

# Praktische Plasmaphysik in der Halbleiterindustrie Kurs bei Trumpf in Ulm V Sputtern, 15. April 2021

Gerhard Franz

Walter Schottky Institut  
TU München

<http://www.gerhard-franz.org>



# Programm

- Einführung



# Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Streuprozesse



# Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Streuprozesse
- CCP- und Mikrowellen-Plasmen: Aufheizung und Ionisation



# Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Streuprozesse
- CCP- und Mikrowellen-Plasmen: Aufheizung und Ionisation
- ICP-Entladungen: Aufheizung, Elektrodenpotentiale und DC-Bias, Streuprozesse, Gegenüberstellung von ICP- und CCP-Entladungen



# Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Streuprozesse
- CCP- und Mikrowellen-Plasmen: Aufheizung und Ionisation
- ICP-Entladungen: Aufheizung, Elektrodenpotentiale und DC-Bias, Streuprozesse, Gegenüberstellung von ICP- und CCP-Entladungen
- Sputtern



# Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Streuprozesse
- CCP- und Mikrowellen-Plasmen: Aufheizung und Ionisation
- ICP-Entladungen: Aufheizung, Elektrodenpotentiale und DC-Bias, Streuprozesse, Gegenüberstellung von ICP- und CCP-Entladungen
- Sputtern
- RIE I + (PE)CVD



# Programm

- Einführung
- DC-Plasmen und Streuprozesse
- CCP- und Mikrowellen-Plasmen: Aufheizung und Ionisation
- ICP-Entladungen: Aufheizung, Elektrodenpotentiale und DC-Bias, Streuprozesse, Gegenüberstellung von ICP- und CCP-Entladungen
- **Sputtern**
- RIE I + (PE)CVD
- RIE II: Microfeatures, Ätzmechanismen, Endpunktkontrolle, Plasmadiagnostik



# Organisation

- Historischer Rückblick
- Grundlagen des Sputterns
- Sputtersystem
- Prozesse im Target: Kinetik
- Ausbeute und Sputterrate
- Streuprozesse
- Prozesse im Substrat
- Reaktives Sputtern
- Bias-Sputtern
- Magnetron-Sputtern



# Historischer Rückblick I

- GROVE (1852): Wände von Entladungsröhren aus Glas werden mit der Zeit milchig, dann undurchsichtig. Das abgeschiedene Material stammt aus der Kathode.



# Historischer Rückblick I

- GROVE (1852): Wände von Entladungsröhren aus Glas werden mit der Zeit milchig, dann undurchsichtig. Das abgeschiedene Material stammt aus der Kathode.
- WRIGHT (1877): Spiegelbeschichtung



# Historischer Rückblick I

- GROVE (1852): Wände von Entladungsröhren aus Glas werden mit der Zeit milchig, dann undurchsichtig. Das abgeschiedene Material stammt aus der Kathode.
- WRIGHT (1877): Spiegelbeschichtung
- In den 1930er Jahren: Western Electric führt das Verfahren in der Schallplattenherstellung zur Metallisierung der Wachsmatrizen ein.



# Historischer Rückblick I

- GROVE (1852): Wände von Entladungsröhren aus Glas werden mit der Zeit milchig, dann undurchsichtig. Das abgeschiedene Material stammt aus der Kathode.
- WRIGHT (1877): Spiegelbeschichtung
- In den 1930er Jahren: Western Electric führt das Verfahren in der Schallplattenherstellung zur Metallisierung der Wachsmatrizen ein.
- STARK beschreibt Sputtern als Impulsaustausch.



# Historischer Rückblick II

- SEELIGER und SOMMERMEYER beobachten eine Cosinusverteilung des gesputterten Materials, typisch für Verdampfungsprozesse.



# Historischer Rückblick II

- SEELIGER und SOMMERMEYER beobachten eine Cosinusverteilung des gesputterten Materials, typisch für Verdampfungsprozesse.
- WEHNER: Projektile:  $\text{Hg}^+$ -Ionen, Target: Wolfram-Einkristall  $\Rightarrow$  Bevorzugter Abtrag in bestimmten kristallographischen Richtungen, bei niedrigen Energien wird deutlich weniger Material normal zur Oberfläche emittiert, als nach einem Cosinus-Gesetz erwartet wird  $\Rightarrow$  Sputtern ist das Ergebnis eines Impulstransfers.



# Organisation

- Historischer Rückblick
- Grundlagen des Sputterns
- Sputtersystem
- Prozesse im Target: Kinetik
- Ausbeute und Sputterrate
- Streuprozesse
- Prozesse im Substrat
- Reaktives Sputtern
- Bias-Sputtern
- Magnetron-Sputtern



# Sputtern

- Argonionen treffen auf ein Target aus Silicium

\*

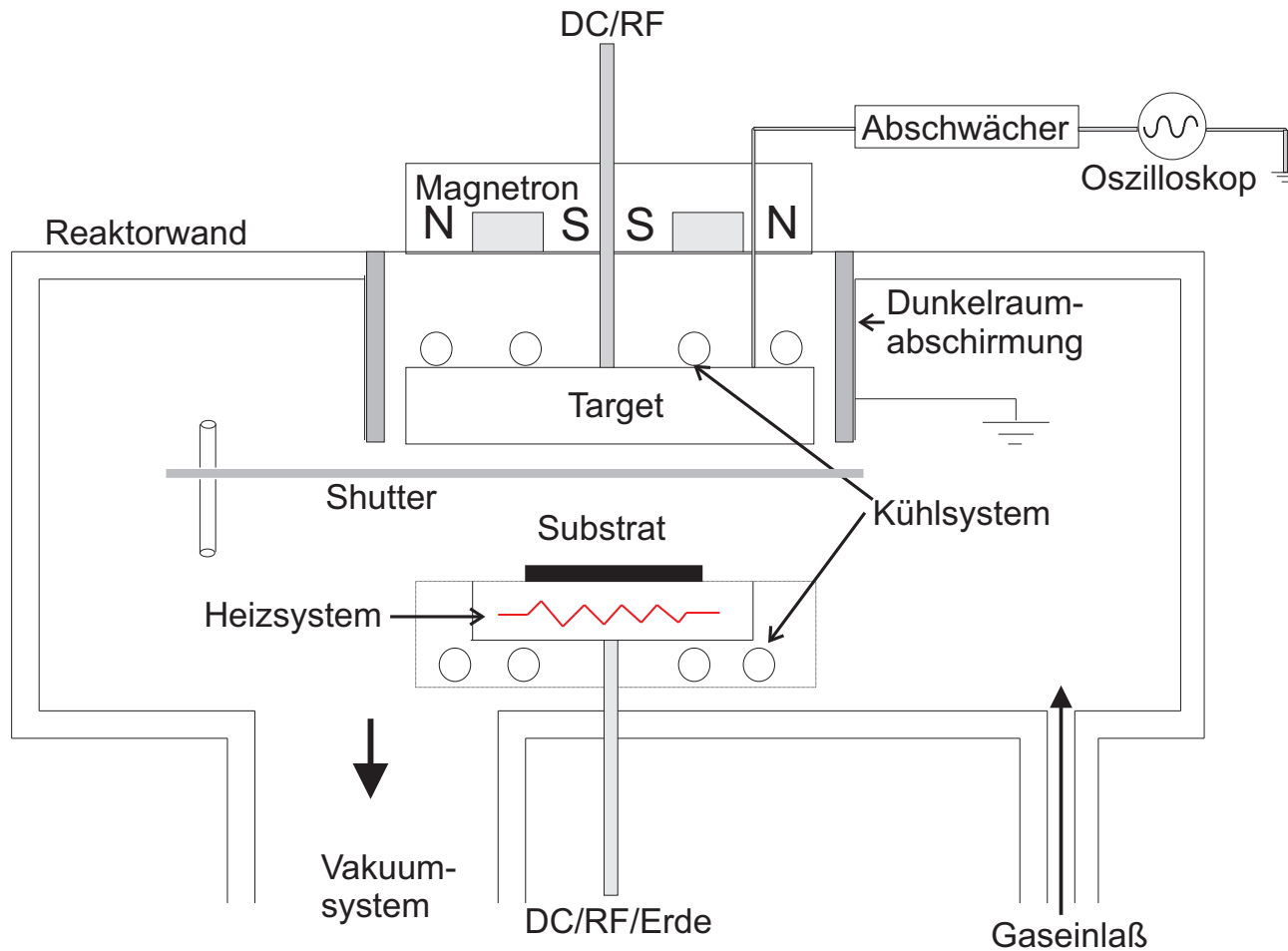


# Organisation

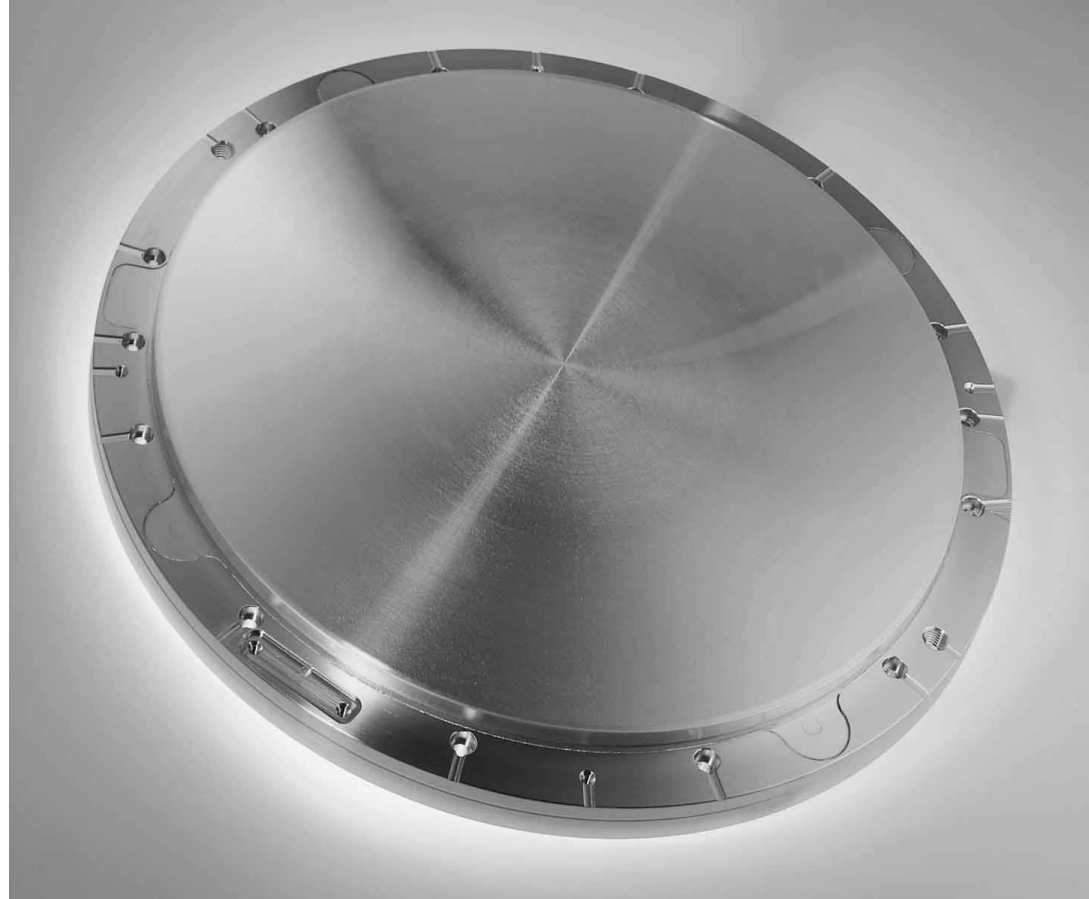
- Historischer Rückblick
- Grundlagen des Sputterns
- **Sputtersystem**
- Prozesse im Target: Kinetik
- Ausbeute und Sputterrate
- Streuprozesse
- Prozesse im Substrat
- Reaktives Sputtern
- Bias-Sputtern
- Magnetron-Sputtern



# Sputtersystem I



# Sputtersystem II



- Ein Aluminium-Target mit einem Durchmesser von 400 mm  
© Unaxis, 2002.



# Sputtersystem III



- Das Aluminium-Target während des Einbaus in eine Anlage, schließlich die vollständige Anlage, ein sog. „Cluster Tool“

© Unaxis, 2002.

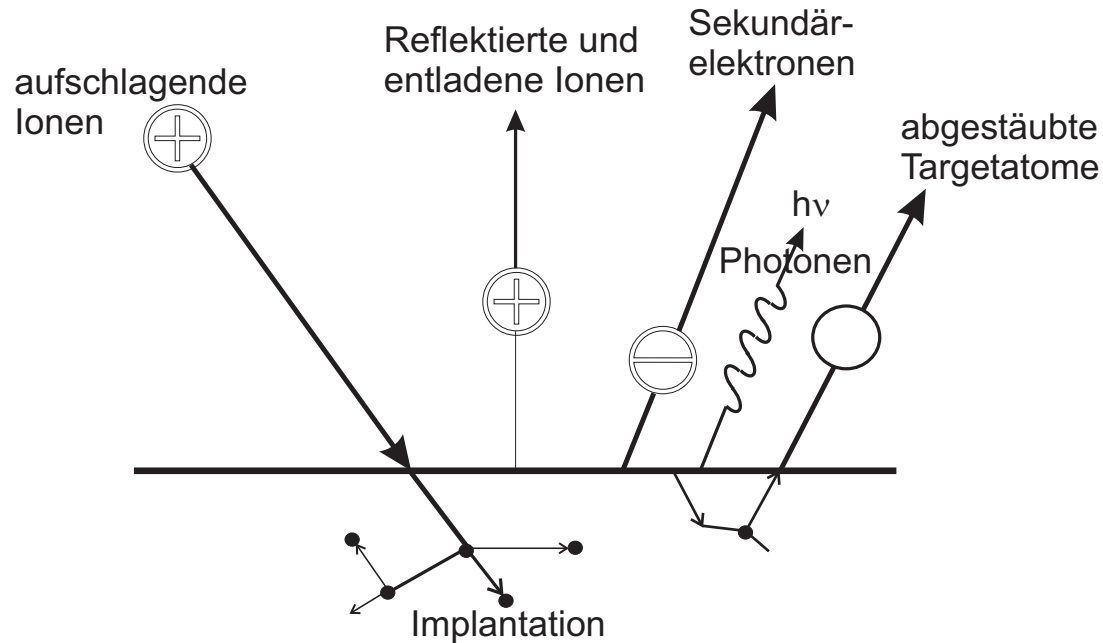


# Organisation

- Historischer Rückblick
- Grundlagen des Sputterns
- Sputtersystem
- Prozesse im Target: Kinetik
- Ausbeute und Sputterrate
- Streuprozesse
- Prozesse im Substrat
- Reaktives Sputtern
- Bias-Sputtern
- Magnetron-Sputtern



# Sputtern I



- Überblick über die verschiedenen Prozesse, die in einem Target bei Ionenbeschuss ablaufen.



# Sputtern II

- Argonionen treffen auf ein Target aus Silicium

\*



# Kinetik im Target I

- Wie wird die Energie vom aufschlagenden Ion auf die Targetatome weitergeleitet  
(Wechselwirkungspotentiale, Streuquerschnitte)?



# Kinetik im Target I

- Wie wird die Energie vom aufschlagenden Ion auf die Targetatome weitergeleitet (Wechselwirkungspotentiale, Streuquerschnitte)?
- Wieviel Energie verbleibt im oberflächennahen Bereich?



