Ionenbeschleuniger für Materialforschung im FZD: Grundlagen, Aufbau und Anwendungen

Shavkat Akhmadaliev

Forschungszentrum Dresden Rossendorf

Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung • Sh. Akhmadaliev • www.fzd.de • Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

Inhalt

Grundlagen

Elektrostatische Ionenbeschleuniger

Anwendungen des Ionenstrahls für Materialforschung

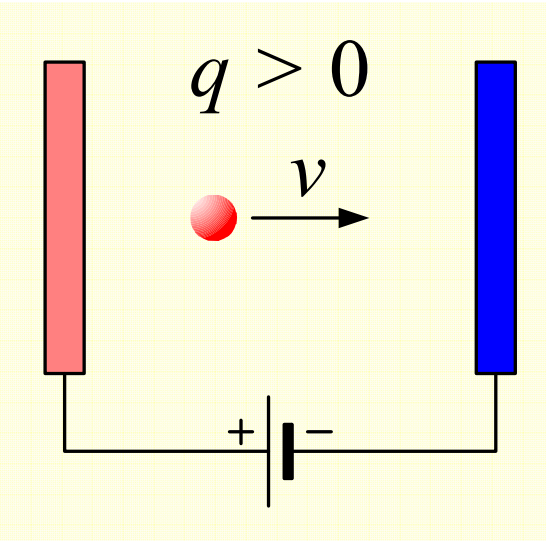
Ionenstrahlanlagen des FZD

Grundlagen

Elektrisch geladene Teilchen in Elektromagnetischem Feld

Elektromagnetische Kräfte

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E})$$



- Magnetfelder können die Bahn eines Teilchens ändern, es aber nicht beschleunigen
- Elektrische Felder können ein Teilchen beschleunigen und ablenken

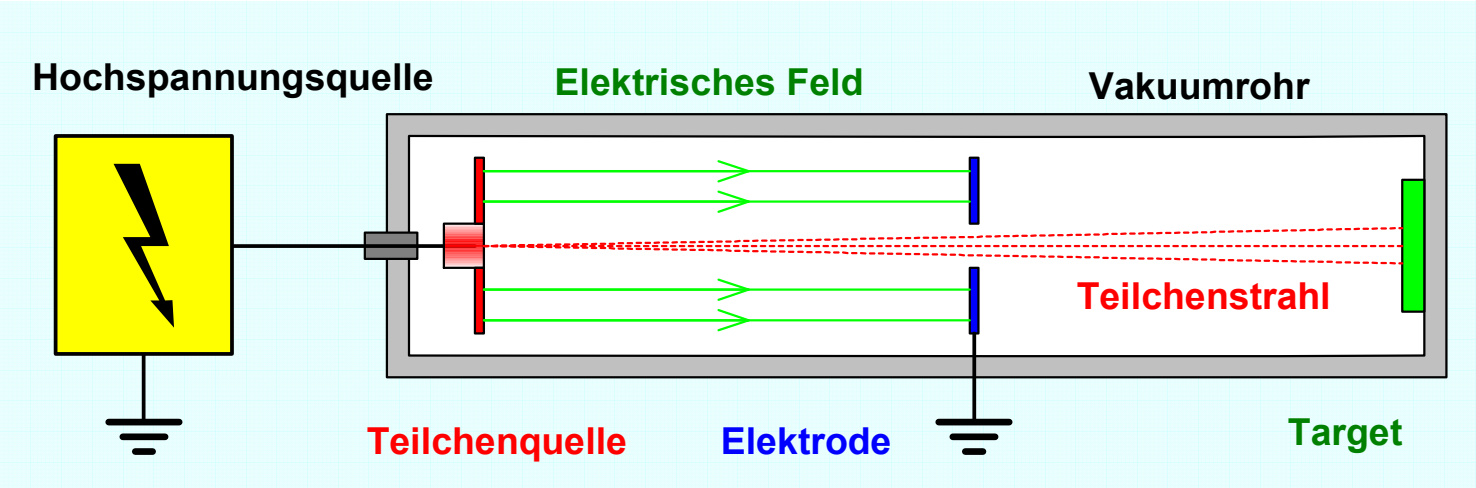
Die Energiegewinn ΔW:

$$\Delta W = \int_{r_1}^{r_2} \vec{F} \cdot d\vec{r} = q \int_{r_1}^{r_2} \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

Energieänderung nur durch elektrische Felder

Elektrostatische Ionenbeschleuniger

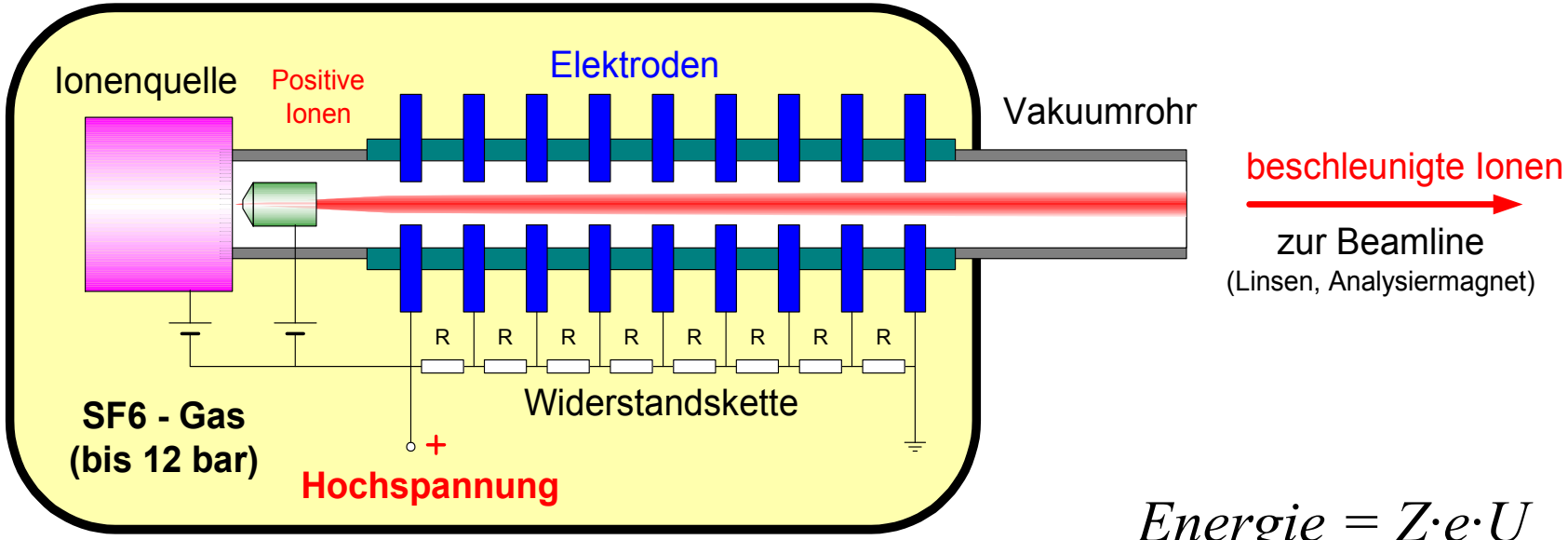
Das Prinzip eines einfachen Teilchenbeschleunigers. $Energie = Z \cdot e \cdot U$



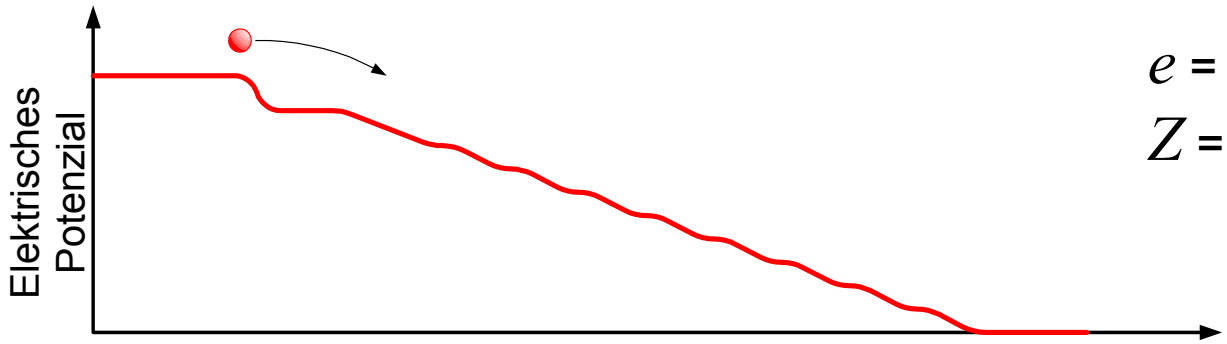
Prinzipielle Schema des Ionenbeschleunigers

