

Wiederholung: physikalische Verfahren

PVD (Physical Vapour Deposition)

Aufdampfen

Sputtern

Dioden-System

Trioden-System

Magnetron-System („balanced/unbalanced“)

Ionenstrahl-System

Ionenplattieren

DC-Glimm-Entladung

HF-Glimm-Entladung

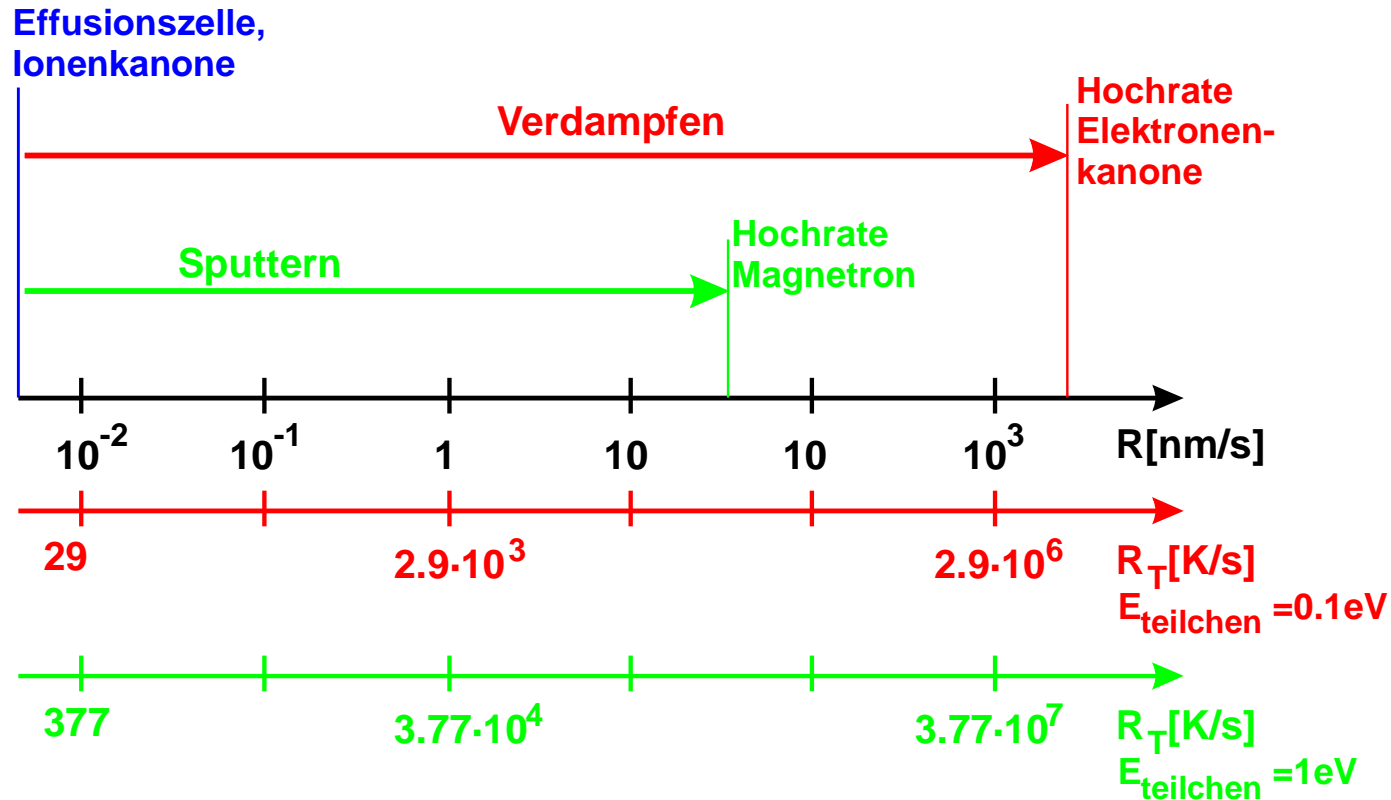
Magnetron-Entladung

Bogen (Arc)-Entladung

Ionen-Cluster-Strahl

Reaktive Varianten der obigen Verfahren

Wiederholung: Raten und Abkühlraten PVD



Diese **extrem hohen erzielbaren Abkühlraten** zeigen, dass PVD - Prozesse (abgesehen vom direkten Übergang Gasphase \rightarrow Festkörper) oft als **Nichtgleichgewichtsprozesse** gesehen werden können.

