

Bestimmung von Zerstäubungsausbeuten bei niedrigen Energien

M. Tartz, F. Scholze, H. Beck, H. Neumann

Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung, Leipzig
www.iom-leipzig.de



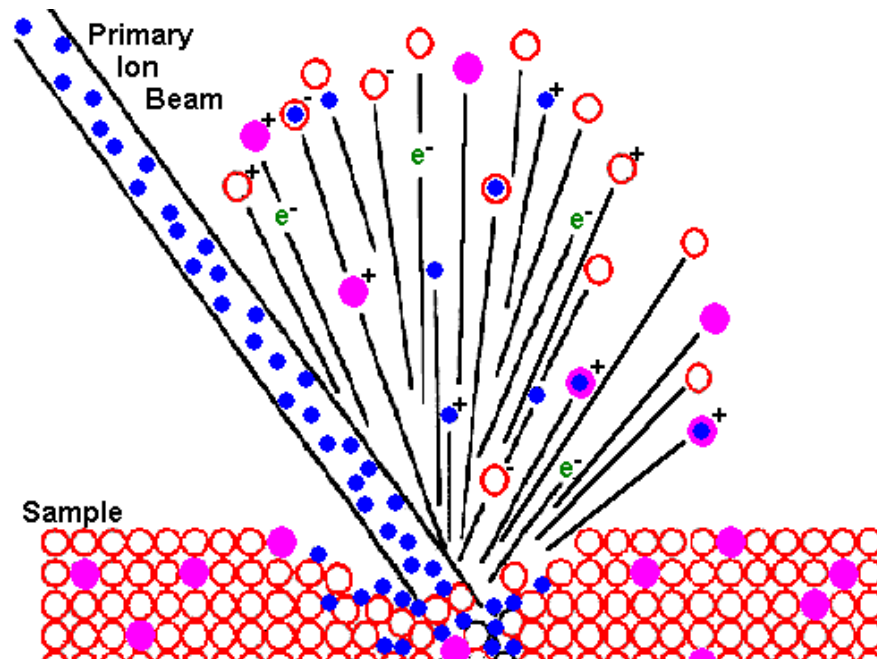
Bestimmung von Zerstäubungsausbeuten

Gliederung:

- Motivation – wofür braucht man Y?
- Experimenteller Aufbau
 - Messverfahren
 - Experimenteller Aufbau
 - Charakterisierung des Ionenstrahles auf dem Target
 - Einflüsse auf die Zerstäubungsausbeute
- Modellierung der Zerstäubungsausbeuten
- Ergebnisse: Graphite, Mo, Ti, Ag

Motivation – Zerstäubung (Sputtering)

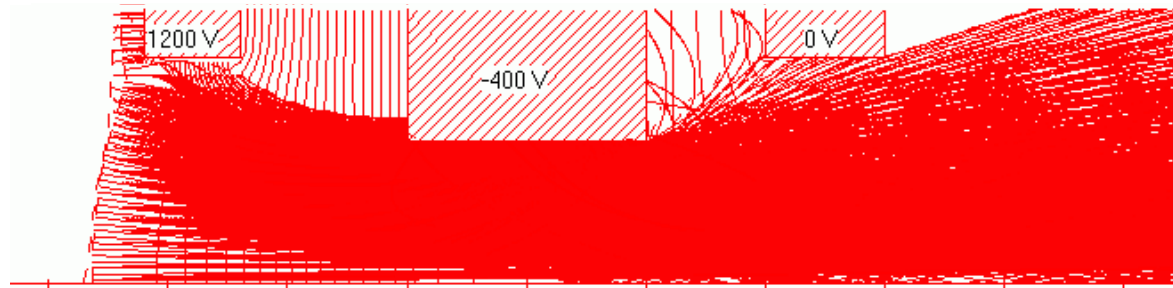
- Zerstäubung: Abtrag von Material bei Beschuß mit energetischen Teilchen (Ionen)



$$\text{Zerstäubungsausbeute} = \frac{\text{Zahl der abgetragenen Teilchen}}{\text{Zahl der einfallenden Teilchen}}$$

Motivation - Gittererosion

- Ionenextraktion und Strahlformung in einem Gittersystem



- Neutralteilchen verlassen Entladungsgefäß
- Ladungsaustauschstoß:



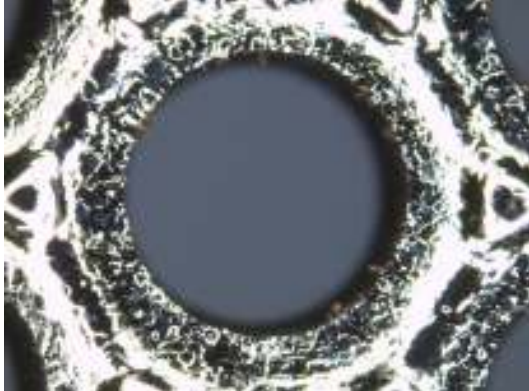
schnell langsam

Gitterstrom, Materialabtrag durch
Zerstäubung

- ⇒ Lochvergrößerung, Erosionsstrukturen auf Aussenseite
- ⇒ begrenzte Lebensdauer
- ⇒ Strahlverunreinigung

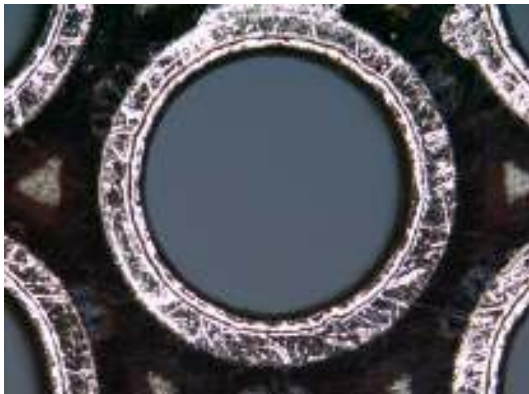
Motivation - Gittererosion

- Aussenseite des Beschleunigungsgitters



Ionen aus dem Strahlplasma
Energie ca. 200 eV

- Plasmaseite



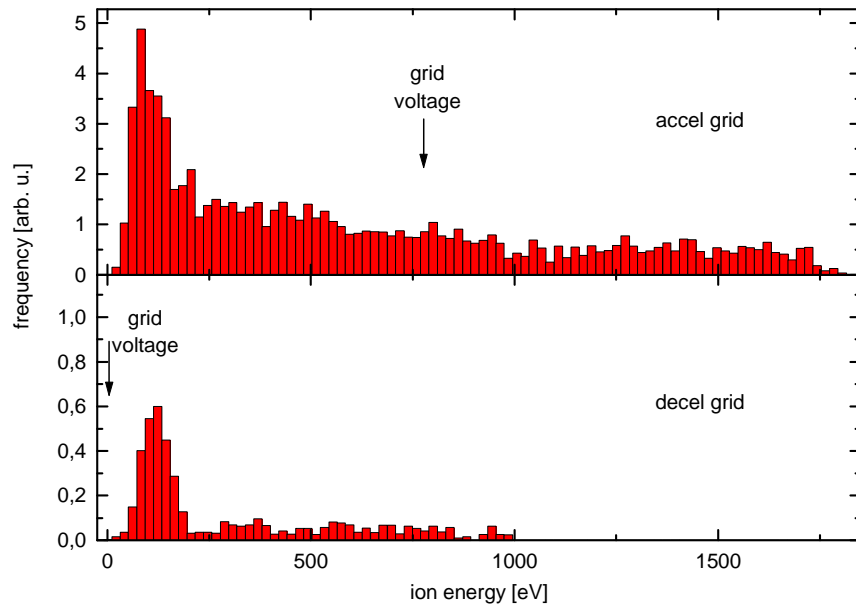
Ionen aus dem plasmanahen
Bereich
Energie bis 1500 eV

