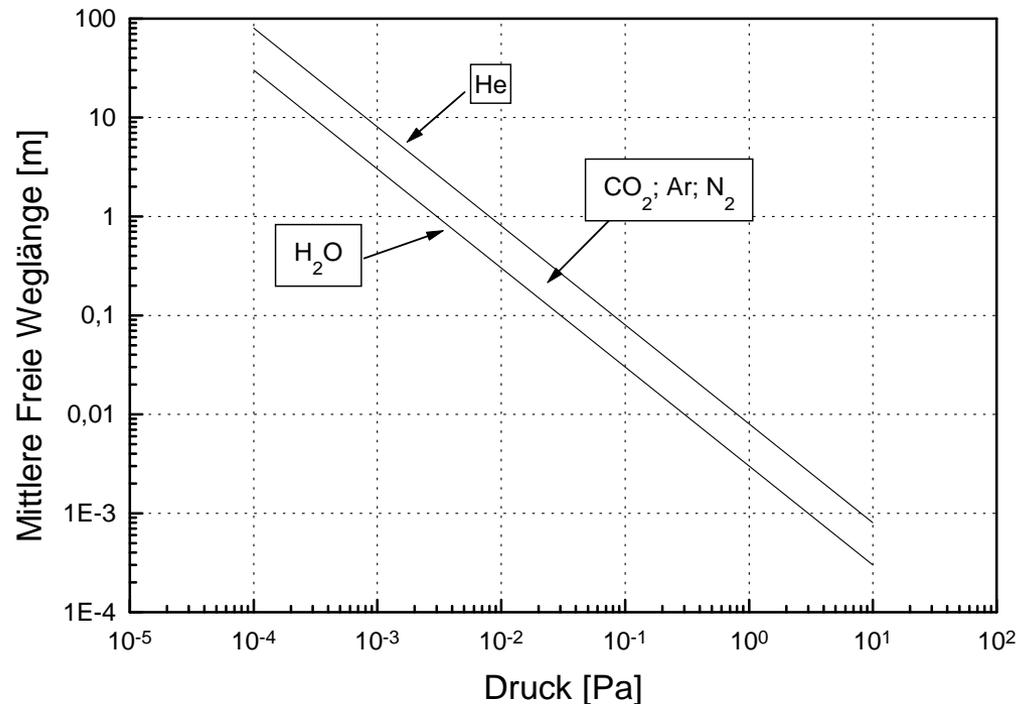


Wiederholung: Mittlere Freie Weglänge

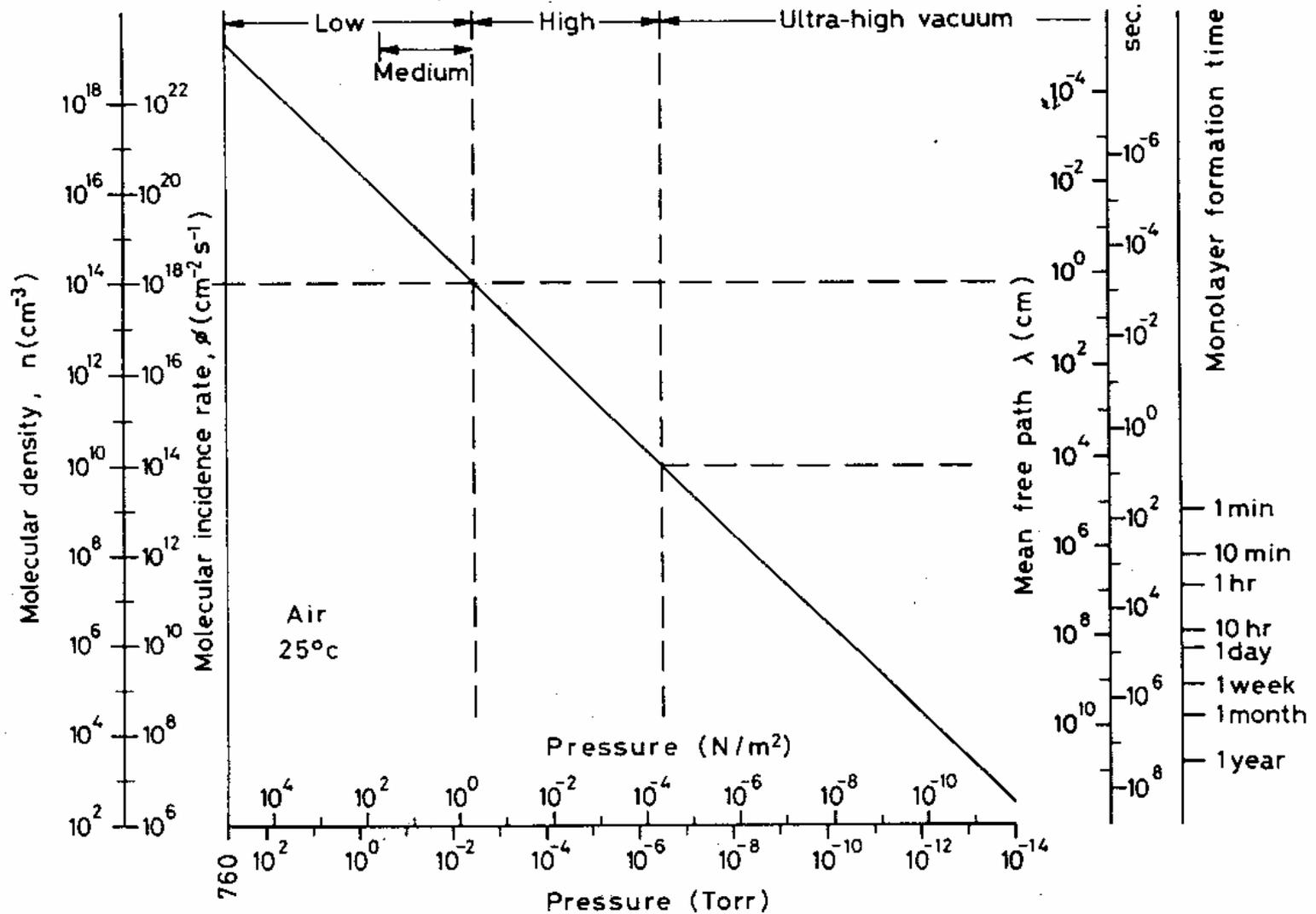
$$\lambda p = 5 \text{ mm Pa}$$

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

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



Wiederholung: Flächenstossrate

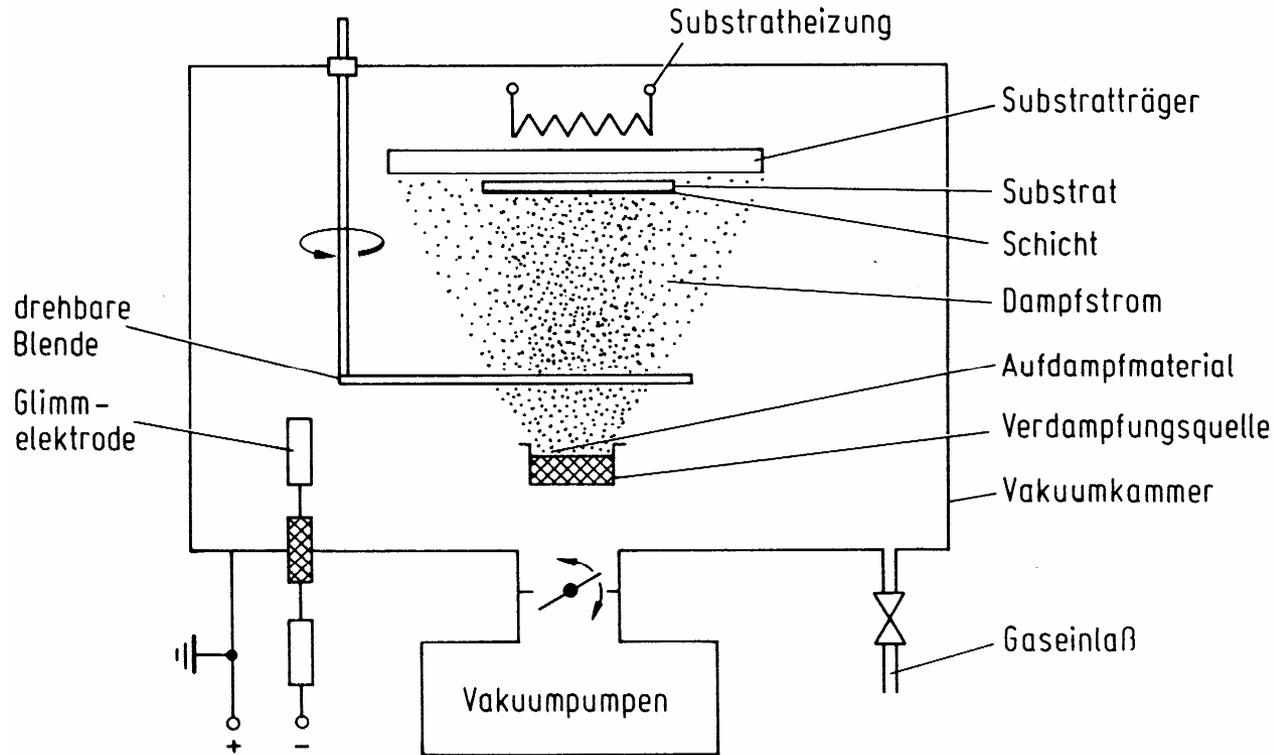


Wiederholung: Designkriterien

- **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.

Der Aufdampfprozess

Schema:



Verdampfungsrate: Temperaturabhängigkeit

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

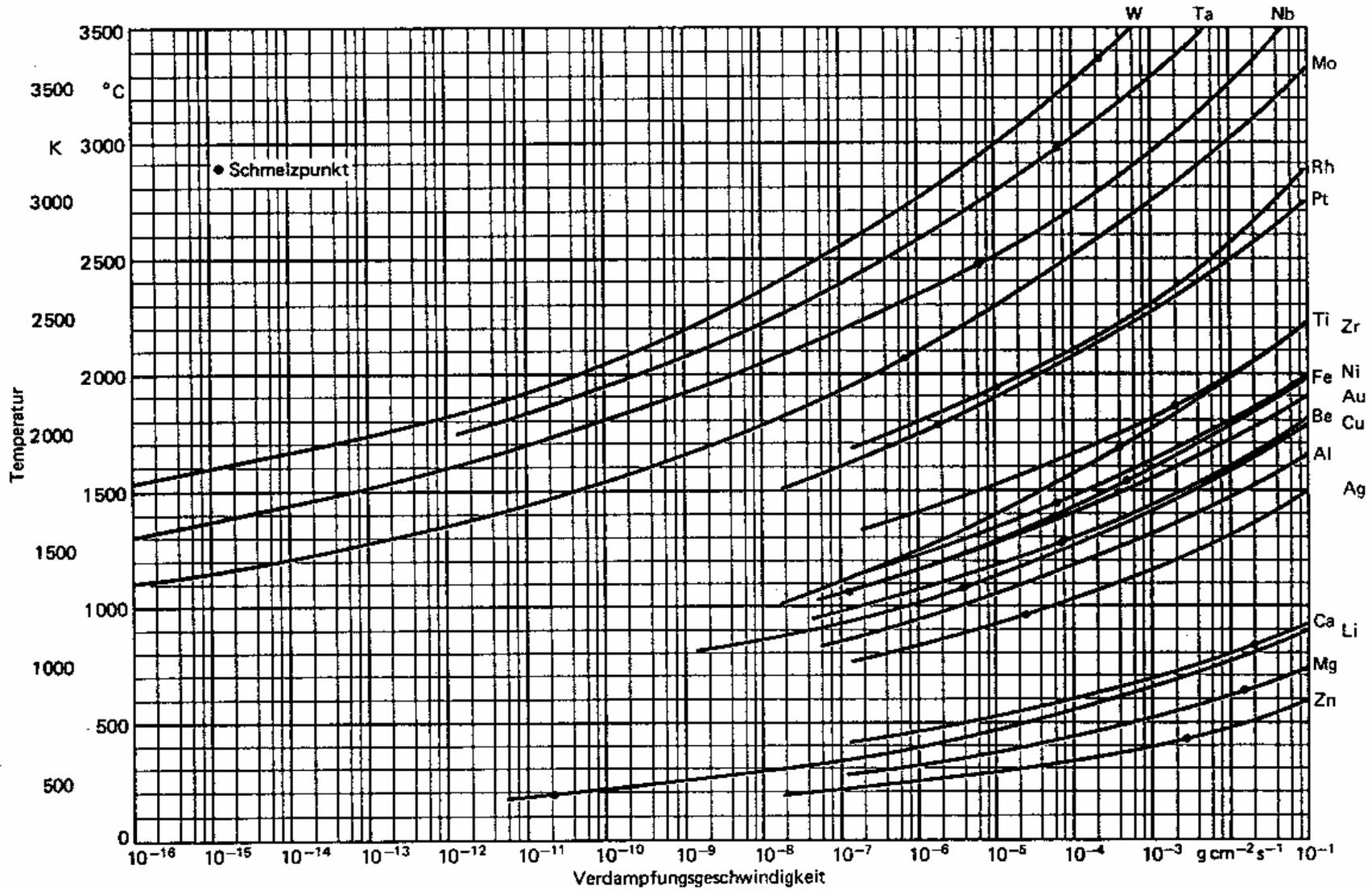
p^* = Temperaturabhängiger Dampfdruck des Quellenmaterials