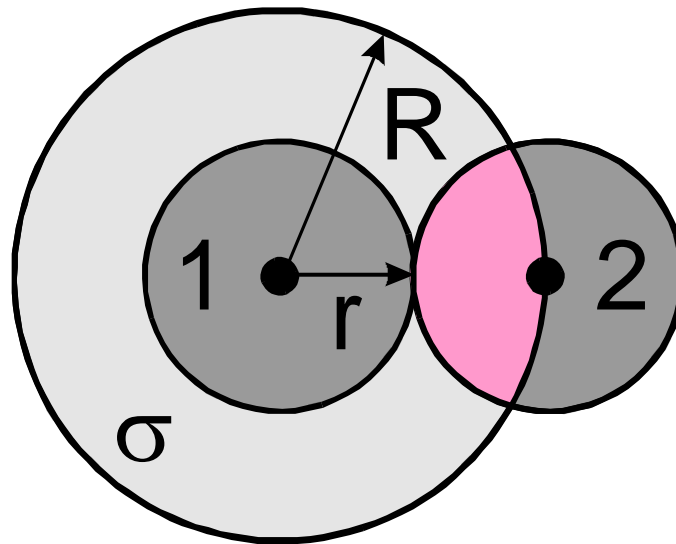
Vakuumphysik

Zentrale Begriffe:

- **Mittlere freie Weglänge:** Strecke, welche ein Gasteilchen (oder ein Beschichtungsteilchen) **ohne Stoss mit einem anderen Teilchen** zurücklegt.
- **Auftreffrate:** Anzahl der Teilchen, welche pro Flächeneinheit und Sekunde auf eine Oberfläche aus einem Gas mit **konstantem Druck** auftreffen.
- **Bedeckungszeit:** Zeit bis zur Ausbildung einer vollständigen, dichtgepackten **Monolage**.

Mittlere Freie Weglänge I

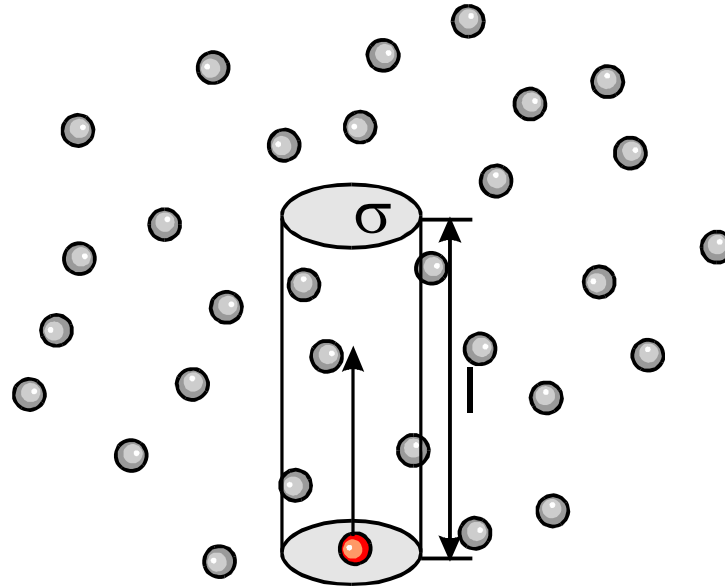
Stoss zweier Teilchen 1 und 2 mit Radius $r = R/2$:



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:

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

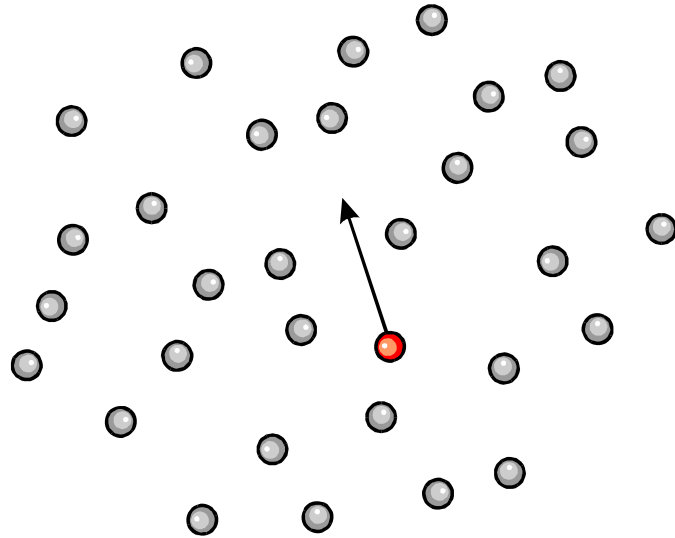
$$\lambda = \frac{1}{n \cdot \sigma} = \frac{1}{\pi \cdot n \cdot R^2} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot n \cdot r^2}$$