- Lochaufweitung

Ionen aus dem Gitterbereich
Energie 100 ... 1500 eV

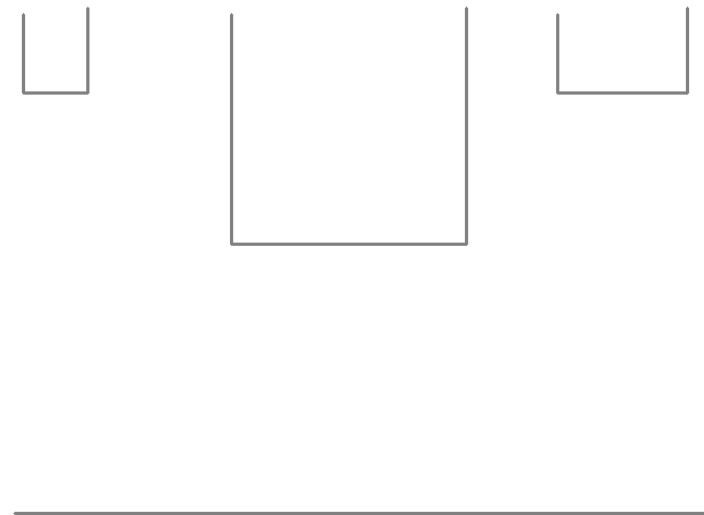
Motivation - Gittererosion

- Energieverteilung der Umladungsionen auf dem Beschleunigungsgitter



$$U_{\text{beam}} = 1200\text{V}$$
$$U_{\text{acc}} = -800\text{V}$$

Dynamische Modellierung



→ Lebensdauer

Motivation - Gittererosion

Ionentriebwerke:

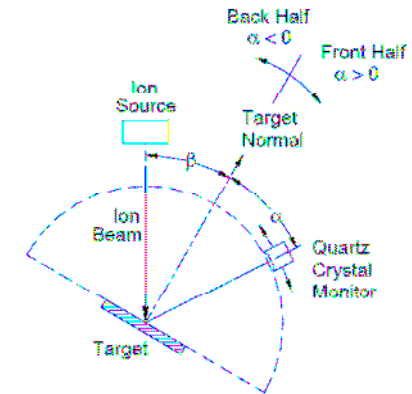
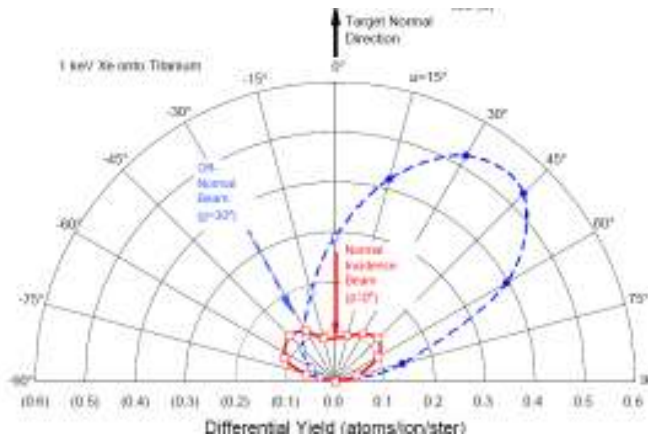
- Ionen: Xenon
- Verwendete Gittermaterialien:
 - Graphit, CC, Pyrographit
 - Molybdän
 - Titan
- Simulation der Gittererosion
Zerstäubungsausbeute als Parameter
- Problem:
Es fehlen i.a. Zerstäubungsausbeuten für verwendeten Ionen-Target-Kombinationen, insbesondere Winkelabhängigkeiten



RIT-22

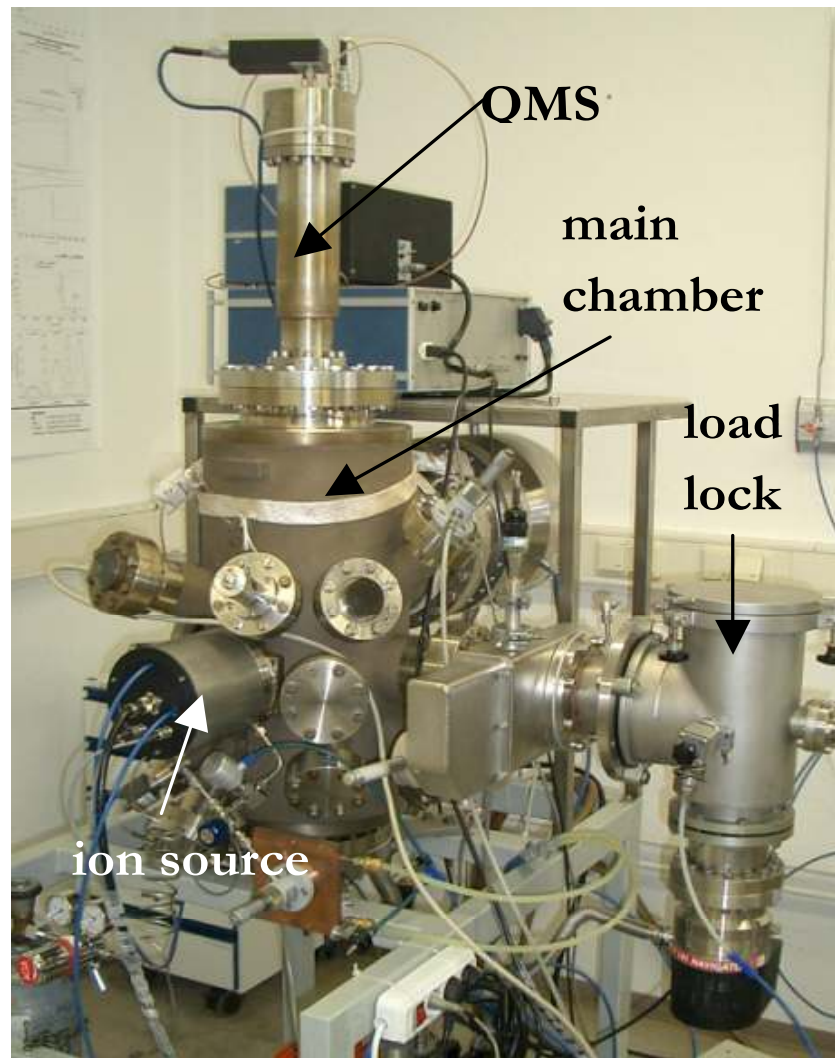
Messverfahren

- Massenverlust - Wägung vorher/nachher
 - einfach, wenig systematische Fehler
 - tiefer Abtrag (einige μm)
 - Gleichgewicht der Oberflächentopologie
- Wägung mit Schwingquarz (QCM)
 - schnell
 - wenig Material abgetragen
 - sensitiv auf Oberflächentopologie
- Bestimmung der Winkelverteilung der zerstäubten Teilchen, Integration
 - fehlerträchtig
- Stufenätzung
- ...



J. Williams, CSU

Experimenteller Aufbau



UHV-Kammer

Basisdruck $<10^{-8}$ mbar

Turbopumpe (2000 l/s)

Probenschleuse

Quadrupol-Massenspektrometer
zur Restgasanalyse

Probenhalter

verschiedene Einfallswinkel

Targetstrom

Schutz vor Deposition

Messung der Targettemperatur

Präzisionswaage (20 μ g)

Ionenquellen

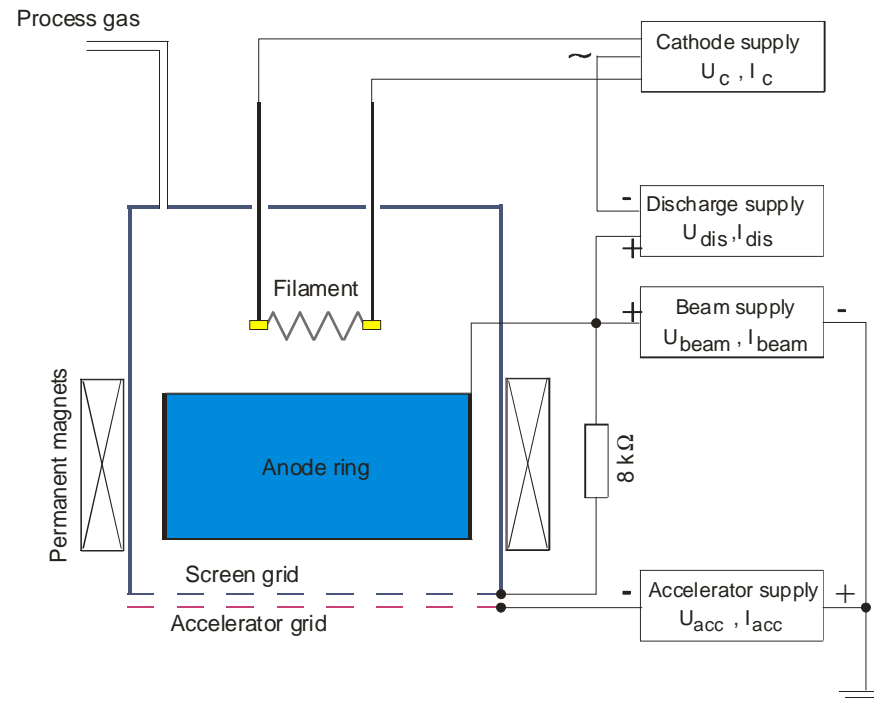
ISQ40DC (Kaufman-Typ)