Single-end-Beschleuniger

Die Ionenquelle liegt auf Hochspannung



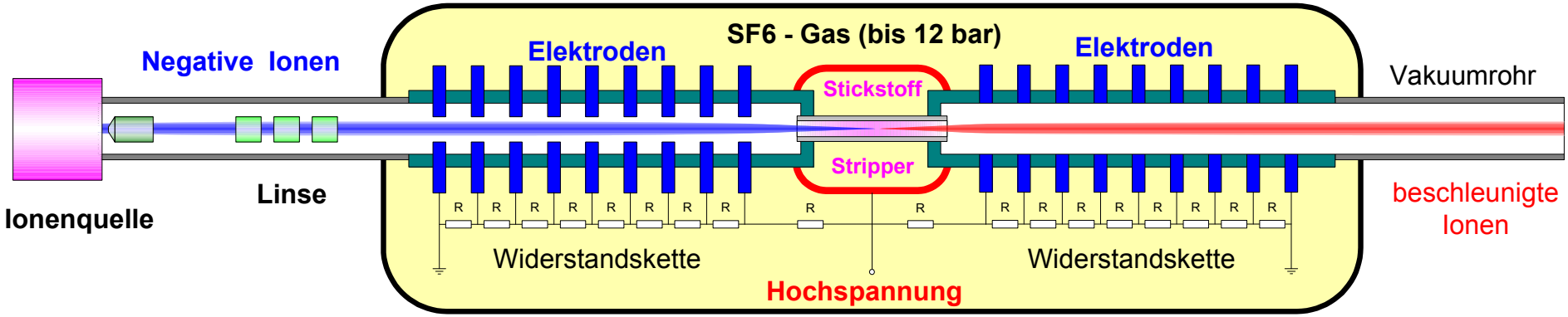
$$Energie = Z \cdot e \cdot U$$

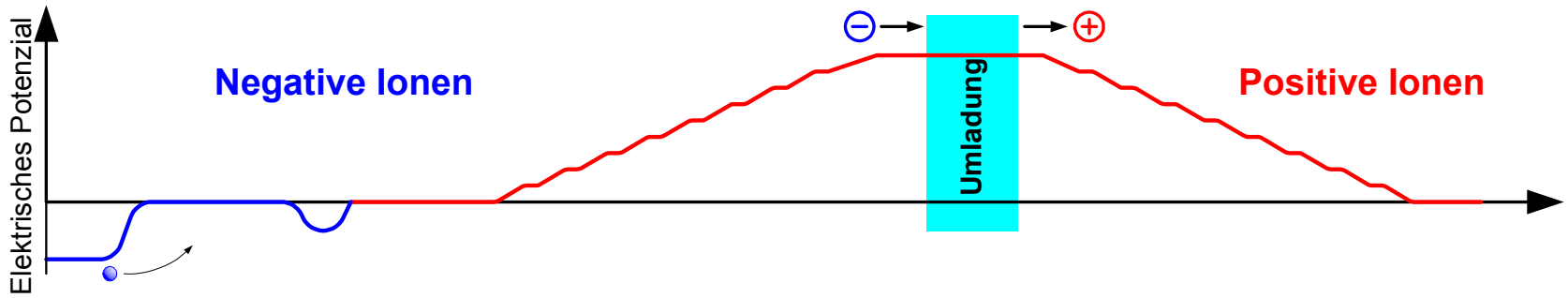


e = 1.6·10^{-19} Coulomb

Z = +1, +2

Tandem-Beschleuniger





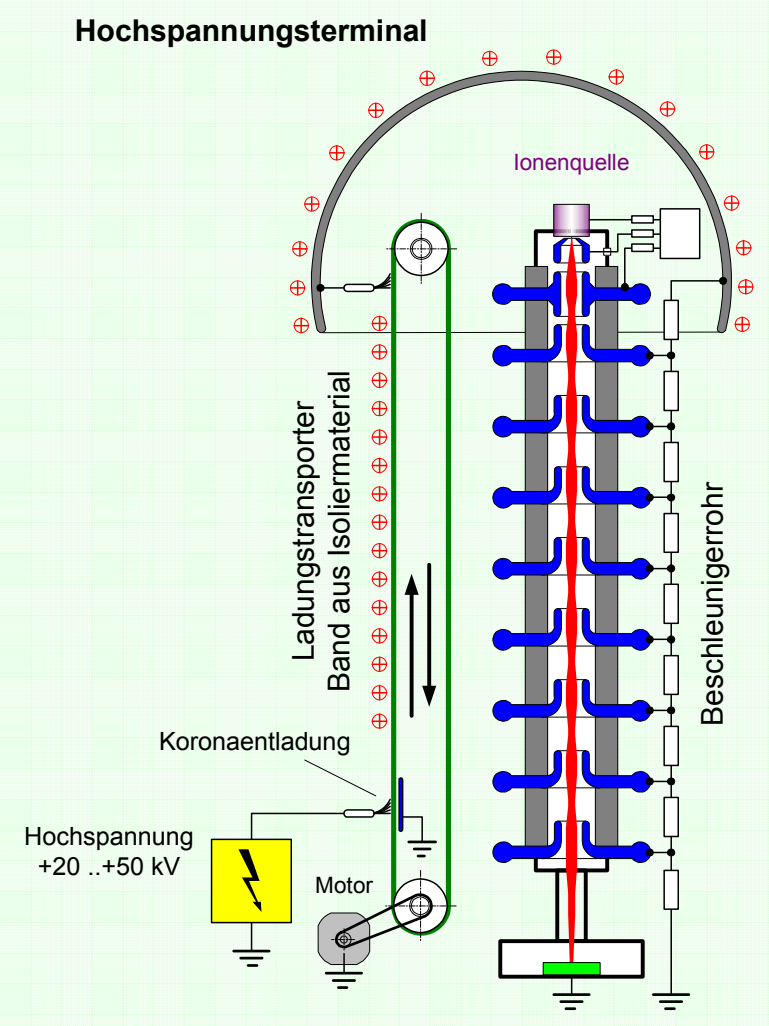
Die Ionenquelle ist auf Erdpotential

$$Energie = (Z+1)\cdot U\cdot e$$

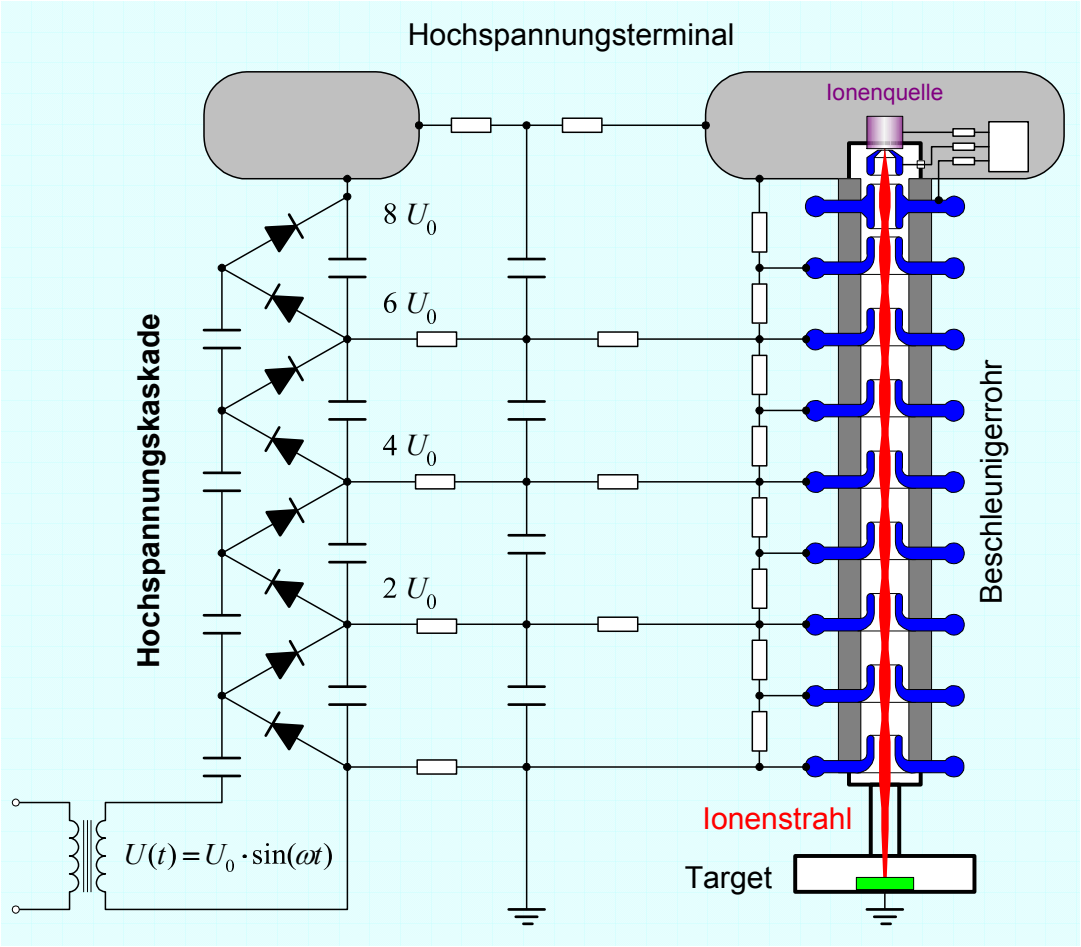
Ladungszahl Z: 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6, +7, +8, …