 a_v = Verdampfungskoeffizient

$$p^* = p_0 \exp[-(E_v / (k_B T_Q))]$$

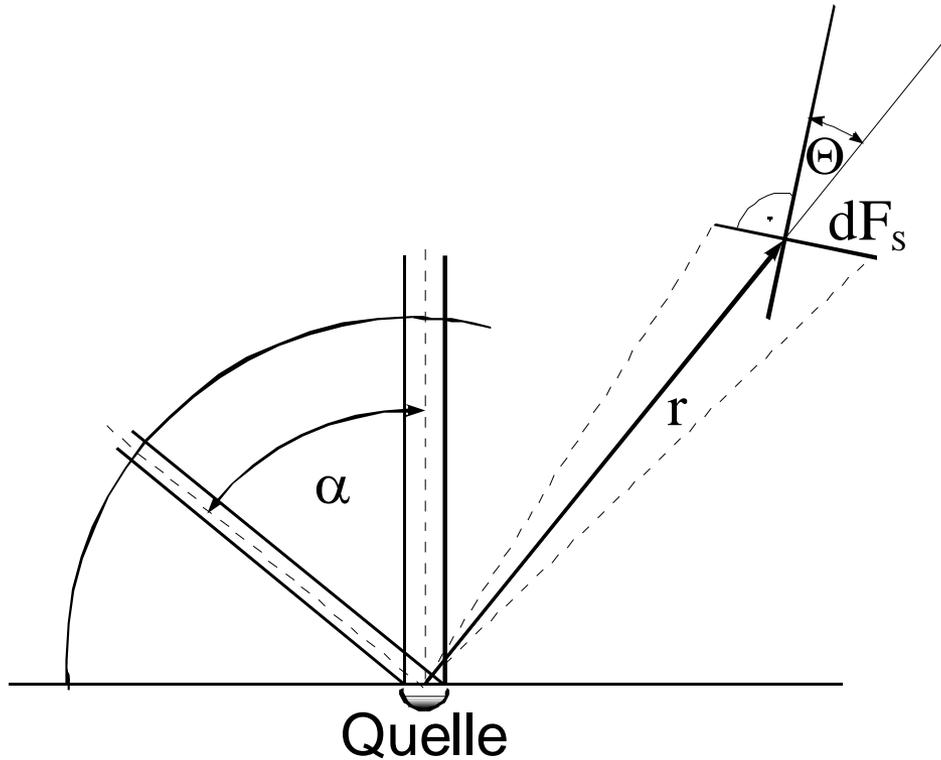
T_Q = Quelltemperatur

p_0 = Referenzdampfdruck, z. B. bei RT

Verdampfungsgeschwindigkeiten



Räumliche Verteilung der Dampfstromdichte



$$\Phi(\alpha) = \frac{dm}{d\Omega} = \frac{m_1}{\pi} \cdot \cos \alpha$$

Neigung des Substrates:

$$R(\alpha, \theta, r) = \Phi(\alpha) \cdot \cos \Theta \cdot \frac{1}{r^2}$$

Infinitesimal in den Raumwinkel emittierte Masse dm:

$$dm = \frac{m_1}{\pi} \cdot \cos \alpha \cdot d\Omega$$

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \sin \alpha \cdot d\alpha \cdot d\varphi$$