Plasmaanregung durch Elektronenstoß (Heißkathoden)

Strahldurchmesser 30mm

3-Gittersystem

Massenfluß 0.5 sccm, U_{beam} : 30...400 V, U_{acc} : 1000...600V



Ionenquellen

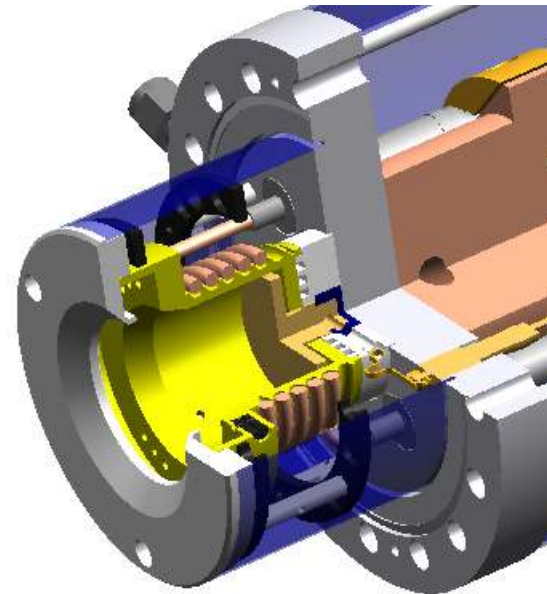
ISQ40HF (HF-Typ)

Induktiv gekoppelte HF-Anregung, 13.56 MHz

Strahldurchmesser 30mm

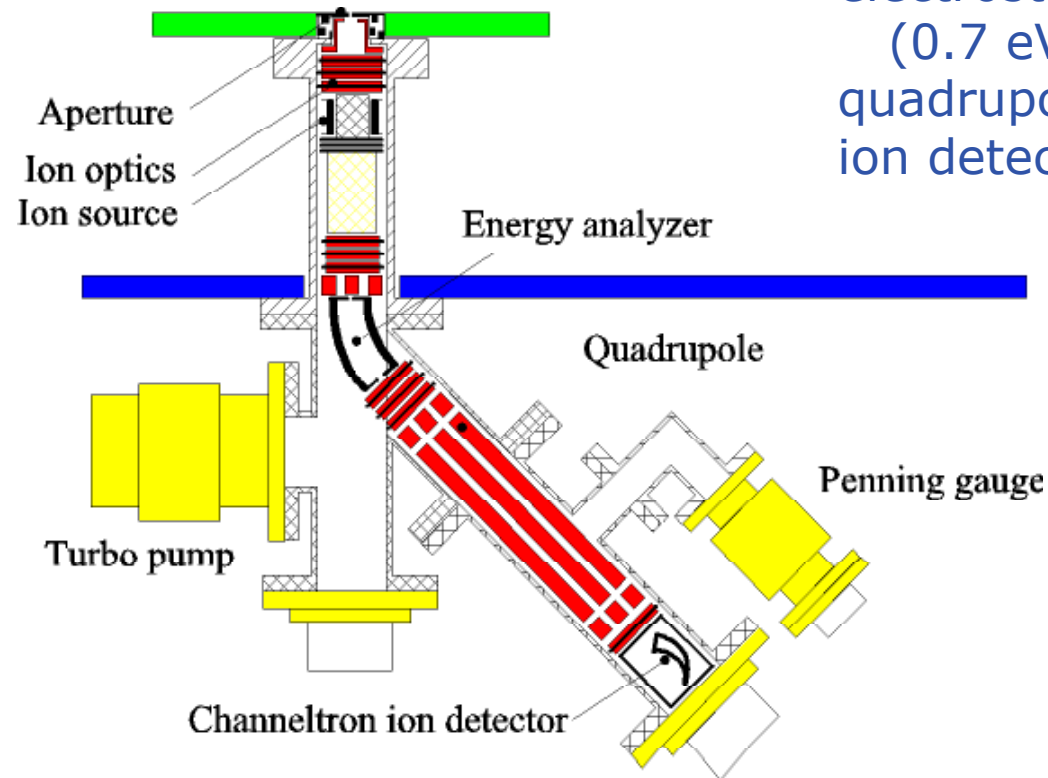
3-Gittersystem

Massenfluß 0.5 sccm, U_{beam} : 400...1500 V, U_{acc} : 600...100V



Charakterisierung des Ionenstrahles

- Energieverteilung der Ionen, Zusammensetzung
→ Energieselektive Massenspektrometrie (Plasmamonitor)
Hiden EQP300

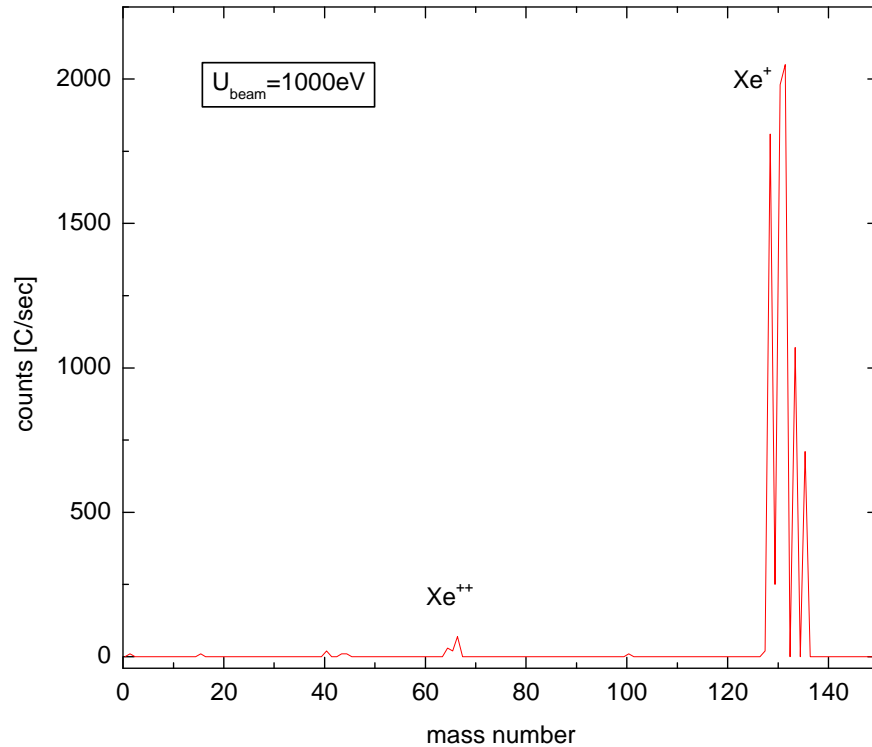


electrostatic sector field analyser
(0.7 eV @ 1000 eV)
quadrupole mass analyser
ion detector



