

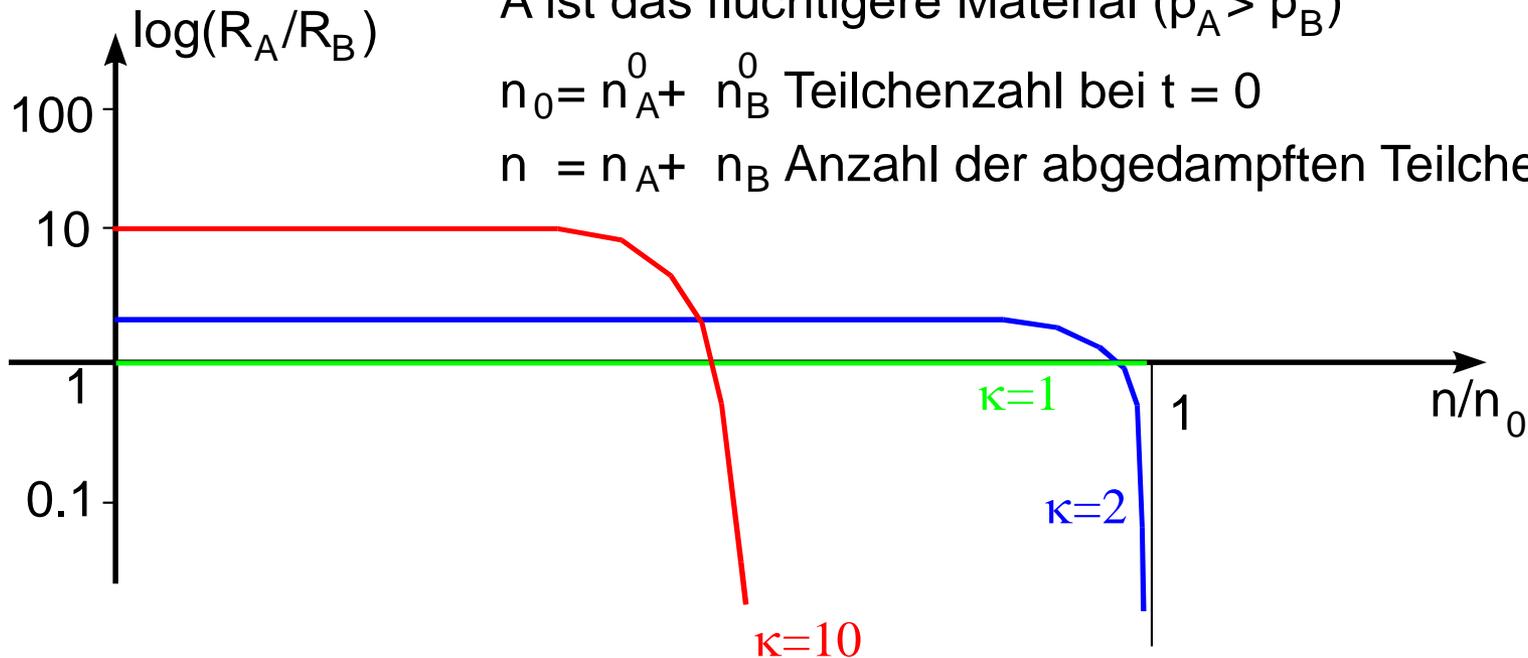
Wiederholung: Verdampfen von Legierungen

Legierungszusammensetzung: A:B=1:1

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

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

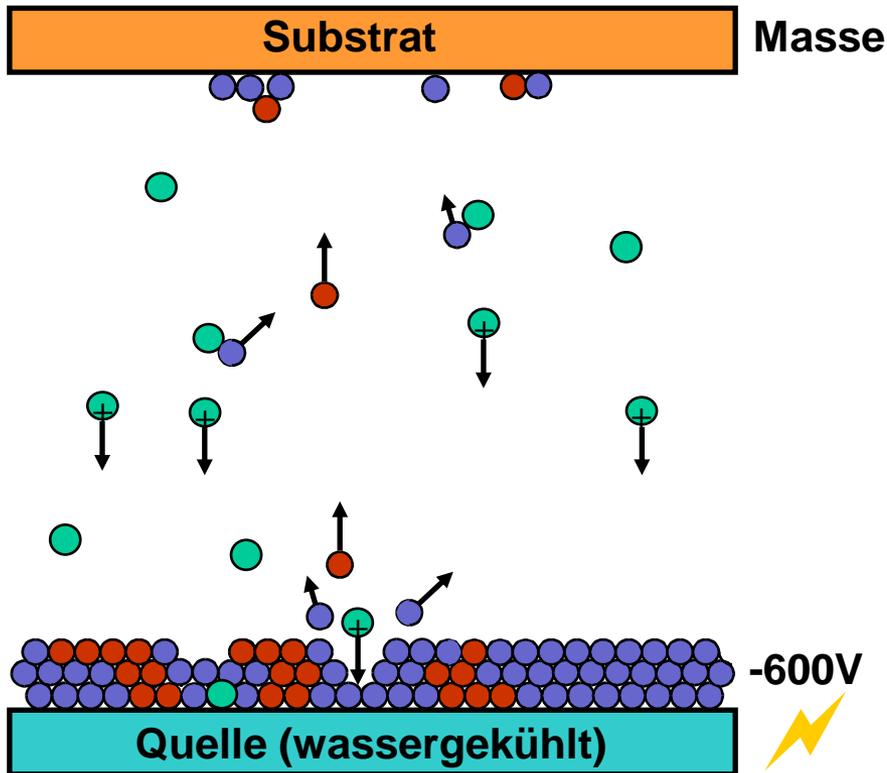
$n = n_A + n_B$ Anzahl der abgedampften Teilchen



Das Verdampfen einer Legierung entspricht einer fraktionierten Destillation. Grund dafür ist der Materialtransport in der Schmelze.

Wiederholung: der Sputterprozess

Elementarprozesse:



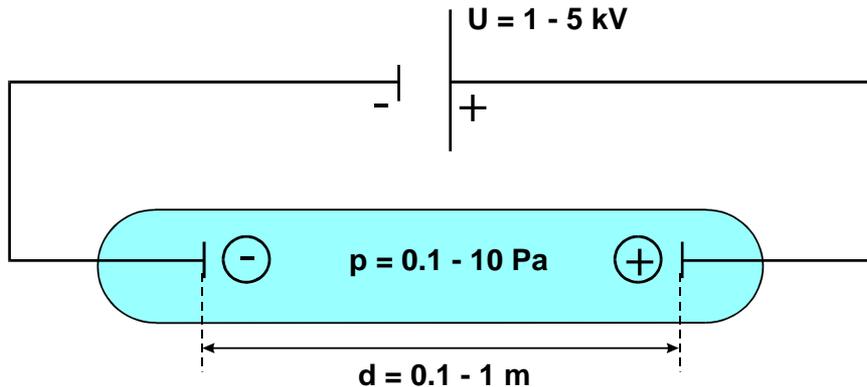
- ● Beschichtungsgut
- ⊕ ● Arbeitsgas, ionisiert oder neutral

Besondere Kennzeichen:

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

Wiederholung: die Gasentladung

Versuchsanordnung:

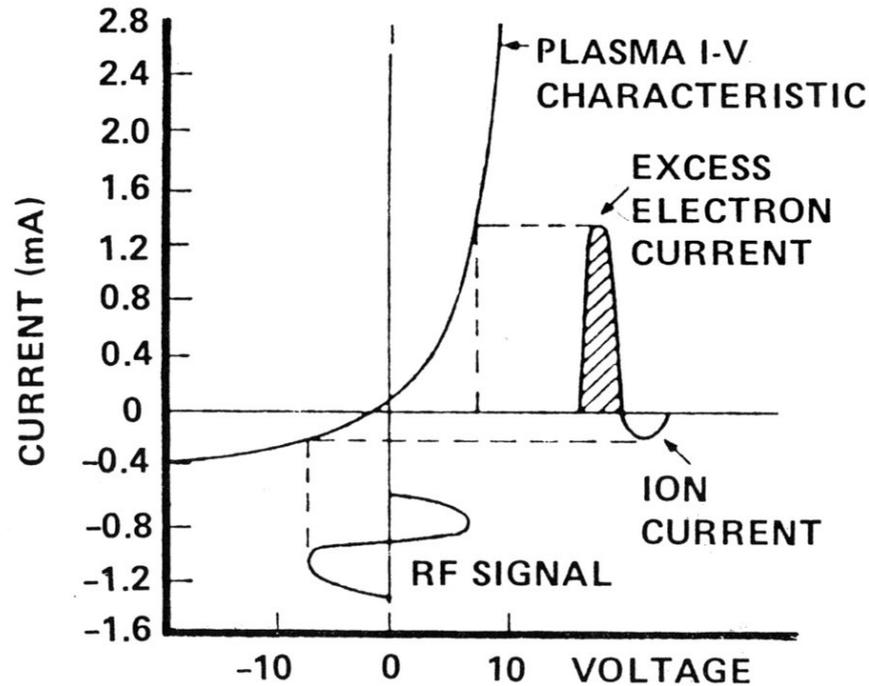


Kriterien für eine selbstständige Gasentladung:

Eine Gasentladung kann dann aufrecht erhalten werden, wenn:

