorbiert wird, also auf jeden Fall haften bleibt.

$$t_{\text{mono}} = \frac{n_{\text{mono}}}{p \cdot N_A} \sqrt{2\pi M_{\text{molar}} RT}$$

Wie deutlich die Druckabhängigkeit in Erscheinung tritt sieht man an folgendem Zahlenbeispiel typischer Monozeiten: Bei einem Druck von 10^{-6} mbar wird größenordnungsmäßig eine Monolage pro Sekunde abgeschlossen, im Ultrahochvakuum bei 10^{-11} mbar liegt die Monozeit bereits im Bereich von 24 Stunden.

Häufig (veraltet) wird auch mit **Langmuir** operiert.

1 Langmuir = Dosis (Adsorbate/cm²) pro Sekunde bei einem Druck von 10^{-6} Torr