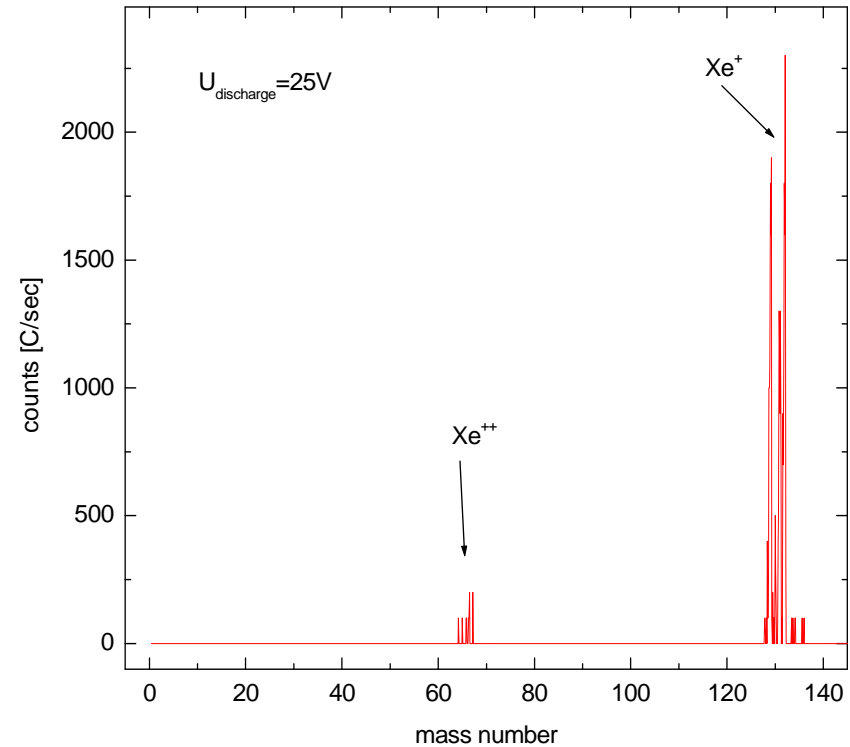
Zusammensetzung des Ionenstrahles

ISQ40HF



Anteil $Xe^{++} < 1\%$

ISQ40DC



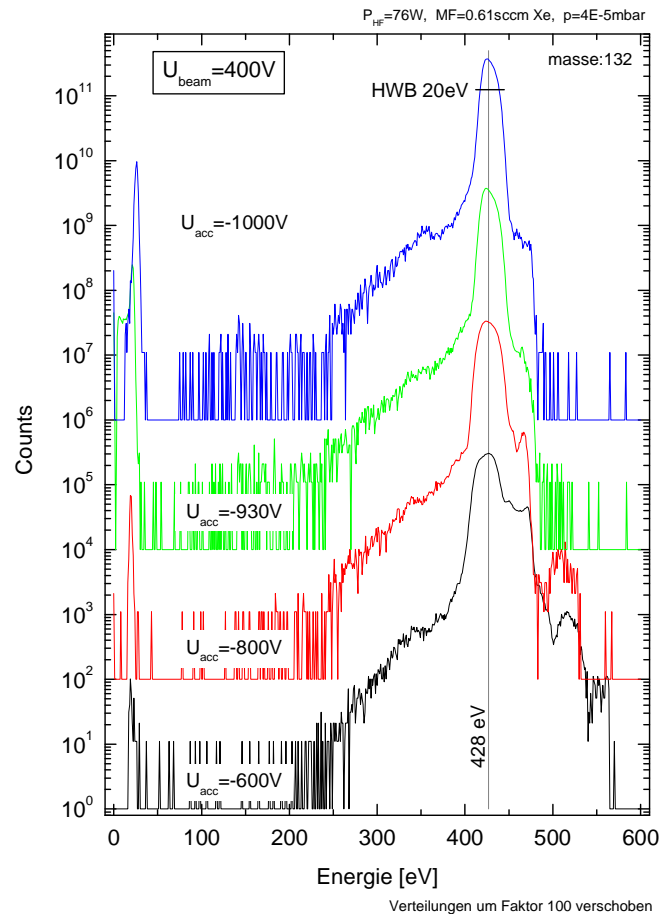
Anteil $Xe^{++} < 2\%$

abhängig von $U_{discharge}$
 $U_{discharge} = 25V$

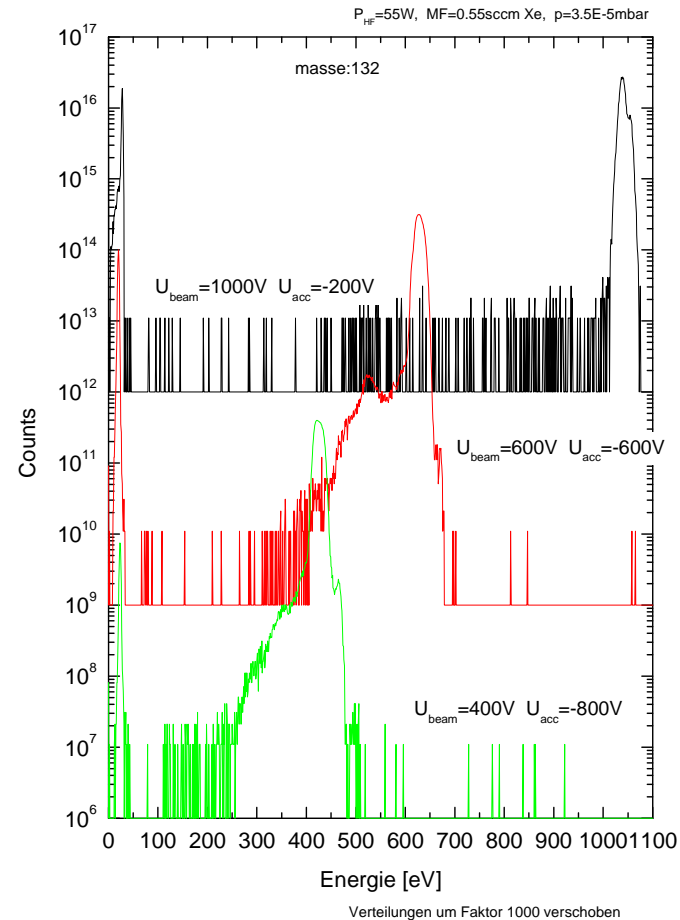
kein Gittermaterial, kein Quellenmaterial gefunden ($< 10^{-7}$)

Energieverteilung der Ionen – ISQ40HF

Variation U_{acc}



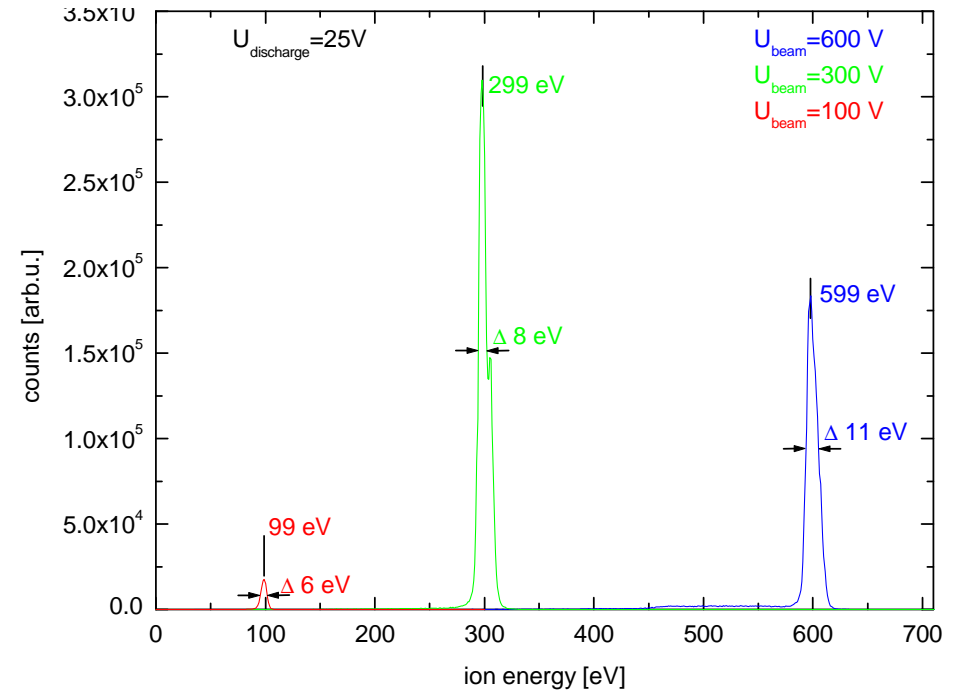
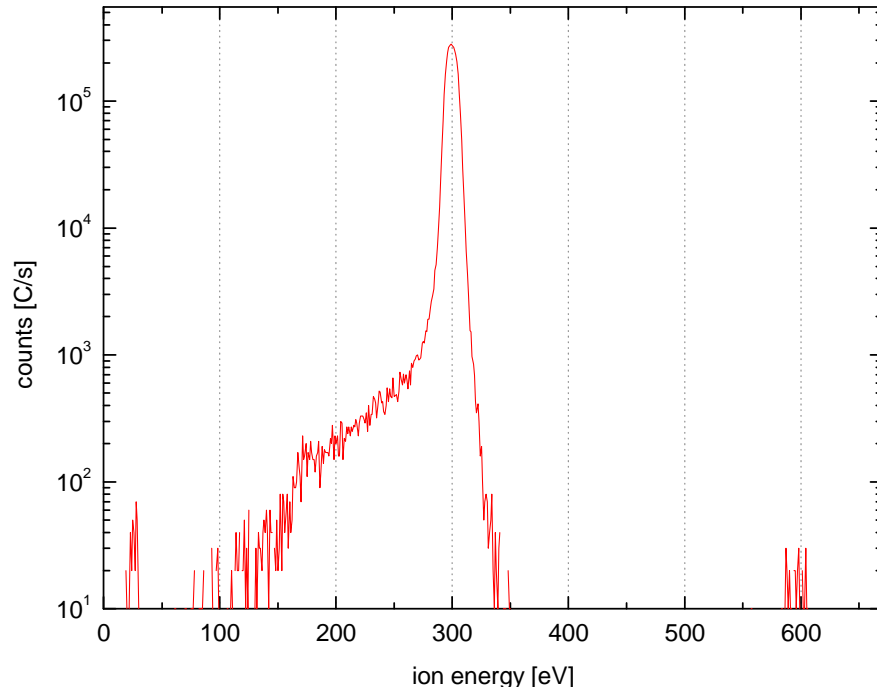
Variation U_{beam}



