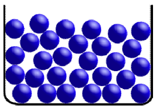
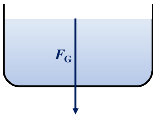
Flüssigkeiten



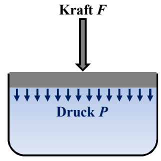
Atome / Moleküle sind im Volumen *V* **frei verschiebbar**



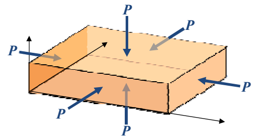
Die Oberfläche steht immer senkrecht auf der Kraft:
keine Tangentialkräfte!

$\rho = m/V \overset{!}{=}$ **konstant**
Flüssigkeiten sind (näherungsweise) **inkompressibel!**

Druck

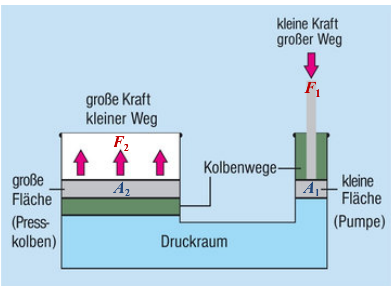


Druck = Kraft/Fläche:
$P = F/A$
Einheit des Drucks:
$[P] = \mathrm{N/m^2} = \mathrm{Pa}$



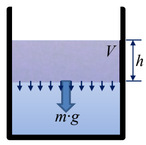
Ruhende Flüssigkeit:
P = **konstant!**

Anwendung: Presse



P = **konstant** $\rightarrow$ $F_1 = P{\cdot}A_1 < P{\cdot}A_2 = F_2$

Hydrostatischer Druck

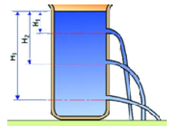


Gewichtskraft der Flüssigkeitssäule übt Kraft aus:
$F_G = m{\cdot}g \quad\rightarrow\quad P = g{\cdot}m/A$
Masse der Flüssigkeitssäule:
$m = \rho{\cdot}V = \rho{\cdot}A{\cdot}h$

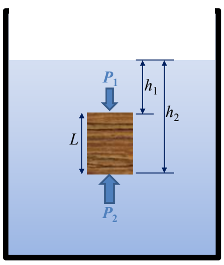
Hydrostatischer Druck:
$P = \rho{\cdot}g{\cdot}h$

Der hydrostatische Druck nimmt linear mit der Höhe ab:

$P(z) = \rho\cdot g\cdot(H\text{-}z)$



Archimedisches Prinzip



Druckunterschied:
$$\begin{aligned}\Delta P &= P_2 - P_1\\ &= \rho\cdot g\cdot(h_2 - h_1)\\ &= \rho\cdot g\cdot L\end{aligned}$$

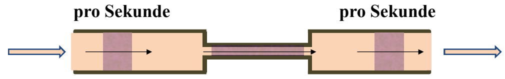
resultierende Kraft (= Auftrieb):
$$\begin{aligned}F &= \Delta P\cdot A\\ &= \rho\cdot g\cdot L\cdot A\\ &= \rho\cdot g\cdot V\\ &= m\cdot g\end{aligned}$$

Durch den Auftrieb verliert ein eingetauchter Körper so viel an Gewicht, wie die von ihm verdrängte Flüssigkeit wiegt!

Strömung durch ein Rohr

Engstelle:
$\dot{V}_E = \dot{V}$

Volumen $\dot{V}$ pro Sekunde — **Volumen $\dot{V}$ pro Sekunde**

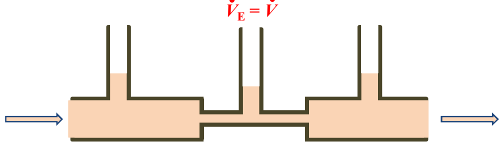


Strömungs-geschwindigkeit v_0 — $v_E > v_0$ — **Strömungs-geschwindigkeit v_0**

- **Wodurch wird die Geschwindigkeit erhöht?** (Kraft nötig!)
- **Ist hier nicht der Energiesatz verletzt?** (Erhöhung der kinetischen Energie!)