# Kinetik im Target I

- Wie wird die Energie vom aufschlagenden Ion auf die Targetatome weitergeleitet (Wechselwirkungspotentiale, Streuquerschnitte)?
- Wieviel Energie verbleibt im oberflächennahen Bereich?
- Wieviel Atome erhalten genügend Energie, um den Festkörper in die Gasphase verlassen zu können?



# Kinetik im Target II

- *Single-Knock-Regime* (eV bis einige 100 eV): die Zahl der rückgestoßenen Molekeln ist proportional dem Stoßquerschnitt: sie haben zwar genügend Energie, um abgestäubt zu werden, aber zu wenig, um eine Stoßkaskade zu generieren;



# Kinetik im Target II

- *Single-Knock-Regime* (eV bis einige 100 eV): die Zahl der rückgestoßenen Molekeln ist proportional dem Stoßquerschnitt: sie haben zwar genügend Energie, um abgestäubt zu werden, aber zu wenig, um eine Stoßkaskade zu generieren;
- *Bereich der linearen Kaskade* (keV-Bereich): die Zahl der rückgestoßenen Molekeln ist proportional der Energie, die in der Oberfläche verteilt wird. Es dominieren *Knock-on*-Stöße, Stöße zwischen sich bewegenden Atomen sind jedoch selten.



# Kinetik im Target II

- *Single-Knock-Regime* (eV bis einige 100 eV): die Zahl der rückgestoßenen Molekeln ist proportional dem Stoßquerschnitt: sie haben zwar genügend Energie, um abgestäubt zu werden, aber zu wenig, um eine Stoßkaskade zu generieren;
- *Bereich der linearen Kaskade* (keV-Bereich): die Zahl der rückgestoßenen Molekeln ist proportional der Energie, die in der Oberfläche verteilt wird. Es dominieren *Knock-on*-Stöße, Stöße zwischen sich bewegenden Atomen sind jedoch selten.
- *Spike-Regime* (MeV-Bereich): Zahl der rückgestoßenen Molekeln ist proportional der Energie, die im Volumen verteilt wird, die meisten Molekeln des Volumenelementes sind in Bewegung.



# Stöße im Target I

- Binäre Stoßapproximation: Der Energietransfer gehorcht den Impulsgesetzen, die Projektionen erleiden elastische Stöße an den (abgeschirmten) Kernen: T: Energie des rückgestoßenen Atoms,

$$T_m = \gamma E_{\text{kin}} = 4(m_i \cdot m_t) / (m_i + m_t) E_{\text{kin}}:$$

Energietransfer-Koeffizient,

$m_i$  und  $m_t$ : Massen eines abstäubenden Atoms bzw. eines Targetatoms,

$\vartheta$  dem Streuwinkel,

$E_{\text{kin}}$  der kinetischen Energie von  $m_i$ :

$$T = 4 \frac{m_i \cdot m_t}{m_i + m_t} E_{\text{kin}} \cos^2 \vartheta = \gamma E_{\text{kin}} \cos^2 \vartheta = T_m \cos^2 \vartheta.$$



# Stöße im Target II

- Dafür beträgt der differentielle Streuquerschnitt in der THOMAS-FERMI-Näherung

$$d\sigma = C E_{\text{kin}}^{-\beta} T^{-1-\beta} dT.$$

$0 \leq \beta \leq 1$ :

$\beta = 1$ : RUTHERFORD-Streuung,

$\beta = 1/2$ : keV-Bereich,

$\beta = 1/3$ : Bereich  $< 1$  keV),

$d\sigma$  dem differentiellen Streuquerschnitt.



# Stöße im Target III

- Für das BORNSche Potential (A und B Konstanten und dem Abschirmradius  $a = 0,022 \text{ nm}$ )

$$U(R) = Ae^{-BR}$$

$$C = 12\pi a^2 = 1,8064^2.$$



# Stöße im Target III

- Für das BORNSche Potential (A und B Konstanten und dem Abschirmradius  $a = 0,022$  nm)

$$U(R) = Ae^{-BR}$$

$$C = 12\pi a^2 = 1,8064^2.$$

- C enthält den Einfluß des zwischenatomaren Potentials.



# Stöße im Target III

- Für das BORNSche Potential (A und B Konstanten und dem Abschirmradius  $a = 0,022 \text{ nm}$ )

$$U(R) = Ae^{-BR}$$

$$C = 12\pi a^2 = 1,8064^2.$$

- C enthält den Einfluß des zwischenatomaren Potentials.
- Für einen optimalen Energietransfer sollten die Atommassen des Targets und der abstäubenden Atome möglichst gleich groß sein.



# Organisation

- Historischer Rückblick
- Grundlagen des Sputterns
- Sputtersystem
- Prozesse im Target: Kinetik
- **Ausbeute und Sputterrate**
- Streuprozesse
- Prozesse im Substrat
- Reaktives Sputtern
- Bias-Sputtern
- Magnetron-Sputtern



# Ausbeute I

- Dieser Energietransfer bestimmt die Ausbeute  $S$  mit, das Verhältnis der Zahl der abgestäubten Atome zu der der auftreffenden Ionen.



# Ausbeute I

- Dieser Energietransfer bestimmt die Ausbeute  $S$  mit, das Verhältnis der Zahl der abgestäubten Atome zu der der auftreffenden Ionen.
- $S$  hängt ab von der Effektivität des Energietransfers in die Oberfläche des Targets, da nur diese Atome abgestäubt werden können; diese Größe hängt entscheidend von der mittleren Ordnungszahl des Targets ab und wird als nukleares Bremsvermögen  $s_n(E)$  bezeichnet:



# Ausbeute I

- Dieser Energietransfer bestimmt die Ausbeute  $S$  mit, das Verhältnis der Zahl der abgestäubten Atome zu der der auftreffenden Ionen.
- $S$  hängt ab von der Effektivität des Energietransfers in die Oberfläche des Targets, da nur diese Atome abgestäubt werden können; diese Größe hängt entscheidend von der mittleren Ordnungszahl des Targets ab und wird als nukleares Bremsvermögen  $s_n(E)$  bezeichnet:
- $$s_n(E) = \int_0^{T_m} T d\sigma.$$



# Ausbeute II

•  $s_n(E) = \int_0^{T_m} T d\sigma.$



# Ausbeute II

- $s_n(E) = \int_0^{T_m} T d\sigma.$
- Für Ionenenergien bis etwa 1 keV ist in guter Näherung ( $\beta \approx 0$ : BORNsches Potential, es besteht jedoch nahezu keine numerische Differenz für  $\beta = 1/3$ ):



# Ausbeute II

- $s_n(E) = \int_0^{T_m} T d\sigma.$
- Für Ionenenergien bis etwa 1 keV ist in guter Näherung ( $\beta \approx 0$ : BORNsches Potential, es besteht jedoch nahezu keine numerische Differenz für  $\beta = 1/3$ ):
- $s_n(E) = C\gamma \cdot E_{\text{kin}}.$



# Ausbeute II

- $s_n(E) = \int_0^T T_m d\sigma.$
- Für Ionenenergien bis etwa 1 keV ist in guter Näherung ( $\beta \approx 0$ : BORNsches Potential, es besteht jedoch nahezu keine numerische Differenz für  $\beta = 1/3$ ):
- $s_n(E) = C\gamma \cdot E_{\text{kin}}.$
- $S \propto n \wedge S \propto 1/U_0$  ( $n$ : Teilchenzahldichte,  $U_0$ : Oberflächenenergie)  $\Rightarrow$



# Ausbeute III

$$S = \frac{\alpha n C \gamma}{U_0} \cdot E_{\text{kin}} :$$

Sputterausbeute hängt linear von der kinetischen Energie der Projektile ab.



# Ausbeute III

$$S = \frac{\alpha n C \gamma}{U_0} \cdot E_{\text{kin}} :$$

Sputterausbeute hängt linear von der kinetischen Energie der Projektile ab.

- $\alpha$ : monoton steigende, dimensionslose Funktion, die wesentlich von den Massenverhältnissen und vom Einfallswinkel abhängt.



# Ausbeute III

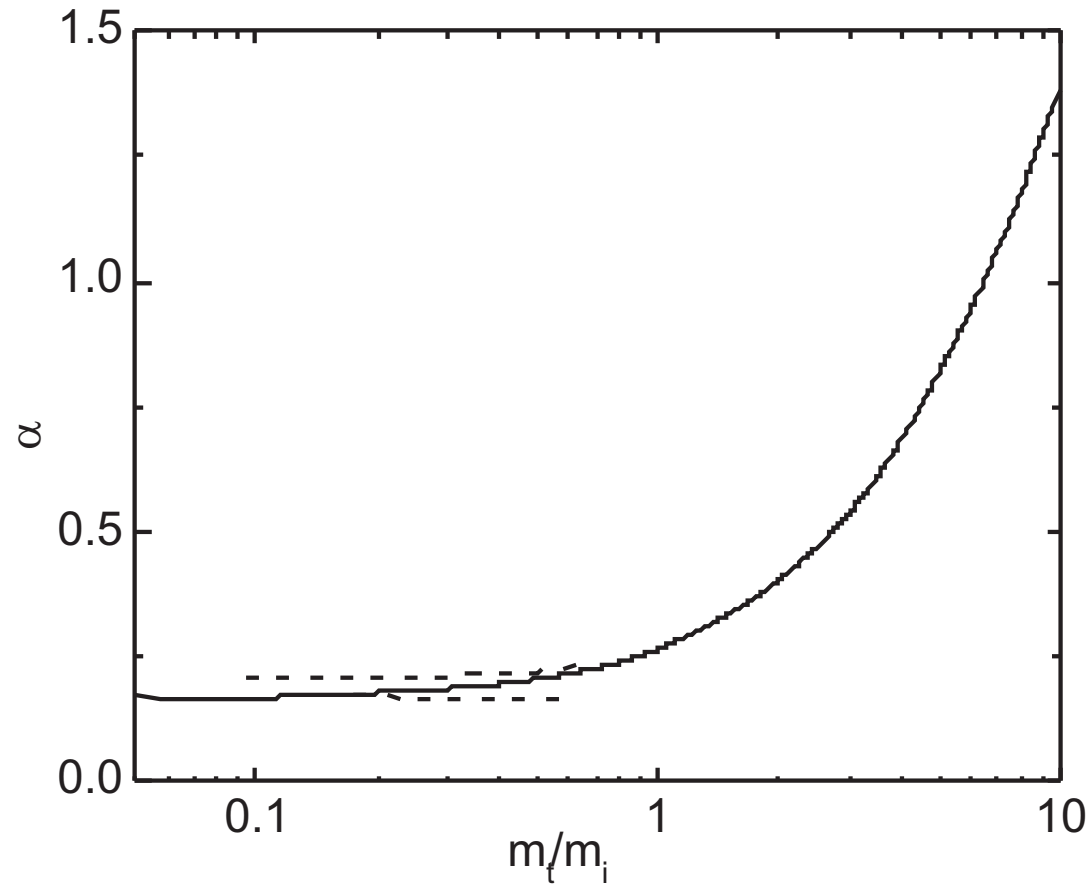
$$S = \frac{\alpha n C \gamma}{U_0} \cdot E_{\text{kin}} :$$

Sputterausbeute hängt linear von der kinetischen Energie der Projektile ab.

- $\alpha$ : monoton steigende, dimensionslose Funktion, die wesentlich von den Massenverhältnissen und vom Einfallswinkel abhängt.
- $\alpha$  ist nahezu unabhängig von der kinetischen Energie der auftreffenden Atome und proportional  $1/(\cos \alpha)^a$  mit  $a$  einem anpaßbaren Parameter, der von dem Atommassenverhältnis  $m_t/m_i$  abhängt.



# Ausbeute IV



- $\alpha$  als Funktion des Massenverhältnisses  $m_t/m_i$  für  $1/3 < \beta < 1/2$  (© The American Physical Society).



# Ausbeute V

- $\alpha$  steigt mit zunehmendem Atommassenverhältnis  $m_t/m_i$  an (relative Zunahme der Kleinwinkelstreuung bei zunehmender Masse der Projektilionen).



# Ausbeute V

- $\alpha$  steigt mit zunehmendem Atommassenverhältnis  $m_t/m_i$  an (relative Zunahme der Kleinwinkelstreuung bei zunehmender Masse der Projektilionen).
- Bei gleichem  $s_n(E)$  weisen leichte Ionen eine höhere Sputterausbeute auf als schwere.



# Ausbeute V

- $\alpha$  steigt mit zunehmendem Atommassenverhältnis  $m_t/m_i$  an (relative Zunahme der Kleinwinkelstreuung bei zunehmender Masse der Projektilionen).
- Bei gleichem  $s_n(E)$  weisen leichte Ionen eine höhere Sputterausbeute auf als schwere.
- Die Winkelabhängigkeit von  $\alpha$  steigt ebenfalls monoton mit dem Inzidenzwinkel der Ionen an (deren kinetische Energie wird außer bei streifendem Einfall stärker in Oberflächennähe dissipiert).



# Ausbeute $V$

- $\alpha$  steigt mit zunehmendem Atommassenverhältnis  $m_t/m_i$  an (relative Zunahme der Kleinwinkelstreuung bei zunehmender Masse der Projektilionen).
- Bei gleichem  $s_n(E)$  weisen leichte Ionen eine höhere Sputterausbeute auf als schwere.
- Die Winkelabhängigkeit von  $\alpha$  steigt ebenfalls monoton mit dem Inzidenzwinkel der Ionen an (deren kinetische Energie wird außer bei streifendem Einfall stärker in Oberflächennähe dissipiert).
- Für ein BORNSches Potential wird  $\alpha$  unabhängig von der Ionenenergie und ist nur eine Funktion des Einfallswinkels und des Verhältnisses  $m_t/m_i$ .