energetische
 Verschiebung
 25 – 40 eV

Energieverteilung der Ionen – ISQ40DC

U_{beam}=300V



$$E_{\text{ion}} = eU_{\text{beam}}$$

Sonstige Spezies im Strahl

Neutrale

- Umladungsprozesse im Strahl: Strahlionen



gemessenen Targetstrom korrigieren um $e^{-\sigma n l}$
(hier: 13 cm, 200eV, 5E-5 mbar: 10%)

- Umladungsprozesse im Strahlplasma



bedeutend bei niedrigen Ionenenergien

- Umladungsprozesse im Gitterbereich
hochenergetische Neutralteilchen

Thermosonden

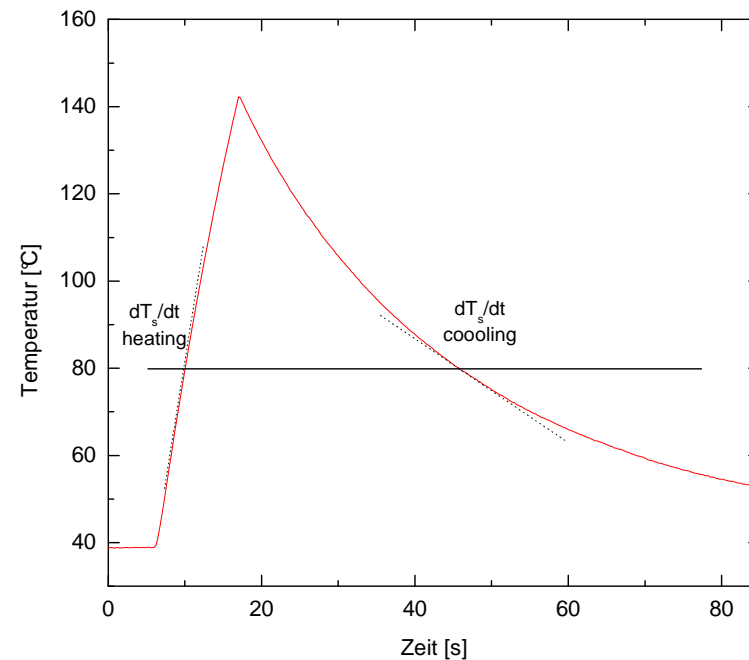
- Messung des Energieeintrages (einschließlich Neutrale) und des Targetstromes
- Aufheizung (Strahl an)

$$\dot{Q}_{in} = \int (J_{rad,1} + J_{ch} + J_n + J_{ext}) dA$$

- Abkühlung

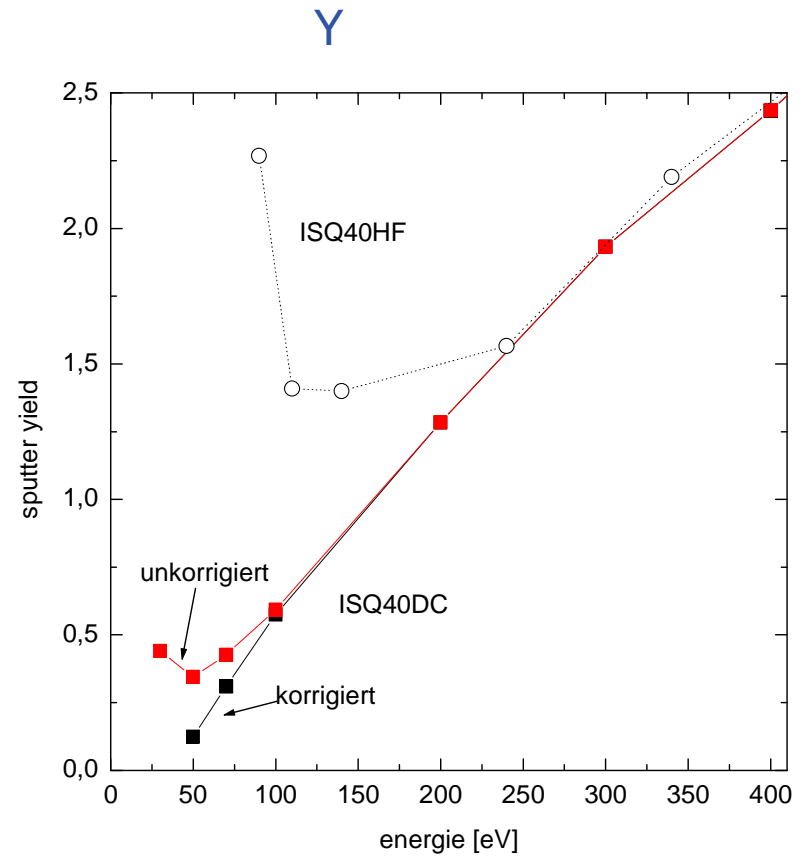
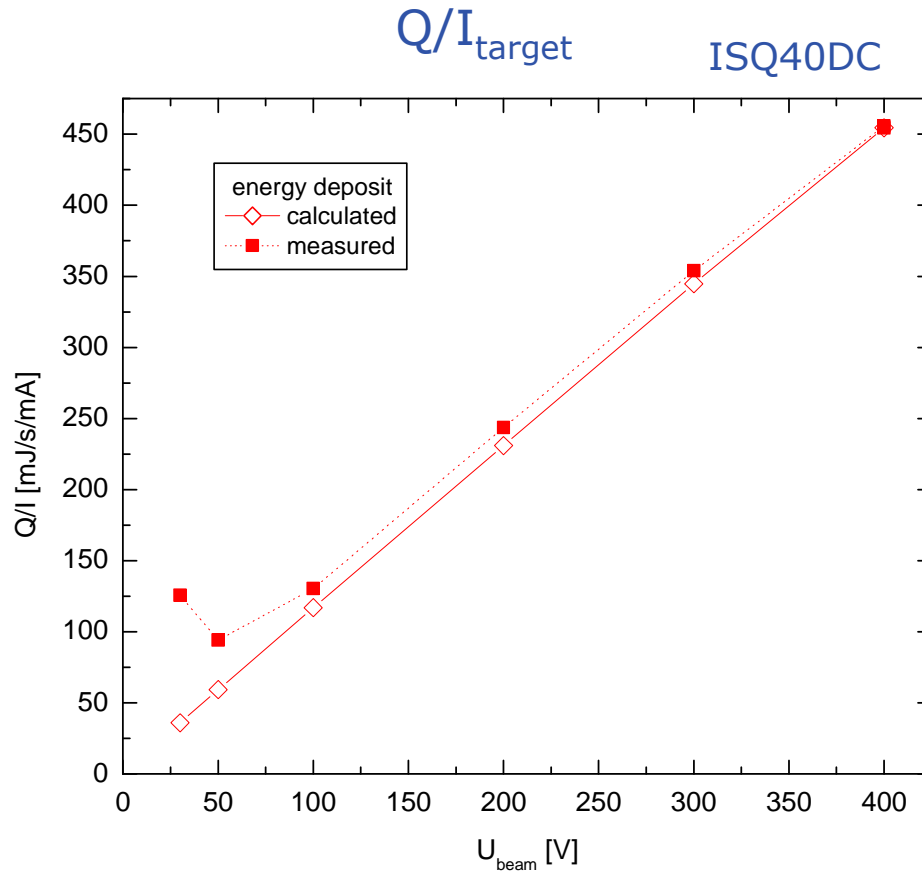
$$\dot{Q}_{out} = \int (J_{rad,2} + J_{particle} + J_{ext,2}) dA$$