Normierung:

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha &= \\ &= 2 \cdot \pi \cdot \int_0^1 u \cdot du = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{2} = \pi \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \int_{d\Omega} dm = m_1$$

Hertz-Knudsen-Formel

$$R(\alpha, \theta, r) = \frac{m_1}{\pi} \cdot \cos \alpha \cdot \frac{\cos \Theta}{r^2}$$

Spezielle Geometrien:

Planes Substrat:

$$R(\alpha, \theta, r) = \frac{m_1}{a^2 \cdot \pi} \cdot \cos^4 \alpha$$

Halbkugel:

$$R(\alpha, \theta, r) = \frac{m_1}{\pi \cdot a^2} \cdot \cos \alpha$$

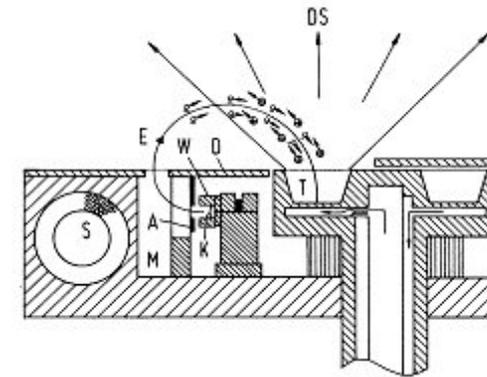
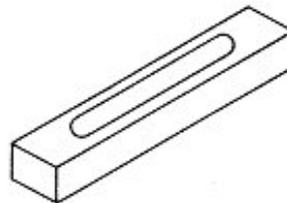
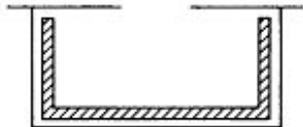
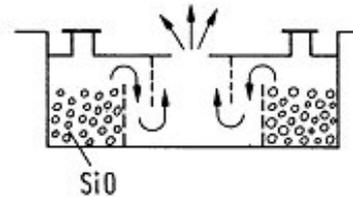
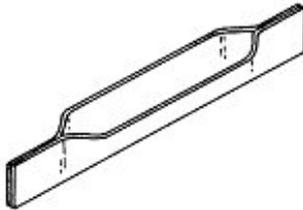
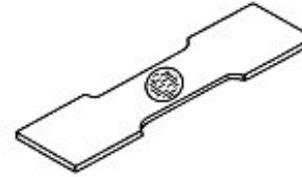
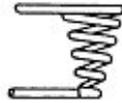
**Quelle im Pol
(Knudsen-Kugel):**

$$R(\alpha, \theta, r) = \frac{m_1}{\pi} \cdot \frac{1}{4 \cdot a^2} = \text{const}$$

a ... Abstand bzw. Radius der Kugeln

Verdampfungsquellen

Widerstandsgeheizte Quellen



Elektronenkanone

Dampfdruck in Legierungen I

Raoult'sches Gesetz:

Annahme: Legierung A/B als ideale Lösung:

$$W_{AA} = W_{BB} = W_{AB}$$

**Behauptung: Dampfdruck der Materialien
in Lösung ist kleiner als in Reinform:**

$$p_A^* < p_A$$

* ... in Lösung

Dampfdruck in Legierungen II

Beweis des Raoult'sches Gesetzes:

$$p_A^* = \int \underbrace{m_A \cdot u_A}_{\text{Impuls}} \cdot \underbrace{n_A \cdot u_A \cdot \Phi(u_A)}_{\text{differentielle Flächenstossrate}} \cdot du_A$$

$$p_A = \int n \cdot m_A \cdot u_A \cdot u_A \cdot \Phi(u_A) \cdot du_A$$

$$p_A^* = \frac{n_A}{n} \int n_A \cdot m_A \cdot u_A^2 \cdot \Phi(u_A) \cdot du_A$$

$$p_A^* = \frac{n_A}{n} \underbrace{\int n \cdot m_A \cdot u_A^2 \cdot \Phi(u_A) \cdot du_A}_{p_A}$$

$$p_A^* = \frac{n_A}{n} \cdot p_A$$

Raoult'sches Gesetz der Dampfdruckerniedrigung in Lösungen

Dampfdruck in Legierungen III

Raoult'sches Gesetz der Dampfdruckerniedrigung in idealen Lösungen:

$$p_A^* = \frac{n_A}{n} \cdot p_A$$

Raoult'sches Gesetz der Dampfdruckerniedrigung in nicht-idealen Lösungen:

$$p_A^* = f_A \cdot \frac{n_A}{n} \cdot p_A$$

f_A ... Aktivitätskoeffizient

Verdampfen von Legierungen - Voraussetzungen

- **Voraussetzung 1:**

Es gilt das Raoult'sche Gesetz der Dampfdruckerniedrigung in Lösungen. Die vorliegende Legierung wird als ideale Lösung angenommen

- **Voraussetzung 2:**

Die Lösung ist während des gesamten Verdampfungs Vorganges homogen, das bedeutet, die Konstituenten sind im Schmelzgut immer homogen verteilt. Insbesondere existiert kein Zusammensetzungsunterschied zwischen Oberfläche und Volumen der Schmelze.

Verdampfen von Legierungen I

$$\frac{dN}{dA \cdot dt} = \frac{p}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot m \cdot k_B \cdot T}} = R_{\text{evap}} [\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$\frac{dN}{dA} = dn \quad \text{Teilchen verdampfen nur von der Oberfläche}$$

$$\frac{dn_A}{dt} = \frac{p_A^*}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot m_A \cdot k_B \cdot T}} \quad p_A^* = \frac{n_A}{n} \cdot p_A$$

$$\frac{dn_B}{dt} = \frac{p_B^*}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot m_B \cdot k_B \cdot T}} \quad p_B^* = \frac{n_B}{n} \cdot p_B$$

Verdampfen von Legierungen II

Verhältnis der Änderungen der Teilchenzahlen in der Schmelze

$$\frac{dn_A}{dn_B} = \frac{p_A}{p_B} \underbrace{\sqrt{\frac{m_B}{m_A}}}_{\kappa} \cdot \frac{n_A}{n_B} = \kappa \cdot \frac{n_A}{n_B}$$