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

Mittlere Freie Weglänge IV

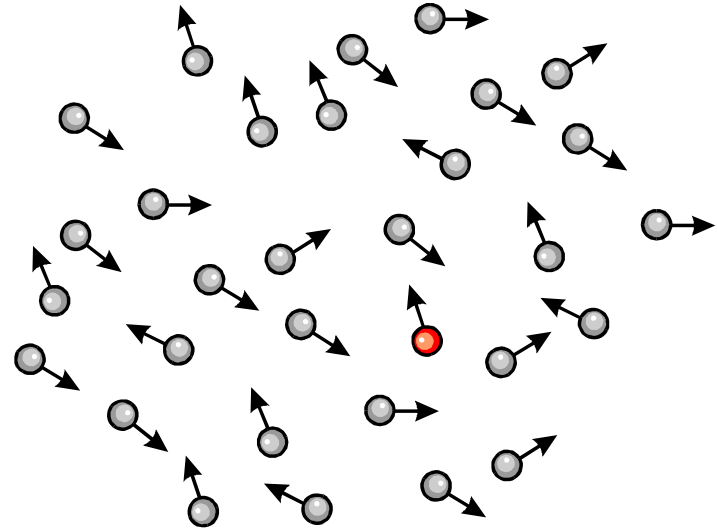
Bewegungszustände des Umgebungsgases:

Energierreiches
Beschichtungsteilchen:
Relativbewegung
vernachlässigt



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

Gasteilchen:
Relativbewegung
nicht vernachlässigt



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

Mittlere Freie Weglänge - Rechenbeispiel

$$\lambda = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot n \cdot r^2} \quad p \cdot V = N \cdot k_B \cdot T \Rightarrow \frac{N}{V} = n = \frac{p}{k_B \cdot T}$$