- Targetspannung



H. Kersten *et al*, The energy balance at substrate surfaces during plasma processing, Vacuum 63 (2001) 385–431

Thermosondenmessungen



Korrektur der Zerstäubungsausbeute durch Messung mit Targetspannung

Messungen: T. Happel, H. Kersten, CAU Kiel

Modellierung der Zerstäubungsausbeuten

- Energieabhängigkeit: Bohdansky-Formel

$$Y(E, \alpha = 0^\circ) = Q s_n(\varepsilon) \left(1 - \left(\frac{E_{th}}{E} \right)^{2/3} \right) \left(1 - \frac{E_{th}}{E} \right)^2$$

E_{th} : Schwellenergie

s_n : Kernbremsquerschnitt (Kr-C Wechselwirkungspotential)

ε : redzierte Energie $\varepsilon = E(eV) \frac{M_2}{M_1+M_2} \frac{0.03255}{Z_1 Z_2 (Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}}$

- Winkelabhängigkeit: Yamamura-Formel

$$\frac{Y(\alpha, E)}{Y(0^\circ, E)} = (\cos \alpha)^{-f} \exp \left[f \left(1 - (\cos \alpha)^{-1} \right) \cos \alpha_{opt} \right]$$

$$\alpha_{opt} = 90^\circ - 286.0 \left(\frac{p}{\sqrt{E(keV)}} \right)^{0.45}$$

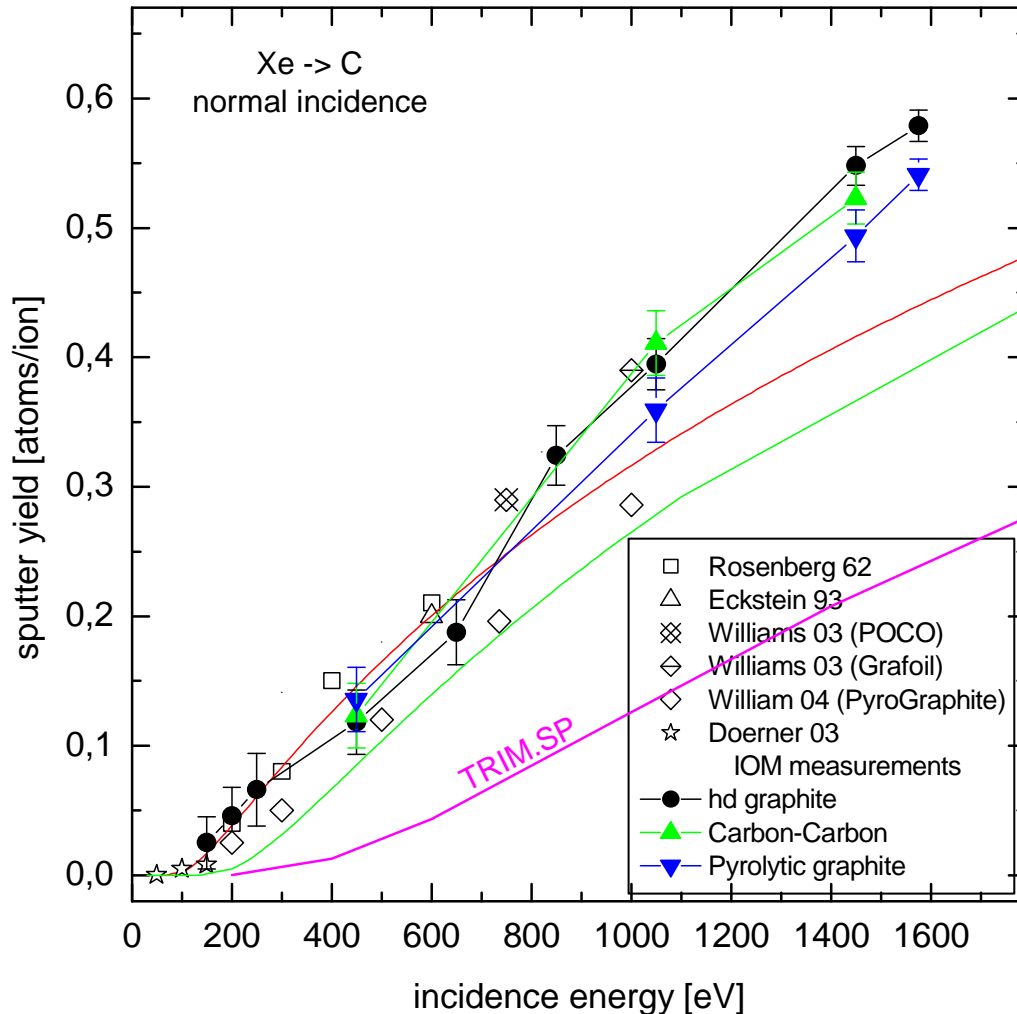
f, p: Parameter

C. Garcia-Rosales, W. Eckstein, J. Roth, *Revised formulae for sputtering data*, J. Nucl. Mat. 218 (1994) 8.

Y. Yamamura, Y. Itikawa, N. Itoh, *Angular dependence of sputtering yields of monatomic solids*,

Institute of Plasma Physics, Nagoya University, Report IPPJ-AM-26.

Ergebnisse - Graphite



Werte in guter
Übereinstimmung mit
früheren Messungen und
anderen Literaturwerten

Kein signifikanter
Unterschied zwischen
verschiedenen
Materialien

Verbesserung des Sputter
Modells durch Parameter-
Anpassung

TRIM.SP liefert zu kleine Werte,
richtiges Modell?

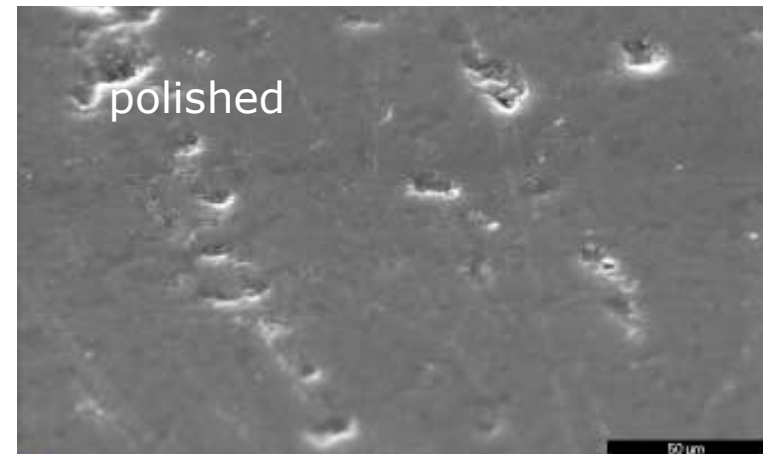
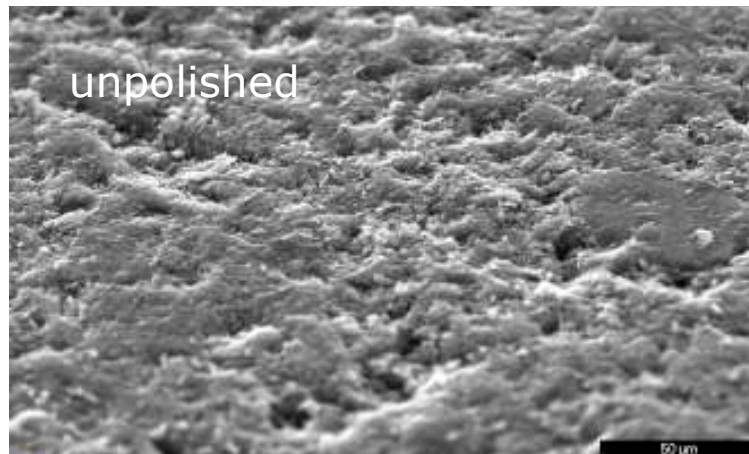
$$E_{th} = 70\text{eV}$$