n_A, n_B = Materialanteil des Stoffes A, B

p_A, p_B = Dampfdruck von A, B

m_A, m_B = Masse von A, B

κ = Verdampfbarkeitskoeffizient

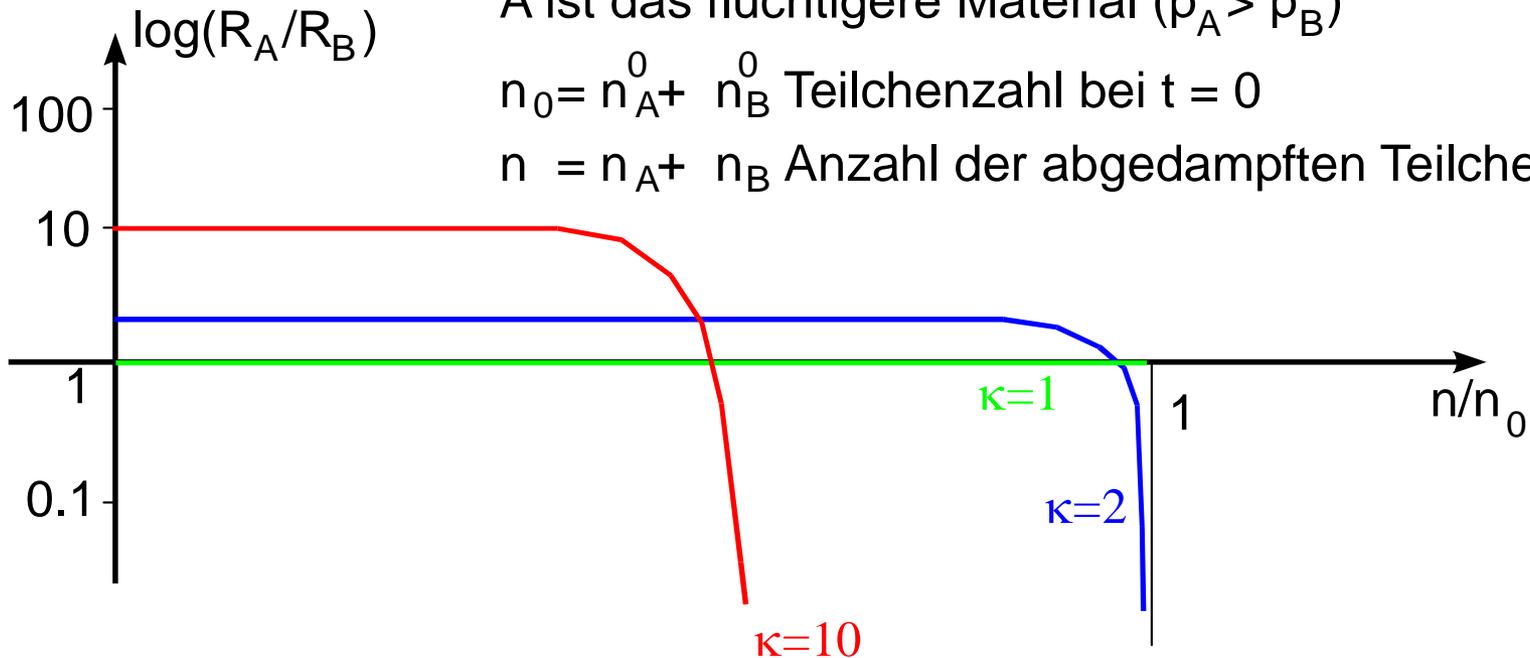
Verdampfen von Legierungen III

Legierungszusammensetzung: A:B=1:1

A ist das flüchtigere Material ($p_A > p_B$)

$n_0 = n_A^0 + n_B^0$ Teilchenzahl bei $t = 0$

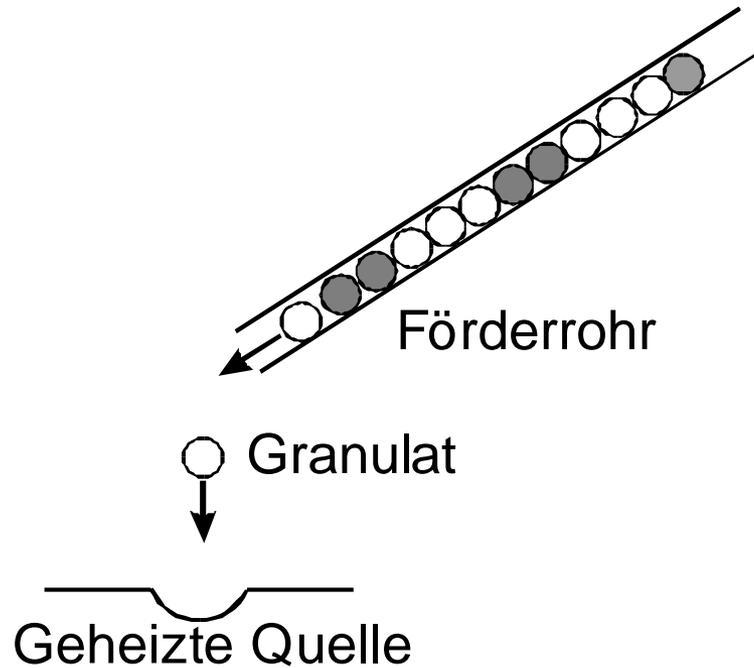
$n = n_A + n_B$ Anzahl der abgedampften Teilchen



Das Verdampfen einer Legierung entspricht einer fraktionierten Destillation. Grund dafür ist der Materialtransport in der Schmelze, welcher immer für Nachschub der flüchtigen Komponente sorgt.

Spezielle Verdampfungsverfahren

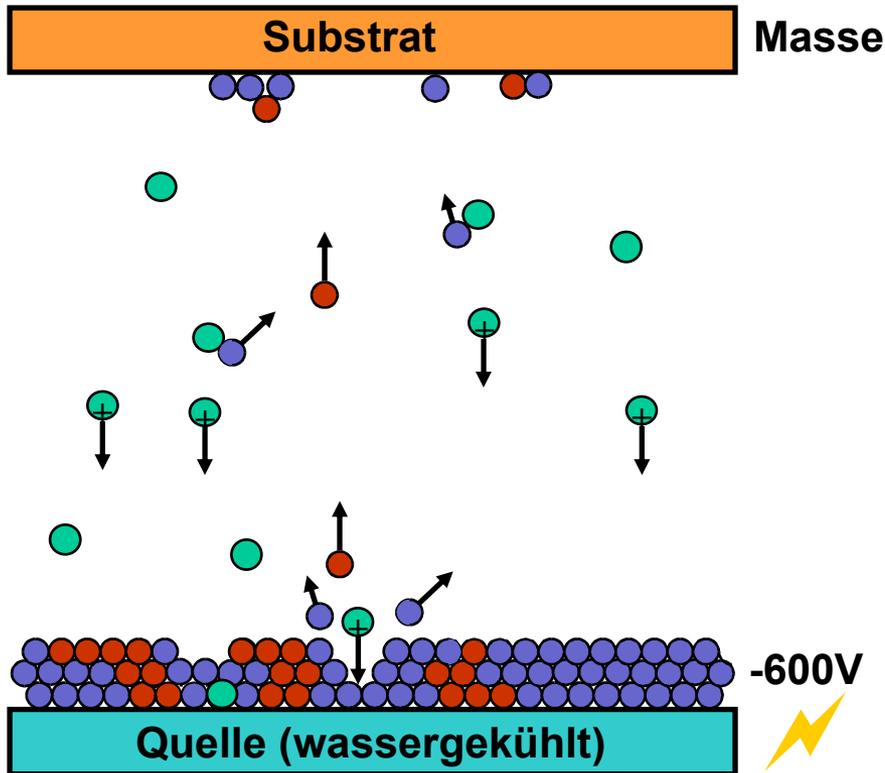
Flash-Verdampfen



Mehrquellen-Verdampfen

Der Sputterprozess I

Elementarprozesse:



- ● Beschichtungsgut
- ⊕ Arbeitsgas, ionisiert oder neutral

Besondere Kennzeichen:

- *Feste Quelle, d. h. beliebige Quellenform*
- *Geringe Abscheidetemperatur*
- *Hohe Abscheideraten erreichbar*
- *Weites Parameterfeld*
- *Schichtzusammensetzung = Quellenzusammensetzung*
- *Gute Schichthaftung*
- *Interessante Schichteigenschaften*

Der Sputterprozess - Teilchenemission

Arten der losgelösten Teilchen:

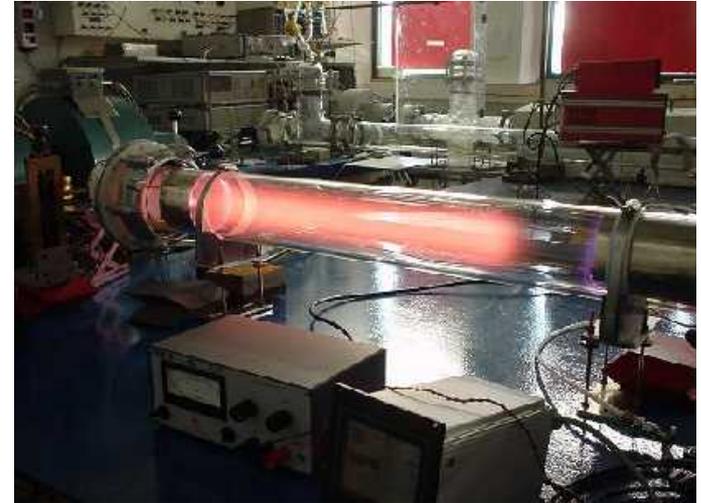
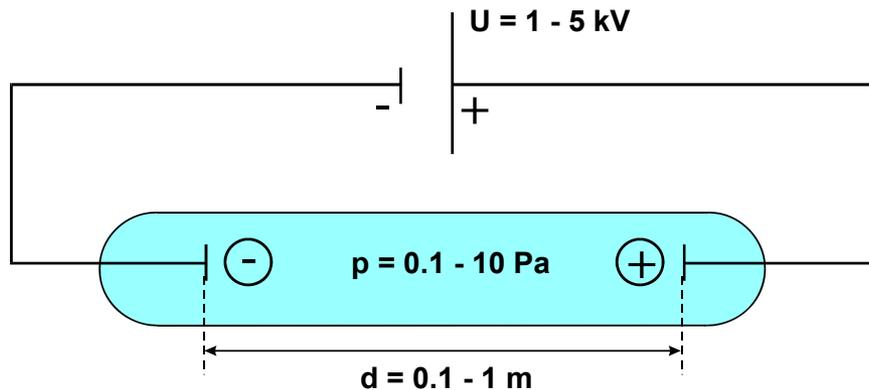
- Atome
- Ionen
- Cluster
- Moleküle
- Sekundärelektronen