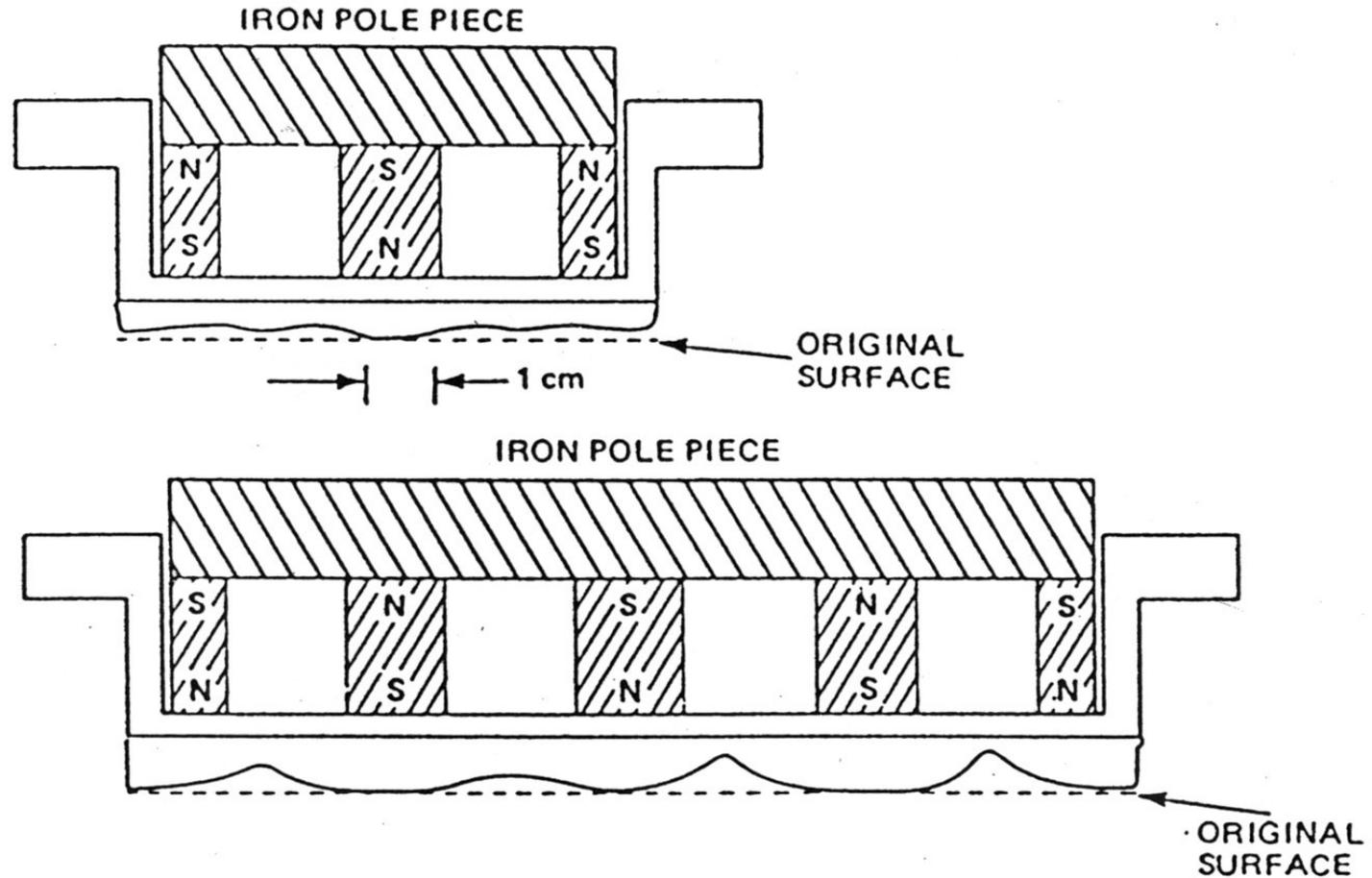
- die mittlere freie Weglänge der Elektronen groß genug ist, um bei gegebenem U neutrale Gasatome zu ionisieren
→ **verdünntes Gas** notwendig
- genügend Gasatome vorhanden sind, um eine Ionisierungskaskade zu ermöglichen
→ **kein "zu gutes" Vakuum** notwendig

Wiederholung: RF-Sputtern

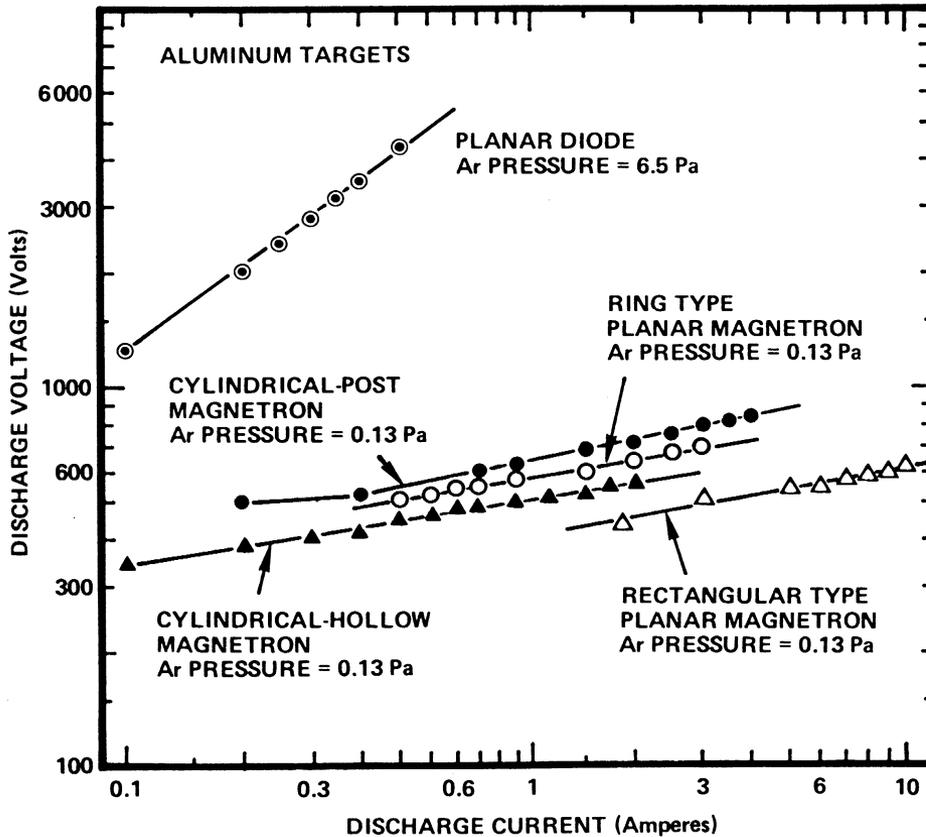


Ein überschüssiger Elektronenstrom wird durch die höhere Elektronenbeweglichkeit erzeugt. Dieser bewirkt eine negative Nettospannung am Target, unabhängig davon, ob es leitet oder nicht.

Wiederholung: Magnetron-Sputtern



Wiederholung: Magnetron - Kennlinien



Empirischer Zusammenhang:

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

R = Erosionsrate

I = Entladungsstrom

U = Entladungsspannung

Magnetronentladungen arbeiten bei wesentlich geringeren Gasdrücken!

Die Sputterausbeute I

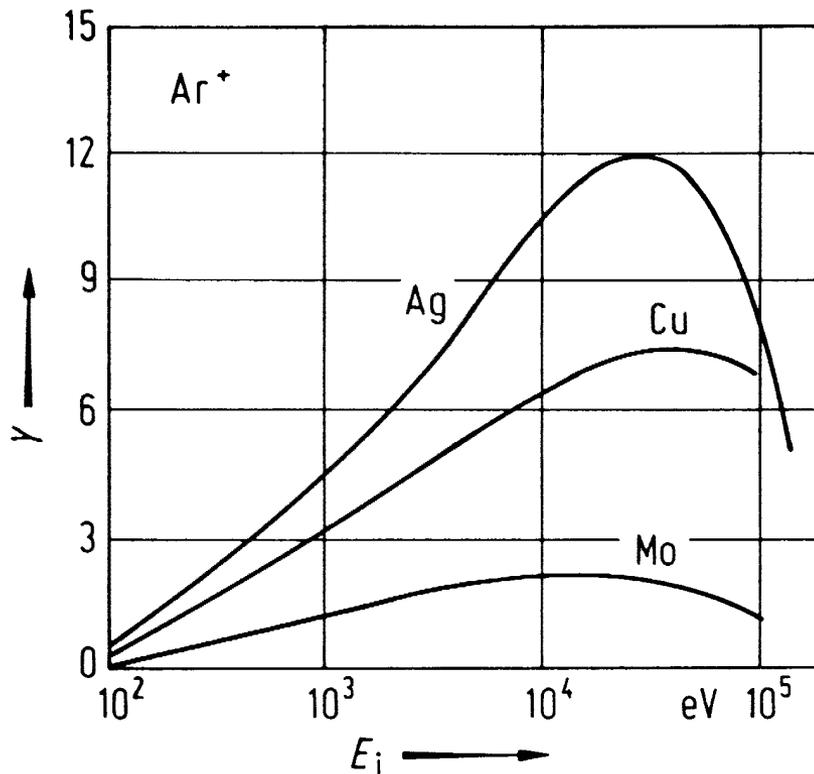
$$Y = \frac{\langle n \rangle}{n^+}$$

$\langle n \rangle$ = mittlere Anzahl der pro Einschluß emittierten Teilchen
 n^+ = Anzahl der auftreffenden Ionen

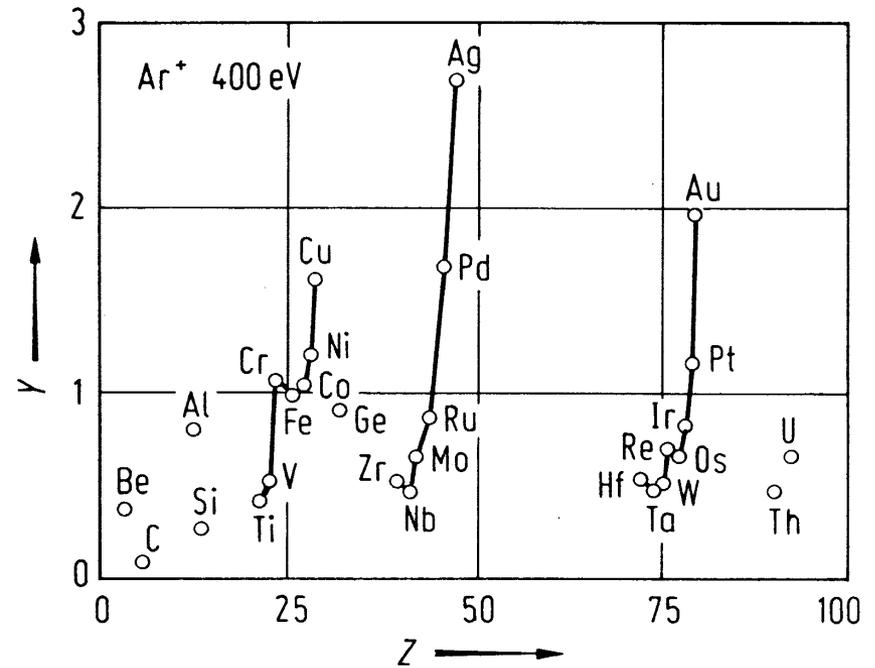
Y hängt von mehreren Ionen- und Materialparametern ab.