Strömung durch ein Rohr

Engstelle:
$\dot{V}_E = \dot{V}$

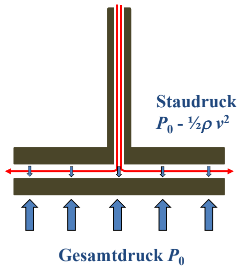


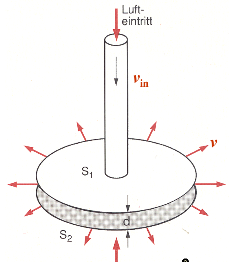
Druck: P_1 > P_2 < P_3

- Druckgradient bewirkt Erhöhung der Geschwindigkeit!
- Energiesatz ist gültig: $P \cdot V + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \text{konst.}$

Hydrodynamisches Paradoxon

Bernoulli: $P + \frac{1}{2}\rho\, v^2 = P_0$





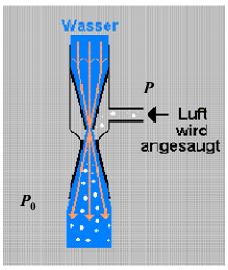
$\Delta P = \frac{1}{2}\rho\, v^2$

Wasserstrahlpumpe

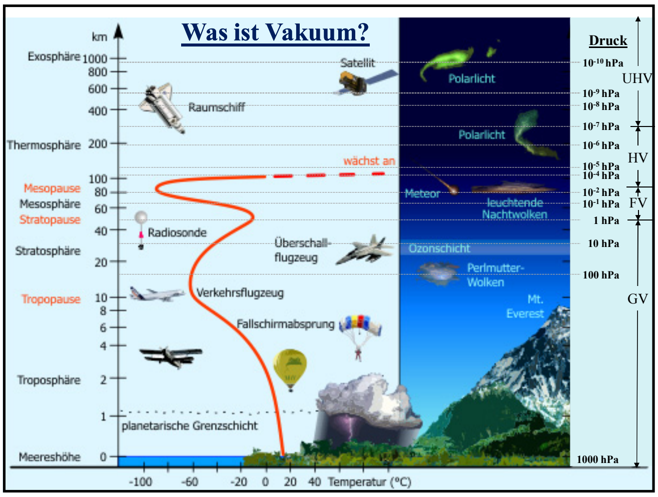
Bernoulli: $P + \frac{1}{2}\rho\, v^2 = P_0$

Erreichbarer Druck:
$P = P_0 - \frac{1}{2}\rho\, v^2$
$= (1013 - 970)$ hPa
≈ 40 hPa

Möglicher Enddruck:
$P_{min} > P_{H_2O} \approx 30$ hPa

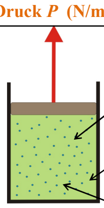


Rechenbeispiel:
Dichte: $\rho \approx 10^3$ kg/m³
Geschwindigkeit:
$v = 50$ km/h $\approx 13{,}9$ m/s
⇩
$\frac{1}{2}\rho\, v^2 \approx 9{,}7 \cdot 10^4$ N/m²



Druck ↔ Teilchenzahldichte

Druck P (N/m² = Pa, 1 mbar = 100 Pa = 1 hPa)



Teilchenzahldichte $n = N/V$ (1/m³)

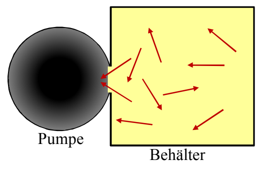
Volumen V (m³), Temperatur T (K)

mittl. freie Weglänge: $\lambda = 1/\sqrt{2} \cdot n \cdot \pi d^2$

Ideales Gasgesetz: $P = n \cdot k \cdot T$ ($k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

- **Erdboden:** $P = 1013$ hPa, $n = 2{,}55 \cdot 10^{25}$ m⁻³, $\lambda = 68$ nm
- **ISS:** $P = 10^{-8}$ hPa, $n = 1{,}06 \cdot 10^{14}$ m⁻³, $\lambda = 10$ km