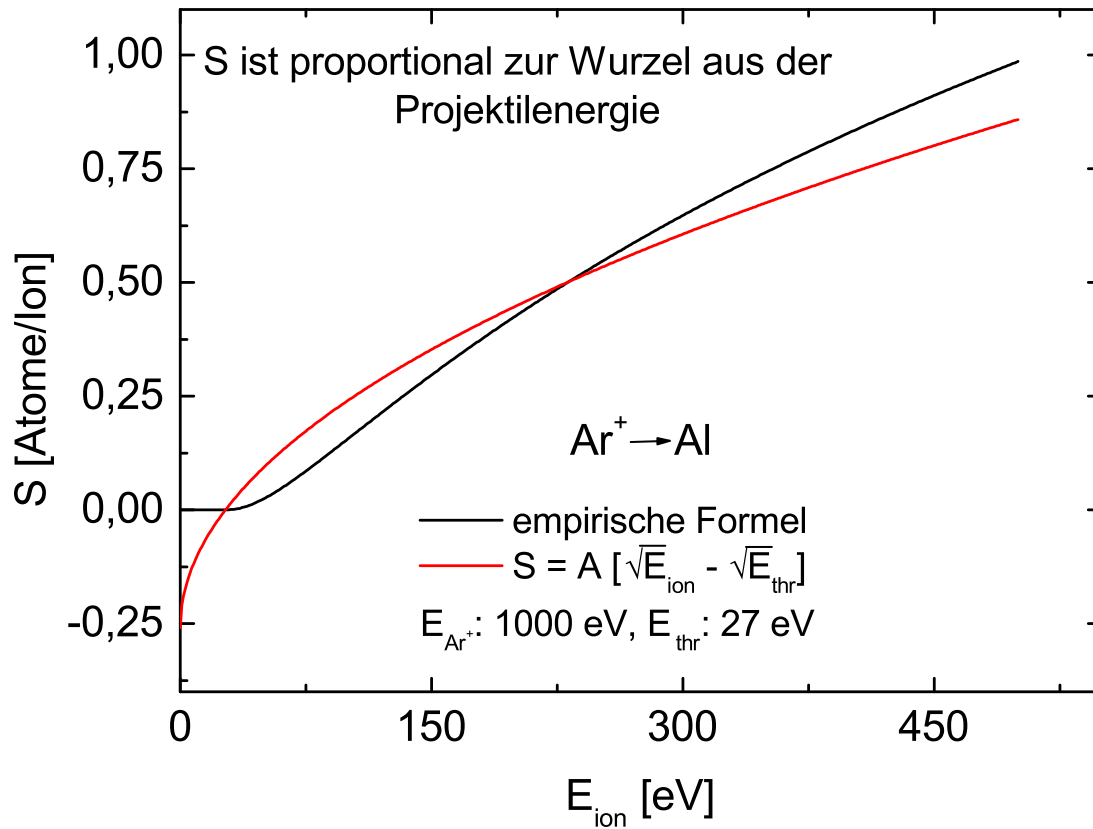


# Ausbeute $V$

- $\alpha$  steigt mit zunehmendem Atommassenverhältnis  $m_t/m_i$  an (relative Zunahme der Kleinwinkelstreuung bei zunehmender Masse der Projektilionen).
- Bei gleichem  $s_n(E)$  weisen leichte Ionen eine höhere Sputterausbeute auf als schwere.
- Die Winkelabhängigkeit von  $\alpha$  steigt ebenfalls monoton mit dem Inzidenzwinkel der Ionen an (deren kinetische Energie wird außer bei streifendem Einfall stärker in Oberflächennähe dissipiert).
- Für ein BORNSches Potential wird  $\alpha$  unabhängig von der Ionenenergie und ist nur eine Funktion des Einfallswinkels und des Verhältnisses  $m_t/m_i$ .
- Die Energieabhängigkeit der Sputterrate wird damit wesentlich bestimmt durch das nukleare Bremsvermögen.



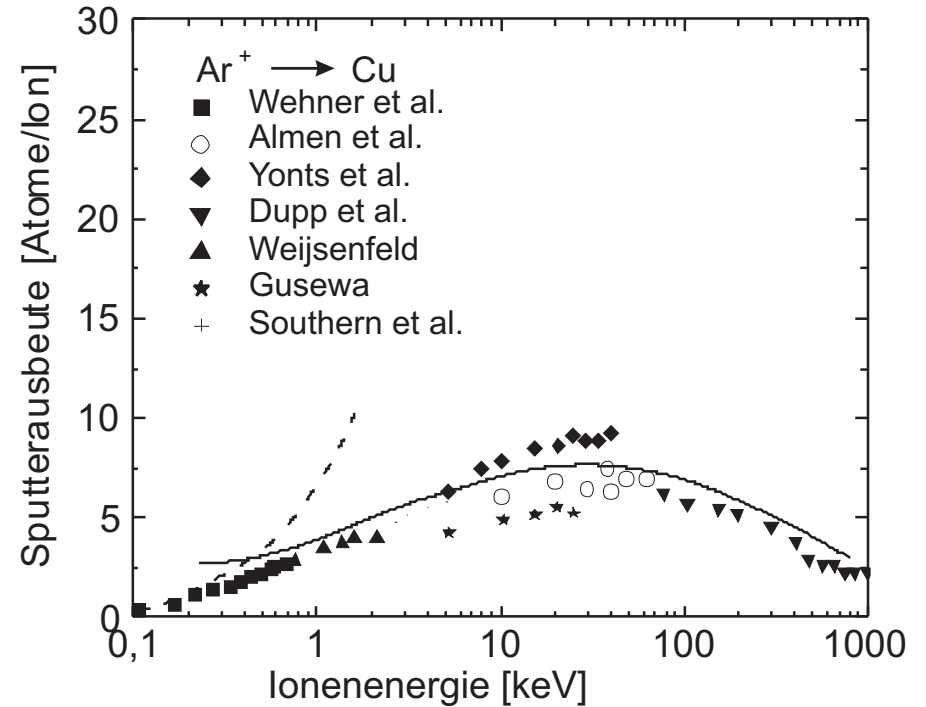
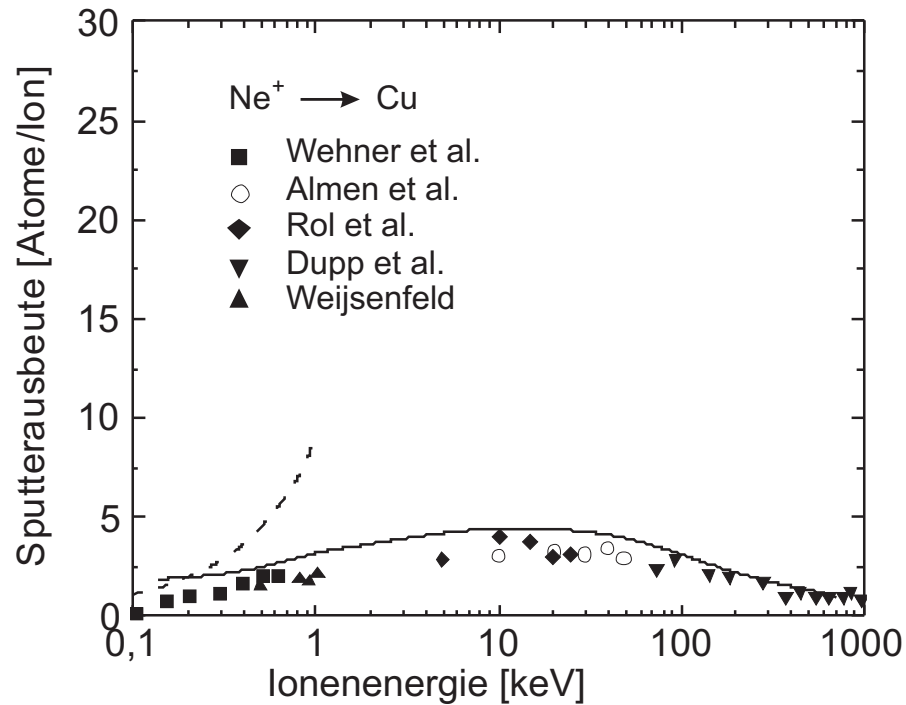
# Ausbeute VI



- Vergleich der Sputterraten von Aluminium durch Ar<sup>+</sup>-Ionen zwischen einer einfachen Wurzelabhängigkeit und einer komplizierteren Funktion bei senkrechter Inzidenz von MATSUNAMI *et al.* in *Energy Dependence of the Yields of Ion-Induced Sputtering of Monatomic Solids*, IPPJ-AM-32 (Institute of Plasma Physics, Nagoya University, Japan, 1983).



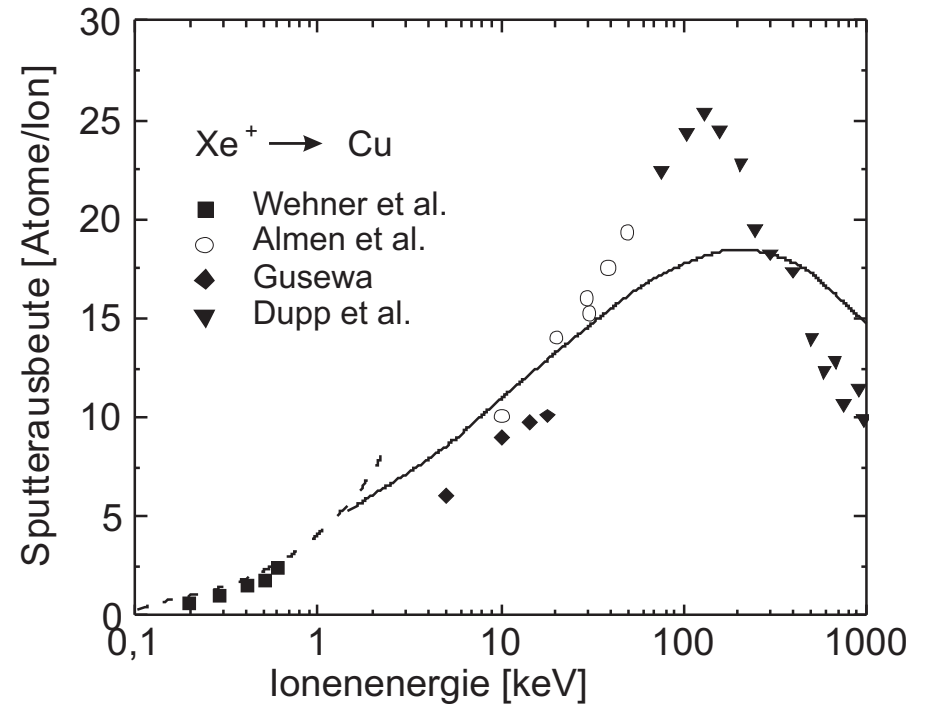
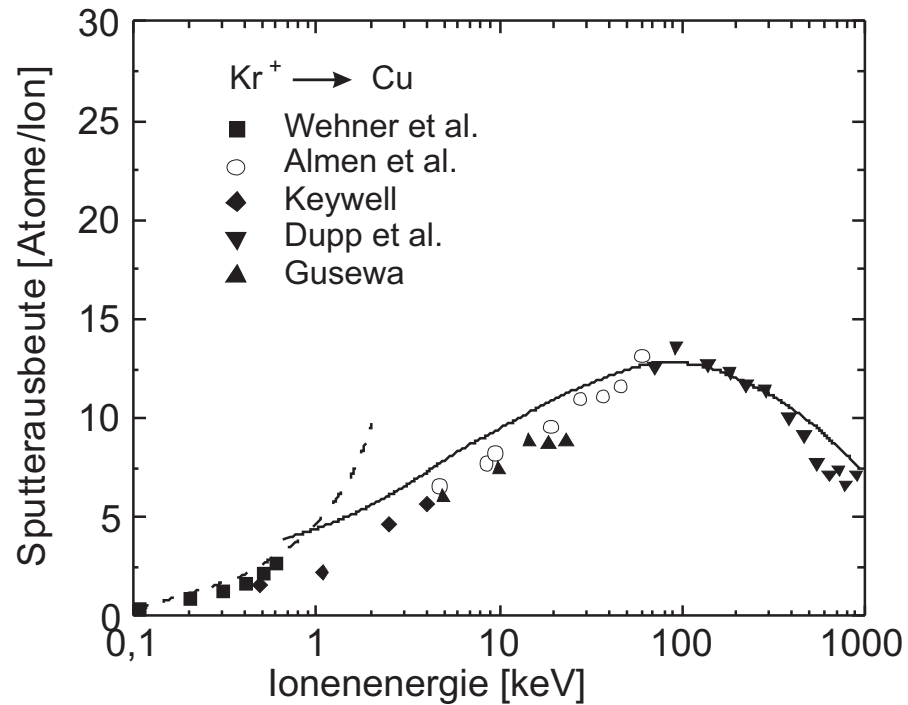
# Ausbeute VII



● Sputterausbeute als Funktion der Energie der Projektilionen.



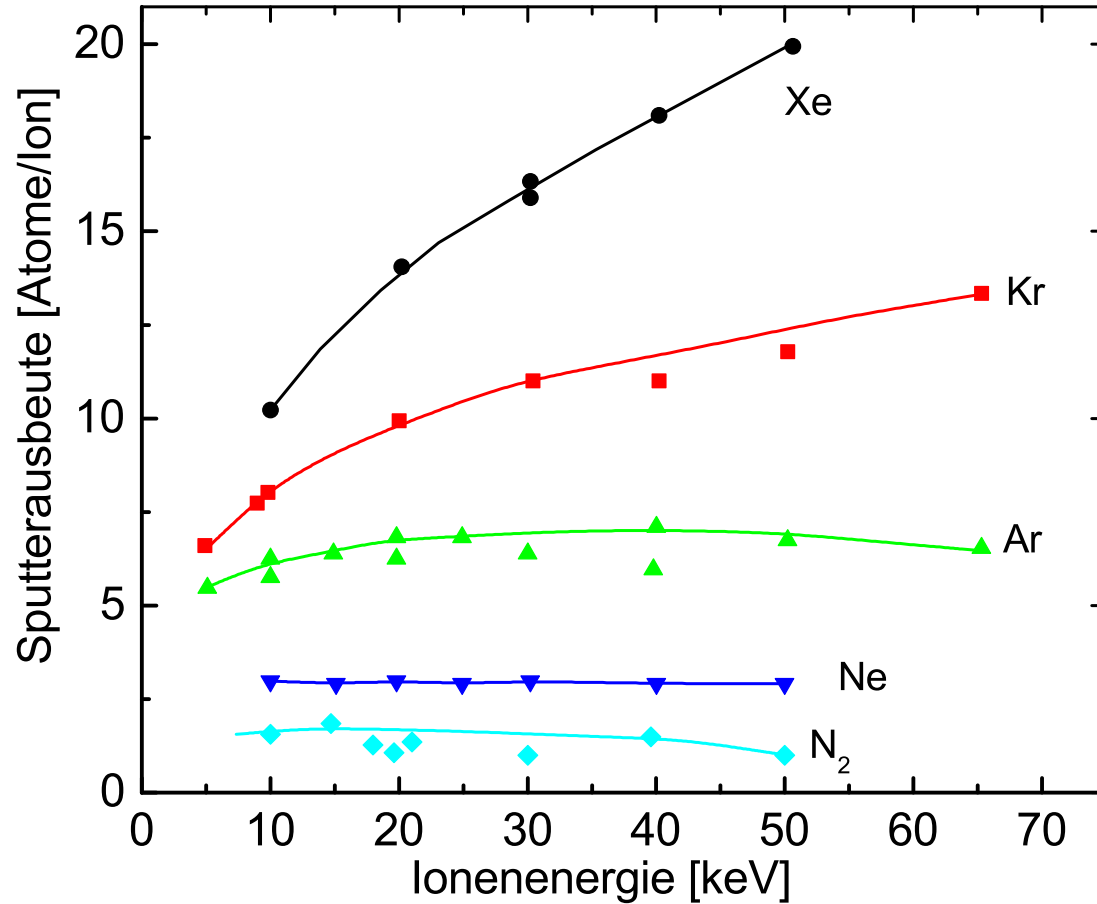
# Ausbeute VIII



● Sputterausbeute als Funktion der Energie der Projektilionen.