Die Sputterausbeute II

Abhängigkeit von:



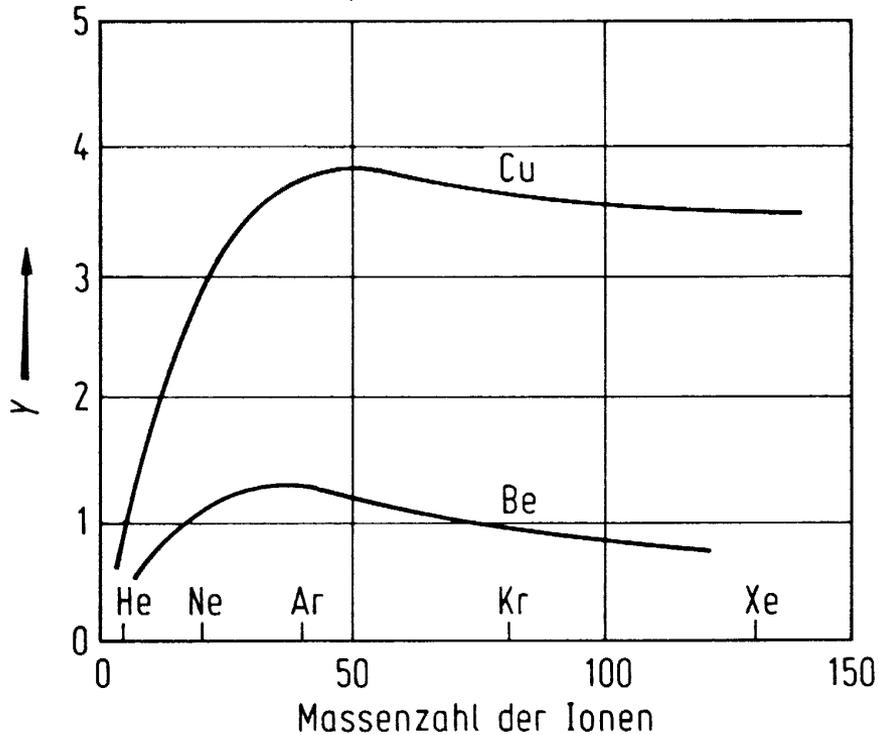
Ionenergie



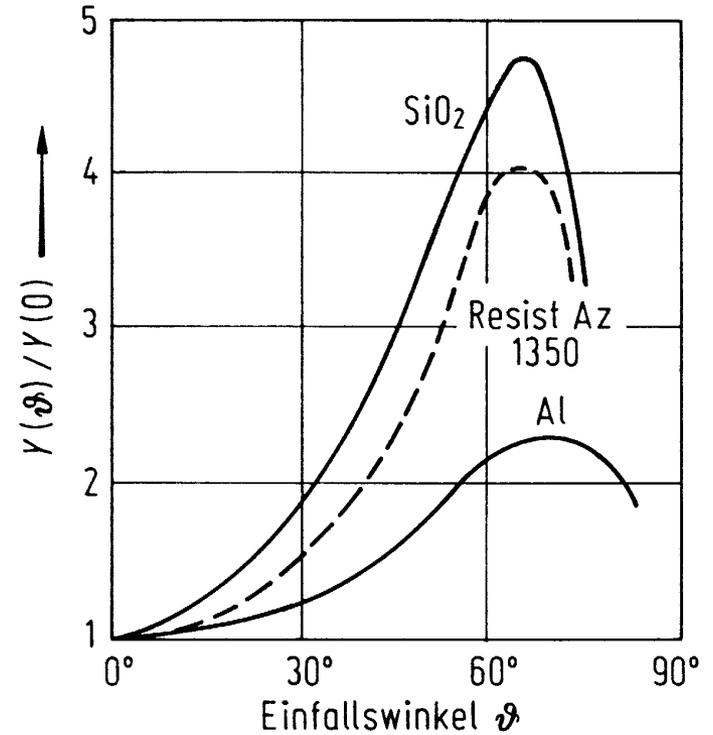
Targetmaterial

Die Sputterausbeute III

Abhängigkeit von:

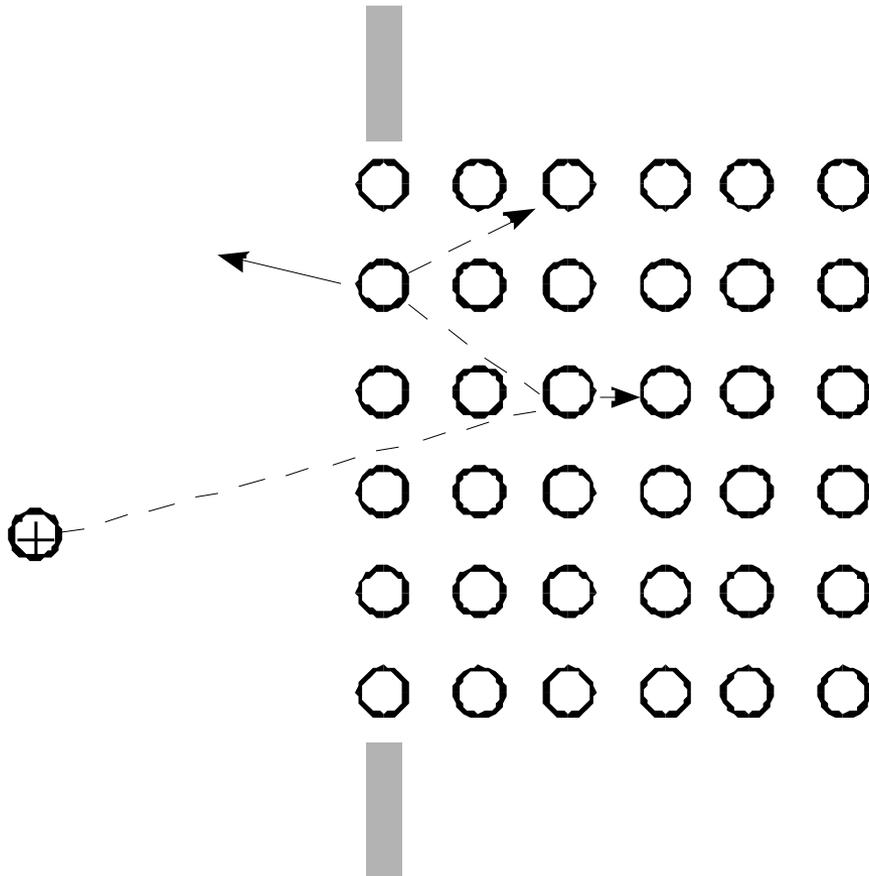


Massenzahl der Ionen



Ioneneinfallswinkel

Sputterregimes: Single Knock On



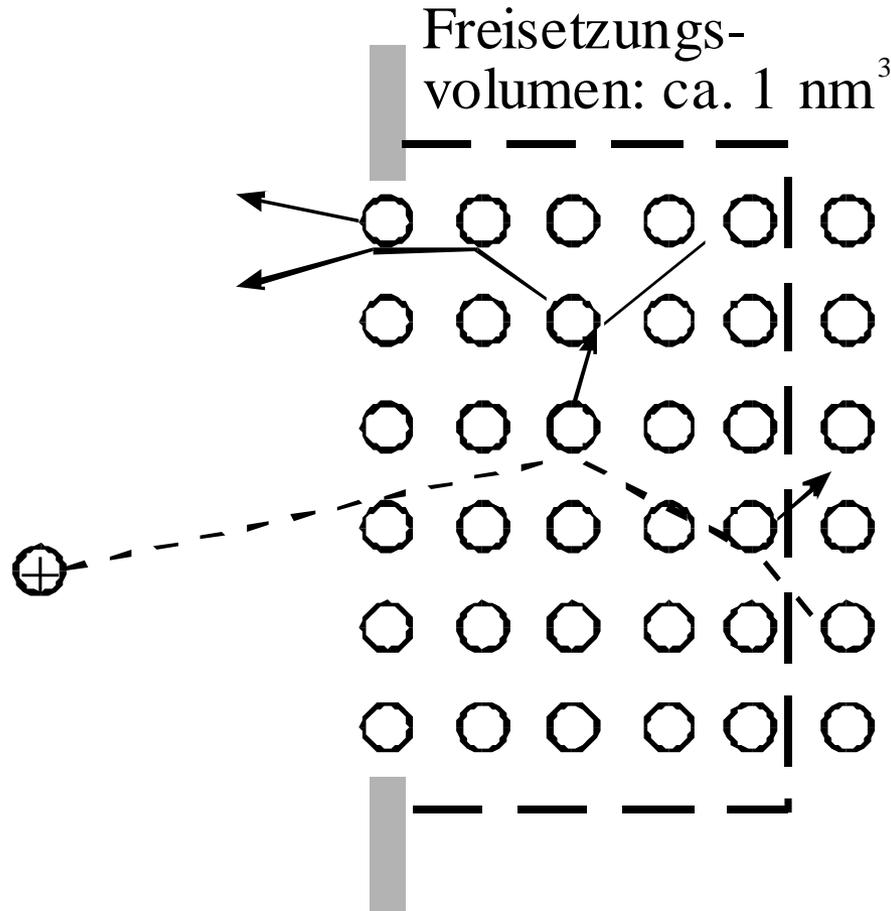
Ionenenergie klein,
und/oder
Ionenmasse klein

$$M^+ <: Y \propto 10^{-1}$$

$$E^+ < 10\text{eV}: Y \propto \frac{E^+}{U_0}$$

U_0 = Oberflächen-
bindungsenergie

Sputterregimes: Lineare Stoskaskade I



Ionenenergie 0.1 - 10 keV

Stoßpotentiale:

E^+ 0.1 - 1 keV: Born-Mayer

E^+ 1 - 10 keV: Thomas-Fermi

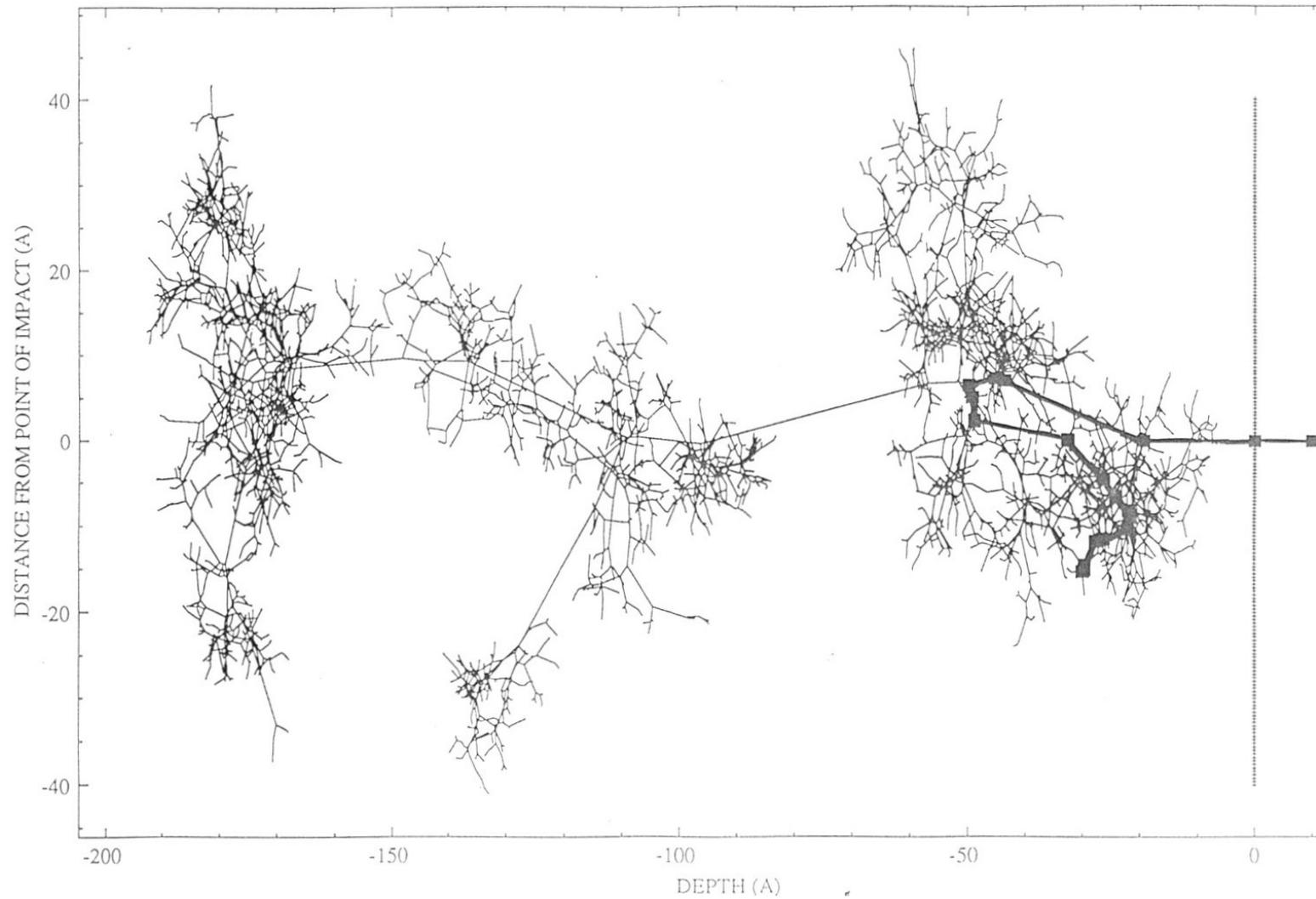
$$Y \propto \frac{4M^+M_t}{(M^+ + M_t)^2} \frac{E^+}{U_0}$$

M_t = Masse der Targetatome

Sputterregimes: Lineare Stosskaskade II

Senkrechter Einfall:

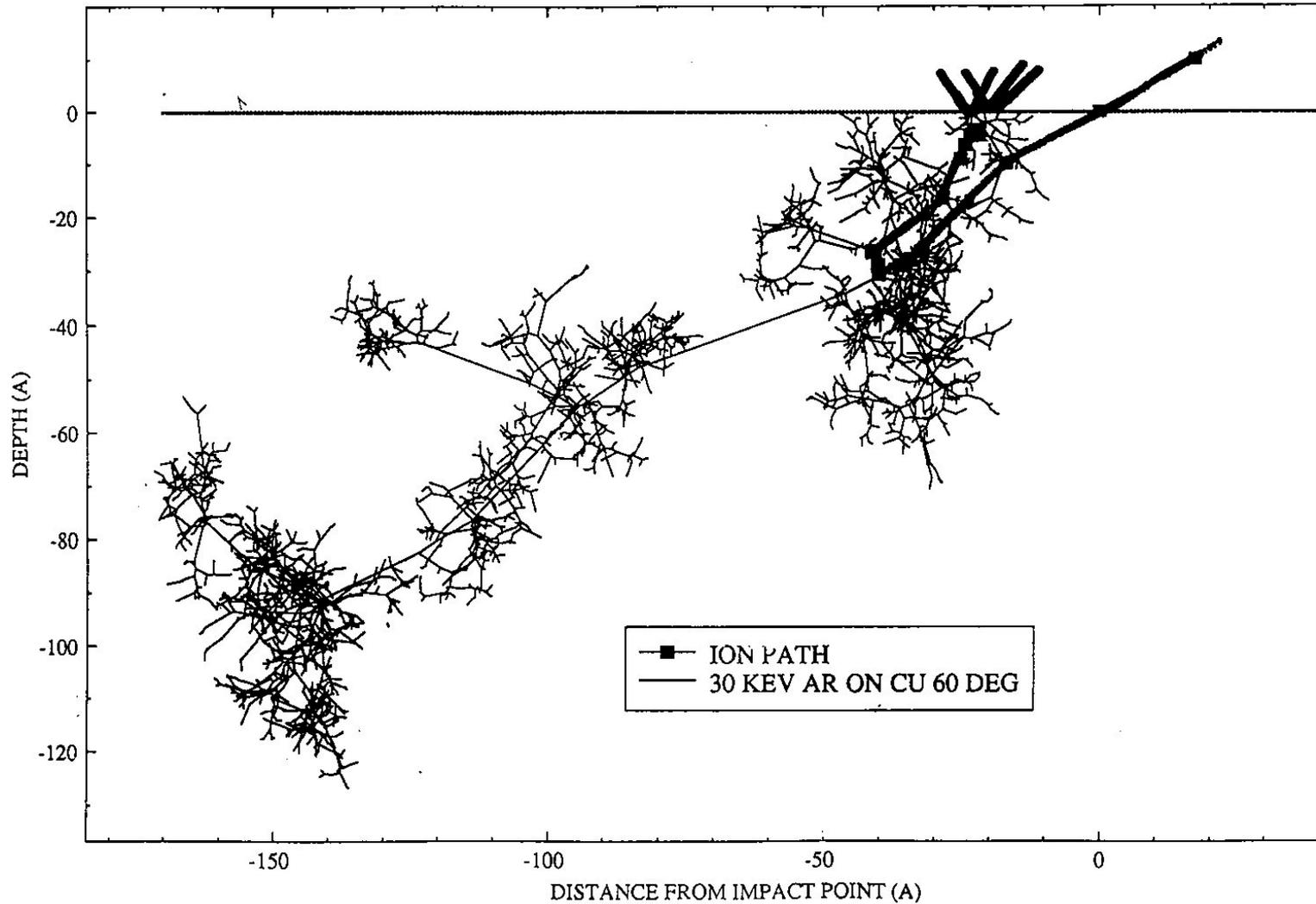
COLLISION CASCADE 30KEV AR ON CU



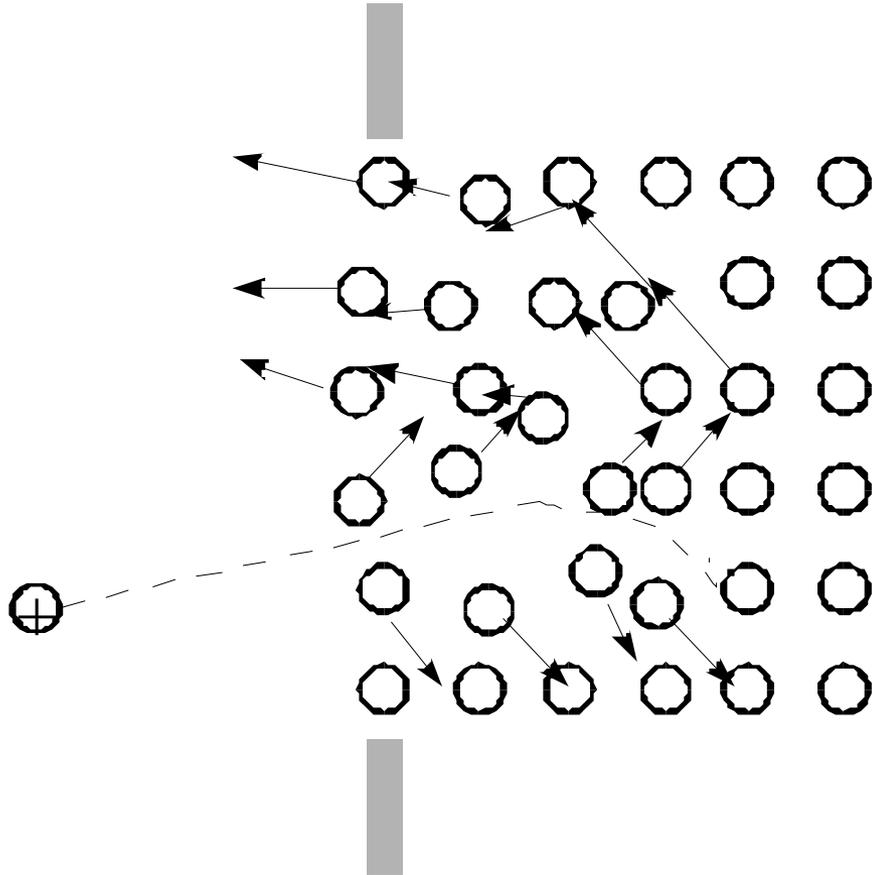
Sputterregimes: Lineare Stosskaskade III

Schräger Einfall:

COLLISION CASCADE



Sputterregimes: Thermal Spike

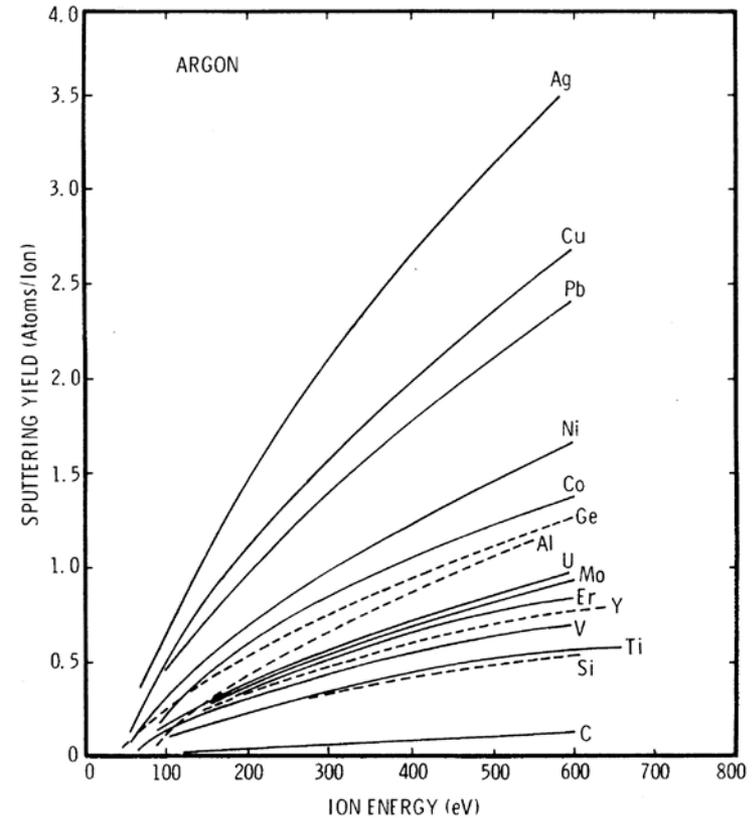
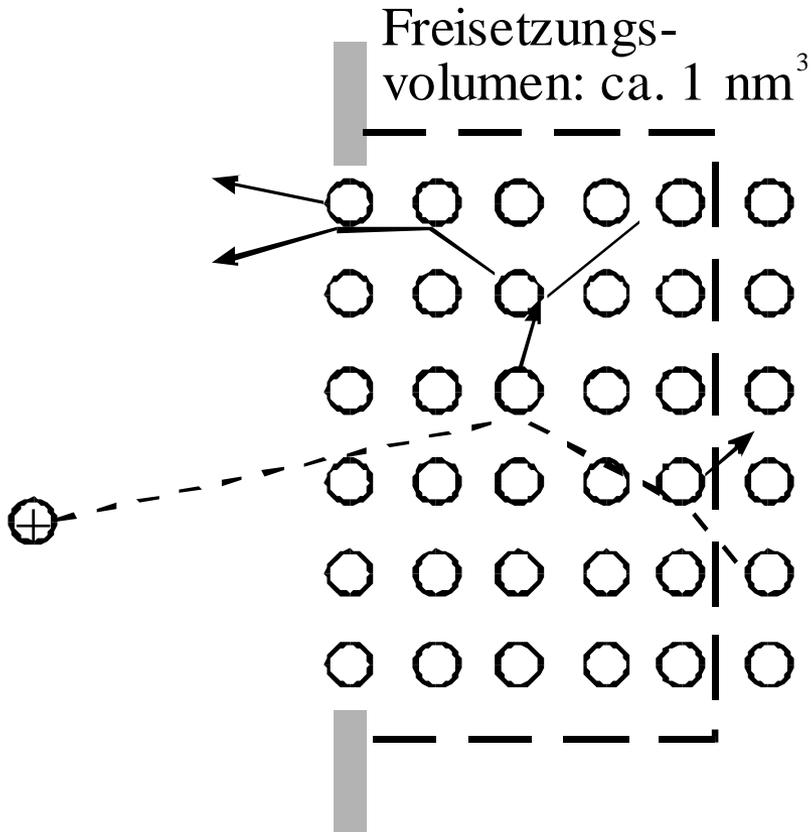


Ionenenergie > 10 keV

$$Y \propto \exp\left(-\frac{U_0}{k_B T}\right)$$

d. i. eine Verdampfungs-
charakteristik des
Emissionsvolumens

Lineare Stosskaskade: Globale Charakteristika



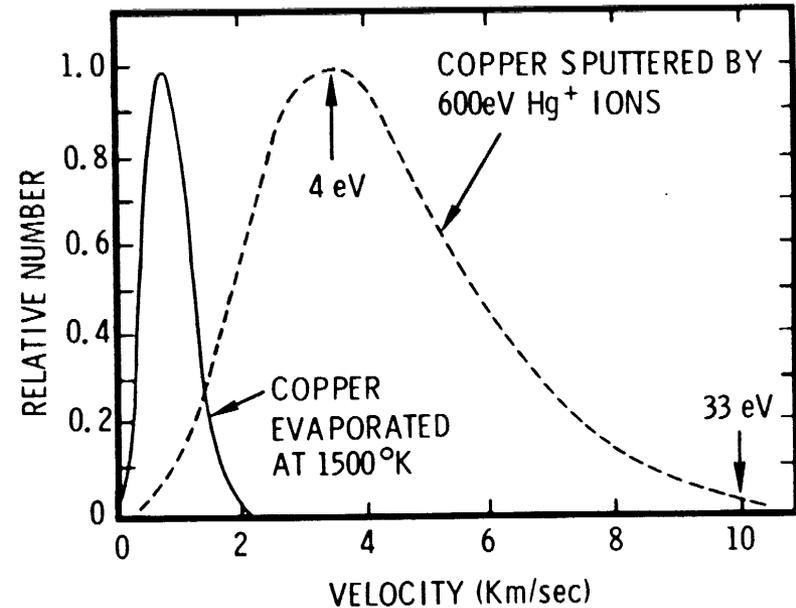
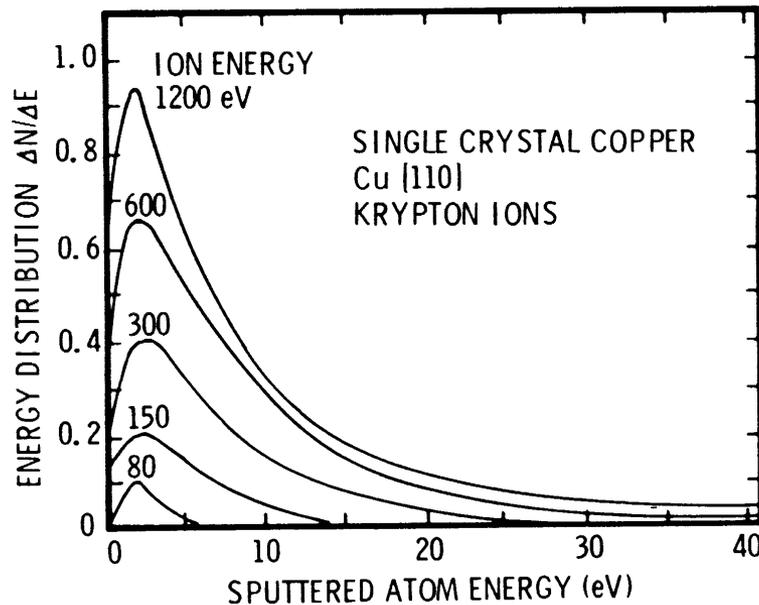
$$Y = 0,5 - 4$$

Sputterregimes: Simulation

www.srim.org

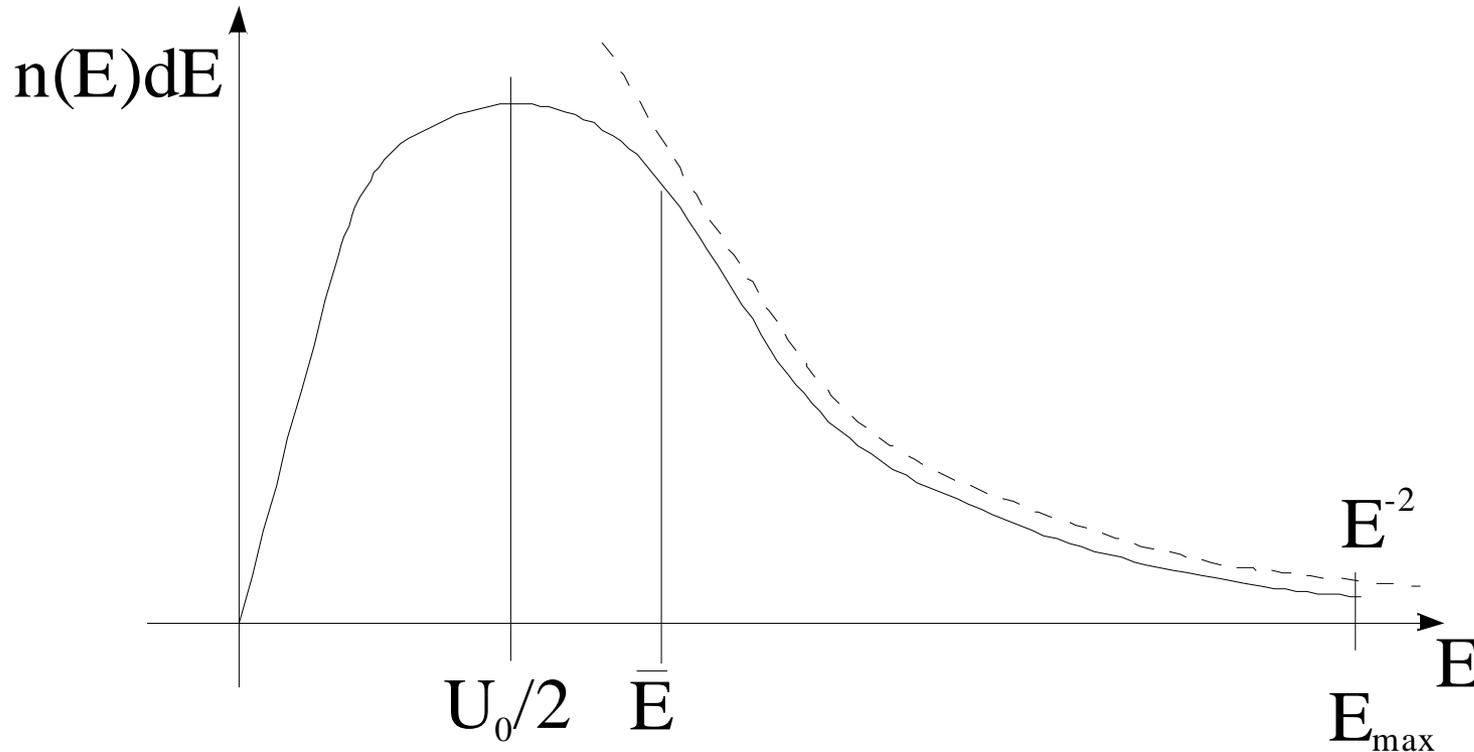
Stopping Range of Ions in Matter

Energieverteilung der emittierten Teilchen



Die Energieverteilung gesputterter Teilchen unterscheidet sich deutlich von jener thermisch evaporierter Atome!