Hochspannungserzeugung

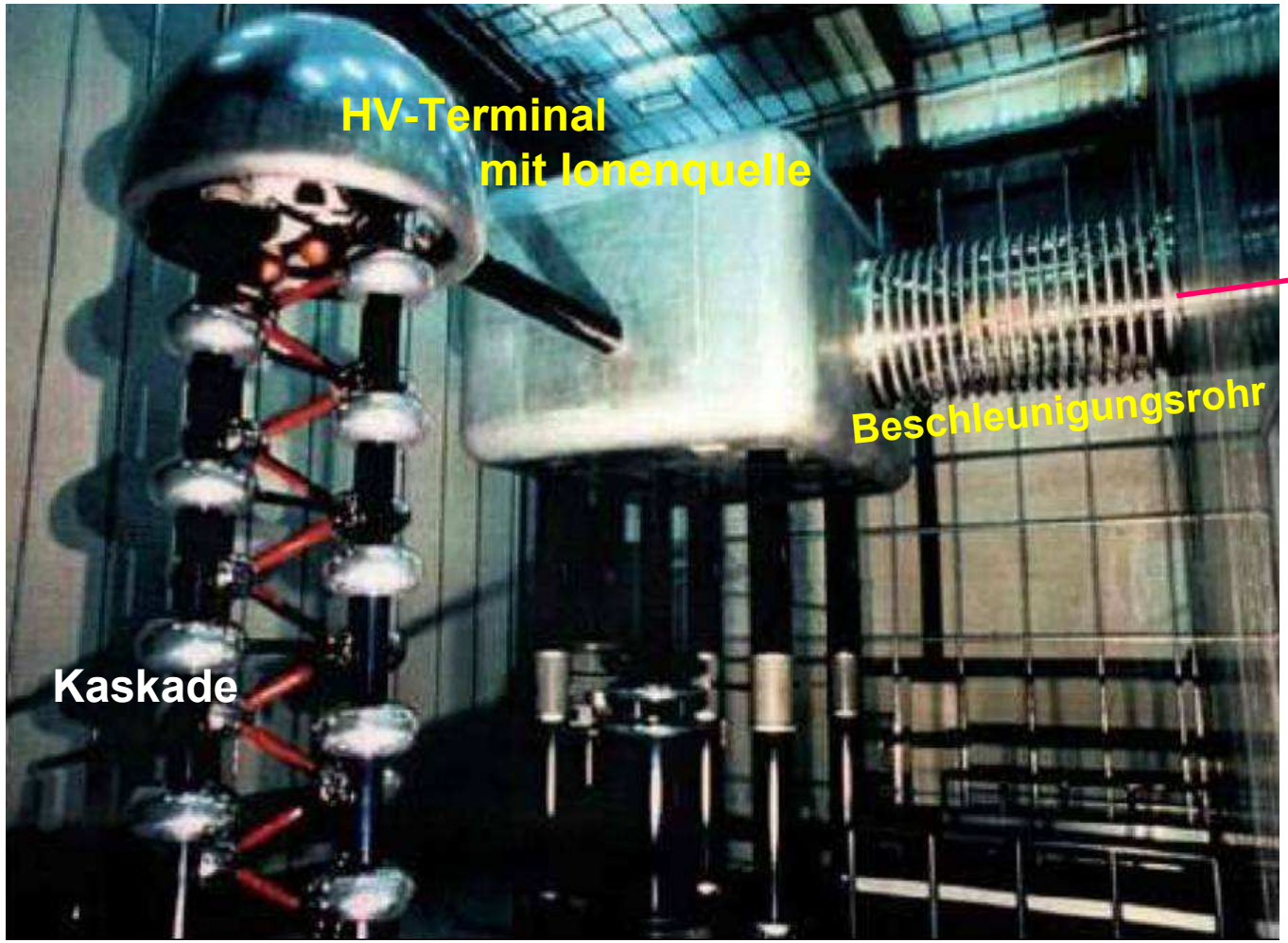
Van-de-Graaff Generator



Schaltplan eines Cockroft-Walton-Generators



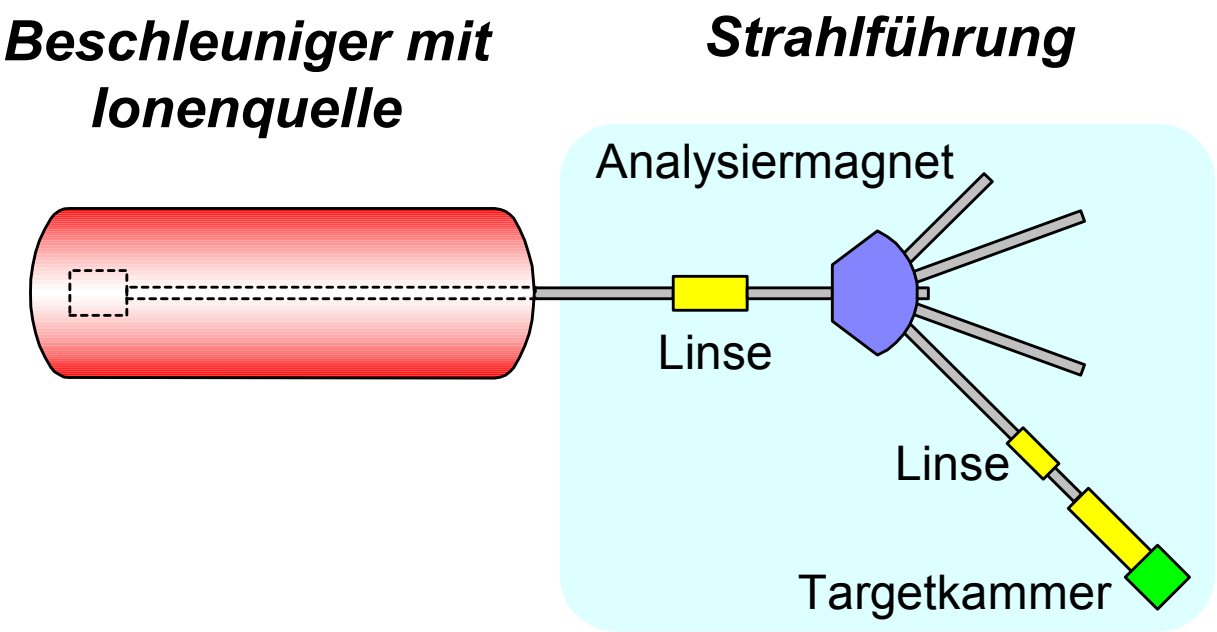
Hochspannungskaskade eines Implanters



Ionenstrahl

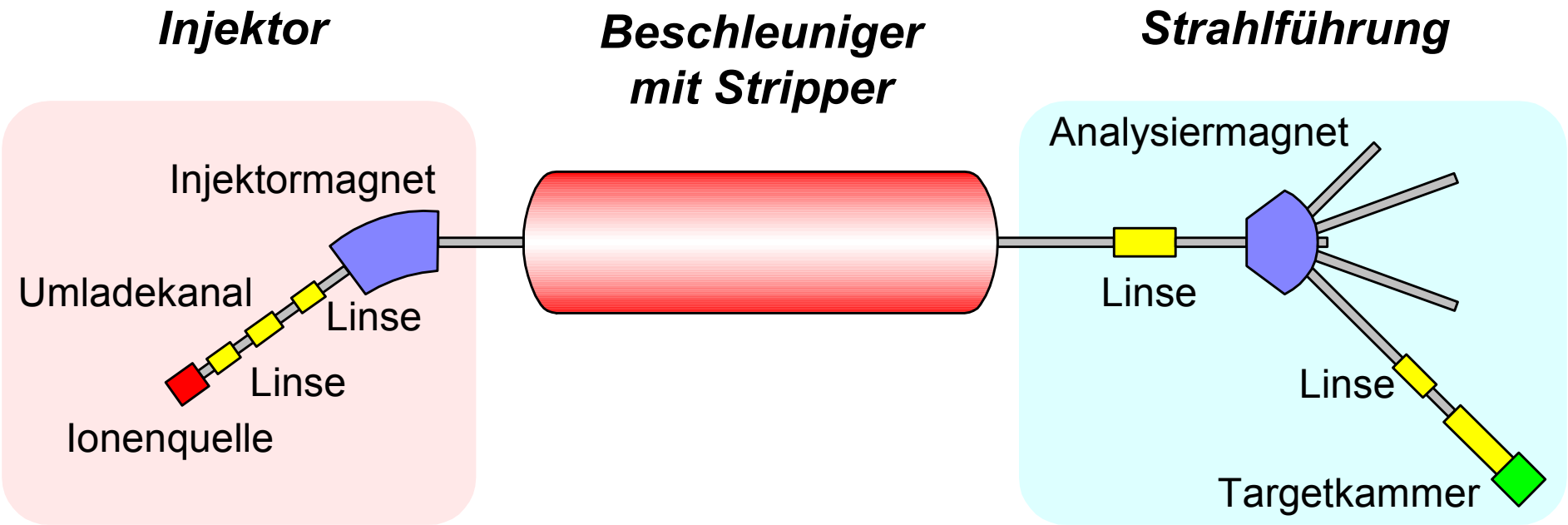
Aufbau des elektrostatischen Beschleunigers

Single-End-Beschleuniger



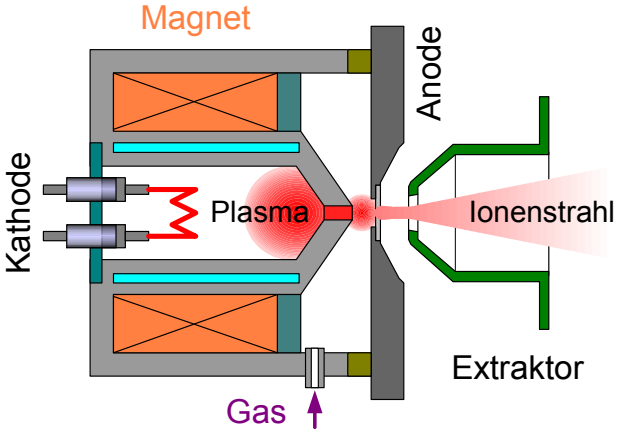
Aufbau des elektrostatischen Beschleunigers

Tandem-Beschleuniger

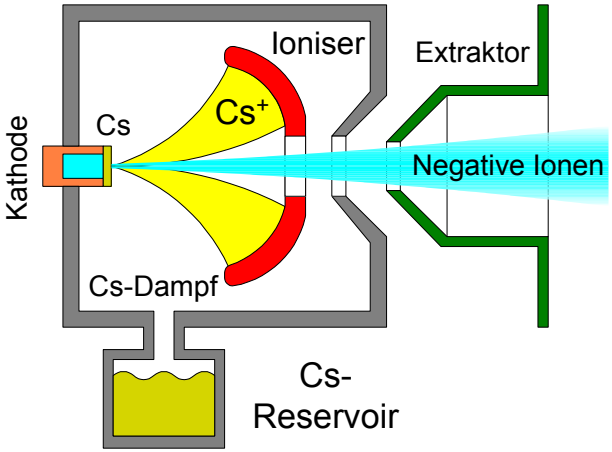


Ionenerzeugung, Ionenquellen

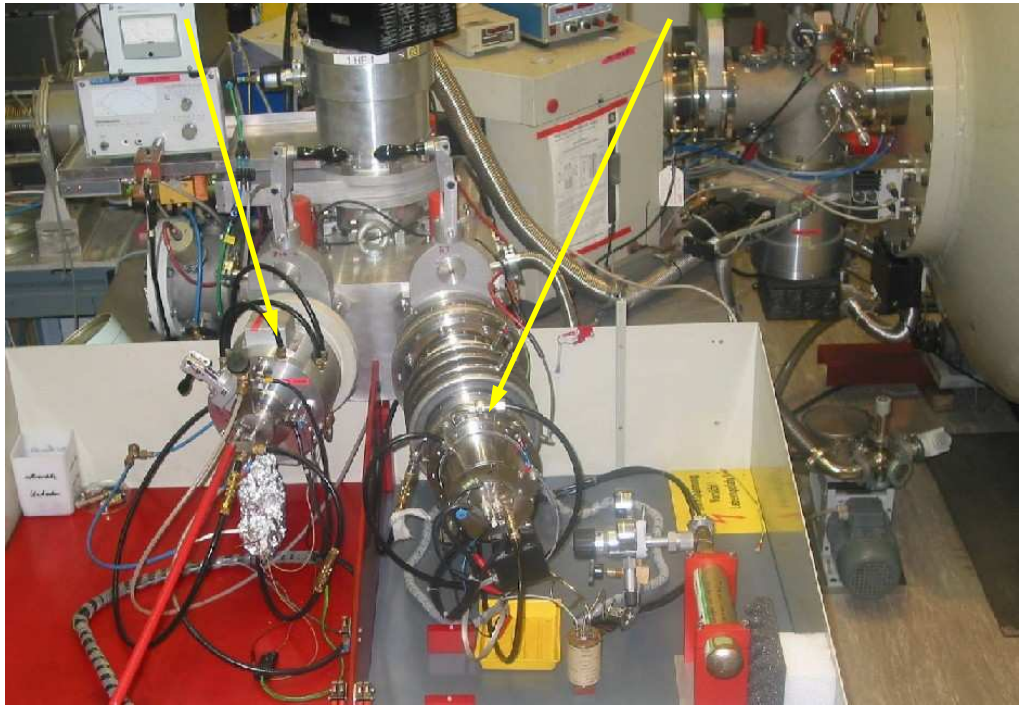
Duoplasmatron (Gasionenquelle)