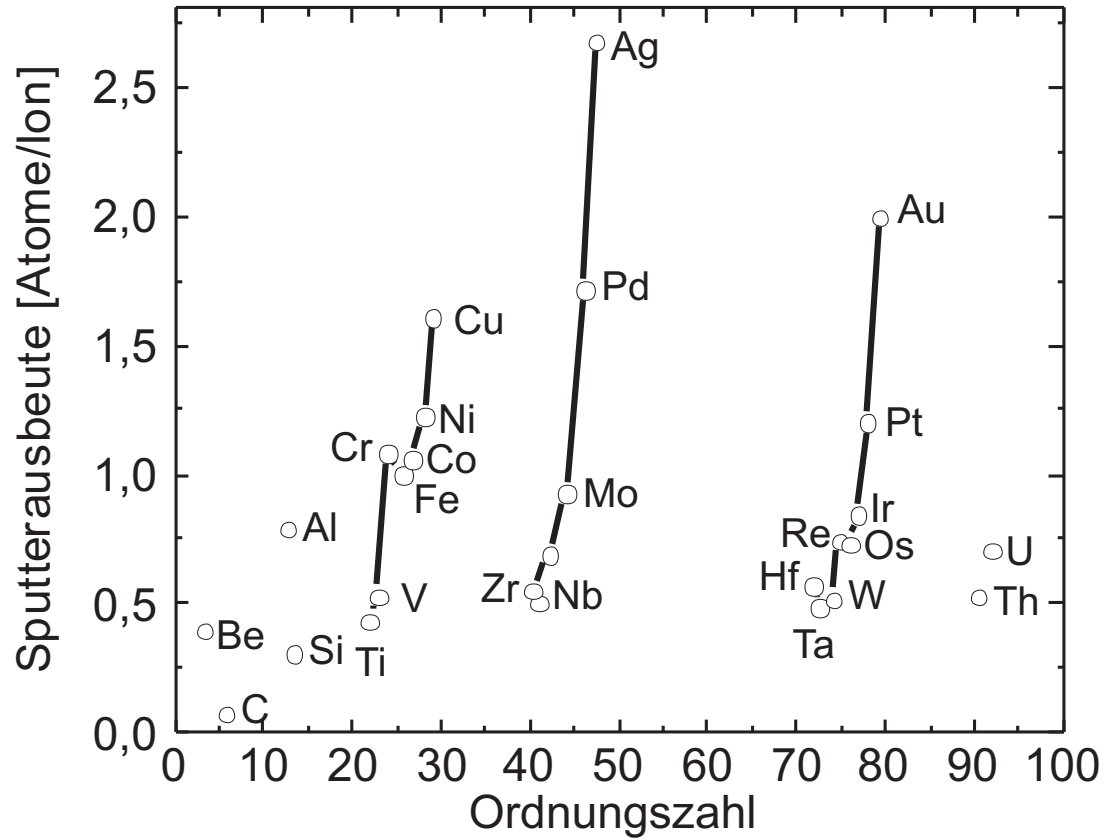
# Ausbeute IX



- Detail der vorherigen Bilder, Kupfer wird von Edelgasionen und N<sub>2</sub><sup>+</sup> abgesäubt.



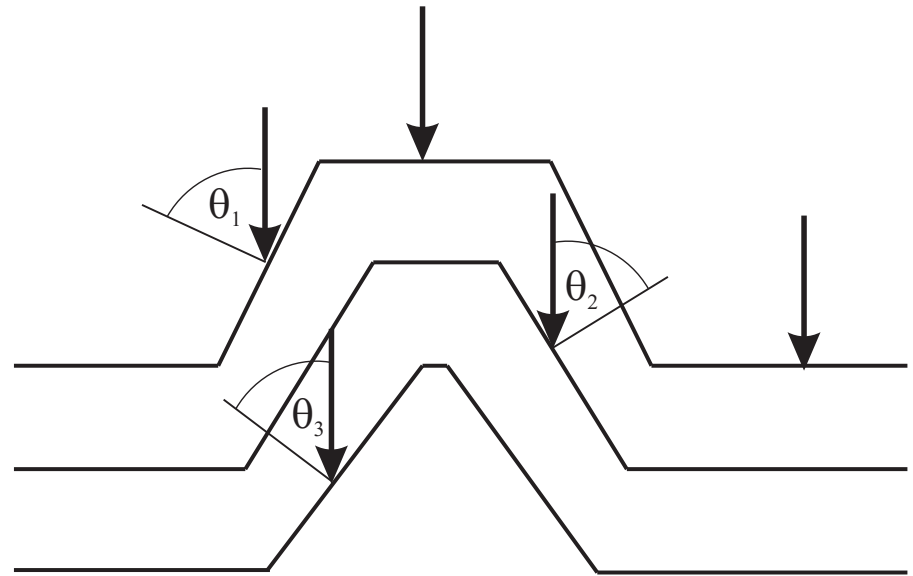
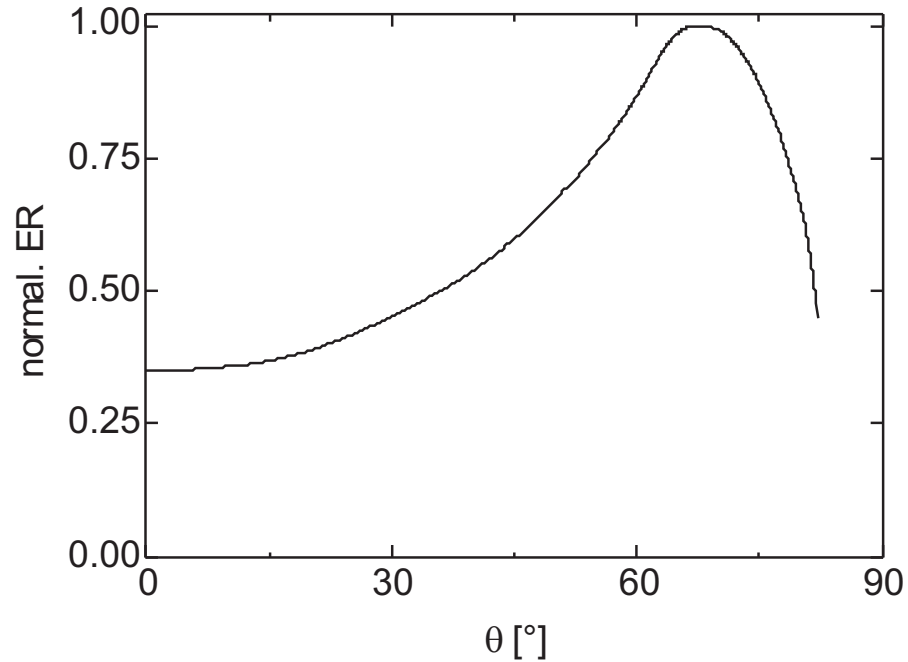
# Ausbeute X



- Periodische Abhängigkeit der Sputterausbeute von  $\text{Ar}^+$ -Ionen (400 eV).



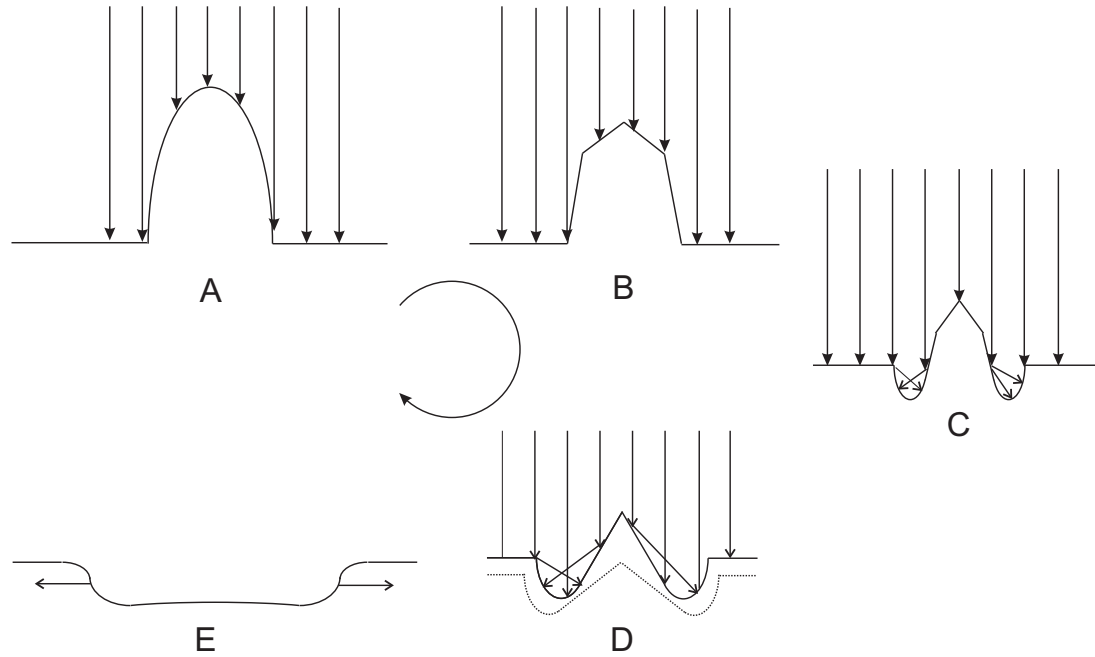
# Ausbeute XI



- Die Winkelabhängigkeit der Sputterausbeute führt zur Facettenbildung.



# Rauhigkeitsinduzierter Mechanismus I



- Verschiedene Stadien des Rauhigkeitsinduzierten Mechanismus nach AUCIELLO.

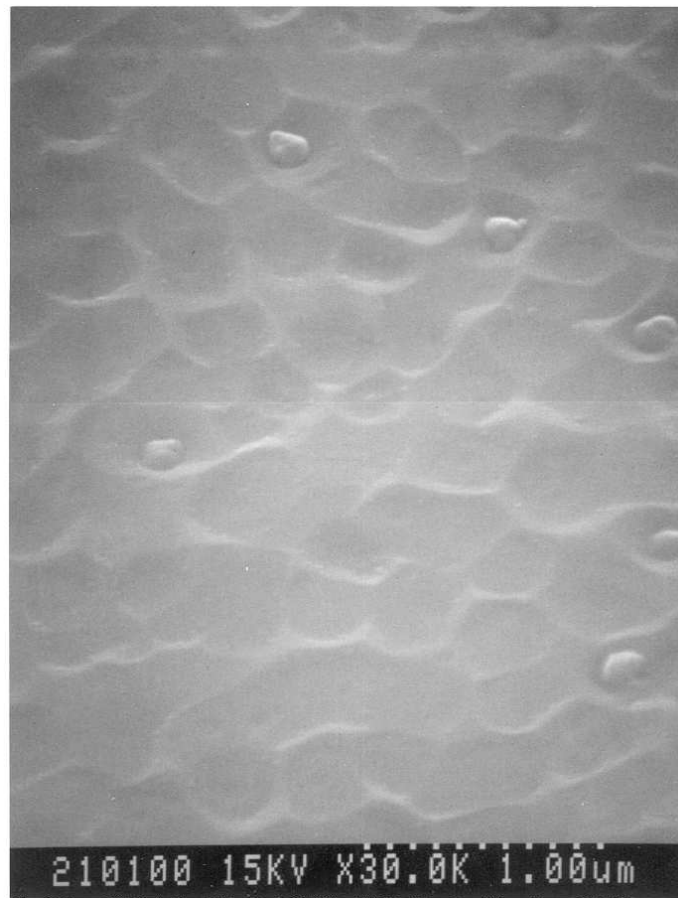


# Rauhigkeitsinduzierter Mechanismus II

- **Primäreffekt:** Erzeugung einer Struktur durch Primärionenbeschuß(Winkelabhängigkeit d. Sputterrate)
- führt zu der Bildung von Sekundärpartikeln.
- **Sekundäreffekt:** Bombardement abgesputterter Sekundärpartikel
- führt zur Ausbildung von Konussen und Pyramiden.
- **Tertiäreffekte:** Konusse und Pyramiden stehen in Gruben (Pits), Gräben (Trenches) und Löchern.
- Endstadium: unruhige, aber ziemlich flache Oberfläche.



# Rauhigkeitsinduzierter Mechanismus III



- Selbst auf einer zu Beginn sehr glatten Oberfläche entsteht schließlich die Tertiärstruktur (Sandstrand).

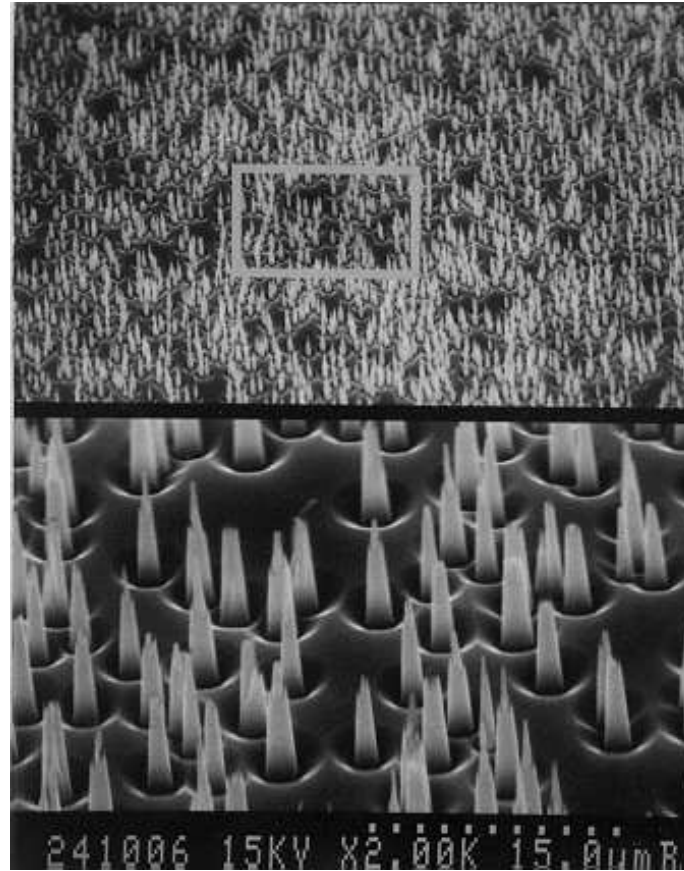
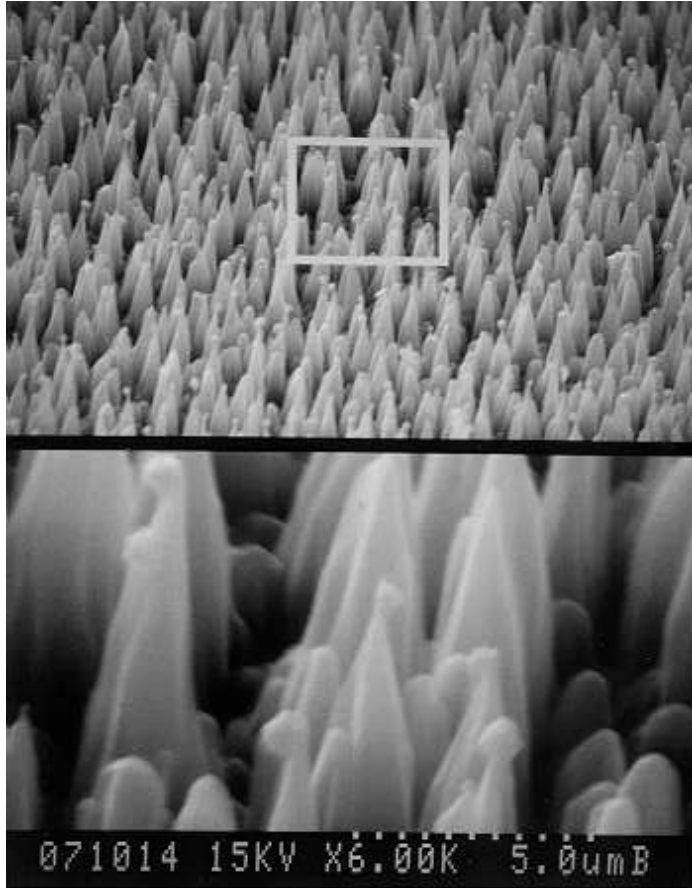


# Kontaminationsinduzierter Mechanismus

- **Primäreffekt:** schlechtes Vakuum erzeugt auf der Oberfläche des Targets Oxide und Nitride mit sehr hoher Gitterenergie,
- ⇒ Bildung von **Sekundärpartikeln:**
- Konusse und Pyramiden.
- **Tertiäreffekte:** Konusse und Pyramiden stehen in Gruben (Pits), Gräben (Trenches) und Löchern.
- Endstadium: unruhige, aber ziemlich flache Oberfläche.