Ein paar (wichtige) Formeln



$P = n \cdot k \cdot T \leftrightarrow P \cdot V = N \cdot k \cdot T$

Teilchenfluss durch Öffnung:

$$\dot{N} = \frac{1}{kT} \cdot \frac{d}{dt}(P \cdot V) = \frac{1}{kT} \cdot Q_{PV}$$

PV-Fluss in der Vakuumphysik,
$[Q_{PV}]$ = hPa ·l/s

Auftreffrate auf die Fläche A:

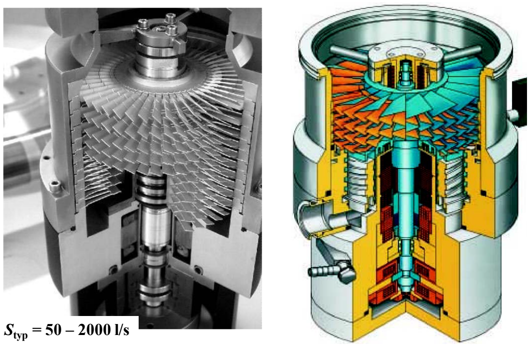
$$\dot{N} = \frac{1}{4} n \cdot \bar{v} \cdot A \qquad \text{mit} \qquad \bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

Maximal möglicher Volumenfluss durch die Fläche (=Leitwert L):

$$Q_{PV} = P \cdot \dot{V} \;\rightarrow\; L = \dot{V} = \frac{kT}{P} \cdot \dot{N} \;\rightarrow\; \boxed{L = \sqrt{\frac{kT}{2\pi m}} \cdot A}$$

Wert für Luft: $L = 11{,}6 \cdot A$ (Ø =10cm ↔ $L \approx 900$ l/s)

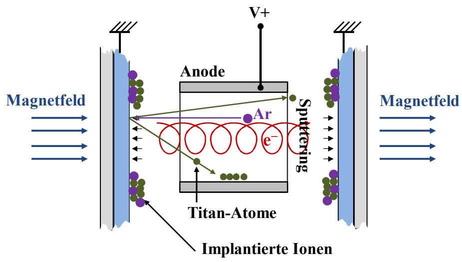
Turbomolekularpumpe



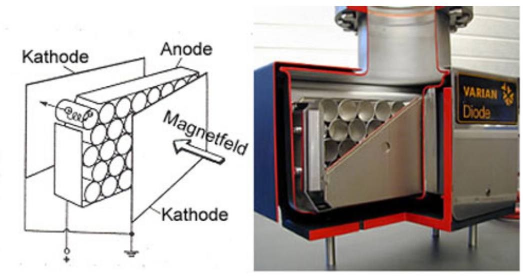
S_{typ} = 50 – 2000 l/s

Ionengetterpumpe

Funktionsprinzip:

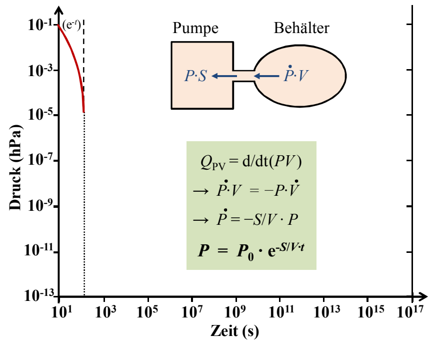


Ionengetterpumpe

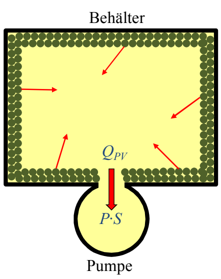


S_{typ} = 50 – 500 l/s

Pumpzeiten



Oberflächendesorption



Oberfläche bedeckt mit vielen Monolagen!