Bereitstellung der Projektile:

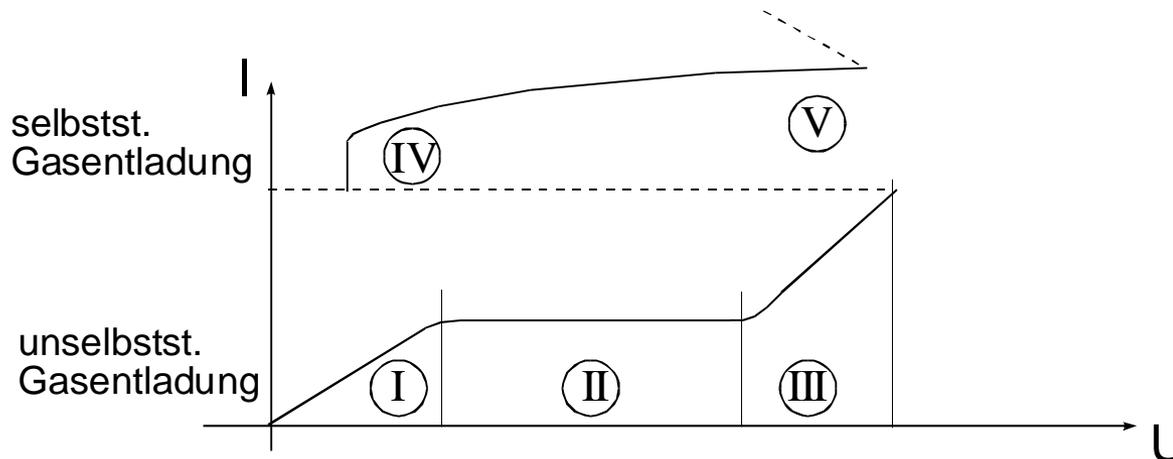
- Gasentladung
- Ionenkanone

Die Gasentladung - Grundlagen

Versuchsanordnung:



Kennlinie:



- I: Ohm'sches Verhalten
- II: Sättigungsbereich
- III: Stossionisation/
Townsend-Entladung
- IV: normales Glimmen
- V: anormales Glimmen
Sekundärelektronen-
emission

Die Gasentladung (Diodenentladung) - Schätzung

Die Grundlage einer Gasentladung ist, dass **Elektronen** in einem **verdünnten Gas** ($p = 0.1 - 10 \text{ Pa}$) durch anlegen einer **Spannung** im **kV-Bereich** innerhalb der **mittleren freien Weglänge** λ genügend Energie zur **Stossionisation** der **Gasatome** gewinnen.

Abschätzung:

$$p = 1 \text{ Pa}$$

$$E_{\text{ion}} = 10 \text{ eV} = W_{\text{el}}$$

Elektrodenabstand $d = 1 \text{ m}$

Gesucht:

Anzulegendes Potential U

$$\lambda_{1\text{Pa}} = 5 \text{ mm}$$

$$W_{\text{el}} = E \cdot e \cdot \lambda = \frac{U}{d} \cdot e \cdot \lambda$$

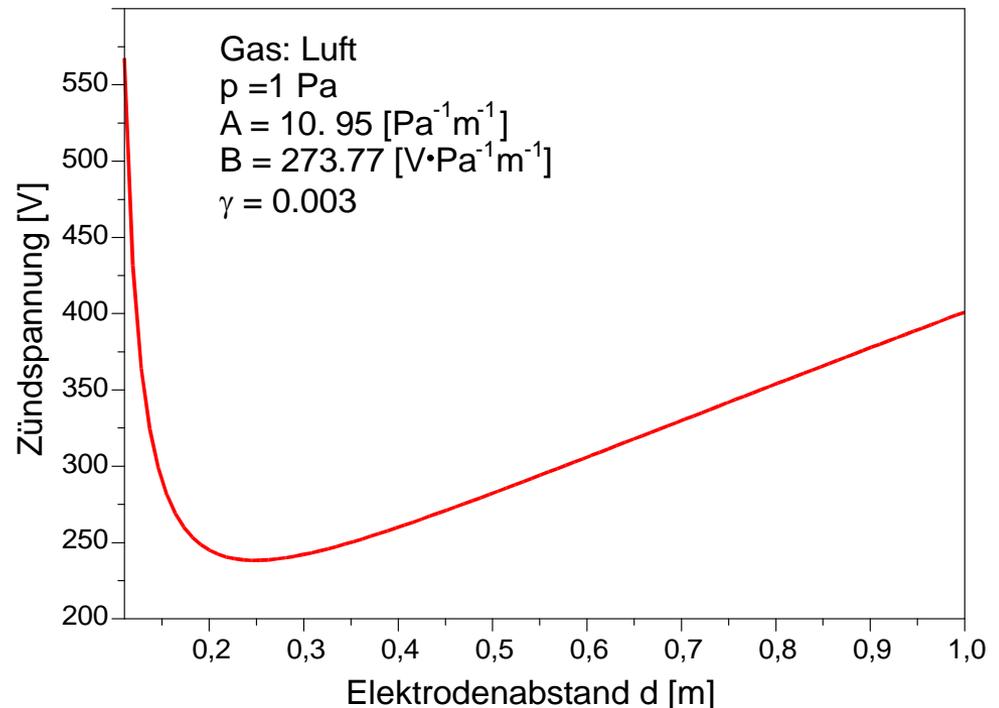
$$U = \frac{d \cdot W_{\text{el}}}{e \cdot \lambda} = 2 \text{ kV}$$

Paschen - Gesetz

Der Zusammenhang zwischen dem **minimalen Elektrodenabstand d** , der **Zündspannung U** und dem **Gasdruck p** zum Zünden einer Gasentladung ist durch das **Paschen-Gesetz** gegeben:

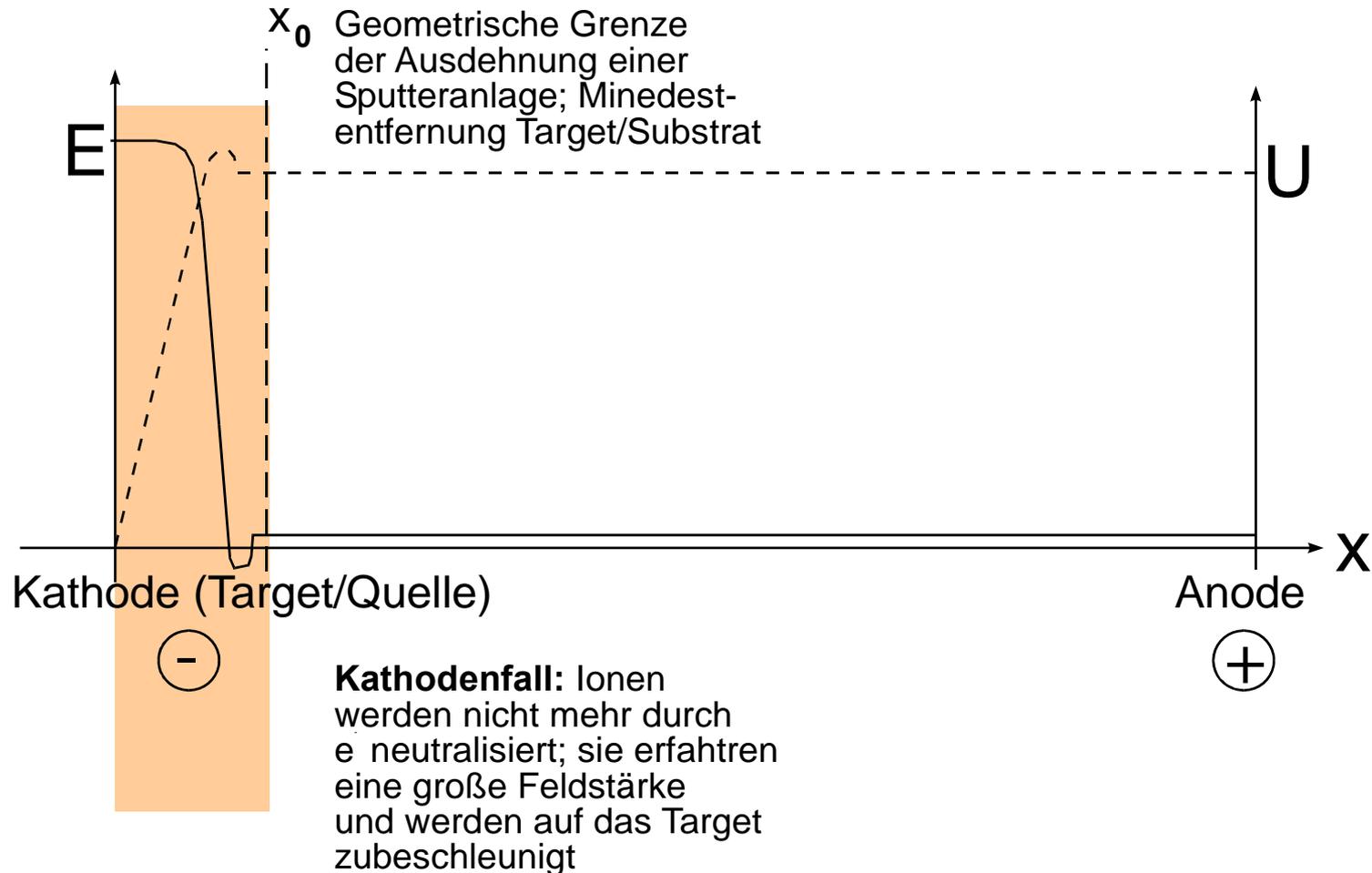
$$U = \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln \left[\frac{A \cdot p \cdot d}{\ln(1/\gamma)} \right]}$$

A, B: Gasartabhängige, empirische Konstante
 γ : Sekundärelektronenemissionskoeffizient



Die Gasentladung - Dunkelraum

Feld- und Potentialverhältnisse in der Gassäule:



Modifikationen der Diodenentladung

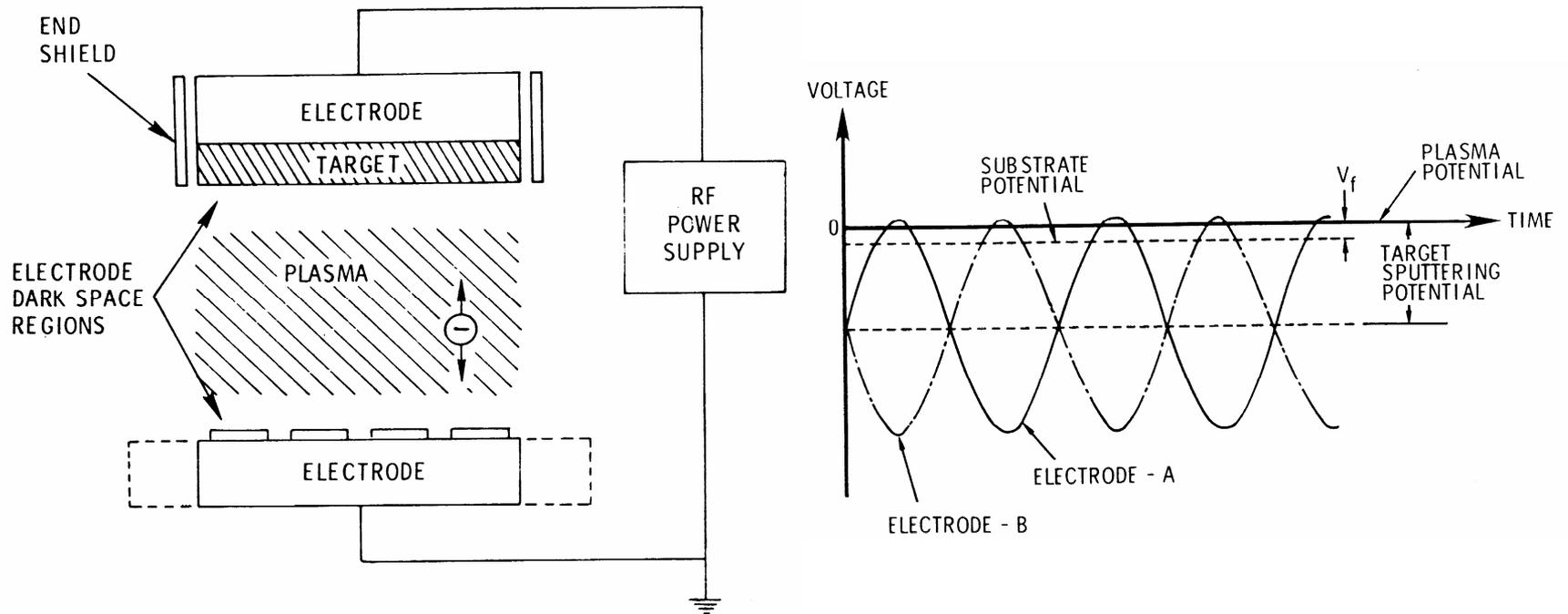
Zielsetzungen:

- a) Verkleinerung des Dunkelraumes
- b) Steigerung des Ionenstromes zwecks Ratensteigerung
- c) Druckverringerung des Hintergrundgases (Reinheit)
- d) Verbreiterung der Materialklasse (Halbleiter/Isolatoren)

Verfahrensmodifikationen:

- RF-Sputtern: c/d
- Triodensputtern: a-c
- Magnetronsputtern: a-c
- RF-Magnetron: a-d
- Ionenstrahlsputtern: c; Ionenenergie wählbar

Hochfrequenzsputtern (RF-Sputtern) I



$f = 13,56$ MHz (freigegebene Industriefrequenz)