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

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

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

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

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

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

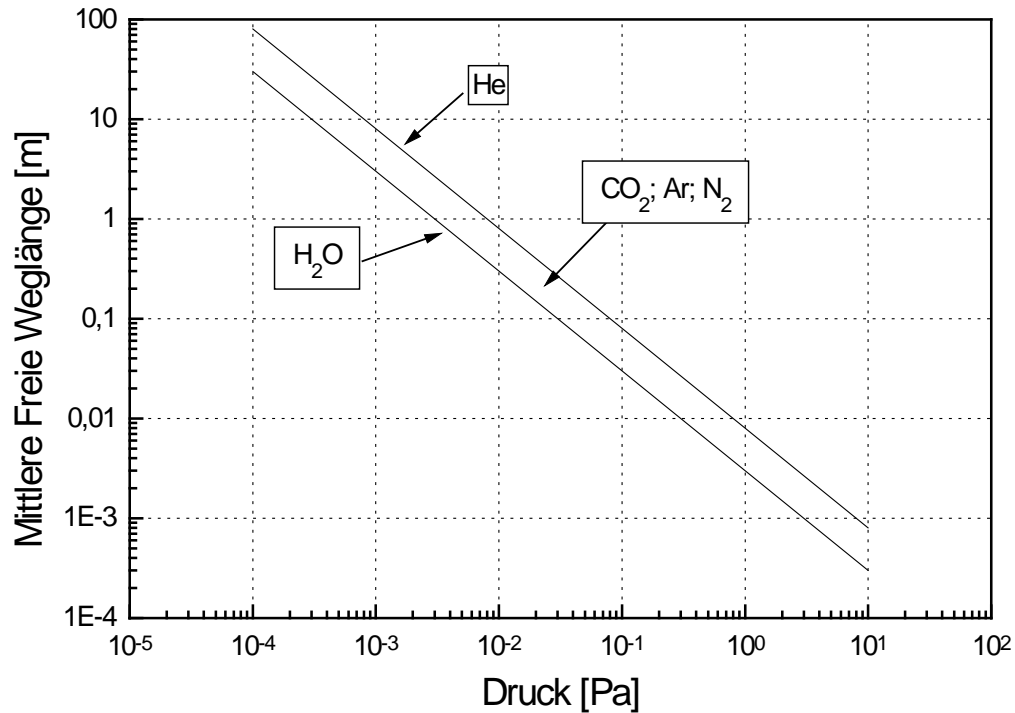
$$= 14.6 \text{ cm}$$

Mittlere Freie Weglänge - Faustformel

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

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

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

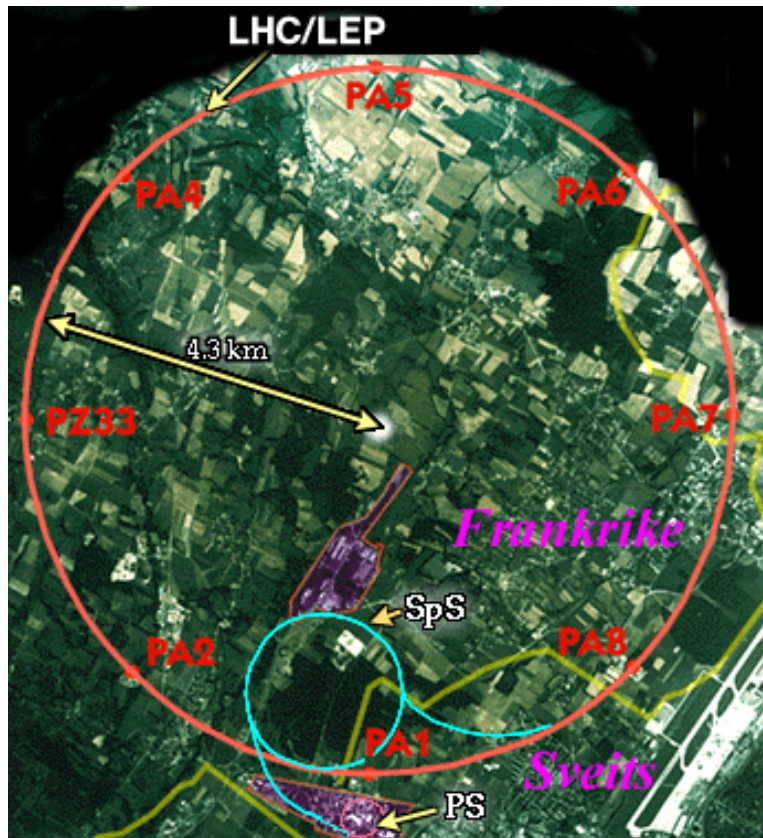


Mittlere Freie Weglänge: Dimensionierung

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.

Gasphasentransport

Clausius'sches Weglängengesetz:

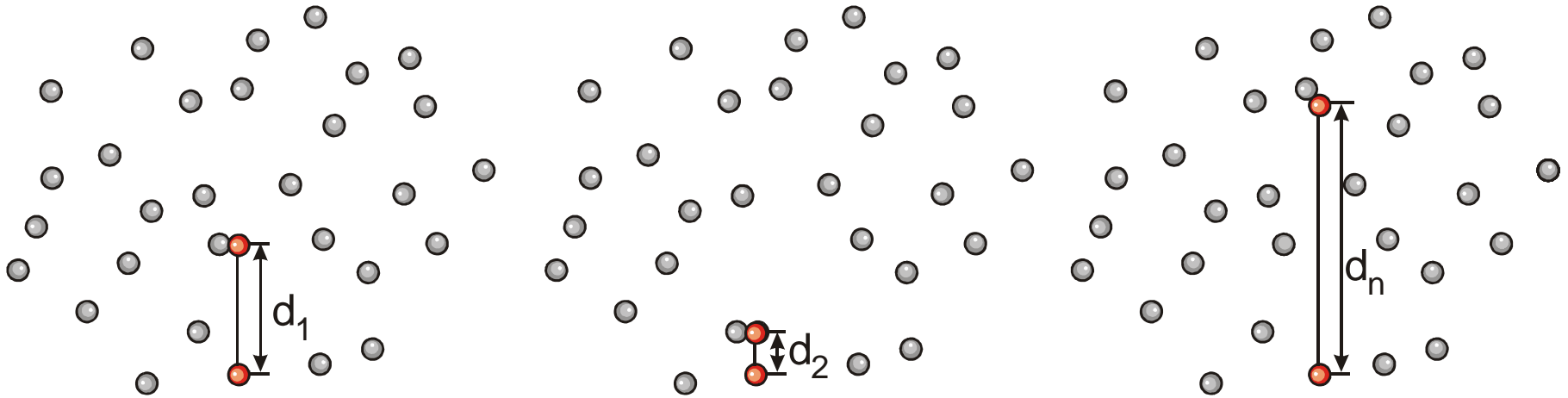
$$N(x) = N(0) \cdot \exp\left[-\frac{x}{\lambda}\right]$$

Dieser Ausdruck besagt:

- Eine signifikante Anzahl an Stößen ereignet sich bereits vor Erreichen der mittleren freien Weglänge.
- Stossfrei wird λ nur von ca. 37% der Teilchen erreicht.
- Auch die mittlere freie Weglänge ist nur eine statistische Masszahl.