Ergebnisse – Graphit - Oberflächentopologie

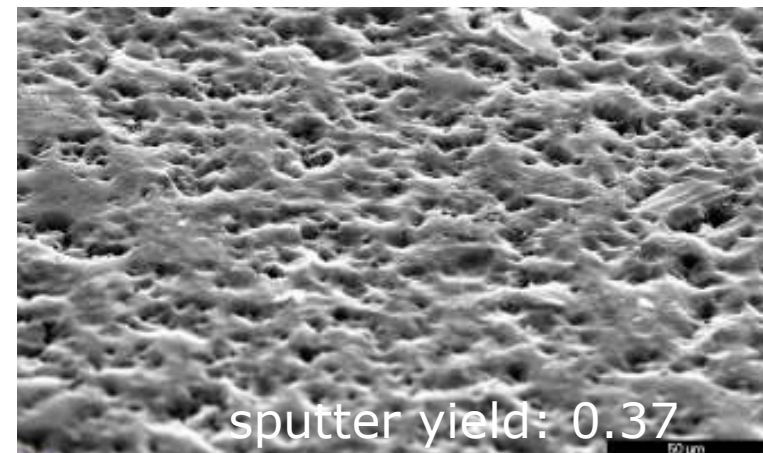
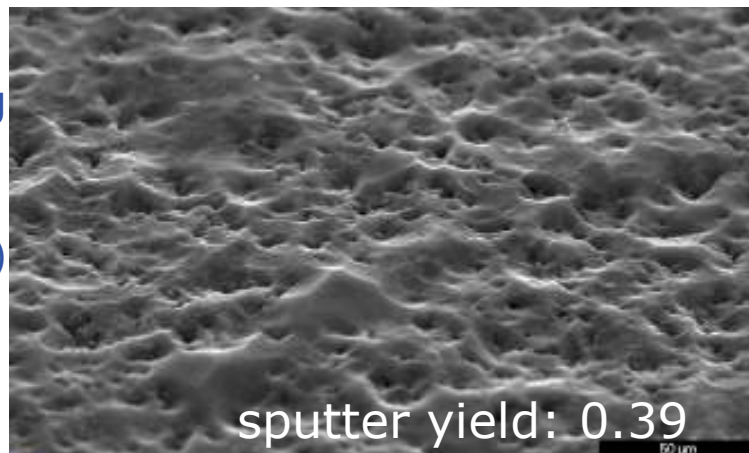
high-density graphite

Korngröße: 2 μm

initial
surface

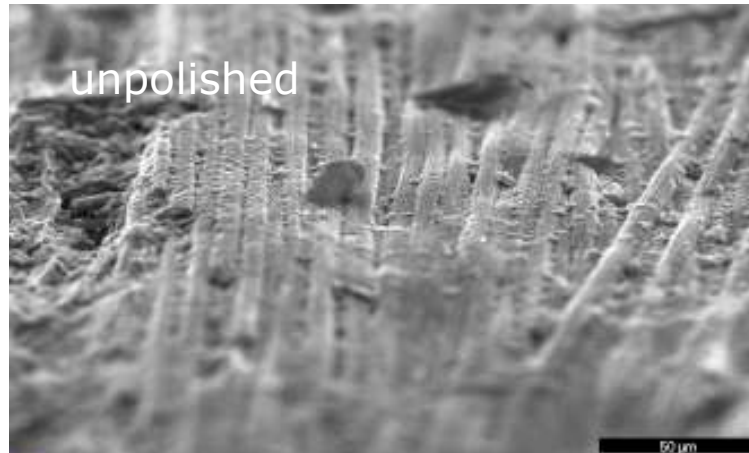


after 3 h
sputtering
(1000 eV,
normal
incidence)

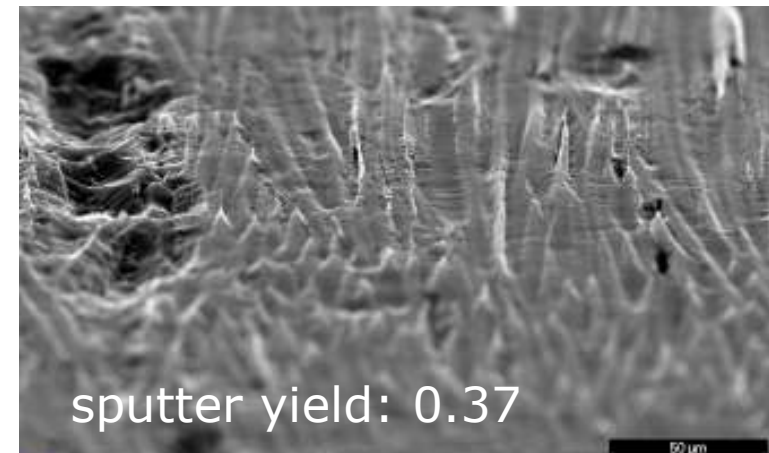
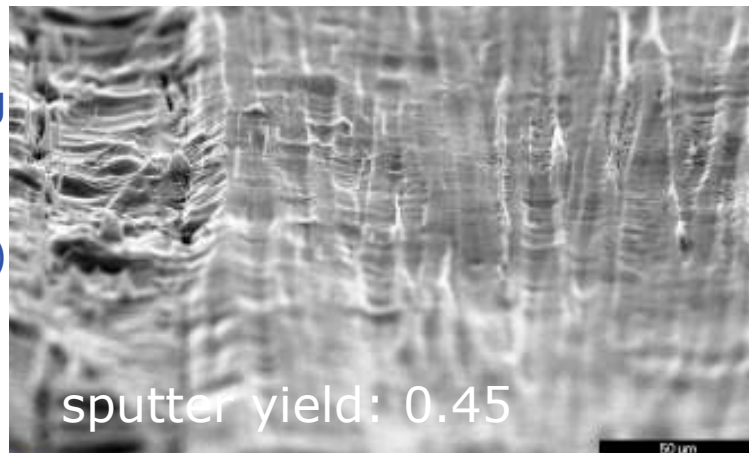


Ergebnisse – CC - Oberflächentopologie

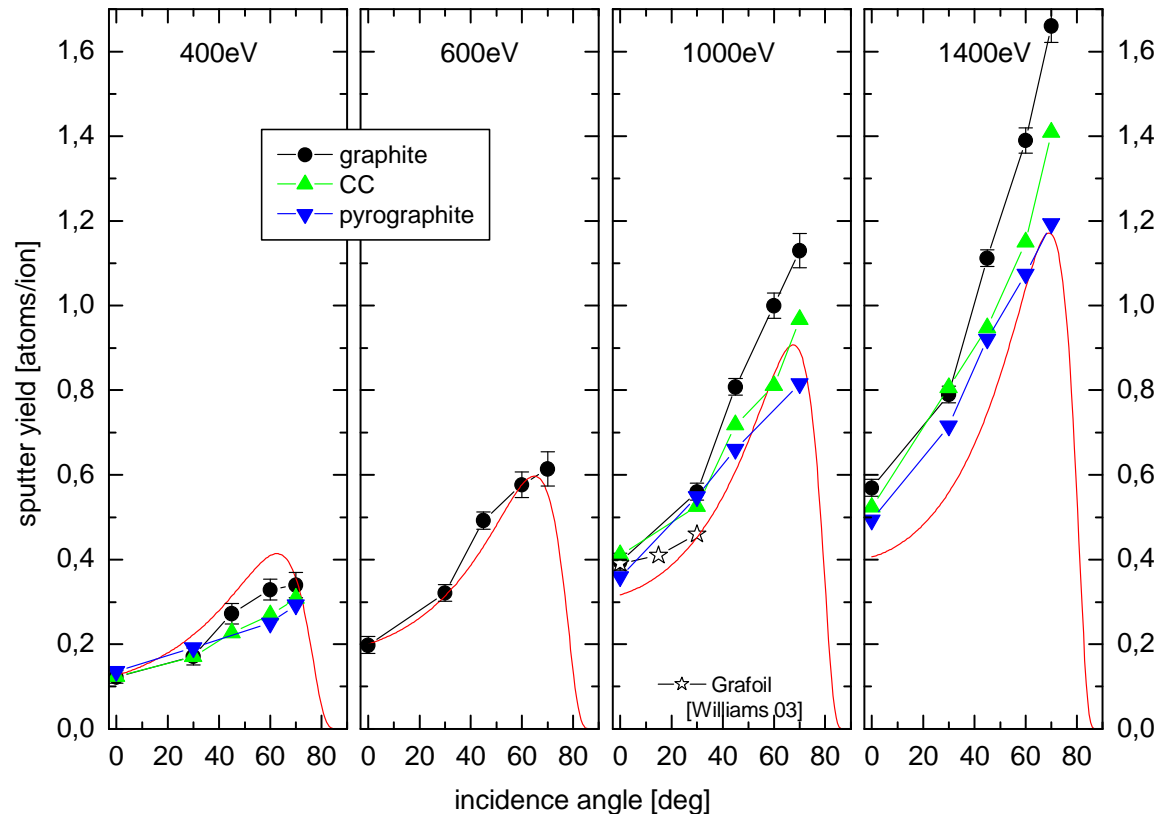
initial
surface



after 3 h
sputtering
(1000 eV,
normal
incidence)