Lineare Stoskaskade: Energieverteilung

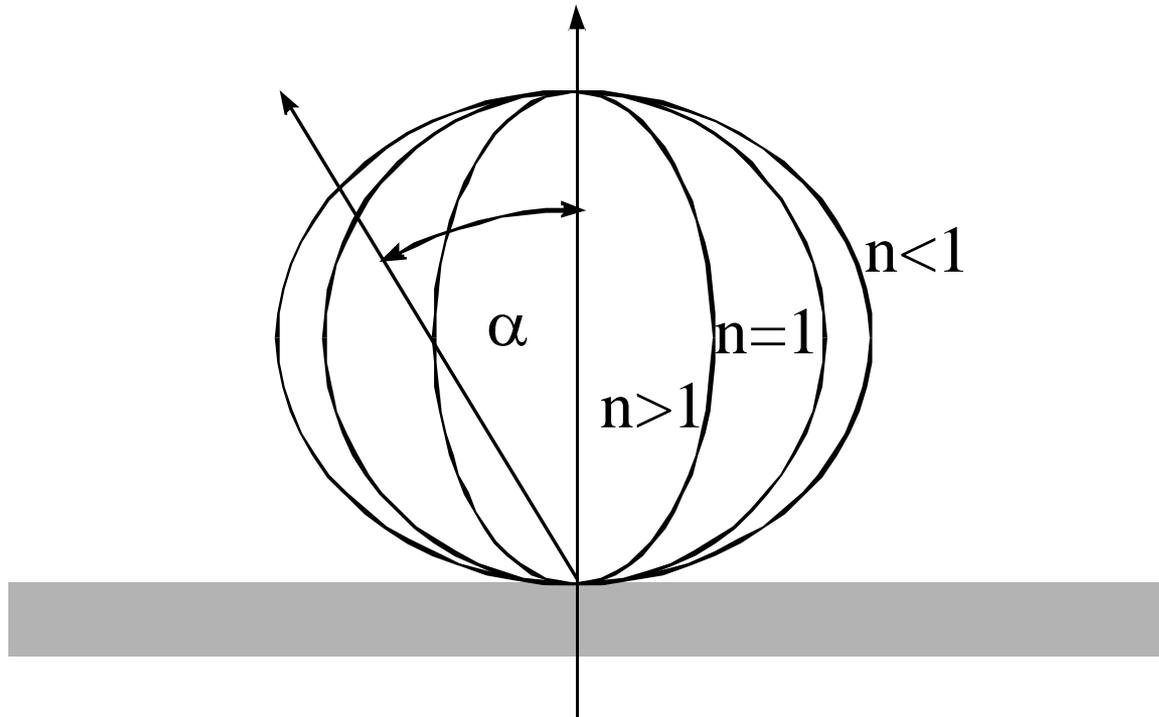


$$n(E)dE \propto \frac{E}{(E + U_0)^3} dE$$

E_{\max} = Maximalenergie, $E_{\max} \propto E^+$

\bar{E} = mittlere Emissionsenergie

Lineare Stosskaskade: Winkelverteilung

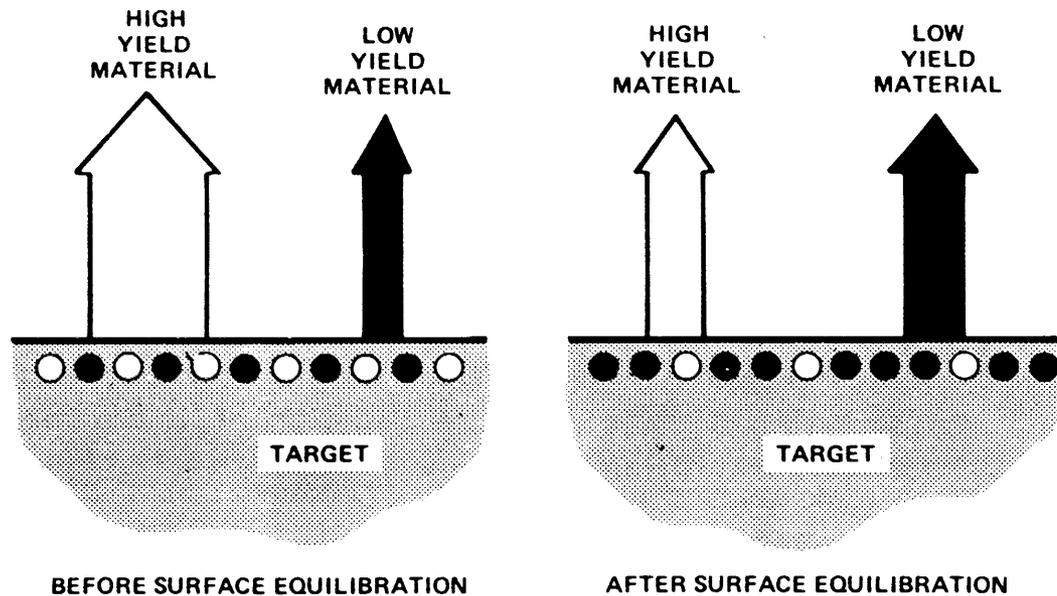


$$n(\alpha) \propto \cos^n \alpha$$

$$n \leq 1 \quad E < 1 \text{ keV}$$

$$n > 1 \quad E > 1 \text{ keV}$$

Sputtern von Legierungen: verschiedenes Y

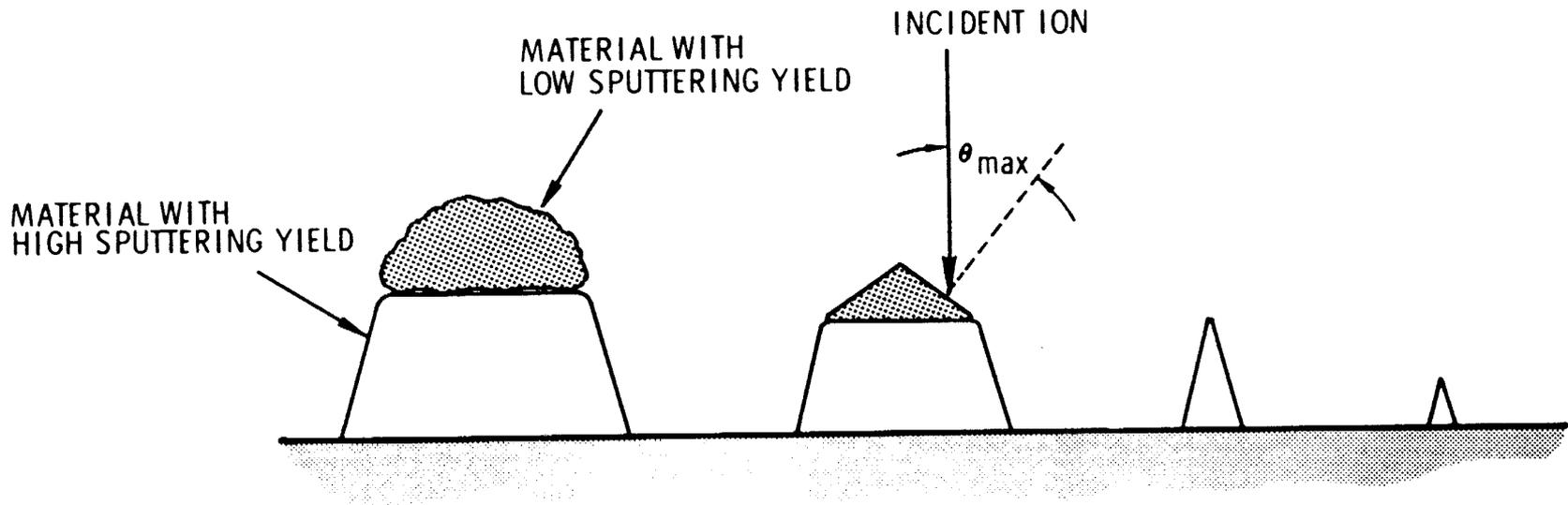


Bei einer gleichmässigen Verteilung von Materialien verschiedener Sputterausbeuten entspricht (nach einer Einlaufphase) die Dampfstrahlzusammensetzung der ursprünglichen Targetzusammensetzung. Es gilt:

$$Y_A \cdot \theta_A = c_A$$

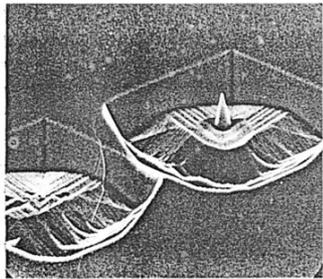
$$Y_B \cdot \theta_B = c_B$$

Sputtern von Legierungen: Konusbildung I

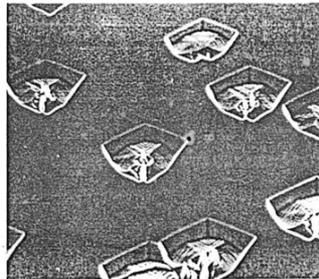


Liegt Material einer geringeren Sputterausbeute in Form von grossen Ausscheidungen vor, so kommt es zur Konusbildung am Target.