Cs-Sputterquelle (Feststoffionen)



Sputterquelle He-Duoplasmatron

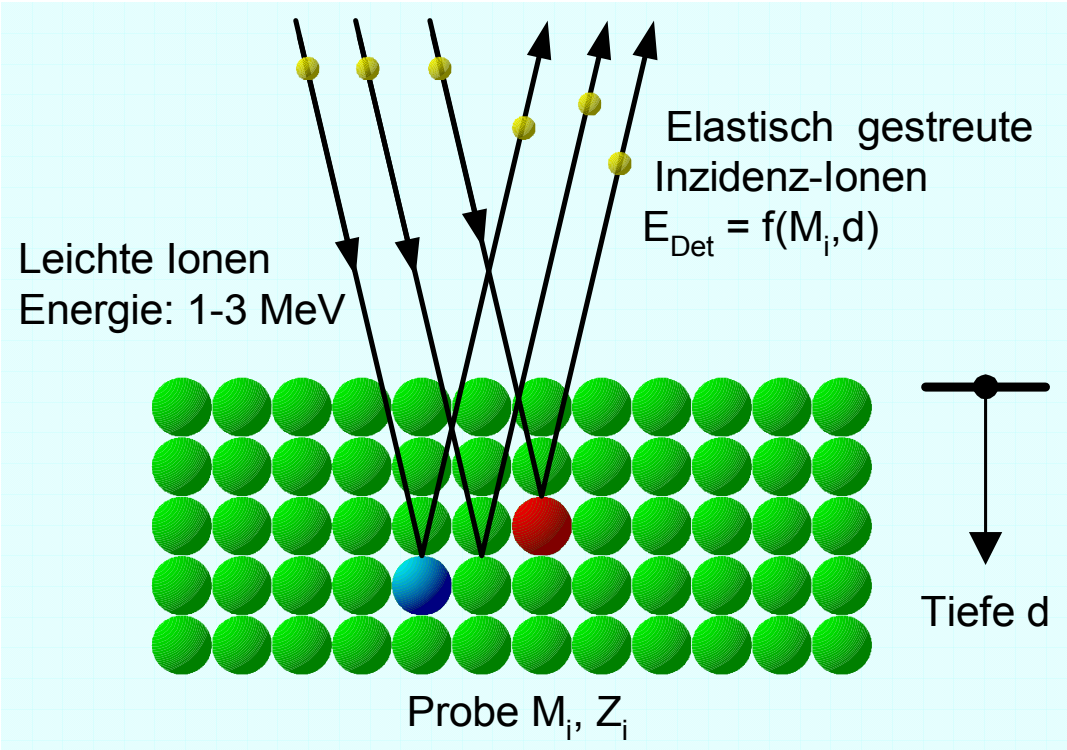


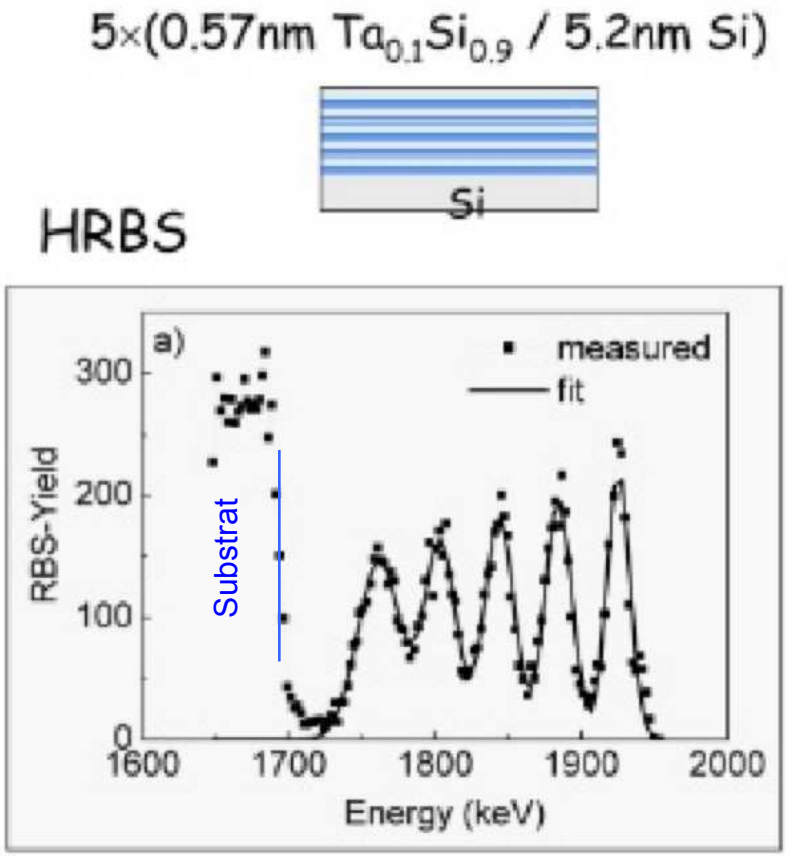
Ioneninjektor am 3MV-Tandetron

Anwendungen des Ionenstrahls für Materialanalyse

RBS, ERDA, PIXE, PIGE, NRA, AMS

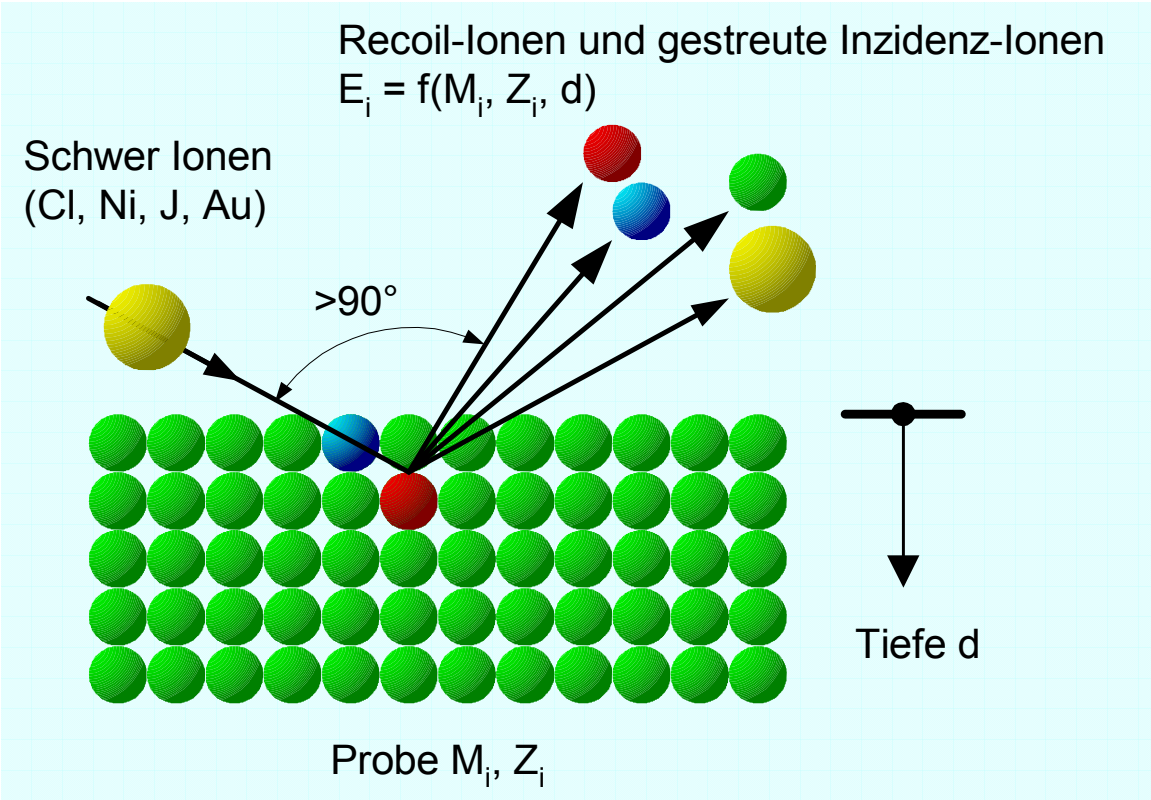
Rutherford Rückstoßspektrometrie (RBS)