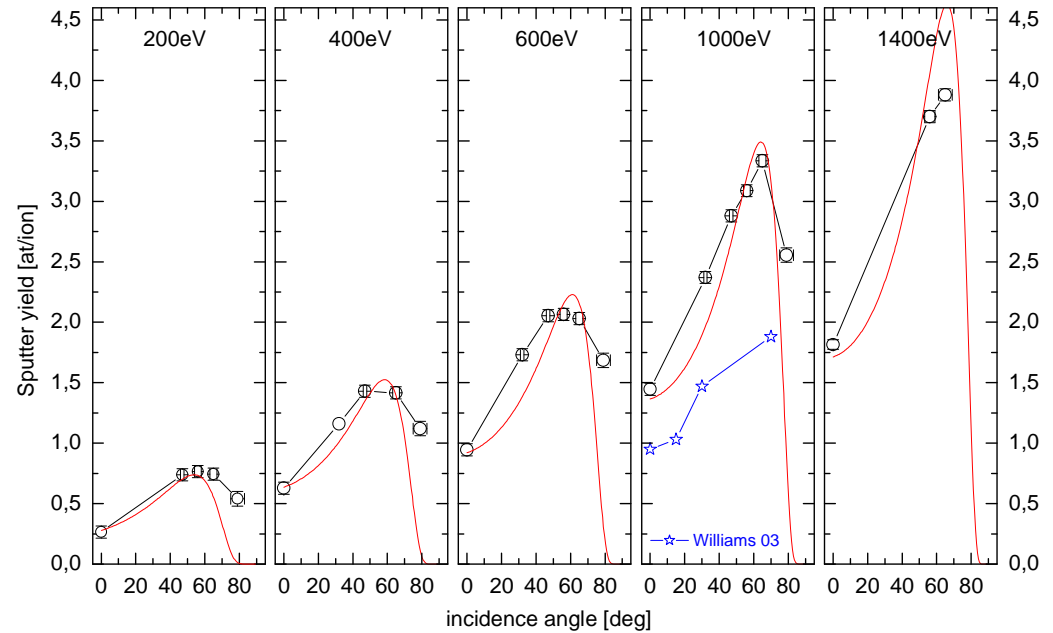
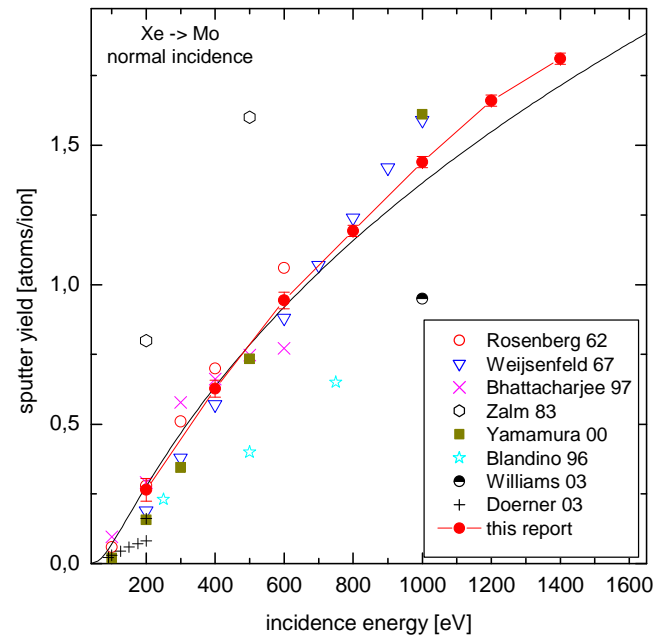
Ergebnisse - Graphite



Unterschiede zwischen den verschiedenen Arten Graphite nur bei größeren Winkeln

Sputtermodell beschreibt Y gut mit den Literaturparametern

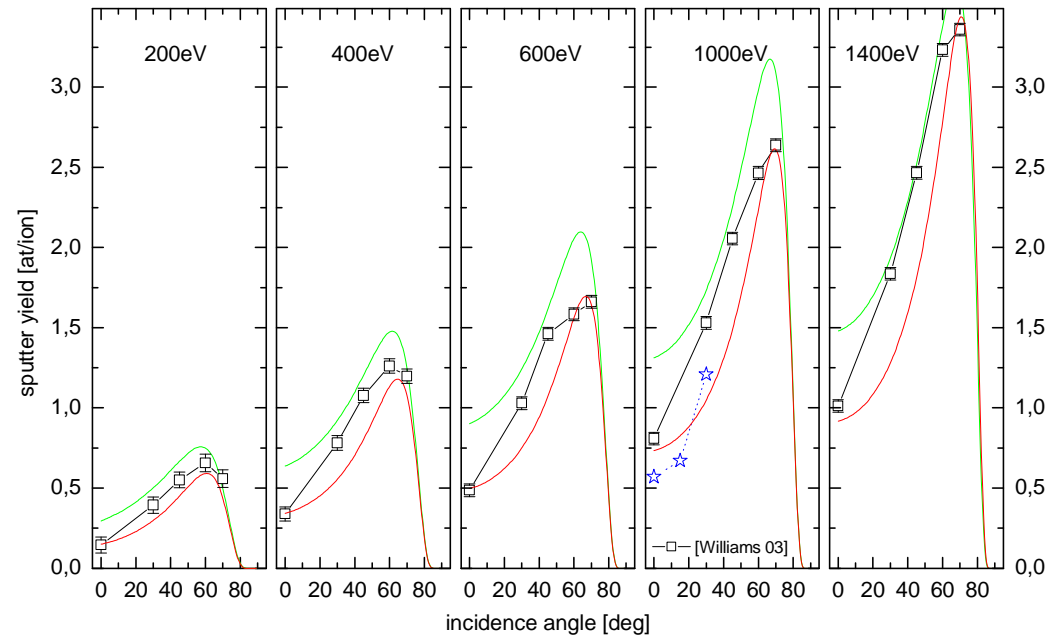
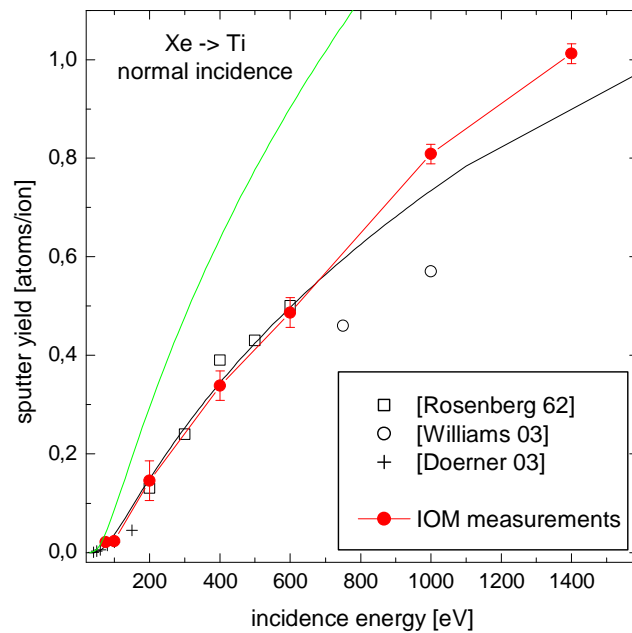
Ergebnisse - Molybdän



Sputtermodell mit Literaturparametern ok

$$E_{th} = 39.2\text{eV}$$

Ergebnisse - Titan



Anpassung der Parameter der Sputtermodelle
notwendig

$$E_{th} = 34.7\text{eV}$$

Zusammenfassung

- Zerstäubungsausbeuten für verschiedene Gittermaterialien für Ionentriebwerke gemessen
- Strahlcharakterisierung mit energieselektiver Massenspektroskopie (E, Zusammensetzung) und Thermosonden (Neutrale)
- Bei niedrigen Ionenenergien wird Einfluß sekundärer Teilchen (Neutrale) bedeutend, großer Einfluß bei Silber (niedriges E_{th}) festgestellt
Erklärung fehlt noch...

Diese Untersuchungen wurden gefördert durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und European Space Agency (ESA)