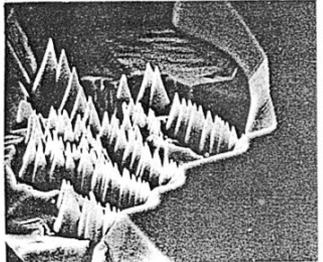
Sputtern von Legierungen: Konusbildung II



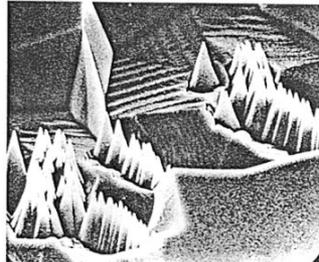
a X2000



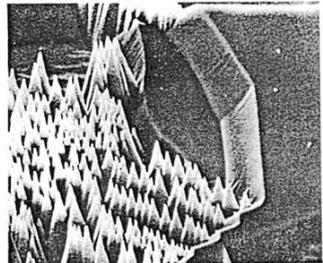
b X1000



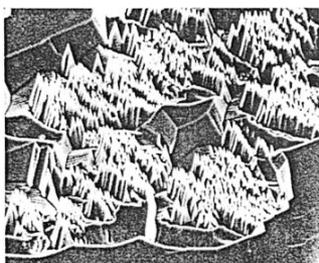
c X3000



d X3000



e X3000



f X1000

(113-1) Cu nach Fluence : $1 \cdot 10^{19} \cdot 40 \text{keV/Ar}^+ \cdot \text{cm}^{-2}$

108



Fig. 4a X2000

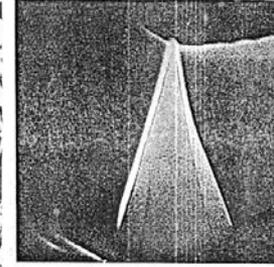
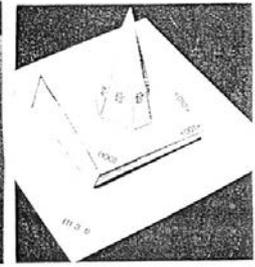


Fig. 4b X20,000

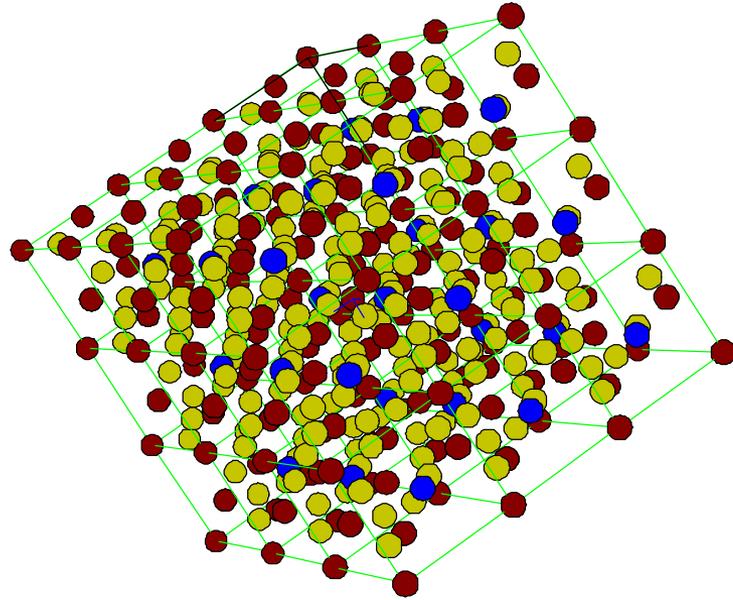


(113-1) Einkristall
Cu, $10^{19} \cdot 40 \text{keV/Ar}^+ \cdot \text{cm}^{-2}$

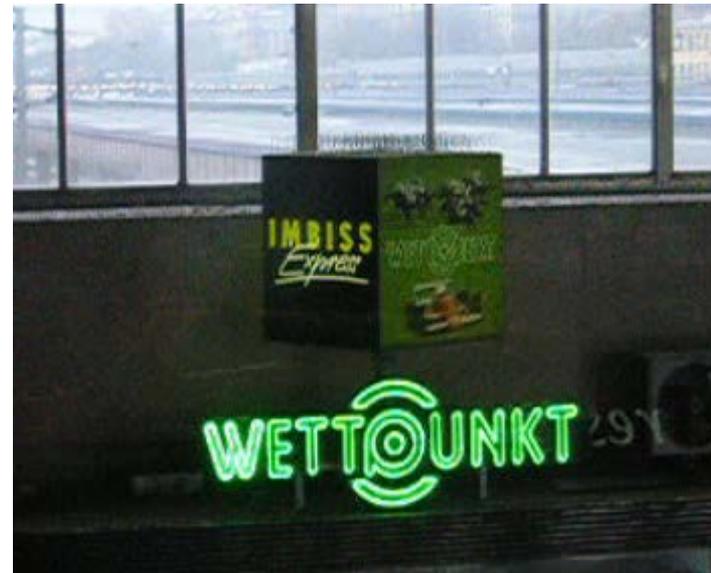
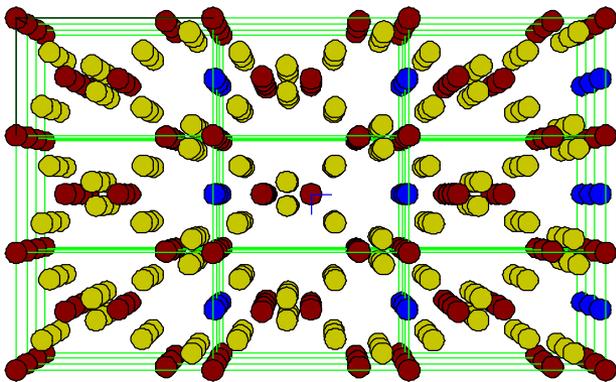
Pyramide

Die Seitenflächen der Konusse sind oft kristallographische Oberflächen oder haben einen Neigungswinkel, der dem des maximalen Y entspricht.

Sputtern von Einkristallen: Channelling

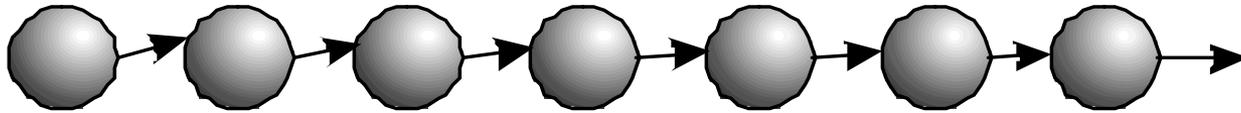


Je nach Einfallsrichtung dringen Ionen mehr oder weniger tief in einen Einkristall ein.



Sputtern von Einkristallen: Wehner-Spots

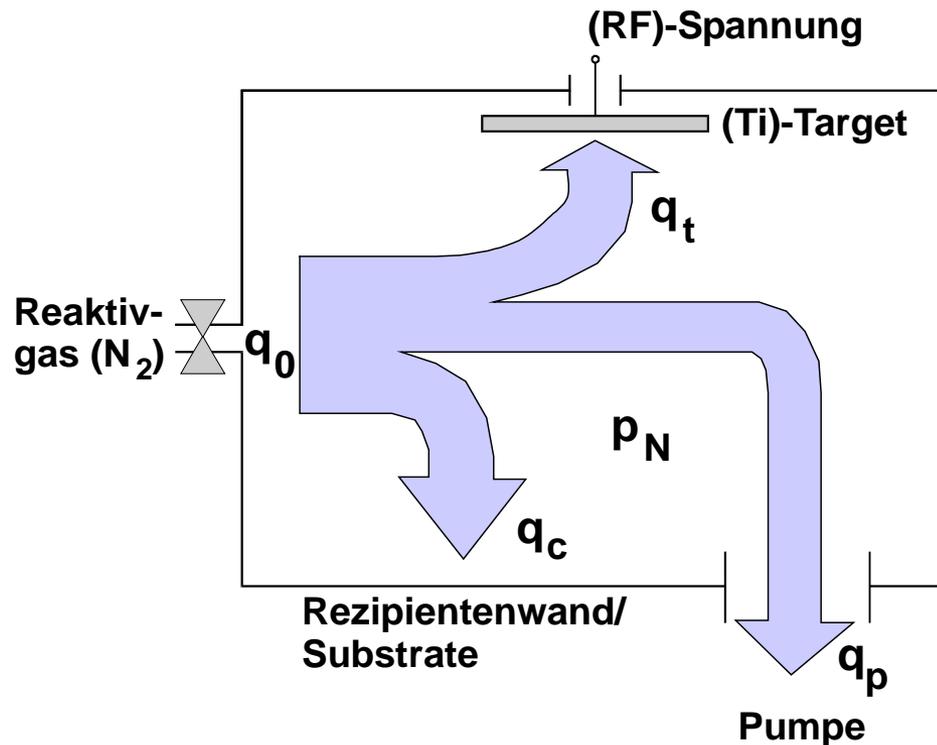
Stossfokussierung entlang dicht gepackter kristallographischer Richtungen:



***Y = Maximum entlang dieser Richtungen!
Positioniert man einen halbkugelförmigen Kollektor über einem einkristallinen Target, so entstehen dort "Wehner-Spots".***

Reaktive Prozesse I

Bei reaktiven Sputterprozessen bilden sich Verbindungen des gesputterten Materials und eines Reaktionsgases. Diese formieren am Target und am Substrat.



Berg-Modell

Für die Gasflüsse des Reaktivgases, q_i , gilt:

$$q_0 = q_t + q_c + q_p$$

q_0 ... Gesamtfluss

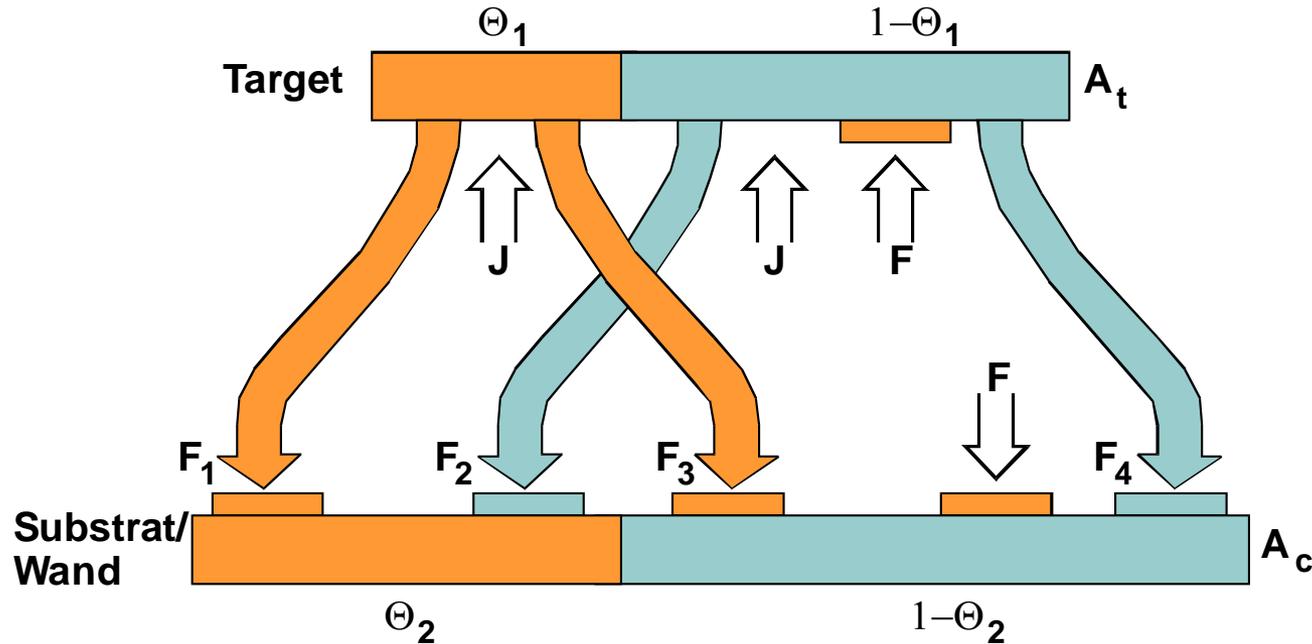
q_t ... Fluss zum Target

q_c ... Fluss zur Wand

q_p ... Fluss zur Pumpe

Reaktive Prozesse II

Bilanz der Flächenbedeckungen und Teilchenflüsse:



Θ_1 ... Reagierte Fläche Target

J ... Fluss Trägergas

Θ_2 ... Reagierte Fläche Wand

F ... Fluss Reaktionsgas

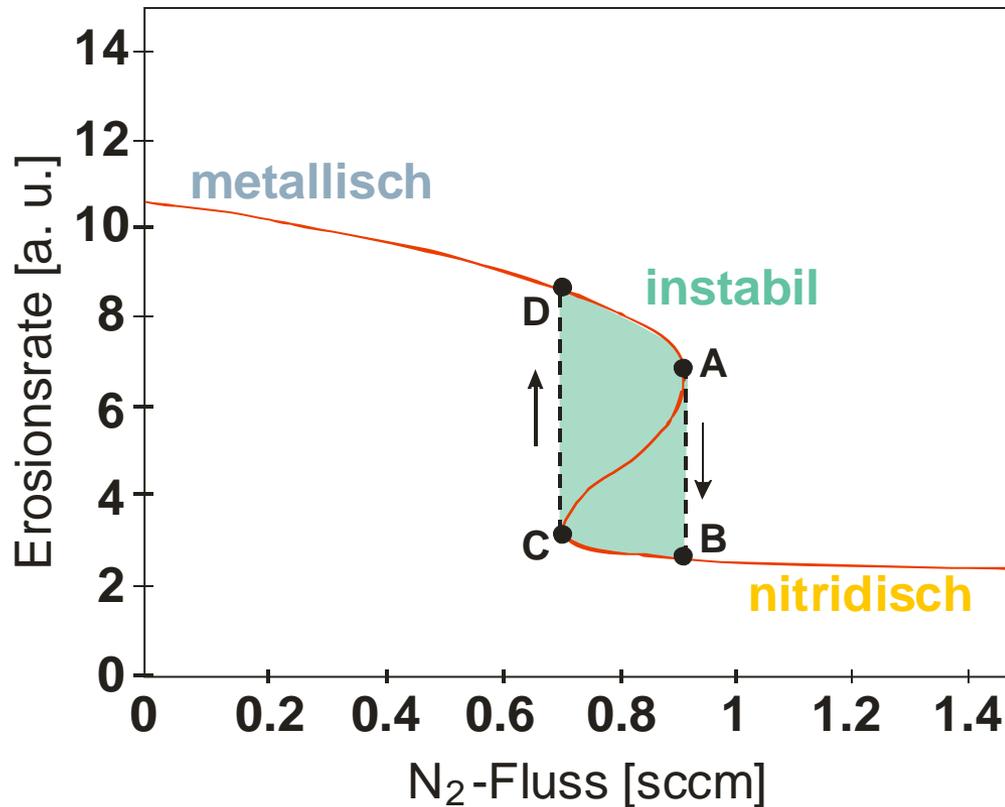
$F_{1,3}$... Flüsse Reaktionsprodukt

$F_{2,4}$... Flüsse Metall

Resultat: numerisch lösbare Bilanzgleichungen

Reaktive Prozesse: Beispiel TiN I

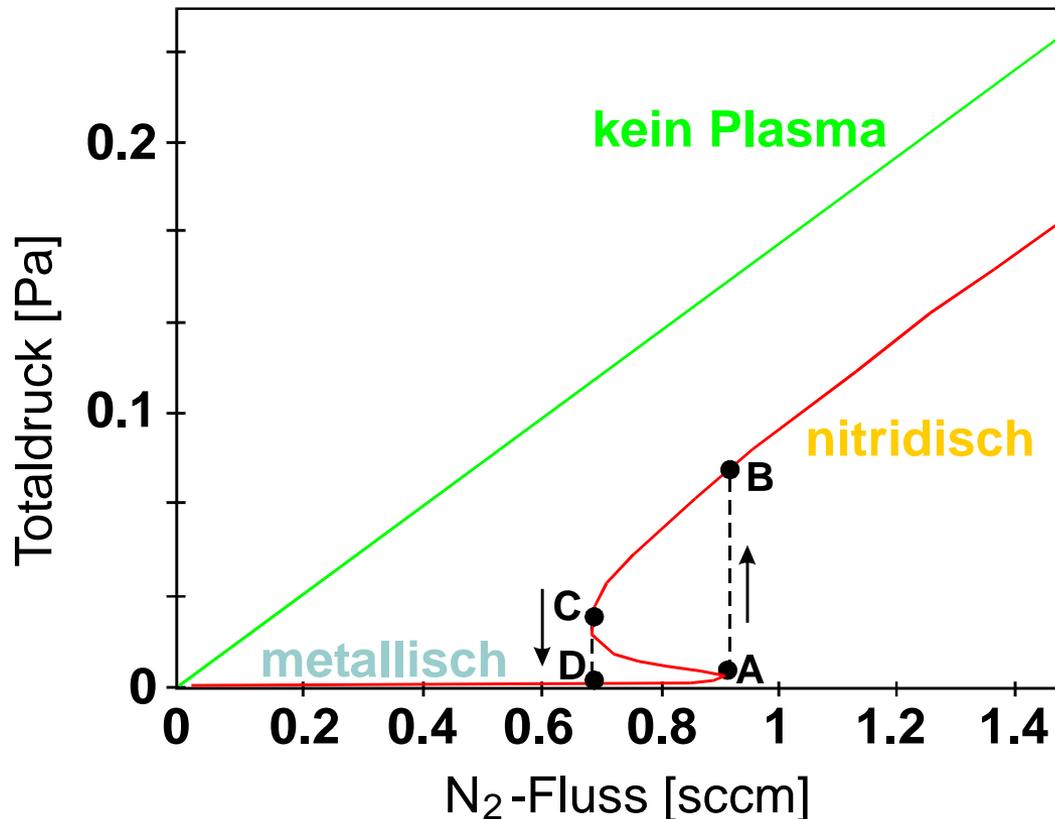
Erosionsrate am Target in Abhängigkeit vom N₂-Fluss:



Hysterese beim Übergang vom metallischen zum nitridischen Modus.

Reaktive Prozesse: Beispiel TiN II

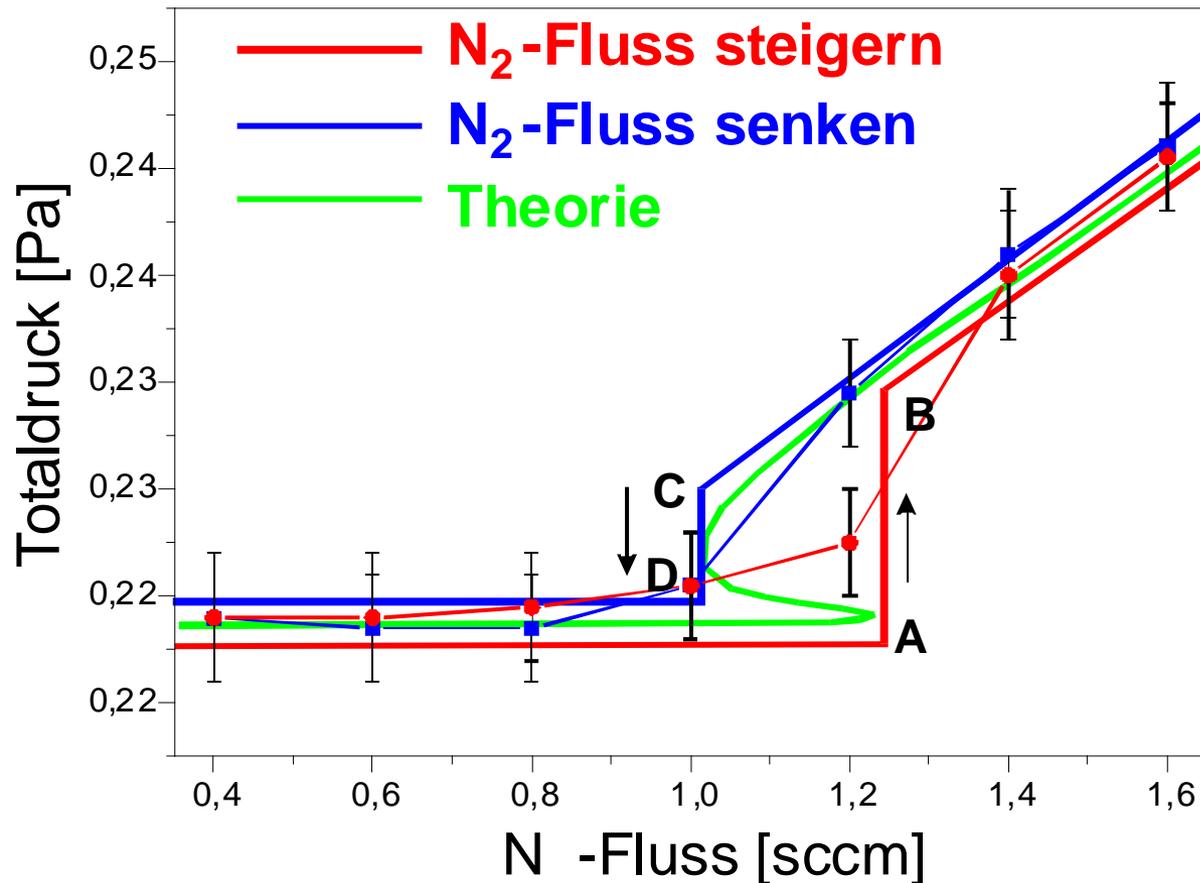
Druck in der Kammer in Abhängigkeit vom N₂-Fluss:



Zunächst wird aller Stickstoff verbraucht; Optimal wäre der instabile Arbeitspunkt A.

TiN: Experimentelle Daten

Die **Hysterese** im Zusammenhang zwischen **N₂-Fluss** und **Totaldruck** ist gut sichtbar.



Reaktive Prozesse: Grossanlagen

Sputteranlage zur reaktiven Abscheidung von Solarzellenmaterialien.



Reaktive Sputterprozesse zählen heute zu den akzeptierten Verfahren zur Abscheidung oxidischer, nitridischer und carbidischer Materialien.