Gasphasentransport - Statistik

Betrachte grosses Ensemble von Einzelsituationen:

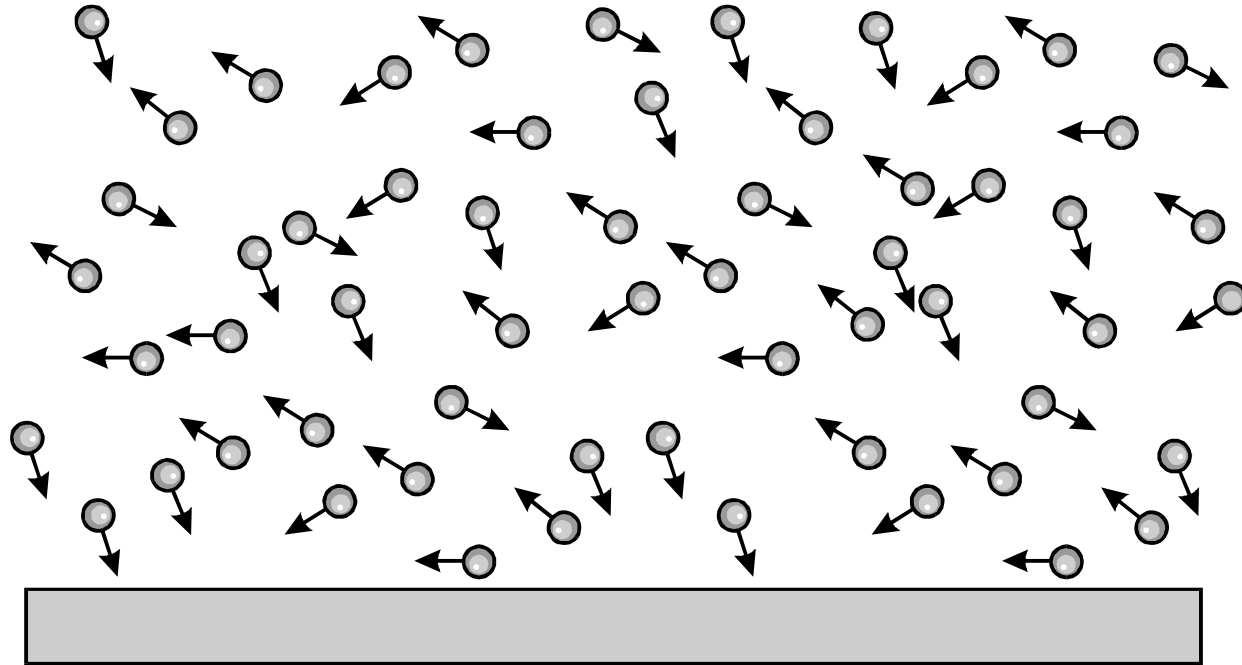


Bilde den Erwartungswert der Stossdistanzverteilung:

$$\langle d \rangle = \frac{\int_0^{\infty} x \cdot \exp\left[-\frac{x}{\lambda}\right]}{\int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{x}{\lambda}\right]} = \lambda$$

Flächenstossrate I

Ausgangssituation: Gasmoleküle treffen auf Oberfläche

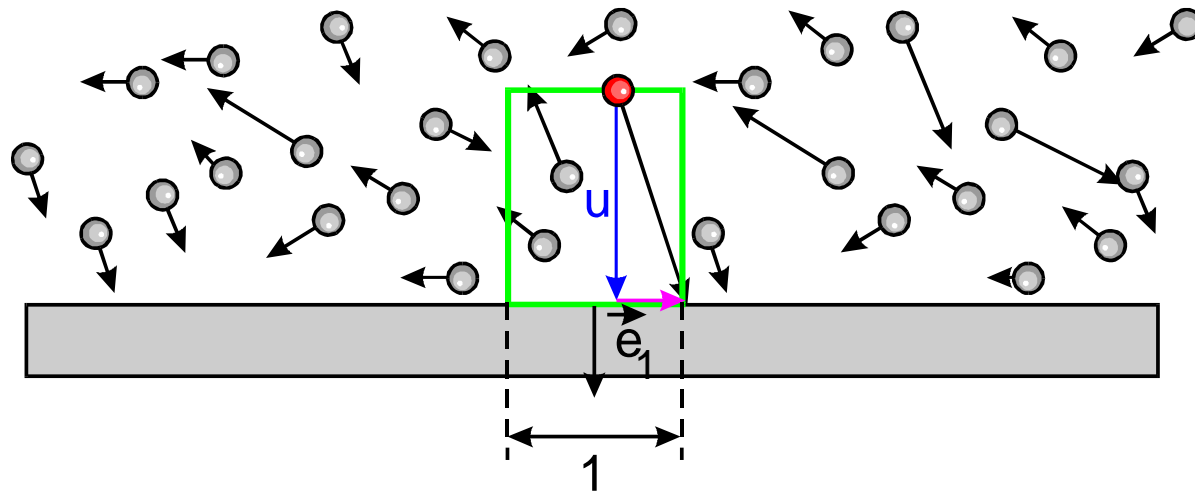


Gesucht: Anzahl der Gasmoleküle, die pro Sekunde auf die Einheitsfläche auftreffen.

Flächenstossrate II

Vorgangsweise: Zylinder mit Einheitsdeckflächen, Höhe u .