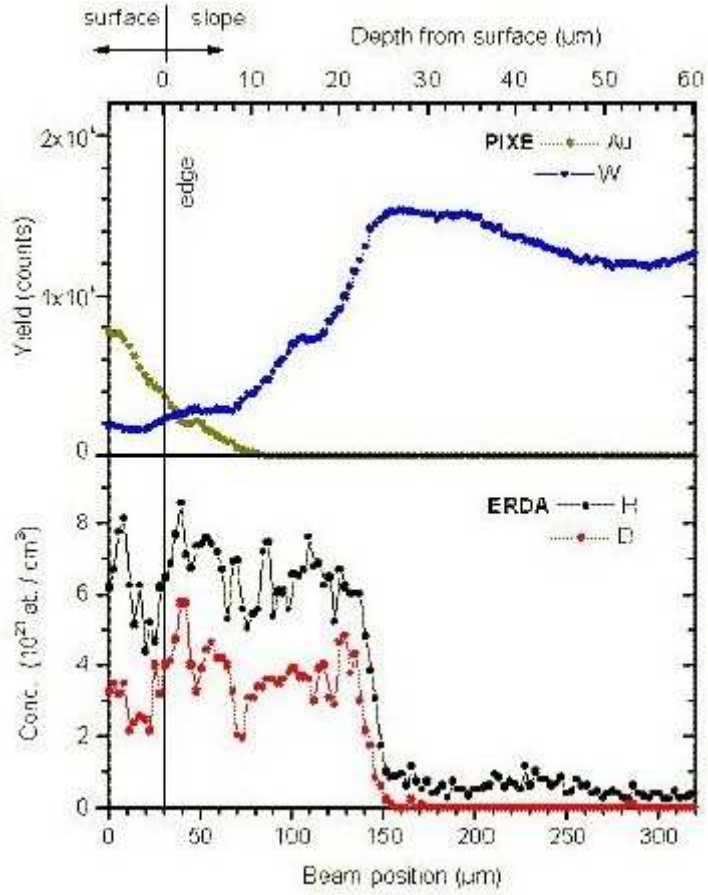




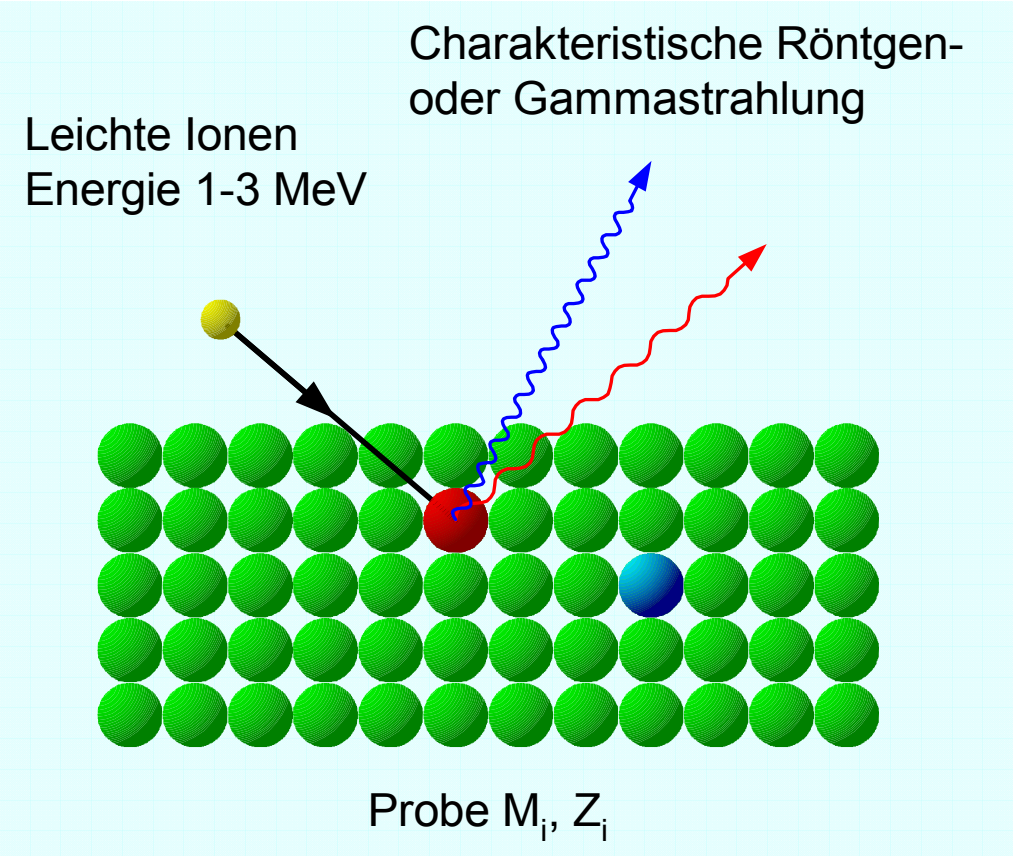
Hochauflösendes RBS-Spektrum

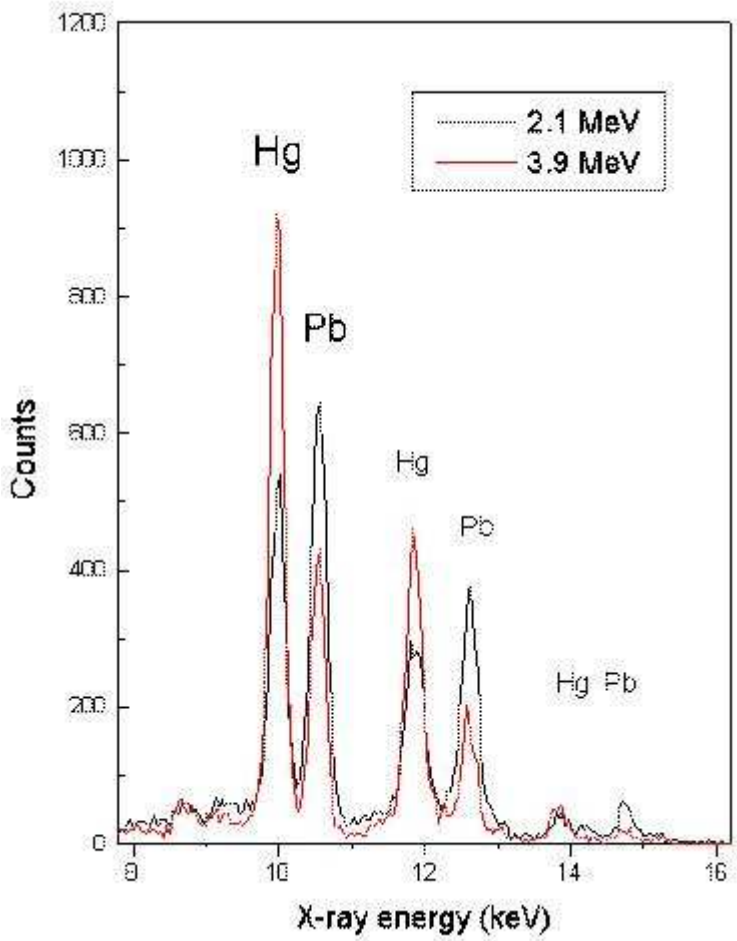
Elastic Recoil Detection Analysis (ERDA)



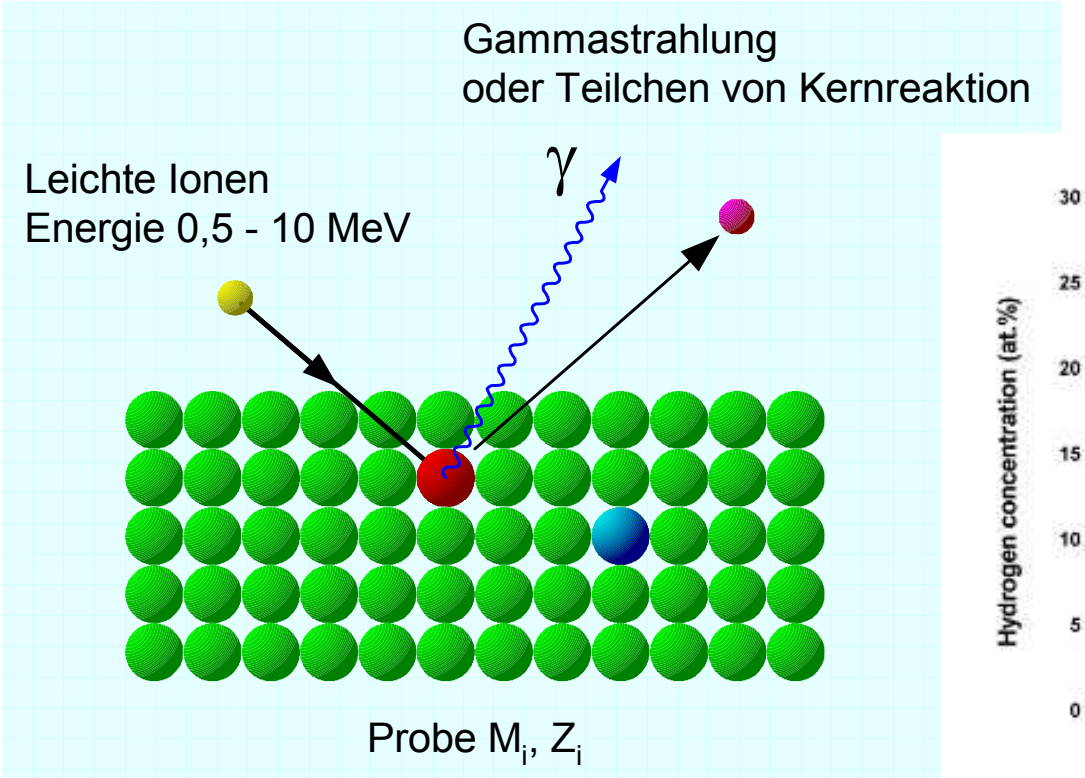


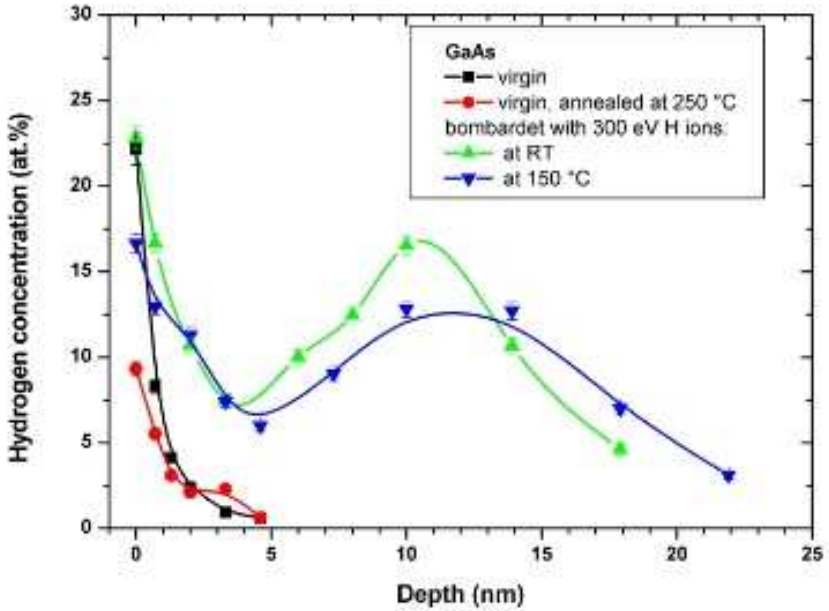
Particle Induced X-ray/Gamma Emission (PIXE/PIGE)





Nuclear Reaction Analysis (NRA)