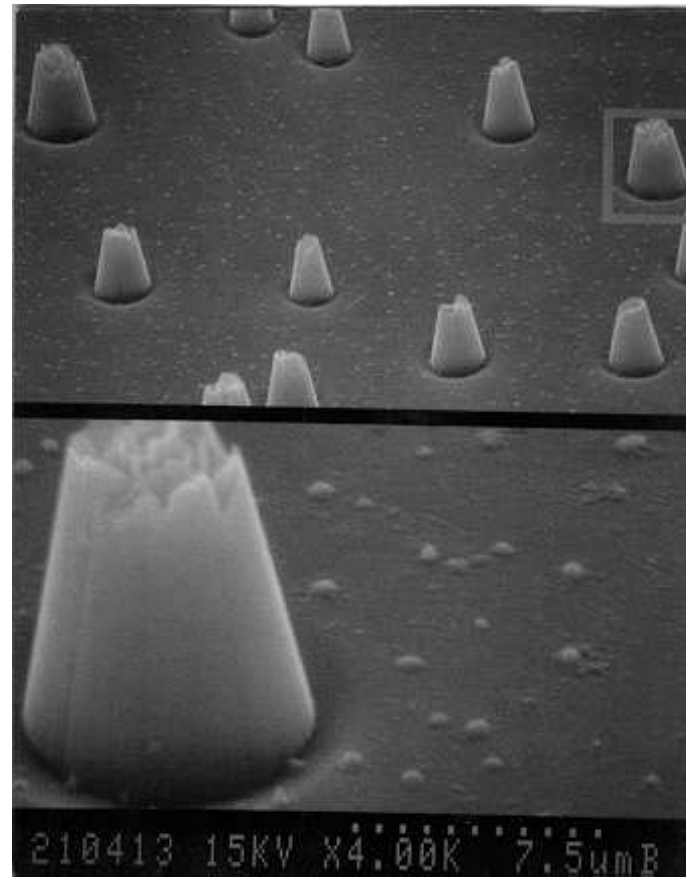
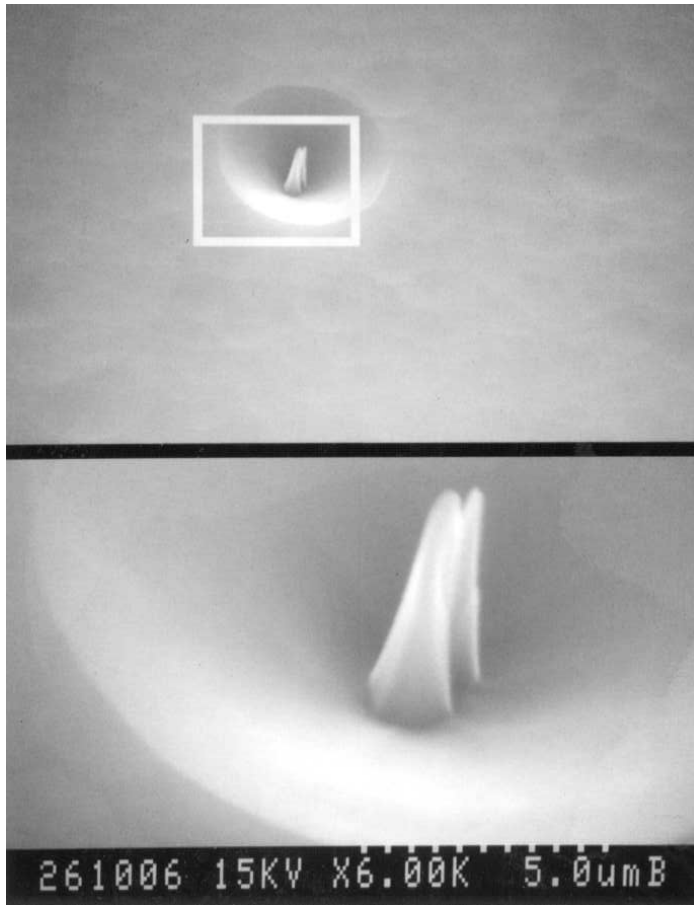
# Features I



Entstehung einer bizarren Oberflächen-Topographie  
Sehr spitze Pyramiden in SiC.



# Features II



Lks.: Konus in einem Pit (Si).

Re.: Spitze und abgeschnittene Konusse in AlGaAs

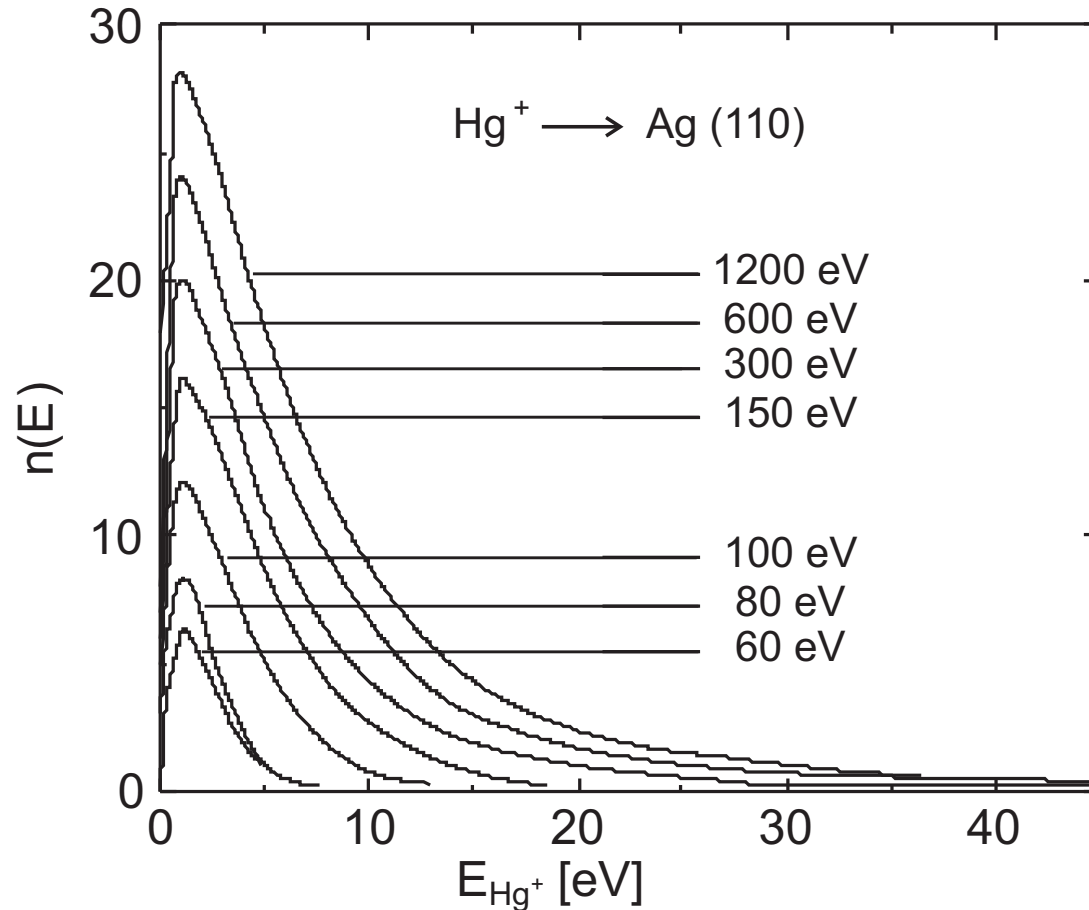


# Organisation

- Historischer Rückblick
- Grundlagen des Sputterns
- Sputtersystem
- Prozesse im Target: Kinetik
- Ausbeute und Sputterrate
- **Streuprozesse**
- Prozesse im Substrat
- Reaktives Sputtern
- Bias-Sputtern
- Magnetron-Sputtern



# Streuprozesse I



- Energieverteilungen von Atomen, die in [110]-Richtung von der (110)-Oberfläche eines Silber-Einkristalls durch senkrecht einfallende Quecksilber-Ionen abgestäubt wurden



© The American Institute of Physics).

# Elast. Streuung zw. schweren Teilchen I

$\angle$	$d\sigma(\vartheta)/d\Omega$	
	<i>Hartree-Potential</i>	<i>Coulomb-Potential</i>
0	$9 \cdot 10^3$	$\infty$
12	7,85	124,0
28	2,00	6,10
34	0,72	2,85
57	0,21	0,40
80	0,08	0,12
114	0,04	0,04
137		0,03
167		0,02

Berechnete differentielle

Streuquerschnitte  $d\sigma(\vartheta)/d\Omega$  pro

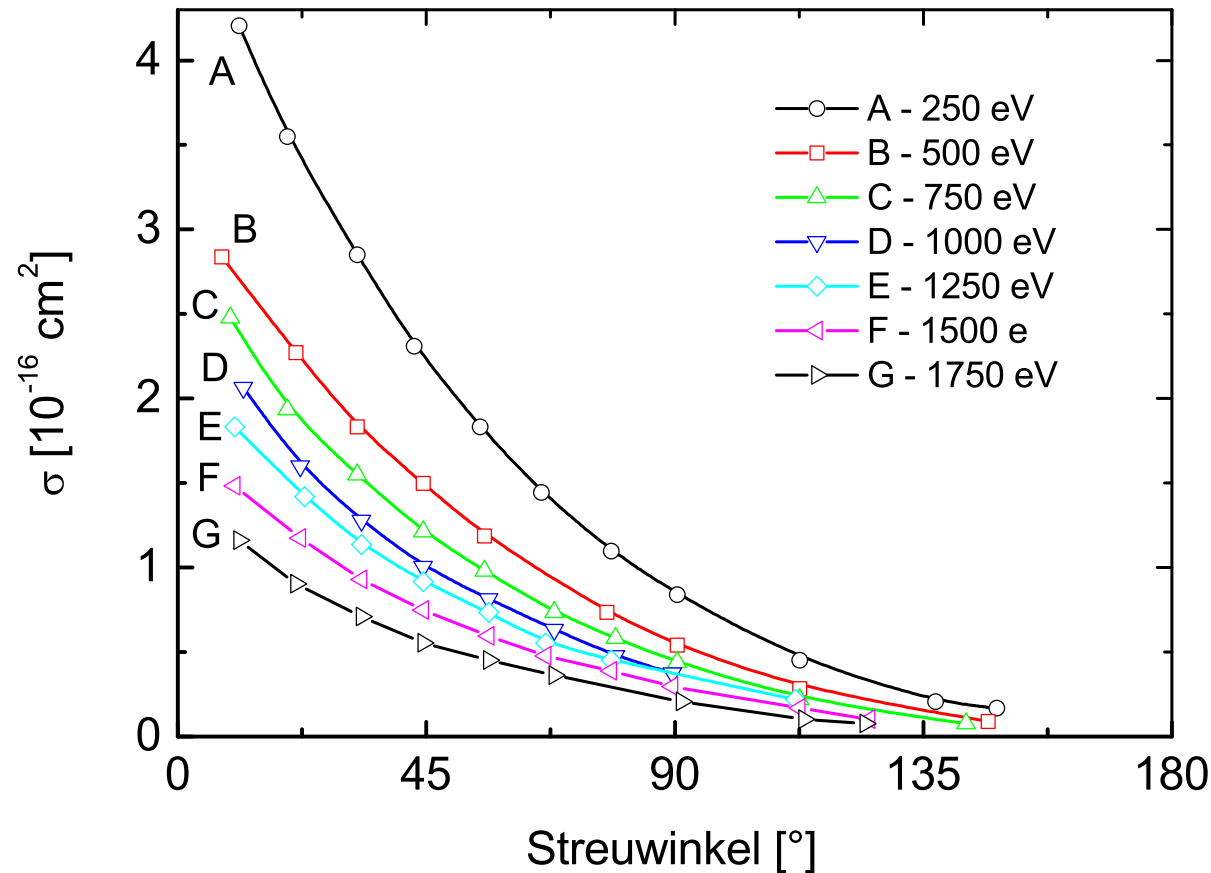
Einheitsraumwinkel für Protonen der

Energie von 110 eV in Helium in

Einheiten von  $a_0^2$ .



# Elast. Streuung zw. schweren Teilchen II



Streuquerschnitt von Ar<sup>+</sup> in Ar  
in Abhängigkeit des  
Streuwinkels nach BERRY.



# Gleichungen

- elastische Streuung schwerer Teilchen in Argon



# Gleichungen

- elastische Streuung schwerer Teilchen in Argon



$$\nu_m = n_{\text{Ar}} \sigma \langle v_{\text{Ag}} \rangle . \quad (8)$$



# Gleichungen

- elastische Streuung schwerer Teilchen in Argon



- 

$$\nu_m = n_{\text{Ar}} \sigma \langle v_{\text{Ag}} \rangle . \quad (8)$$

- 

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sigma n_{\text{Ar}}} . \quad (9)$$



# Gleichungen

- elastische Streuung schwerer Teilchen in Argon



- 

$$\nu_m = n_{\text{Ar}} \sigma \langle v_{\text{Ag}} \rangle . \quad (8)$$

- 

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sigma n_{\text{Ar}}} . \quad (9)$$

- 

$$\nu_m = \sqrt{2} \frac{\langle v \rangle}{\lambda} \quad (10)$$



# Beispiel

- Ag, Anfangsenergie 5 eV, Ar-Druck: 20 mTorr,



# Beispiel

- Ag, Anfangsenergie 5 eV, Ar-Druck: 20 mTorr,
- $\sigma : 30 \text{ \AA}^2, n_{\text{Ar}} : 70 \times 10^{13} / \text{cm}^3$



# Beispiel

- Ag, Anfangsenergie 5 eV, Ar-Druck: 20 mTorr,
- $\sigma : 30 \text{ \AA}^2$ ,  $n_{\text{Ar}} : 70 \times 10^{13} / \text{cm}^3$
- Anfangsgeschwindigkeit 3 000 m/sec,  $\lambda : 2 \text{ mm}$



# Beispiel

- Ag, Anfangsenergie 5 eV, Ar-Druck: 20 mTorr,
- $\sigma : 30 \text{ \AA}^2$ ,  $n_{\text{Ar}} : 70 \times 10^{13} / \text{cm}^3$
- Anfangsgeschwindigkeit 3 000 m/sec,  $\lambda : 2 \text{ mm}$
- $\nu_m \sim 10^6 / \text{sec}$ .