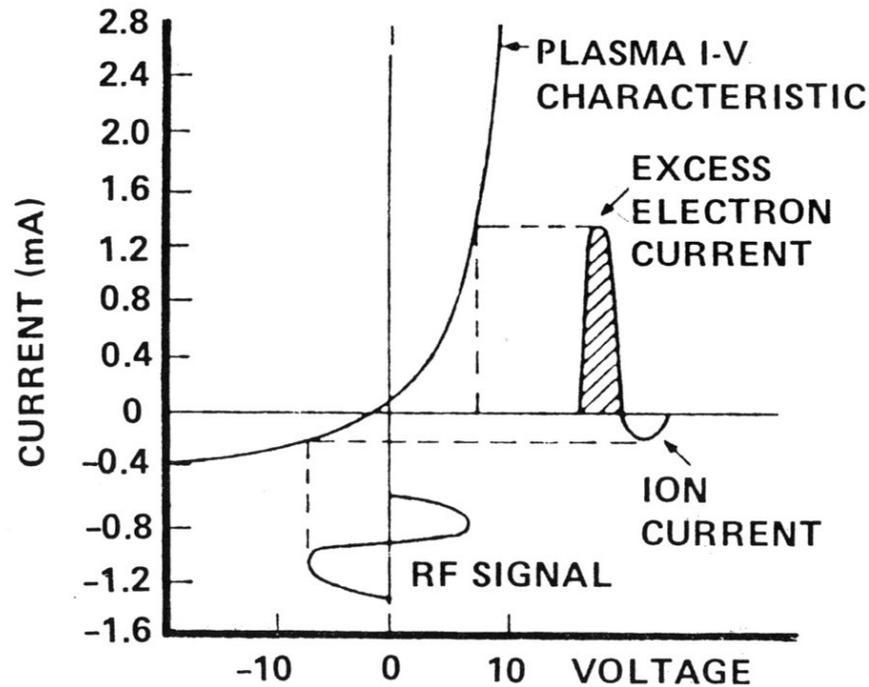
*** Höhere Elektronendichte**

*** Isolatoren können zerstäubt werden**

*** Gasdruck kann verringert werden**

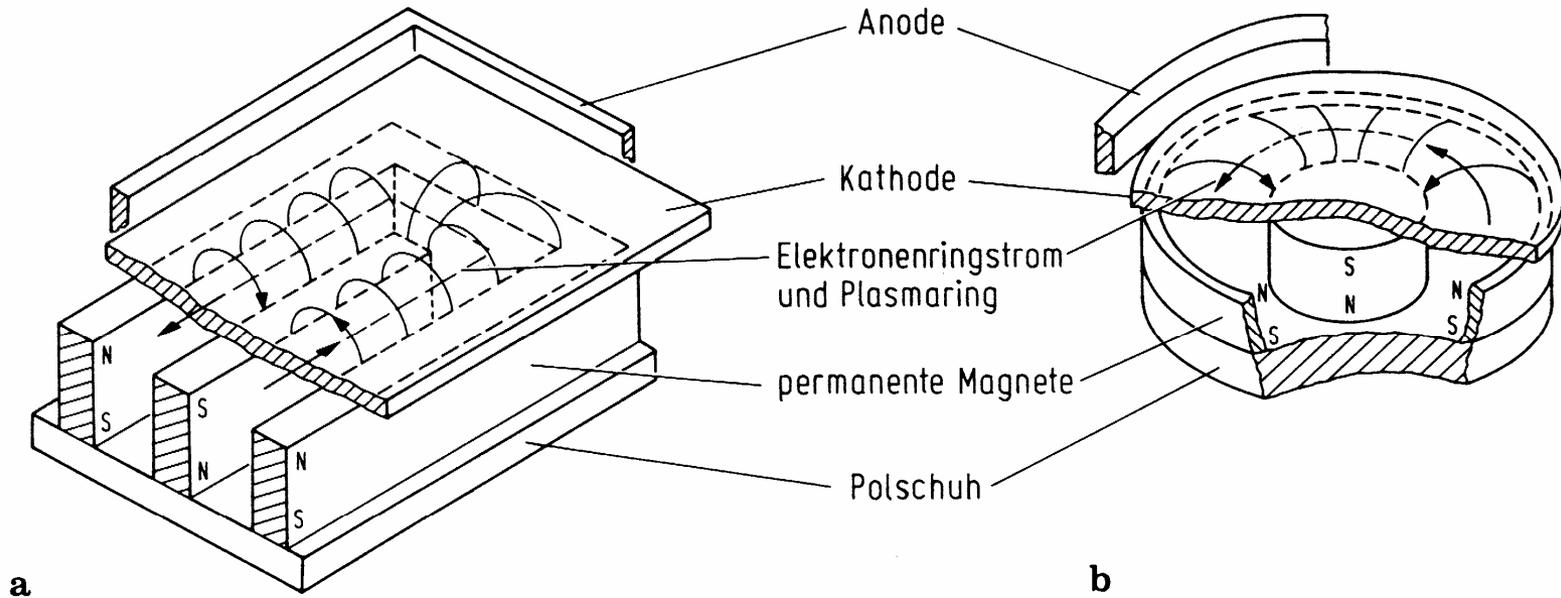
*** Andere Plasmacharakteristik (EEDF, Plasmapotential)**

Hochfrequenzsputtern (RF-Sputtern) II



Ein überschüssiger Elektronenstrom wird durch die höhere Elektronenbeweglichkeit erzeugt. Dieser bewirkt eine negative Nettospannung am Target, unabhängig davon, ob es leitet oder nicht.

Magnetron-Sputtern, Grundlagen I



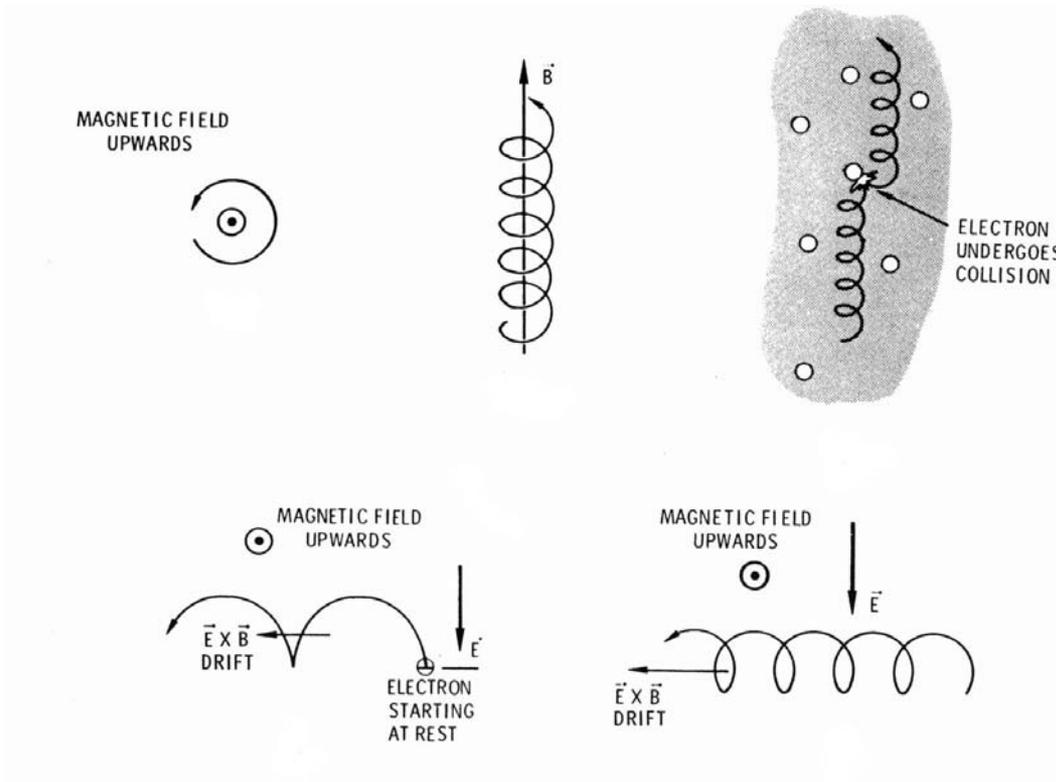
Permanentmagnete hinter dem Target konzentrieren das Plasma in Targetnähe.