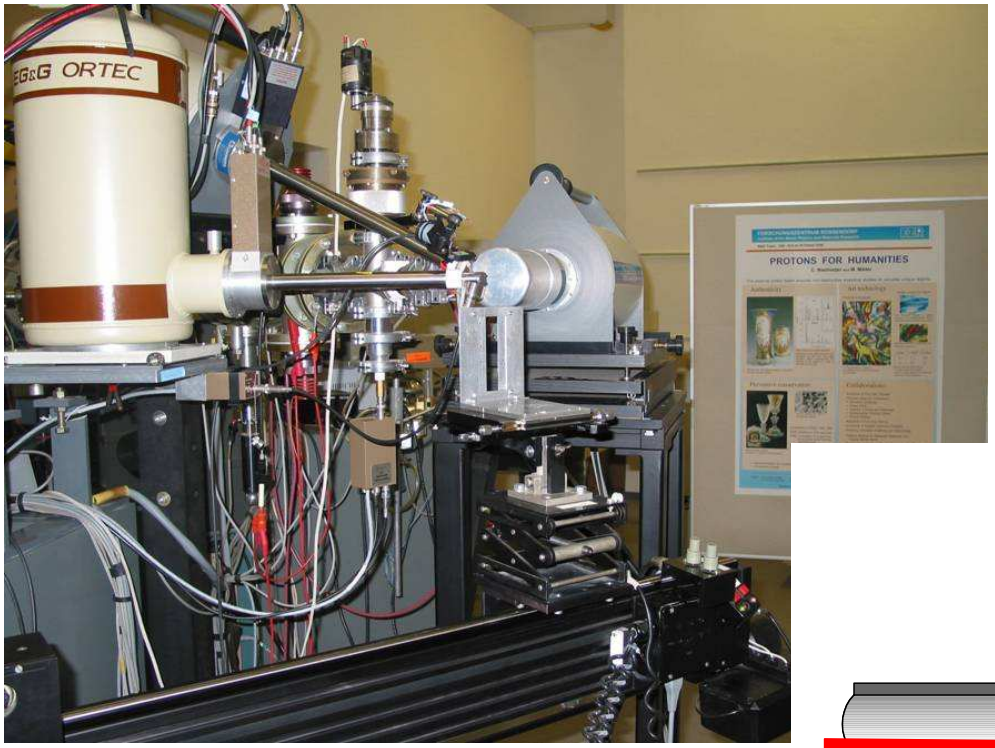


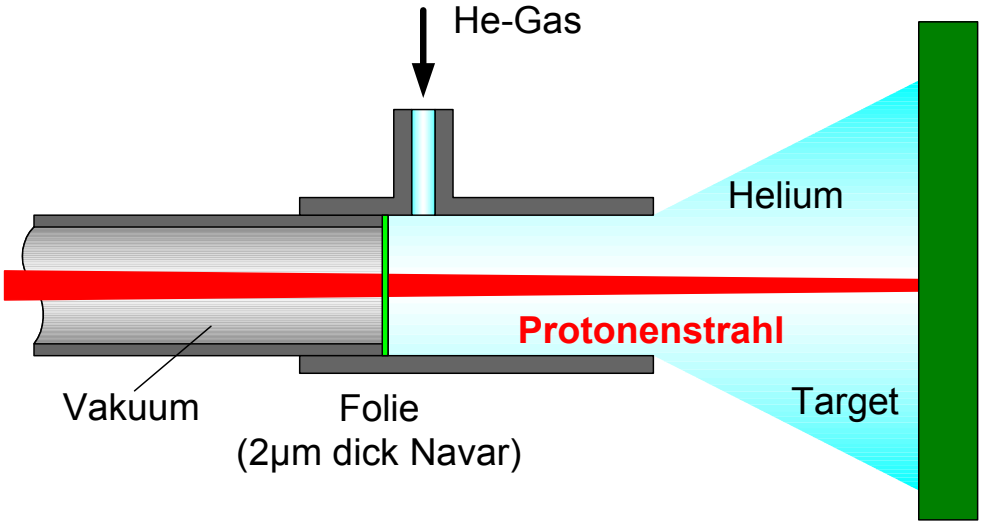
Wasserstoffanalyse in GaAs

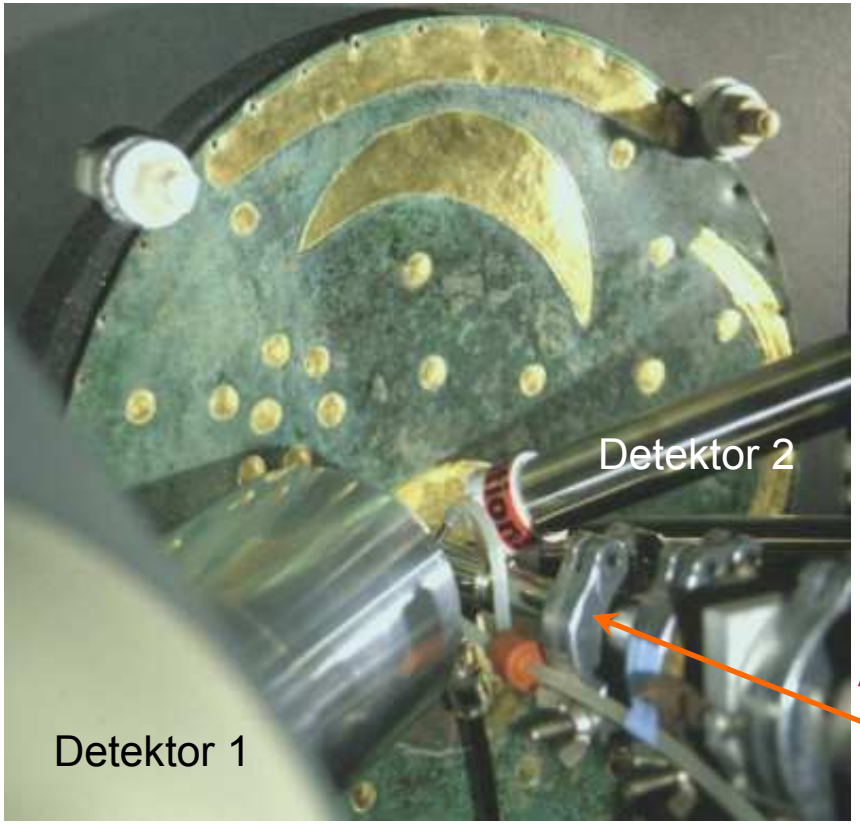
Beispiel:
Zerstörungsfreie quantitative Wasserstoff-Analytik

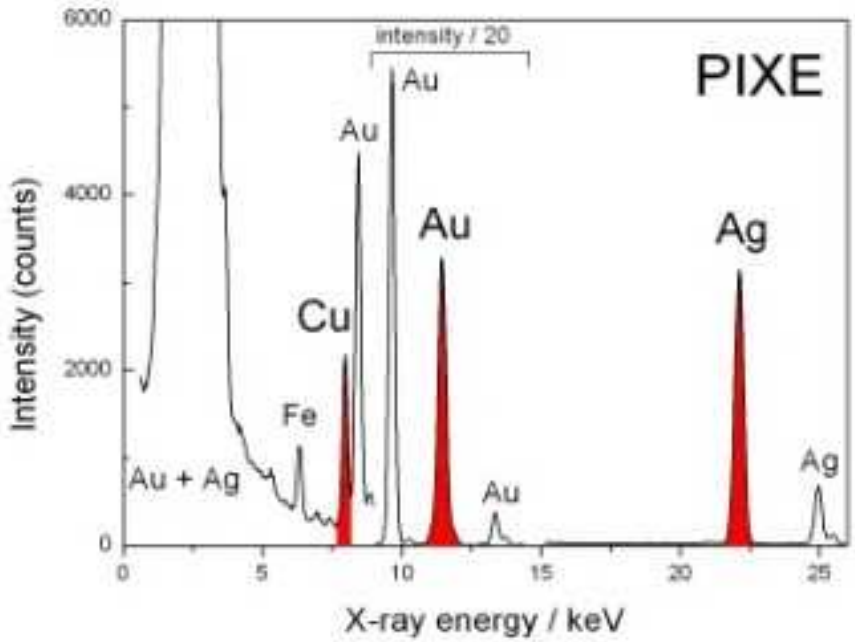
$^{15}N + {}^{1}H \rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He + \gamma(4{,}43\ MeV)$, Resonanzenergie = 6,385 MeV

Externprotonenstrahl am 5 MV Tandembeschleuniger (PIXE,PIGE,RBS)
Zerstörungsfreie Materialanalyse von Kunstwerken