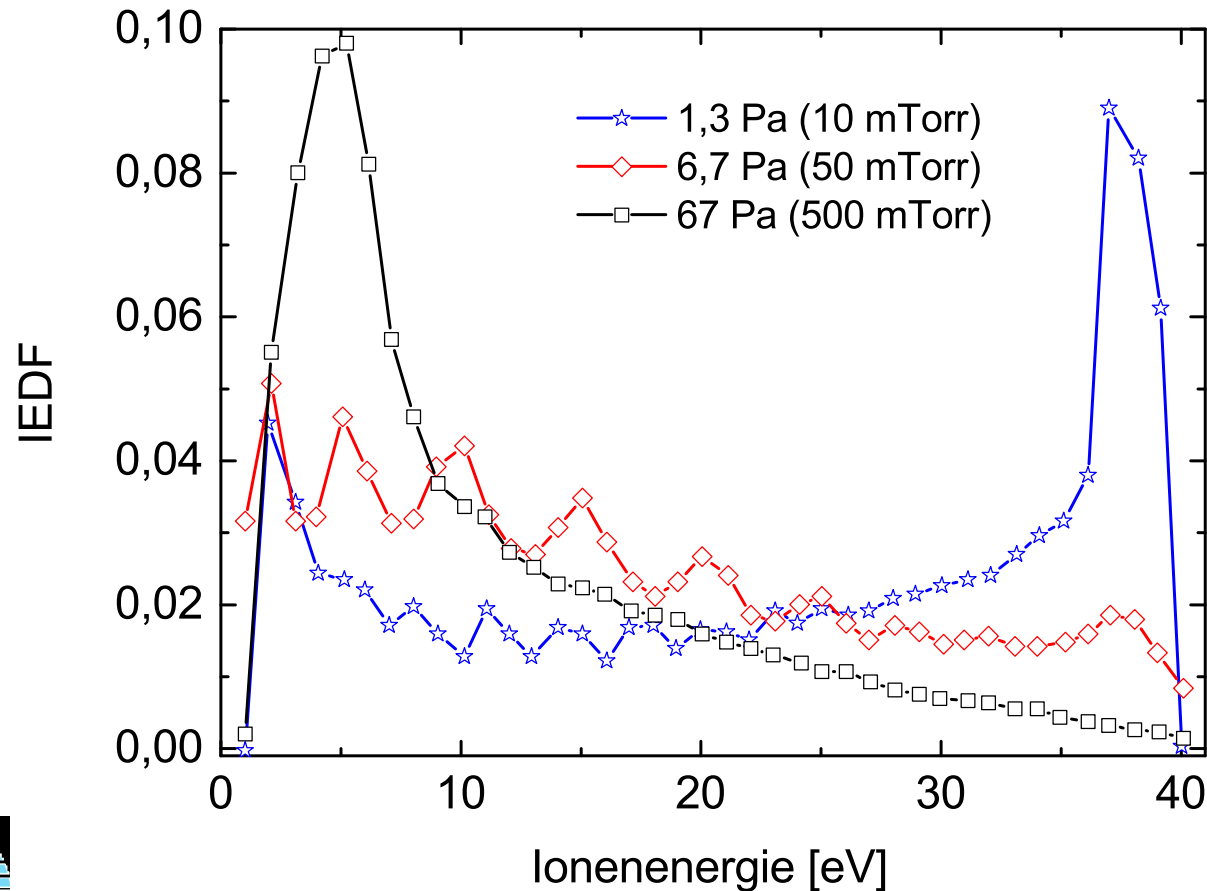
# Beispiel

- Ag, Anfangsenergie 5 eV, Ar-Druck: 20 mTorr,
- $\sigma : 30 \text{ \AA}^2$ ,  $n_{\text{Ar}} : 70 \times 10^{13} / \text{cm}^3$
- Anfangsgeschwindigkeit 3 000 m/sec,  $\lambda : 2 \text{ mm}$
- $\nu_m \sim 10^6 / \text{sec}$ .
- Bei einem Elektrodenabstand von 10 cm bedeutet das eine Stoßzahl von 50  $\Rightarrow$  die Silberionen sind voll thermalisiert!

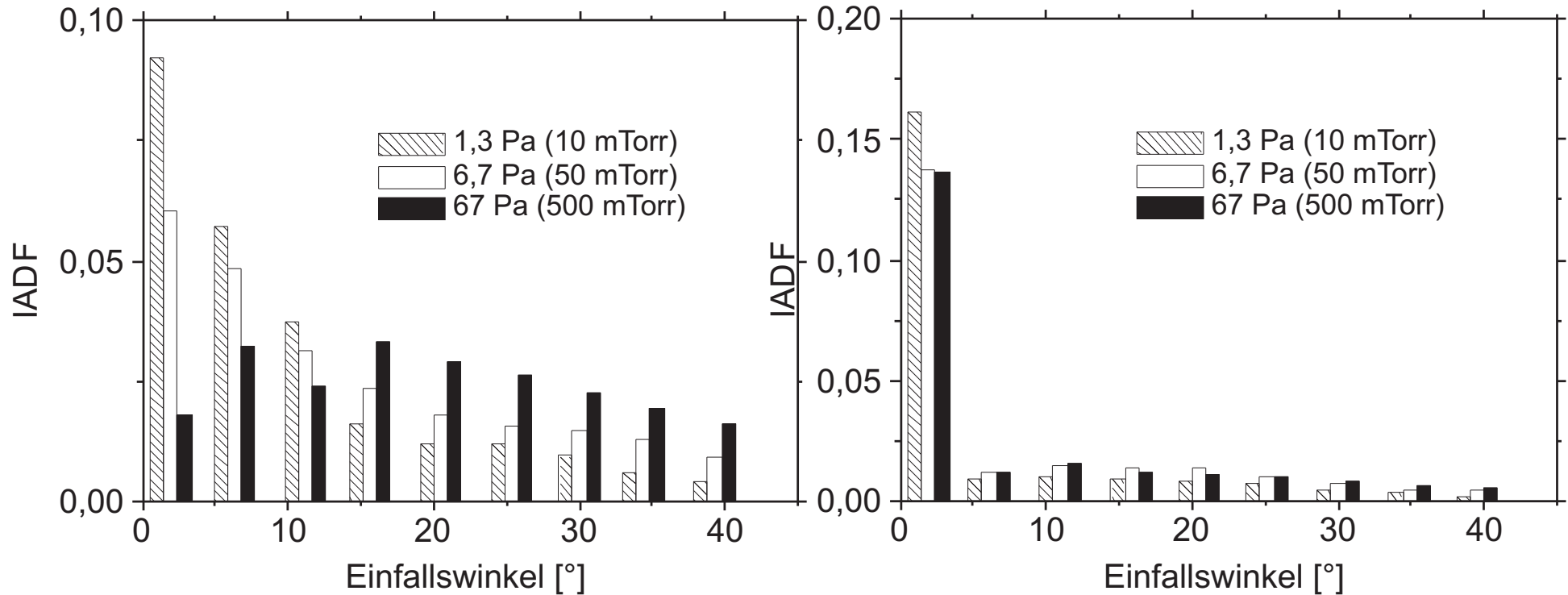


# Energieverteilung

Gemessene Druckabhängigkeit der  $IEDF$  von Argon (CCP, 13,56 MHz). Gut aufgelöst ist der Doppel-„Peak“ bei sehr niedrigen Drücken. Bei 67 Pa (500 mTorr) ist dagegen die  $IEDF$  „voll entwickelt“.



# Winkelverteilung



- *IADFs* für eine Ar-RF-Entladung bei 13,56 MHz und verschiedenen Drücken, Iks.: gemessen, re.: MC-Simulation.

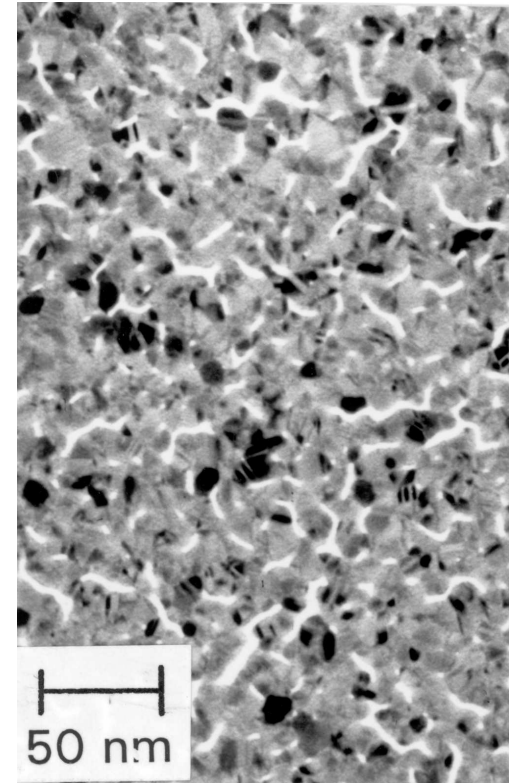
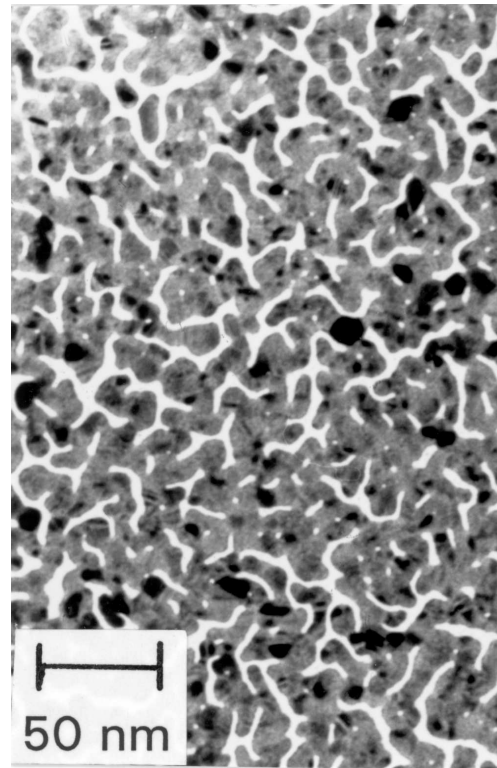
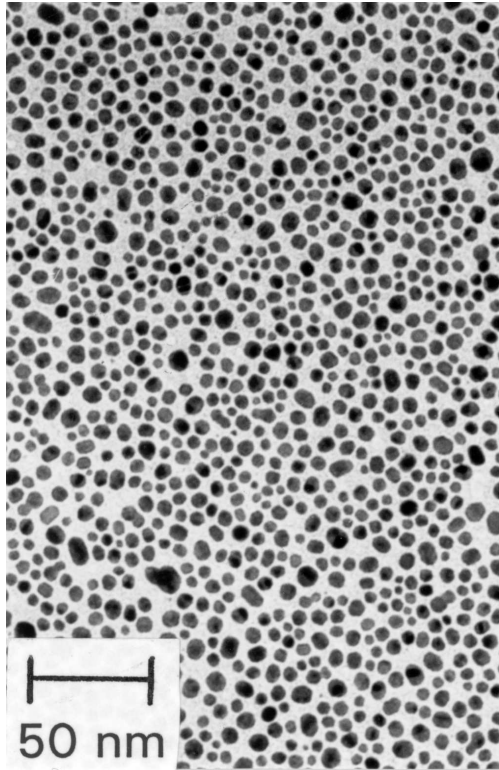


# Organisation

- Historischer Rückblick
- Grundlagen des Sputterns
- Sputtersystem
- Prozesse im Target: Kinetik
- Ausbeute und Sputterrate
- Streuprozesse
- Prozesse im Substrat
- Reaktives Sputtern
- Bias-Sputtern
- Magnetron-Sputtern



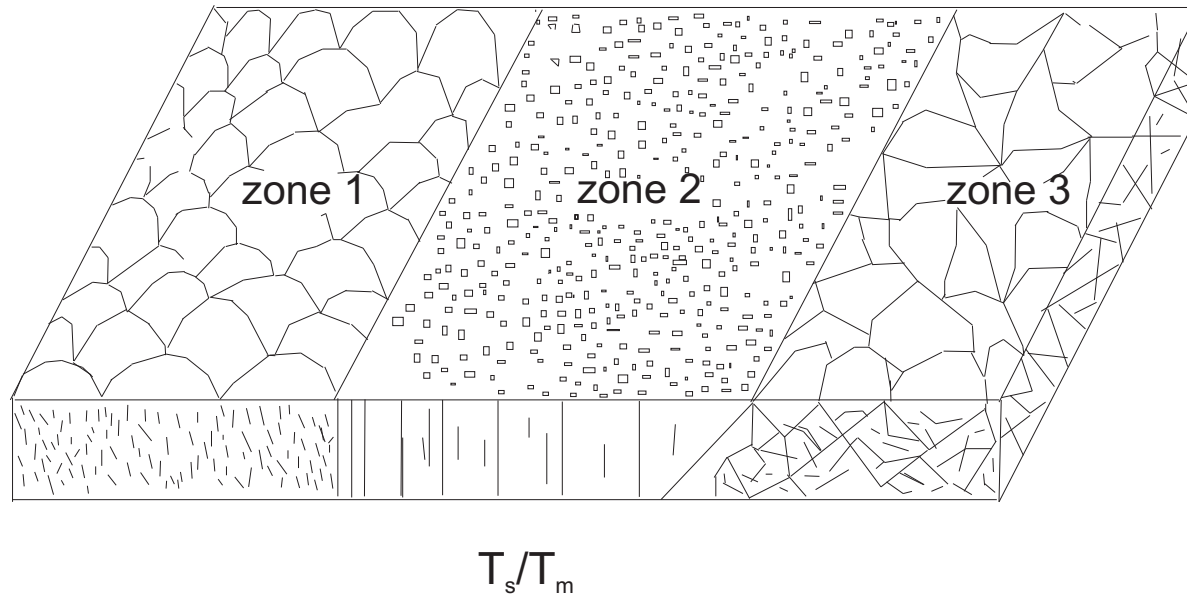
# Schichtwachstum I



Wachstum einer gesputterten Goldschicht von 20 über 33 zu 50 Å: Inselwachstum und Koaleszenz. Die Inseln wachsen allmählich zusammen (BRUNEGGER 1991).