Nur Teilchen mit einer **Geschwindigkeitskomponente u** in **Richtung \vec{e}_1** , welche durch die Zylinderdeckfläche durchtreten erreichen in der **Einheitszeit** die Oberfläche.



**Differentielle
Flächenstossrate:**

$$dz_u = \underbrace{u \cdot 1}_{\text{Zylinder-}} \cdot \underbrace{n}_{\text{Teilchen-}} \cdot \Phi(u) \cdot du$$

volumen dichte

Flächenstossrate III

**Differentielle
Flächenstossrate:**

$$dz_u = \underbrace{u \cdot 1}_{\text{Zylinder-
volumen}} \cdot \underbrace{n}_{\text{Teilchen-
dichte}} \cdot \Phi(u) \cdot du$$

**Totale
Flächenstossrate:**

$$Z = \int_0^{\infty} dz_u = n \cdot \int_0^{\infty} u \cdot \Phi(u) \cdot du$$

**Maxwell-Verteilung
einer Geschwindig-
keitskomponente:**

$$\Phi(u) = \sqrt{\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot k_B \cdot T}} \cdot e^{-\frac{m \cdot u^2}{2 \cdot k_B \cdot T}}$$

Flächenstossrate IV

Berechnung der totalen Flächenstossrate:

$$Z = \int_0^{\infty} dz_u = n \cdot \int_0^{\infty} u \cdot \Phi(u) \cdot du =$$

$$= n \cdot \sqrt{\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot k_B \cdot T}} \cdot \underbrace{\int_0^{\infty} u \cdot e^{-\frac{m \cdot u^2}{2 \cdot k_B \cdot T}} du}_{\frac{k_B \cdot T}{m}} = n \cdot \sqrt{\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot k_B \cdot T}} \frac{k_B \cdot T}{m} =$$

$$= \left| \frac{N}{V} = n = \frac{p}{k_B \cdot T} \right| = \frac{p}{m} \cdot \sqrt{\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot k_B \cdot T}}$$

Flächenstossrate - Rechenbeispiel

$$Z = Z(p, T, m) = \frac{p}{m} \cdot \sqrt{\frac{m}{2 \cdot \pi \cdot k_B \cdot T}}$$

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

$$m = 5.3 \cdot 10^{-26} \text{ kg (O}_2\text{)}$$

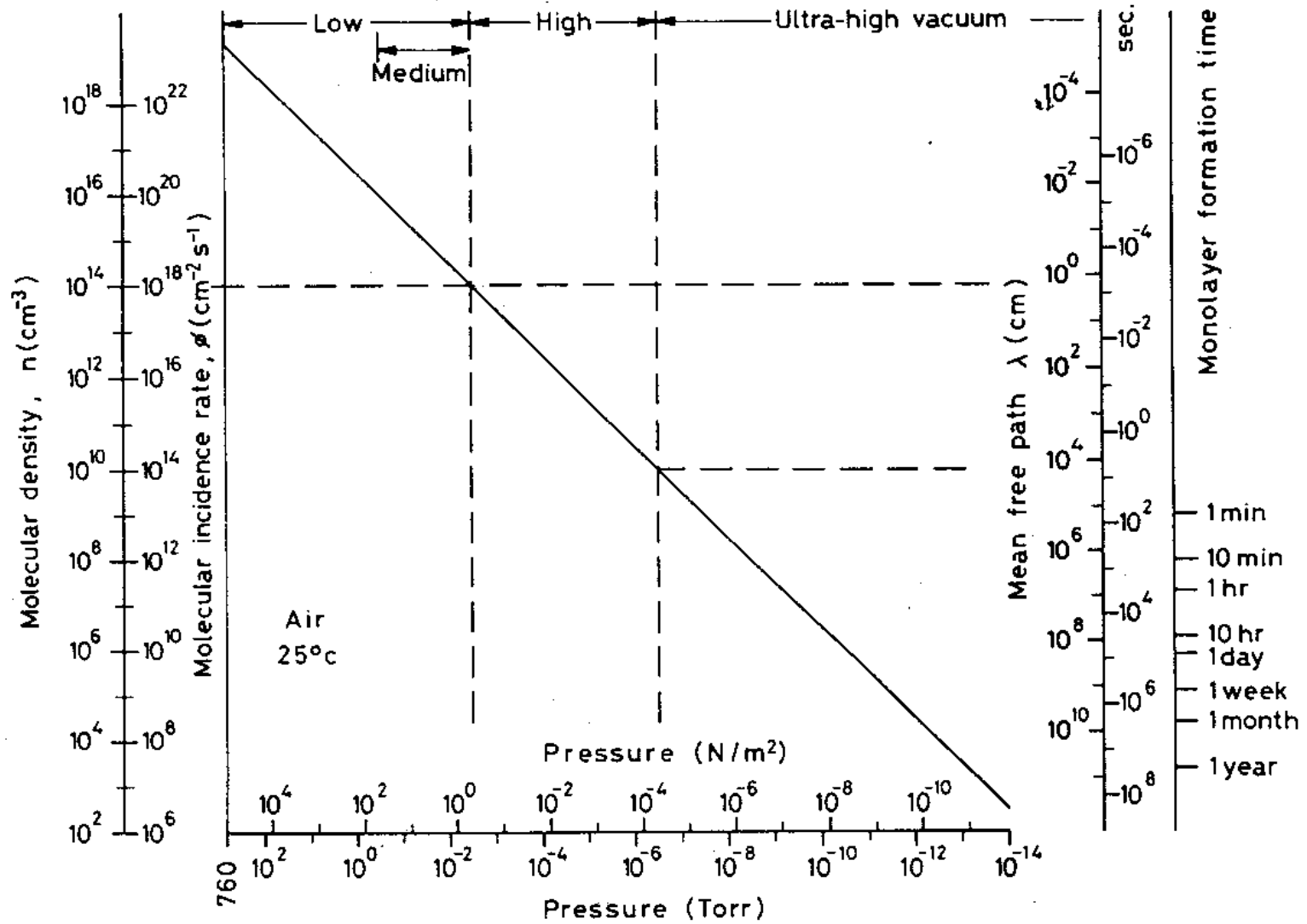
$$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