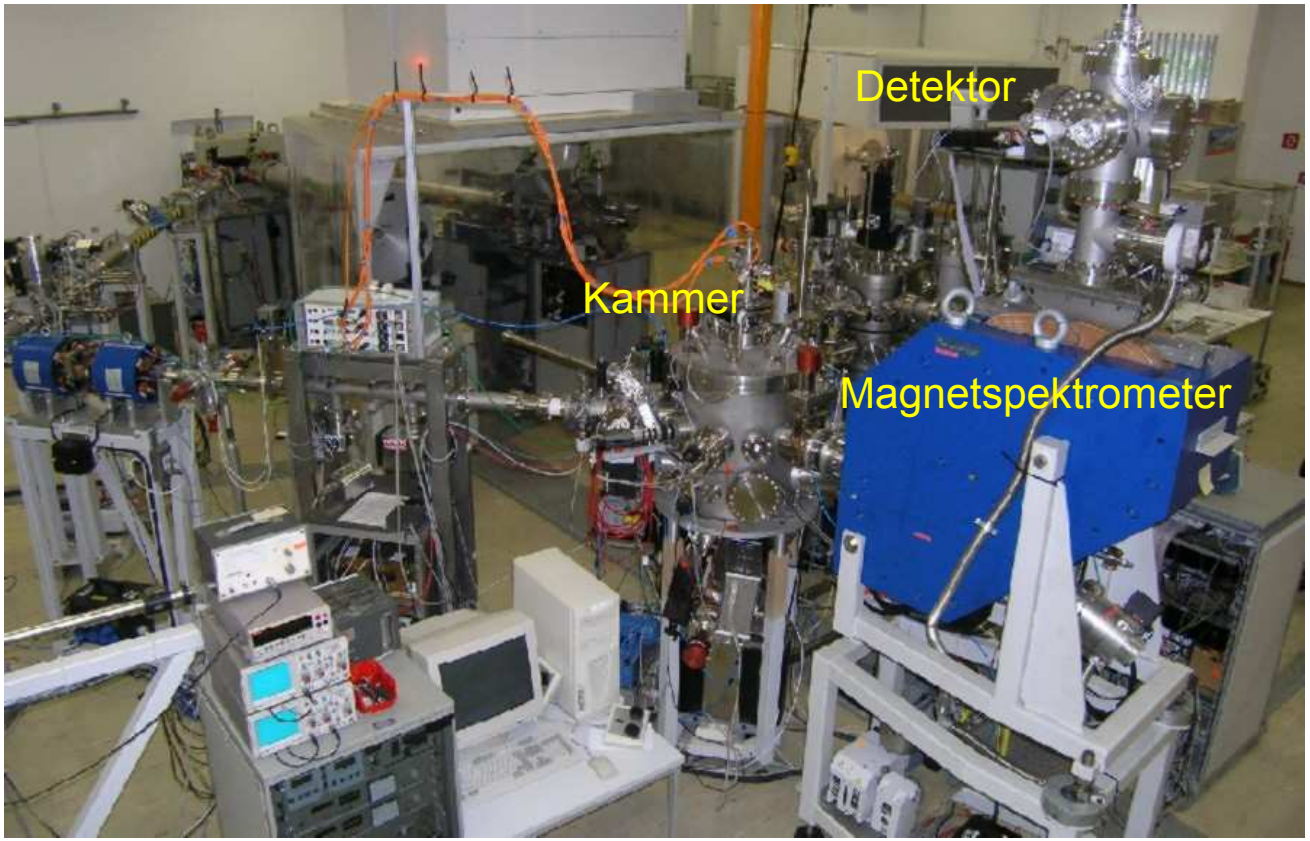


Ionenstrahl

Die "Himmelsscheibe von Nebra" bei Goldanalyse mit externen Protonenstrahl

Hochauflösende RBS-Anlage am 3 MV Tandetron

Strahlrichtung



Hochauflösende ERDA -Anlage am 5 MV Tandem Beschleuniger

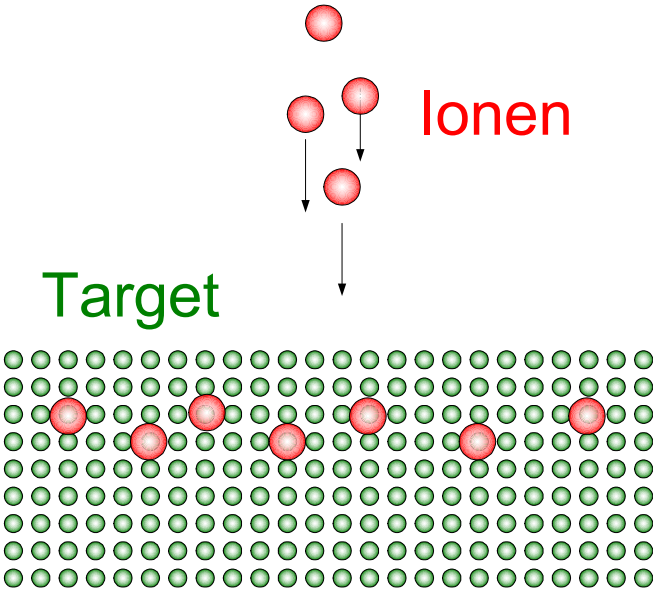
Strahlrichtung

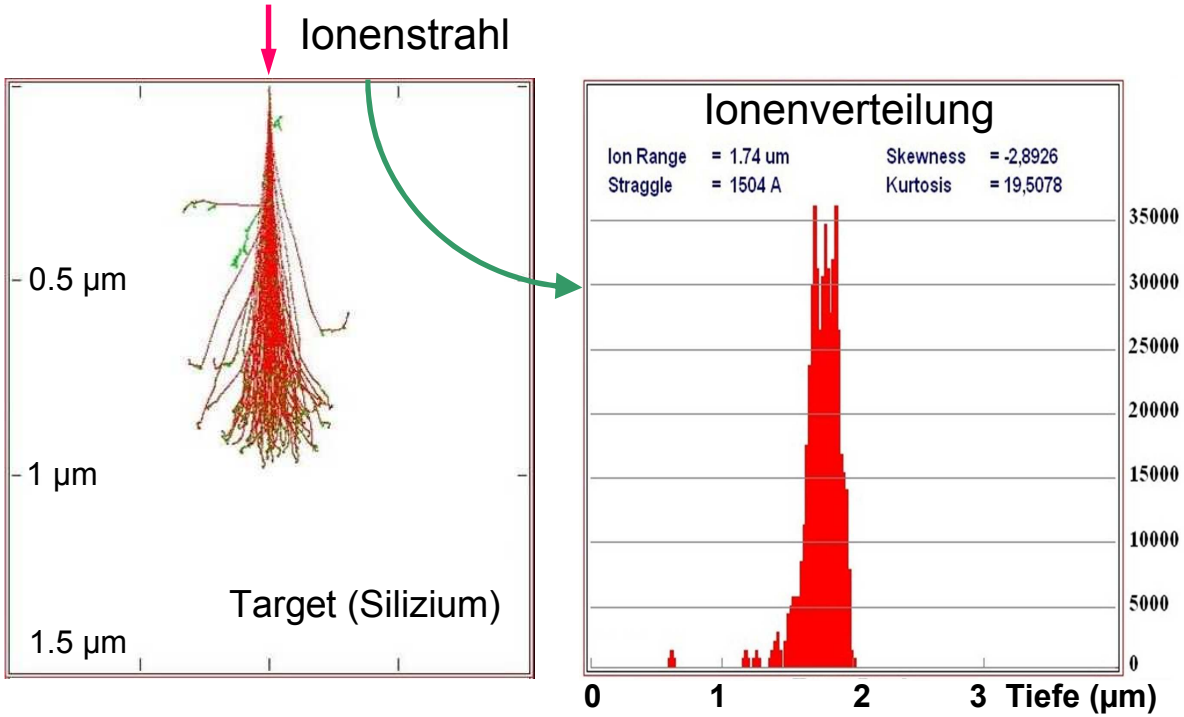
Detektor

Anwendungen des Ionenstrahls für Materialmodifizierung

Implantation, Sputtern, IBAD

Implantation

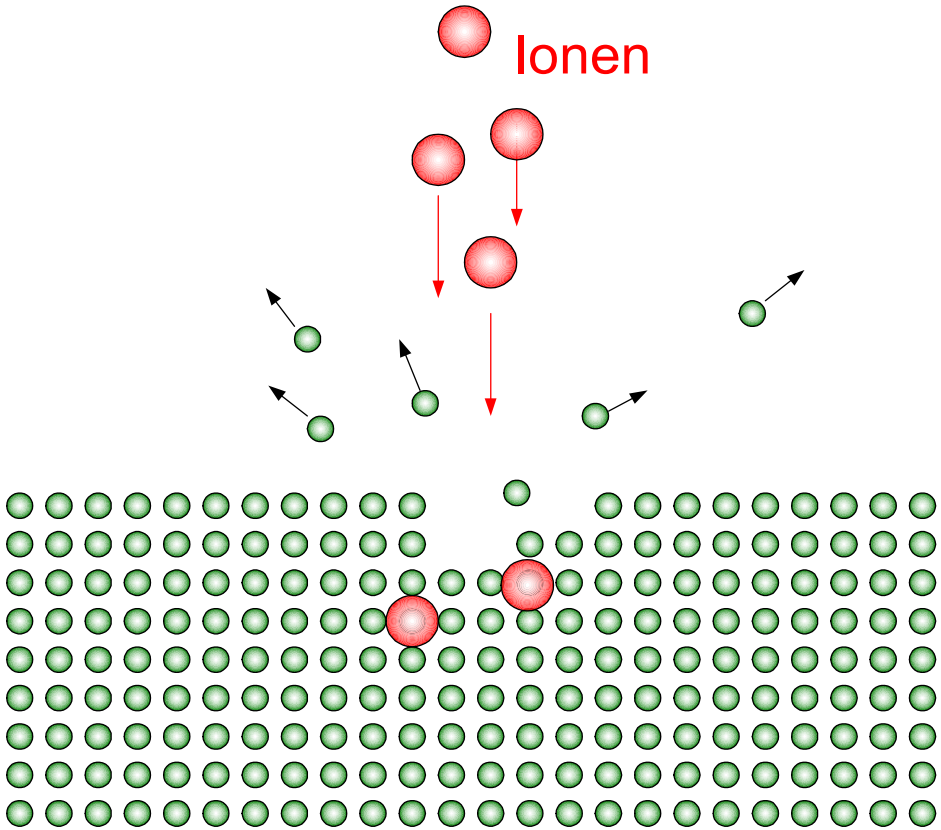




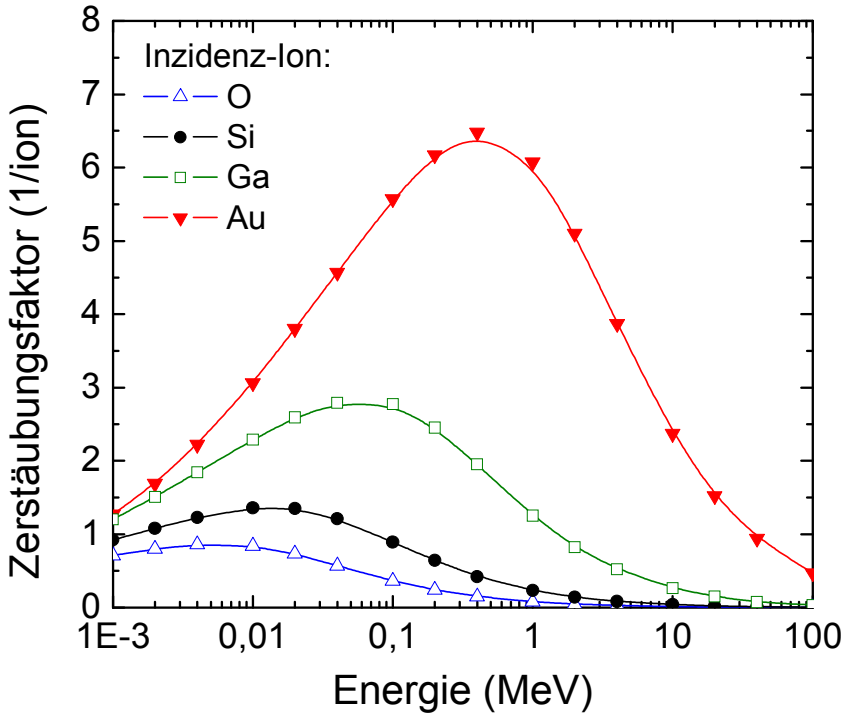
Simulation mit SRIM: 1 MeV B^+ Ionen in Silizium
SRIM = The Stopping and Range of Ions in Matter

Implantationstiefe ist abhängig von Ionenenergie, Ionenmasse, Eintrittswinkel und Material