# Schichtwachstum II

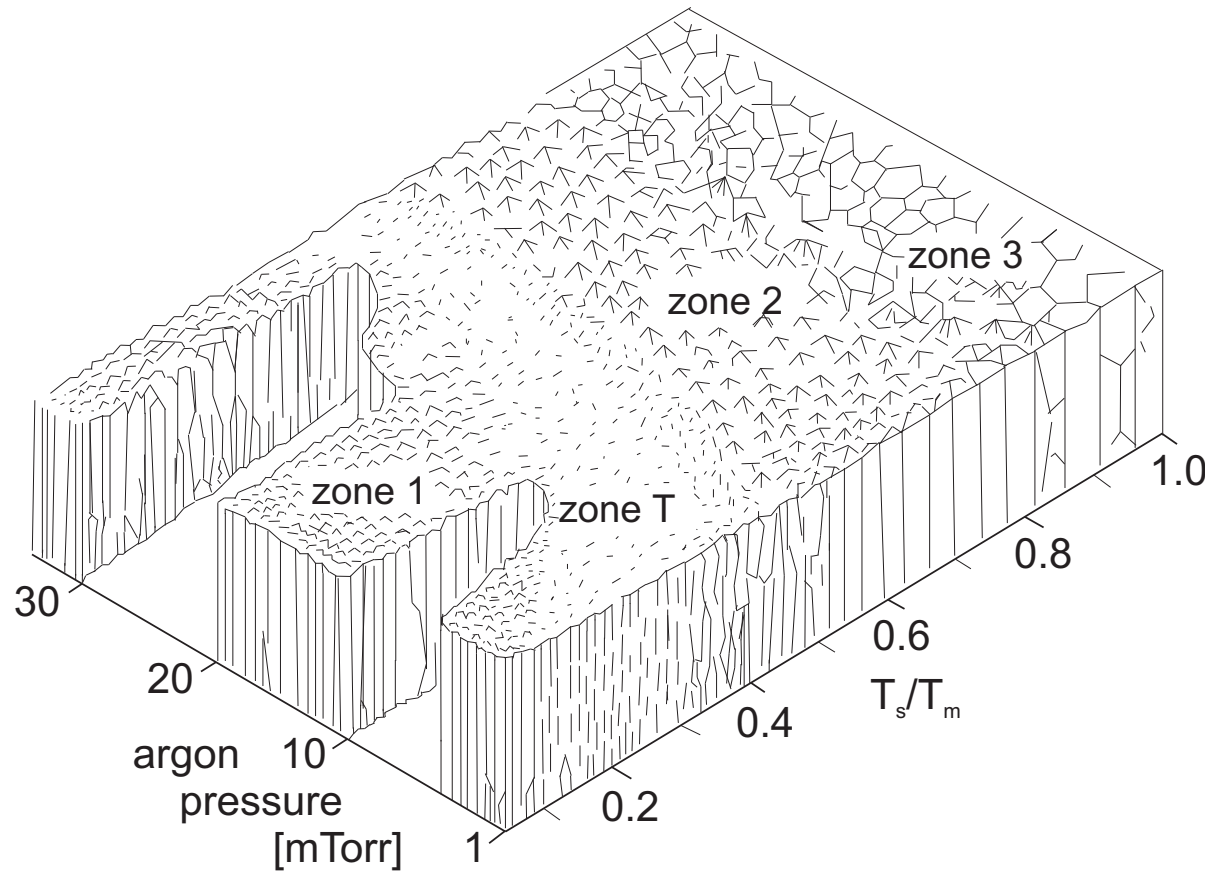


Mikrostrukturdiagramm nach MOVCHAN und DEMCHISIN für physikalische Dampfabcheidung THORNTON, 1986.

$T_s$ : Substrattemperatur,  $T_m$ : Schmelztemperatur.



# Schichtwachstum III



Mikrostrukturdiagramm nach MOVCHAN und DEMCHISIN für physikalische Dampfabcheidung THORNTON, 1986.

$T_s$ : Substrattemperatur,  $T_m$ : Schmelztemperatur.



# Schichtwachstum IV

- Nach der Koaleszenz-Phase beginnt das Kolumnarwachstum.
- Berge fangen mehr Atome als Täler.
- $T_s/T_m < 0,3$ : Oberfläche wird genau nachgezeichnet, starkes Säulenwachstum.
- $T_s/T_m < 0,5$ : Horizontale Verbreiterung der Säulen auf Kosten der Voids.
- $T_s/T_m > 0,5$ : Starke Zunahme der Diffusionsgeschwindigkeit  $\Rightarrow$  Rekristallisation.



# Schichtwachstum V

- Zone 1: Wachstum locker gepackter Säulen.
- Zone T: Oberflächendiffusion füllt die Hohlräume. Ionenbombardement führt zur Glättung der Oberfläche.
- Zone 2: Diffusionsprozesse führen zu weiterem Kolumnarwachstum  $\Rightarrow$  Verstärkung der Rauigkeit.
- Zone 3: maximale Diffusionsgeschwindigkeit  $\Rightarrow$  polykristalline Struktur mit rauher Oberfläche.

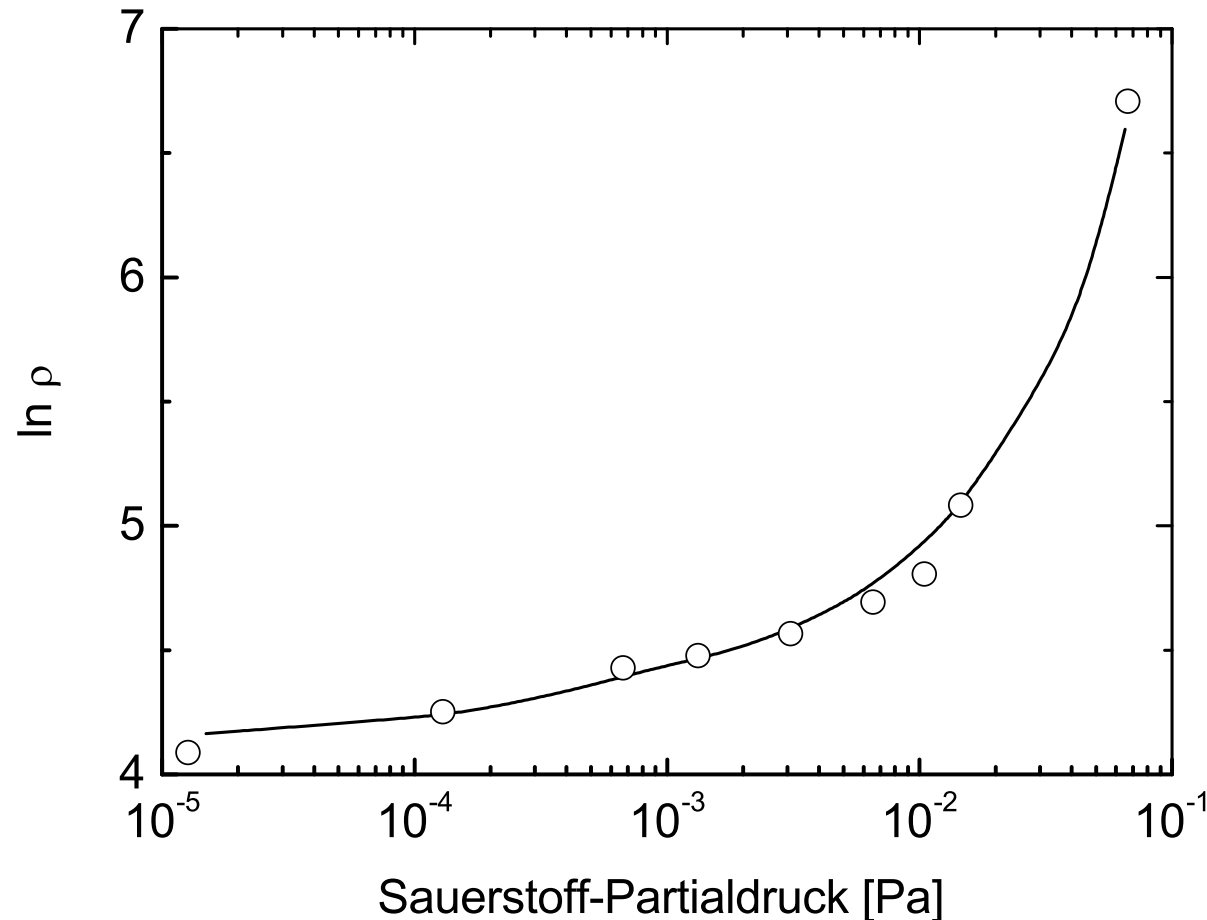


# Organisation

- Historischer Rückblick
- Grundlagen des Sputterns
- Sputtersystem
- Prozesse im Target: Kinetik
- Ausbeute und Sputterrate
- Streuprozesse
- Prozesse im Substrat
- **Reaktives Sputtern**
- Bias-Sputtern
- Magnetron-Sputtern



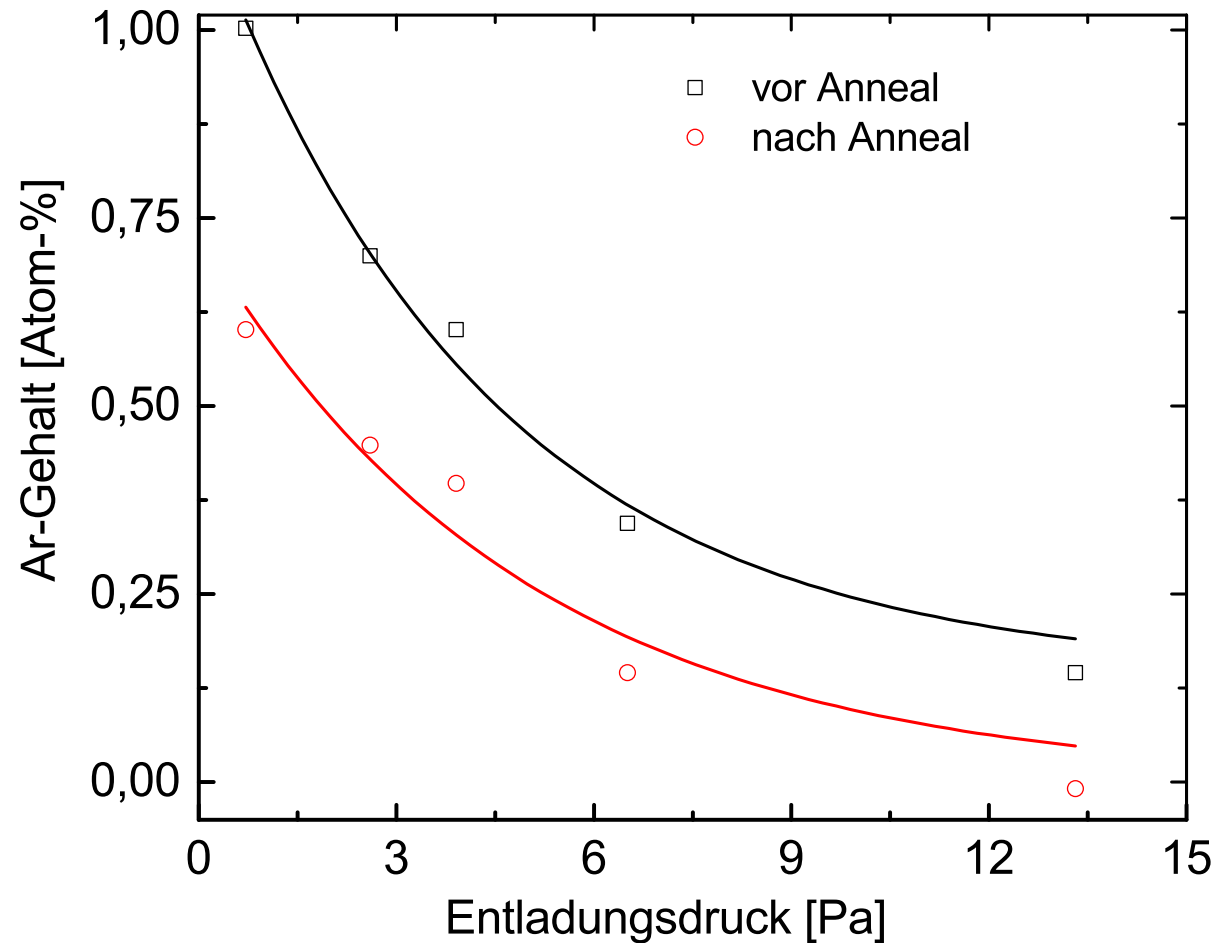
# Reaktives Sputtern I



Lächerliche Partialdrücke von  $O_2$  reichen aus, um den Widerstand von gesputterten Al-Schichten um Größenordnungen zu erhöhen (FRANZ 1982).



# Reaktives Sputtern II



Das Sputtergas Argon selbst wird auch in der aufwachsenden Schicht inkorporiert (FRANZ 1982).

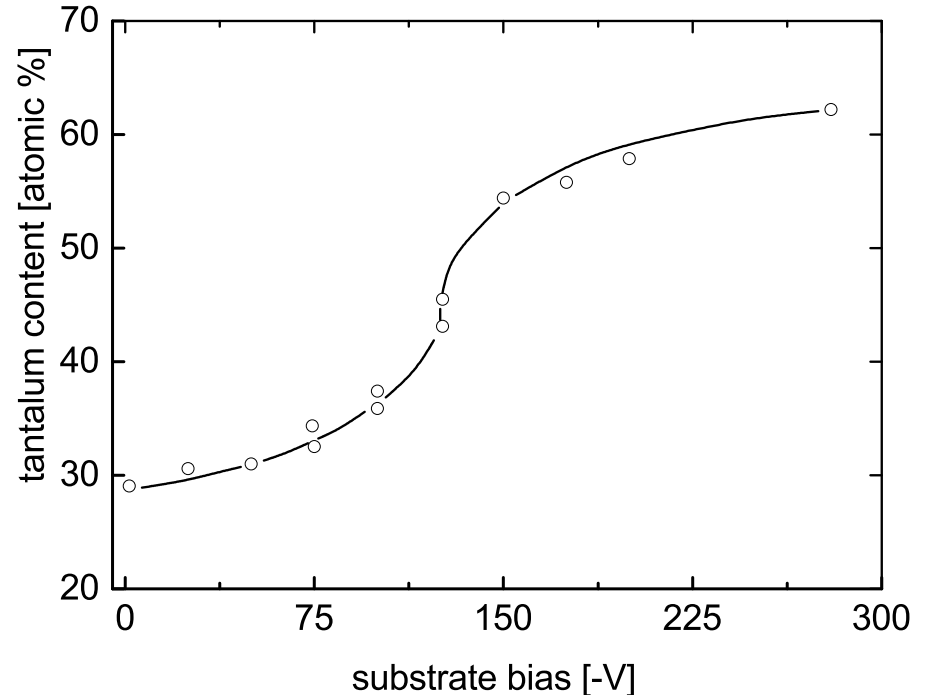
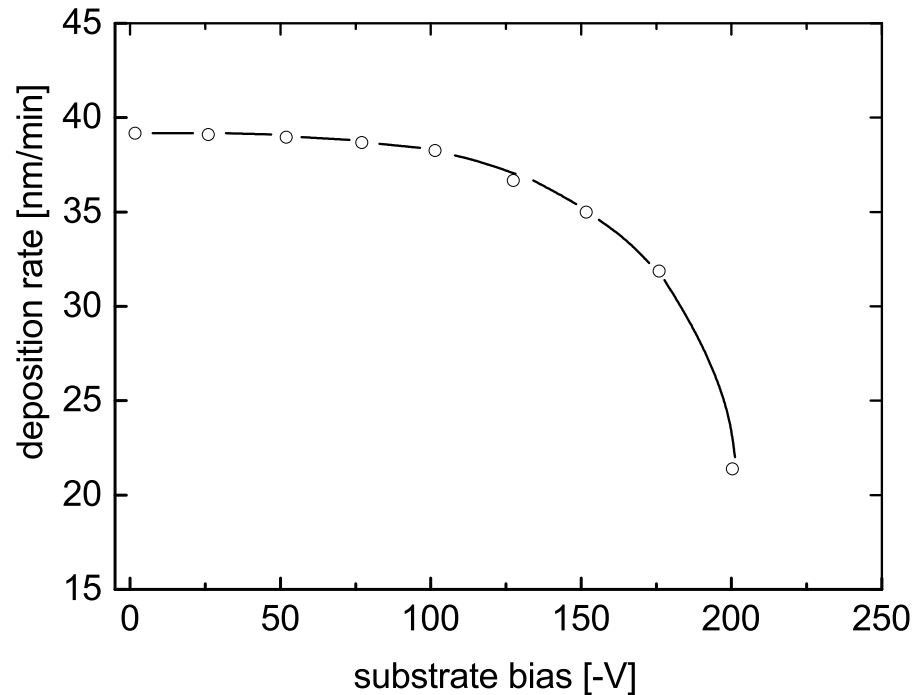