Pro Sekunde Abdampfen von z.B. jedem zehnten Atom (Ø ≈ 1Å):

$$\dot{N}/A = 10^{14}\ 1/(\mathrm{s{\cdot}cm^2})$$

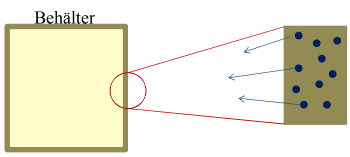
$$\rightarrow Q_{PV} = 10^{-7}\ \frac{\mathrm{hPa \cdot l}}{\mathrm{s \cdot cm^2}} \cdot A$$

A = 1000 cm², S = 100 l/s:

$$\rightarrow P = \frac{Q_{PV}}{S} = 10^{-6}\ \mathrm{hPa}$$

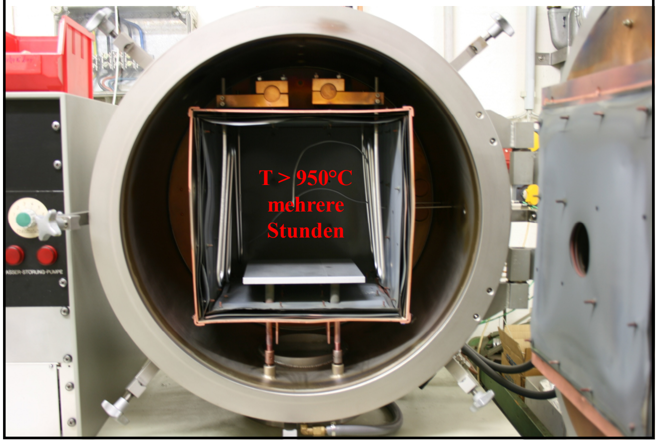
Diffusion

Desorption des im Edelstahl gelösten Wasserstoffs:

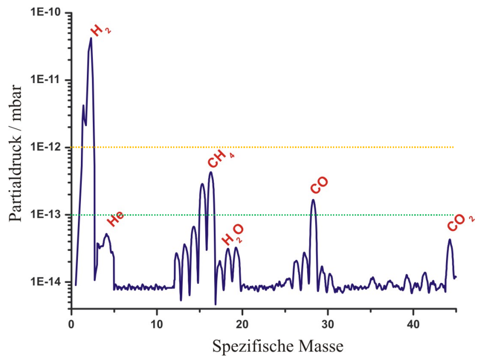


Diffusion von H durch die Wand an die Oberfläche, „Abdampfen“ ins Vakuum

Wasserstoff-Glühen

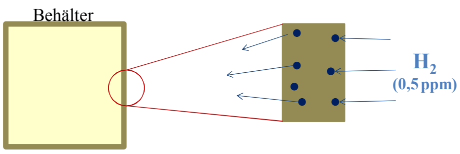


„XHV"-Restgasspektrum



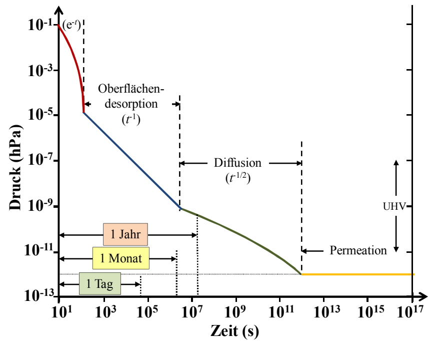
Permeation

Eindringen von atmosphärischem H in die Wand,

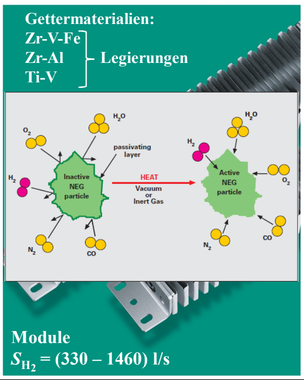


Diffusion von H durch die Wand an die Oberfläche, „Abdampfen" ins Vakuum

Pumpzeiten



NEG-Pumpen



Der Weg zum XHV:

- Nur geeignete **Werkstoffe** verwenden
- **XHV-gerechte Konstruktion** aller Komponenten
- Extrem „**sauberes**" Arbeiten (ggf. im Reinraum)
- Große **Leitwerte**, Minimierung der **Oberflächen**
- **Ausheizen** der gesamten Apparatur bei $T > 200°C$
- Verwendung von **Spezialpumpen**
- Wasserstoffarmes **Glühen** aller Edelstähle

Die Qualität und Reinheit der Oberflächen sind hauptsächlich entscheidend, nicht die Größe der Pumpe!