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

$$Z = 2.7 \cdot 10^{17} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

etwa 270 ML/s

Flächenstossrate - graphisch



Vakuumentypen

| Bezeichnung | Druck [Pa] | Mittl. freie Weglänge [mm] | Bedeckung O ₂ , 300K [ML/s] |
|-----------------------|--------------------------------|--|--|
| Großvakuum | Atm → 1 | $5 \cdot 10^{-5} \rightarrow 5$ | $2.7 \cdot 10^5 \rightarrow 2700$ |
| Feinvakuum | 1 → 0.1 | 5 → 50 | 2700 → 270 |
| Hochvakuum (HV) | 0.1 → 10^{-5} | 50 → $5 \cdot 10^5$ | 270 → 0.027 |
| Ultrahochvakuum (UHV) | $10^{-5} \rightarrow 10^{-10}$ | $5 \cdot 10^5 \rightarrow 5 \cdot 10^{10}$ | 0.027 → $2.7 \cdot 10^{-7}$ |
| Extremes UHV (XHV) | $< 10^{-10}$ | $5 \cdot 10^{10} \rightarrow$ | $2.7 \cdot 10^{-7} \rightarrow$ |

$5 \cdot 10^5$ mm ≡ 500 m

$5 \cdot 10^{10}$ mm ≡ 50 000 km (!)

Pumpentypen

● Gasfördernd:

- + Rotationspumpe
- + Diffusionspumpe
- + Turbomolekularpumpe

Grobovakuum/Feinvakuum
Hochvakuum
Hochvakuum

● Gasbindend:

- + Kühlfallen
- + Kryopumpen
- + Sublimationspumpen
- + Getterpumpen
reaktive Gase
- + Ionengetterpumpen
inerte Moleküle (Aktivierung)

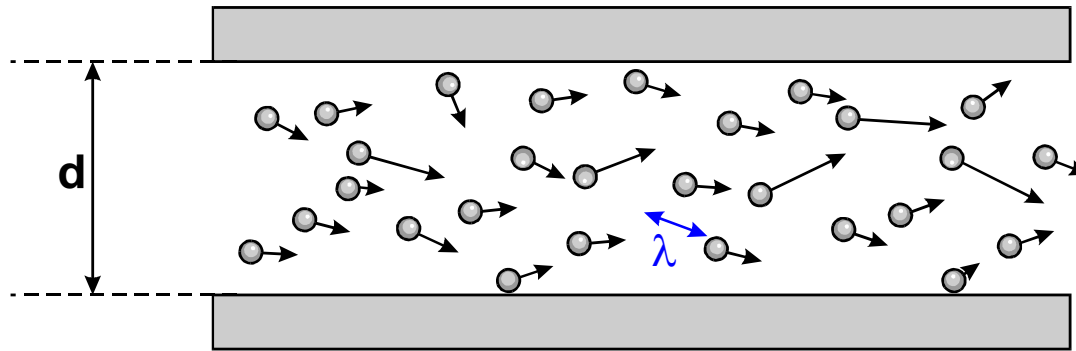
Feinvakuum
Hochvakuum/UHV
UHV
UHV

UHV

Strömungstypen

Strömung durch ein Rohr, Durchmesser d :