# Organisation

- Historischer Rückblick
- Grundlagen des Sputterns
- Sputtersystem
- Prozesse im Target: Kinetik
- Ausbeute und Sputterrate
- Streuprozesse
- Prozesse im Substrat
- Reaktives Sputtern
- **Bias-Sputtern**
- Magnetron-Sputtern



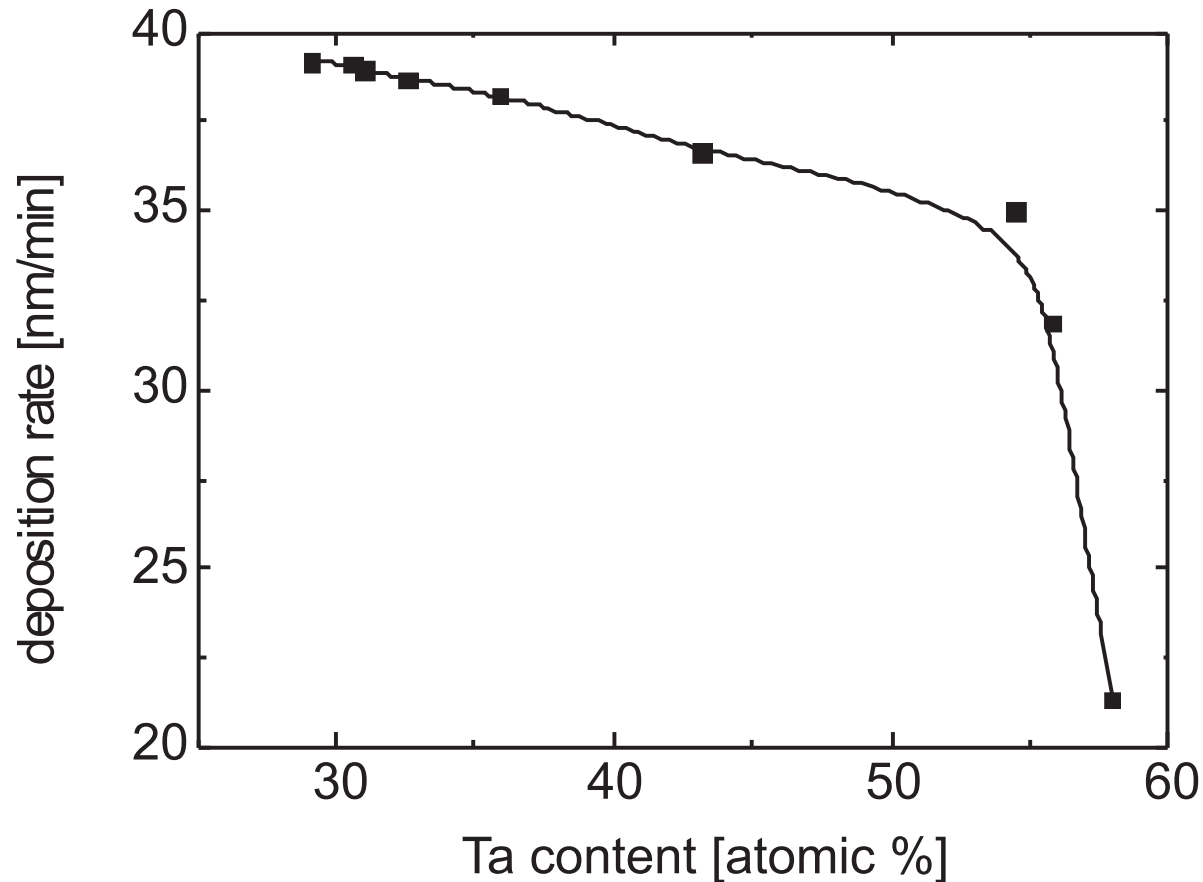
# Bias-Sputtern I



- Abscheiderate und Zusammensetzung können durch das Anlegen eines Substr-Bias stark beeinflusst werden (Absputtern von einem Mosaik-Target).



# Bias-Sputtern II

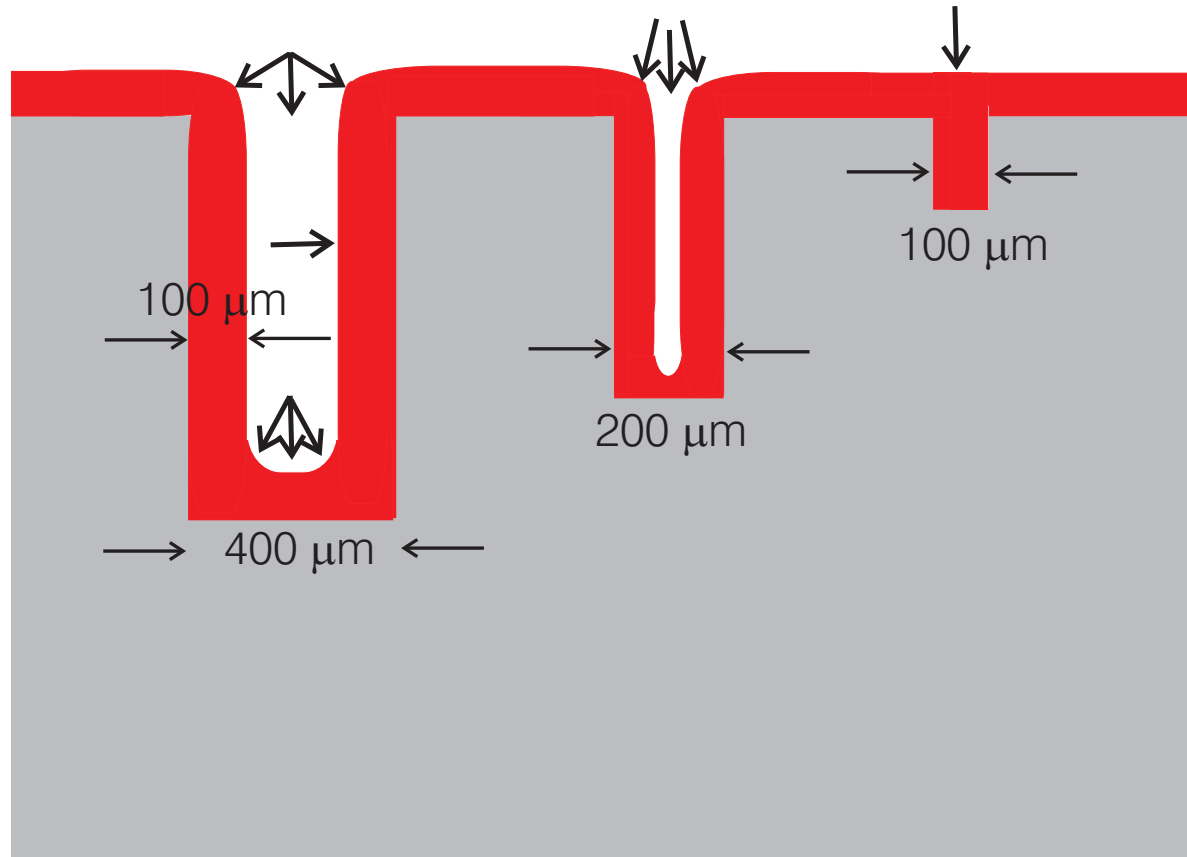


Genau bei dem DC-Bias, bei dem die Depositionsrate stark zurückgeht, ändert sich auch die Zusammensetzung der Schicht.

(FRANZ 1982).



# Bias-Sputtern III



DC-Bias führt zu einer Verrundung an Kanten wg. der dort höheren Feldstärke (FRANZ 1982).

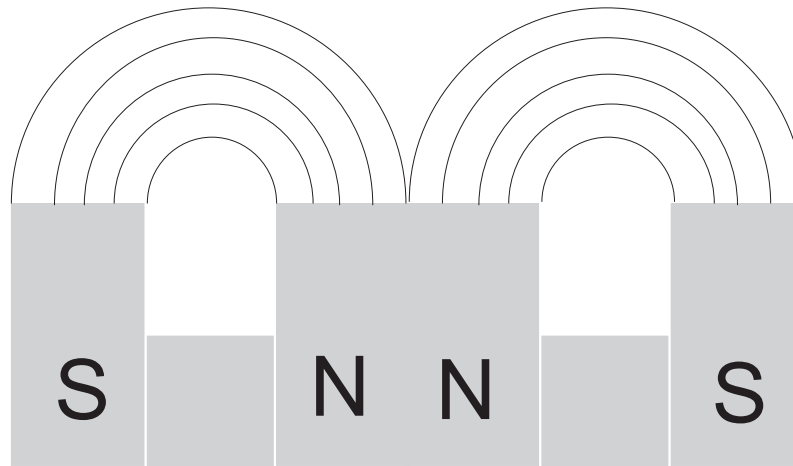


# Organisation

- Historischer Rückblick
- Grundlagen des Sputterns
- Sputtersystem
- Prozesse im Target: Kinetik
- Ausbeute und Sputterrate
- Streuprozesse
- Prozesse im Substrat
- Reaktives Sputtern
- Bias-Sputtern
- **Magnetron-Sputtern**



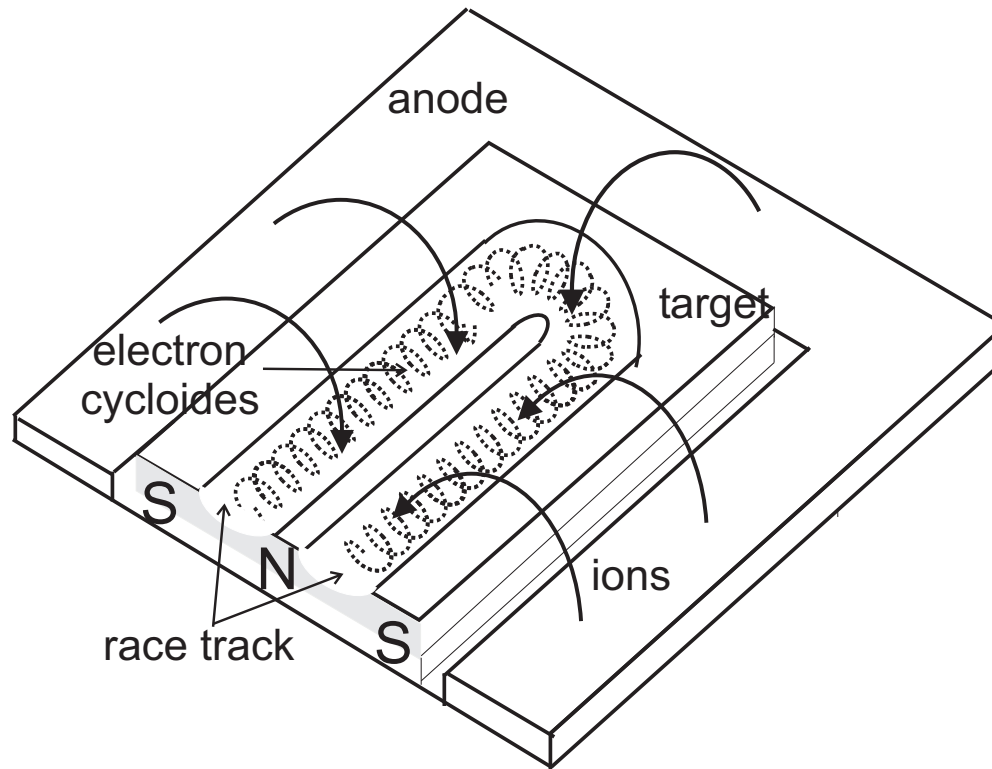
# Magnetron-Sputtern I



Wirkungsweise eines planaren Magnetrons.  
Querschnitt der magnetischen Feldlinien.  
Die Elektronendichte erhöht sich in der Targetzone,  
was zu einer lokalen Potentialerhöhung führt.



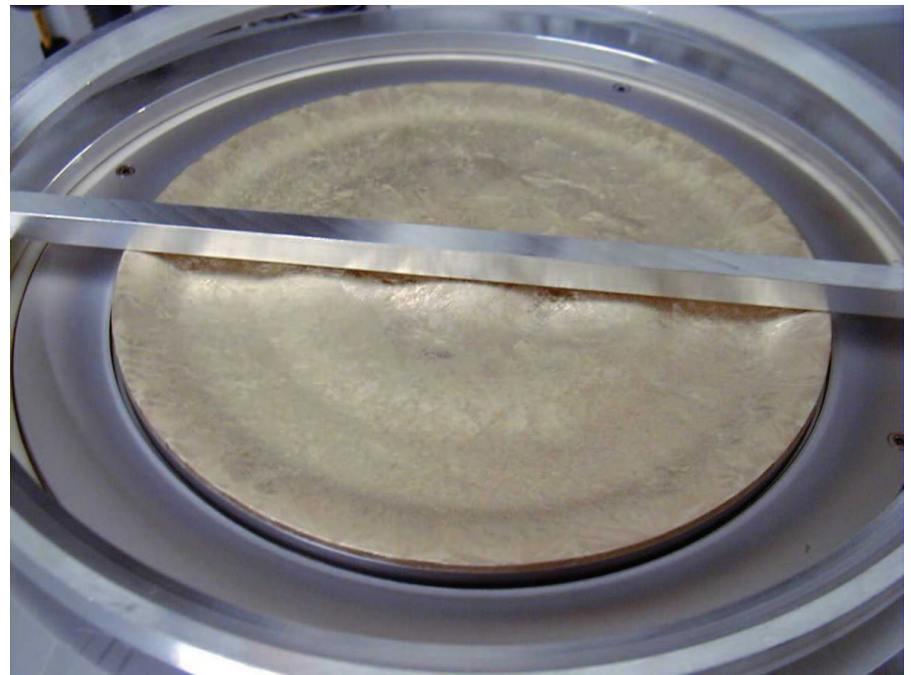
# Magnetron-Sputtern I



Als Antwort auf das statische elektrische Feld folgen die Ionen und erzeugen ein anisotropes Muster im Target: Race Tracks (nach THOMSON © Cambridge University Press).



# Magnetron-Sputtern II



- Lks.: Race-Tracks durch radial inhomogenen Anbring des Targets.



Re.: Ein verbessertes Magnetron reduziert die Tiefe der Race-Tracks.

# Zusammenfassung I

- Stoßkaskade im Target wird bestimmt durch
- Wechselwirkungspotentiale und Streuquerschnitte
- 3 Energieregimes: Single-Knock, lineare Kaskade, Spike
- Sputterausbeute hängt linear von der kinetischen Energie der Projektile ab
- und ist umgekehrt proportional zur Oberflächenenergie.
- Sputterausbeute steigt mit wachsender Energie der Projektil-Ionen.
- Sputterrate zeigt eine periodische Abhängigkeit vom Material des Substrats.



Starke Winkelabhängigkeit der Sputterausbeute.

# Zusammenfassung II

- Streuprozesse führen zu einer Thermalisierung der abgestäubten Atome.
- Auch die  $IADF$  ist thermalisiert.
- Das Schichtwachstum ist wegen der wesentlich höheren kinetischen Energie der auftreffenden Atome wesentlich verschieden vom Aufdampfen.
- Mit dem reaktiven Sputtern werden auch exotische Oxide zugänglich (magnetische und elektrische Effekte).
- Mit dem Bias-Sputtern kann man Topographie, Zusammensetzung, aber auch die mechanische Spannung beeinflussen.



Die Sputterrate kann mit magnetischen Methoden wesentlich erhöht werden.