*** Dunkelraum wird verkleinert**

*** Ionendichte wird vergrößert**

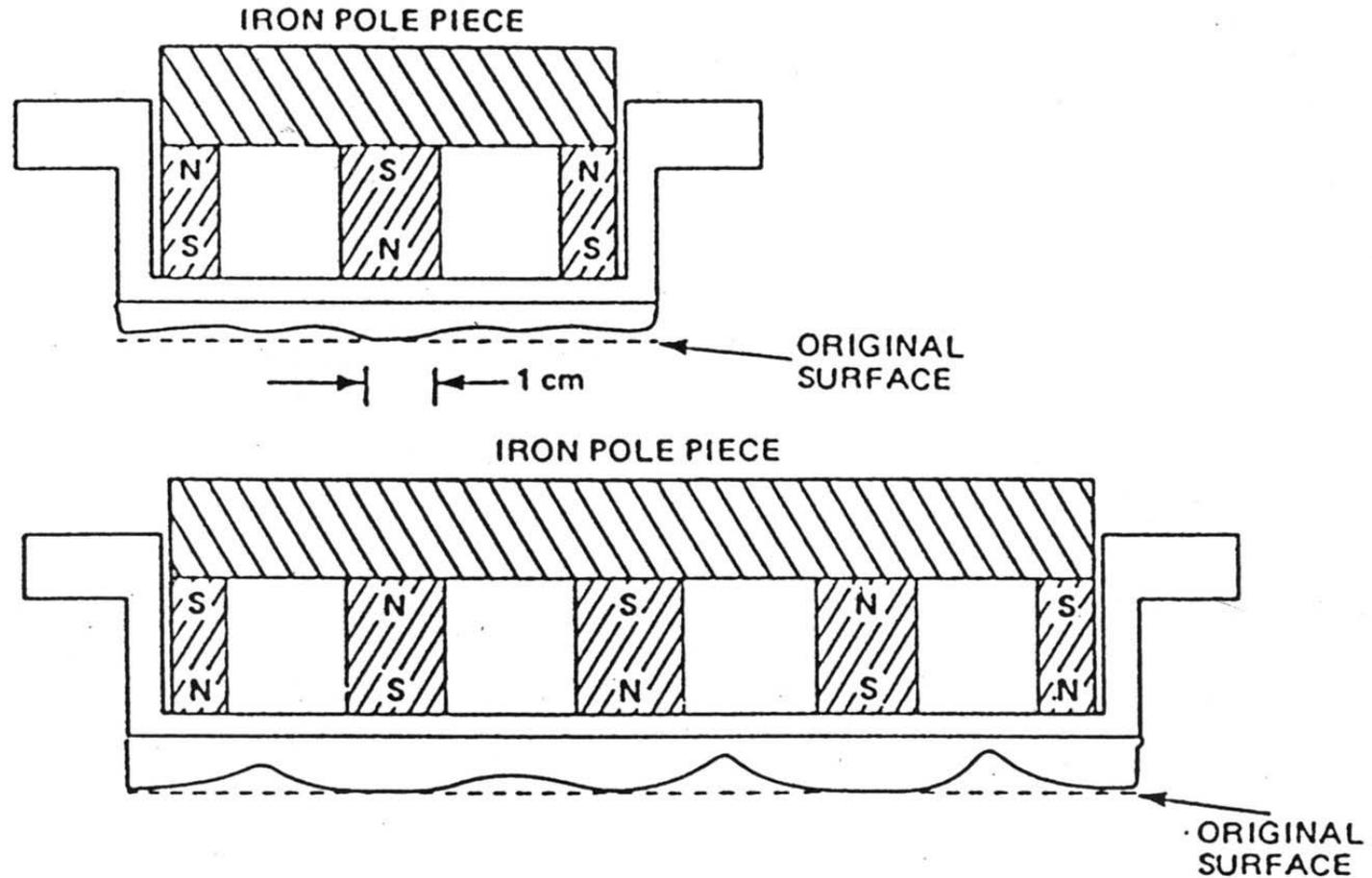
*** Gasdruck kann verringert werden**

Magnetron-Sputtern, Grundlagen II

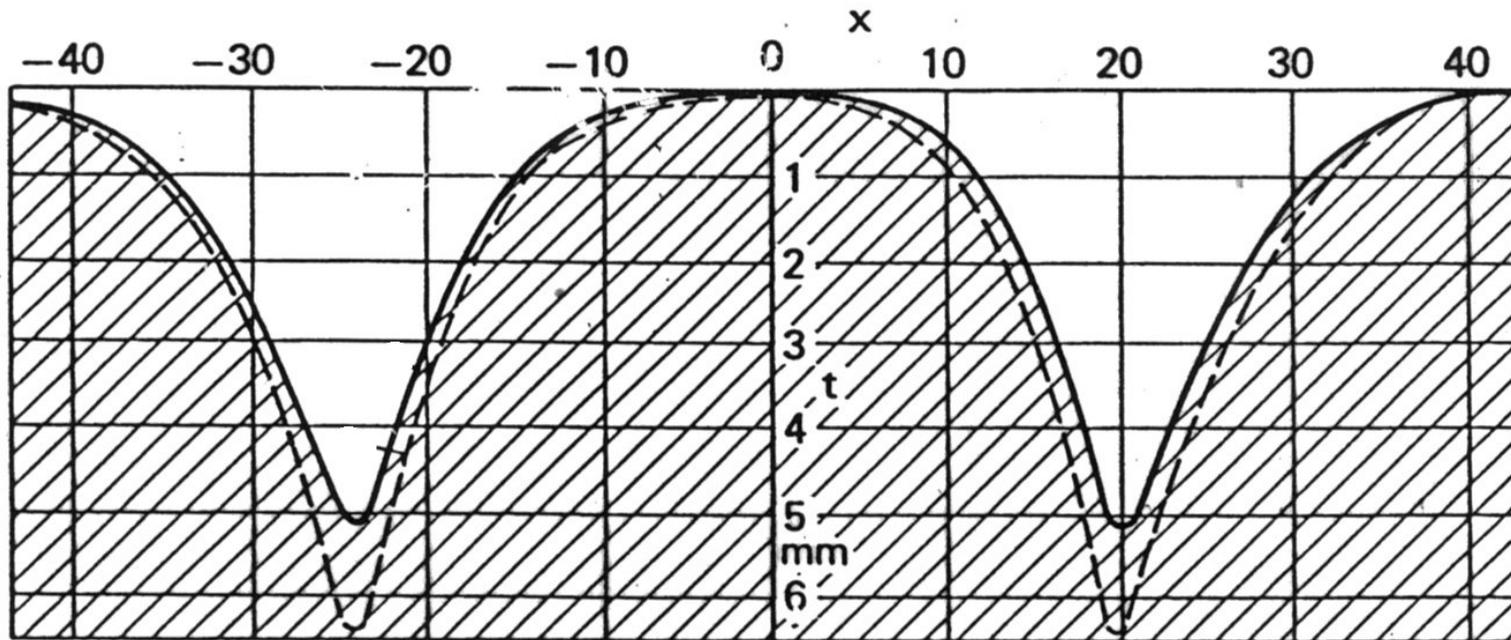


Das Magnetfeld hält die leichten Elektronen auf Spiralbahnen (Lorentz-Kraft) in der Nähe der Kathode. Ein Elektron kann daher in der Nähe des Targets wesentlich mehr Ionisierungsereignisse auslösen.

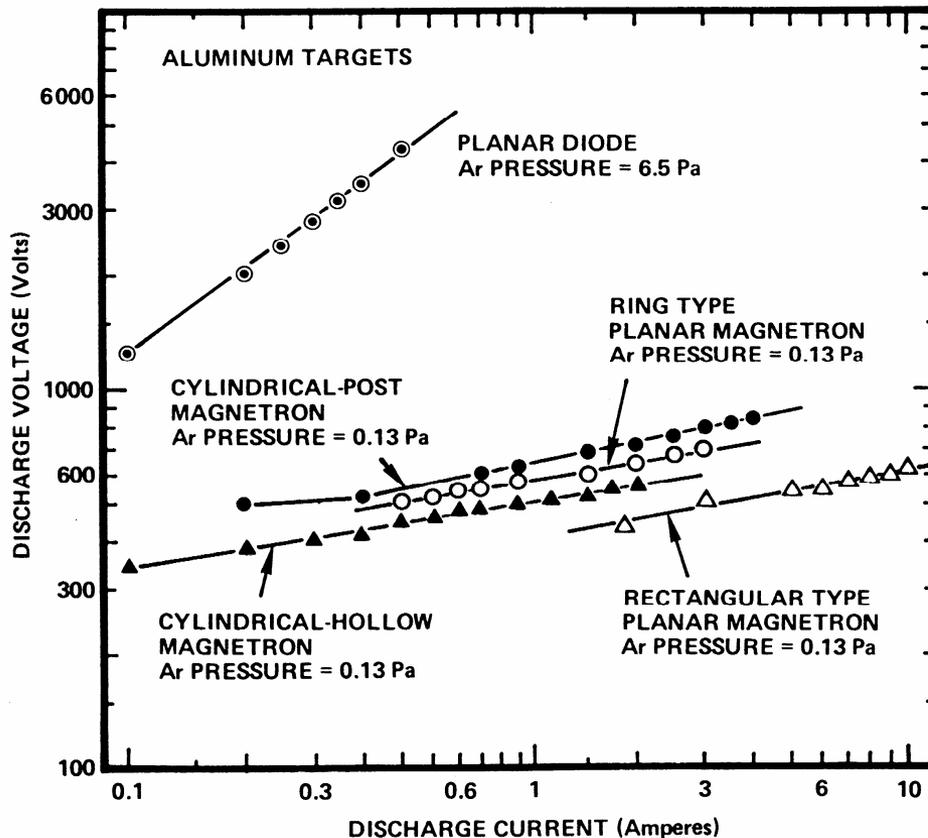
Magnetron-Sputtern: Magnetsysteme



Magnetron-Sputtern: Targeterosion



Beispiel: Magnetron-Sputtern - Kennlinien



Empirischer Zusammenhang:

$$R \propto I(k \cdot \ln U)$$

R = Erosionsrate

I = Entladungsstrom

U = Entladungsspannung

Magnetronentladungen arbeiten bei wesentlich geringeren Gasdrücken!