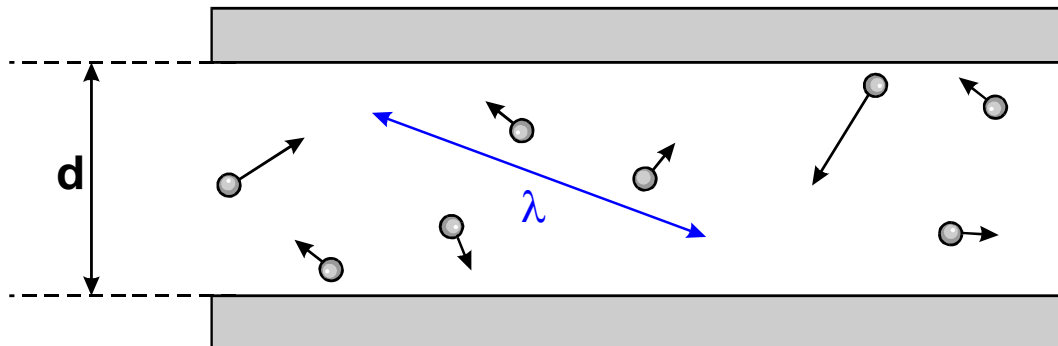
● Laminar/Turbulent: Grobvakuum/Feinvakuum



$$\lambda \ll d$$

Teilchenstöße
wahrscheinlich,
globale Strömung

● Molekular: Hochvakuum, UHV



$$\lambda \gg d$$

Wandstöße
wahrscheinlich,
keine Strömung

Strömungstypen und Pumpsysteme

- **Effizient im laminaren Bereich:**
 - + **Gasfördernde Pumpen:**
 - Rotationspumpe
 - Wasserstrahlpumpe
 - + **Rotorbasierende Pumpen, aber nicht Turbomolekularpumpen**
- **Effizient im molekularen Bereich:**
 - + **Gasfördernde Pumpen:**
 - Diffusionspumpe
 - Turbomolekularpumpe
 - + **Gasbindende Pumpen**

Designkriterien für Vakuumsysteme

- **Mittlere freie Weglänge λ :**
 - + Auswahl des Pumpentypes
 - + Pumpgeschwindigkeit
 - + Dimensionierung der Leitungsdurchmesser

- **Flächenstossrate Z:**
 - + Bedeckungszeiten (z. B. Oberflächenanalytik)
 - + Einbau von Verunreinigungen (Verhältnis der Auftreffrate der Beschichtungsteilchen und der Restgasteilchen)

Einbau von Verunreinigungen

Haftkoeffizient α :

$$\alpha = 1 - \frac{Z_{\text{Des}}}{Z}$$

Z ... Auftreffrate
 Z_{Des} ... Desorptionsrate

- **Hoher Haftkoeffizient $\alpha \approx 1$ ($Z_{\text{Des}} \approx 0$):**

Reaktive Gase:



langkettige Kohlewasserstoffe (Pumpenöle)

- **Geringer Haftkoeffizient $\alpha \ll 1$ ($Z_{\text{Des}} \approx Z$):**

Inerte Gase:

Edelgase



Kohlewasserstoffe ohne reaktive Gruppen

Einbau von Verunreinigungen: Beispiel

Beschichtungsmaterial: Al, $m = 4.5 \cdot 10^{-26}$ kg
Beschichtungsrate Al: 10 nm/s = $3 \cdot 10^{19}$ At/(m²s⁻¹)
Verunreinigung: O₂, $m = 5.3 \cdot 10^{-26}$ kg
Haftkoeffizient α : ca. 1 für Al und O₂
Tempertur: 300K

Gesucht: Restgasdruck, bei dem 1% Sauerstoff in die Schicht eingebaut wird

$$\frac{Z_{O_2}}{Z_{Al}} = 10^{-2} = \frac{1}{9 \cdot 10^{18}} \cdot \frac{p}{m_{O_2}} \cdot \sqrt{\frac{m_{O_2}}{2 \cdot \pi \cdot k_B \cdot T}}$$

$$p = 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{19} \cdot m_{O_2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot k_B \cdot T}{m_{O_2}}} = 1.1 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$$

Designkriterien: Zusammenfassung

- **Mittlere freie Weglänge λ :**
Beeinflusst im wesentlichen die Gasdynamik. Bereits bei relativ hohen Drücken (10^{-2} Pa) erreicht die Mittlere freie Weglänge die geometrischen Dimensionen der Beschichtungsanlage ($\lambda \approx 1\text{m}$).
- **Flächenstossrate Z:**
Ist der wesentliche Parameter für die Schichtreinheit. Der Restgasdruck muss zumindest im mittleren Hochvakuum liegen, damit abgeschiedene Schichten eine hinreichende Reinheit aufweisen.