Sputtering - Materialzerstäubung



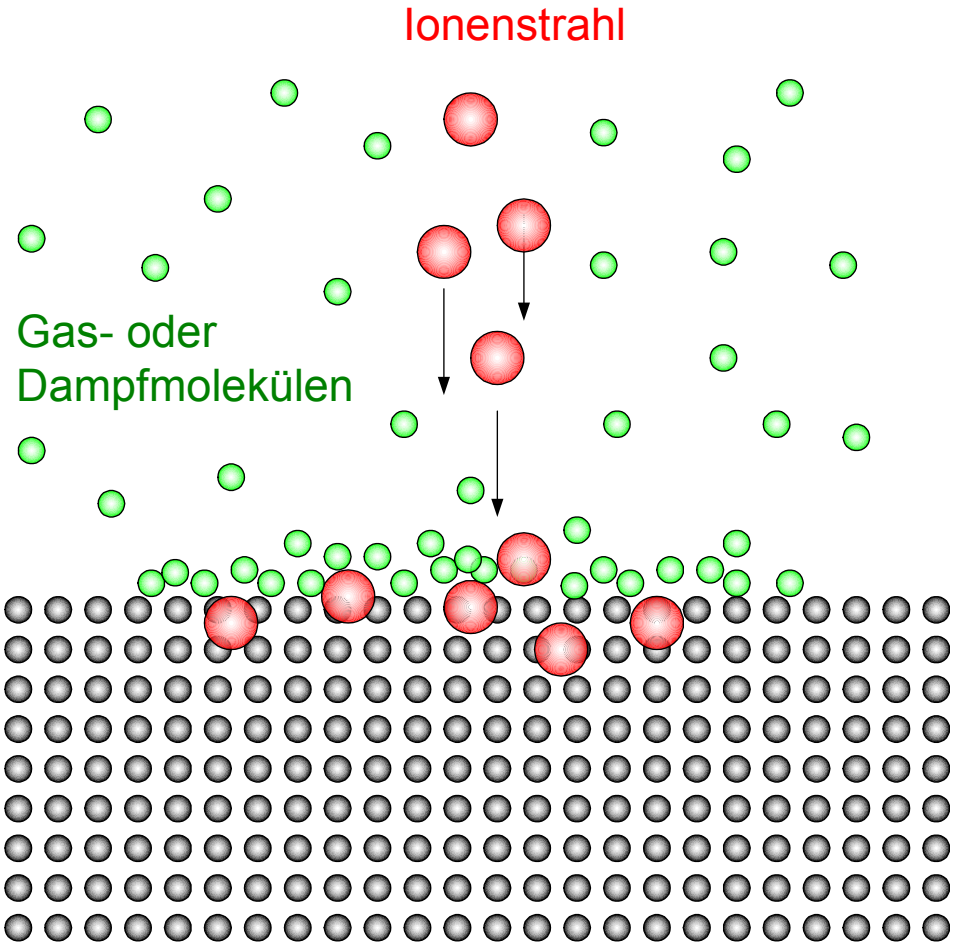
Zerstäubung von Silizium



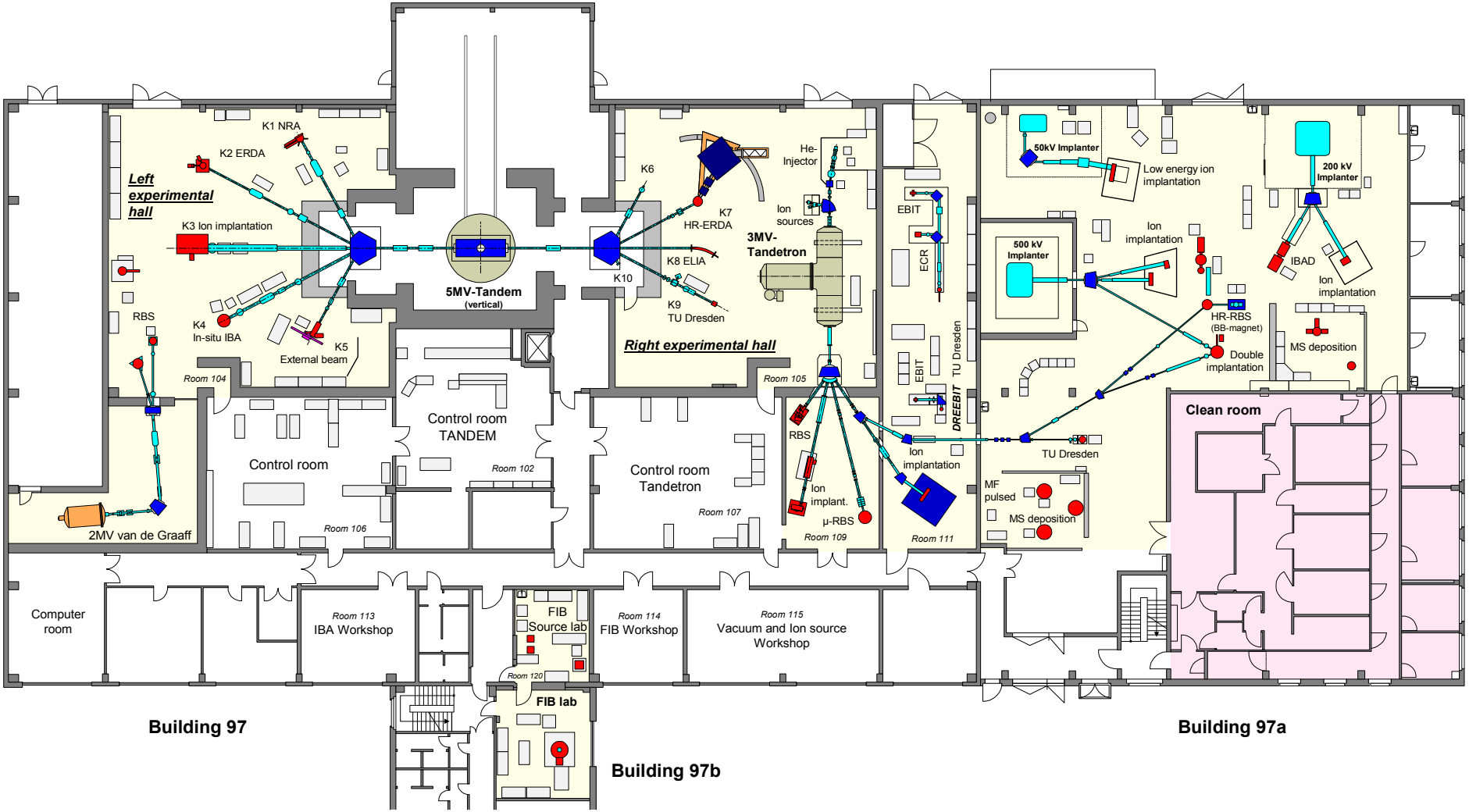
Zerstäubungsfaktor ist abhängig von Ionenenergie, Ionenmasse, Eintrittswinkel und Material

IBAD – Ionenstrahlgestutzte Deposition

Oberflächenbeschichtung



Ionenstrahlanlagen in FZD - Ionenstrahlzentrum



Niederenergie-Beschleuniger

500kV HVEE Ionenimplanter
Hochspannungsterminal mit Ionenquelle

200kV Danfysik Ionenimplanter
Strahlrohr mit Implantationskammer

MeV-Beschleuniger

2-MV-Van-de-Graaff-Beschleuniger
Hochspannung: *Van-de-Graaff Generator*
Baujahr: 1963
Beschleunigungsspannung: 0,3 - 1,7 MV
Strahlstrom: bis 1 µA
Ionenarten: ^{1}H, ^{2}H, ^{4}He

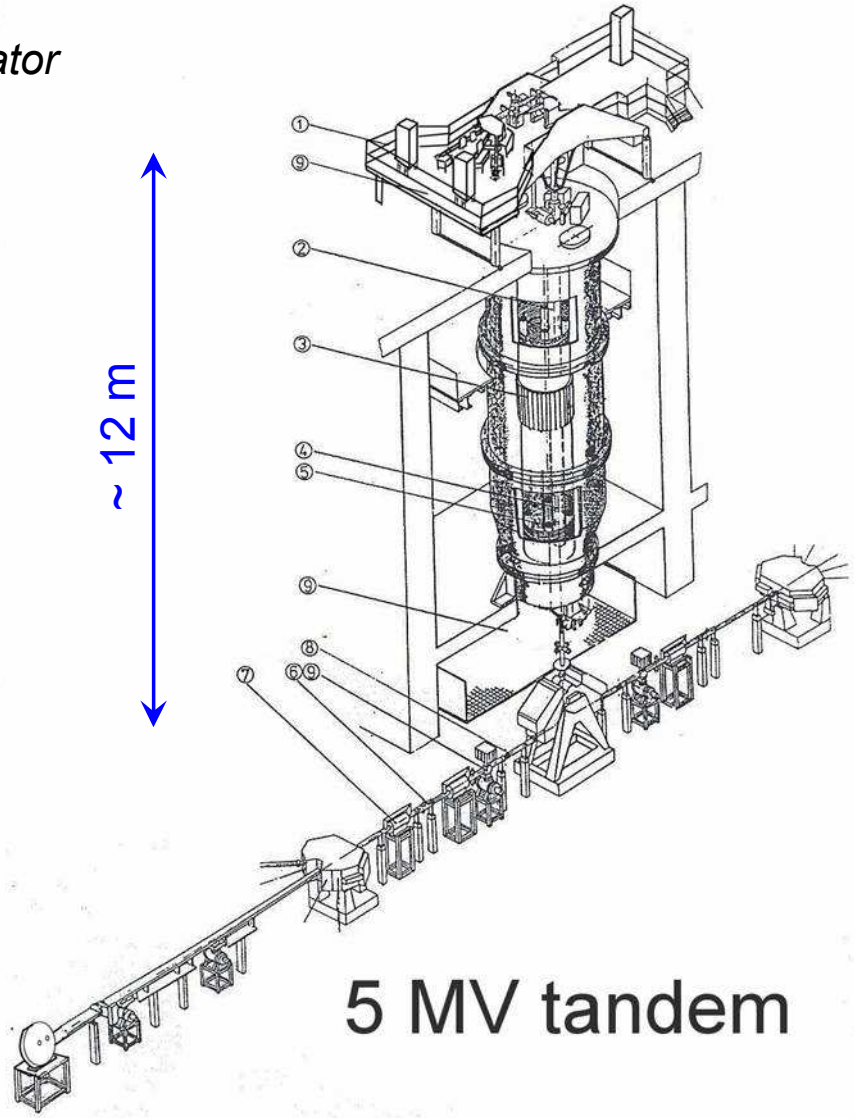
<u>Anwendung</u>: RBS

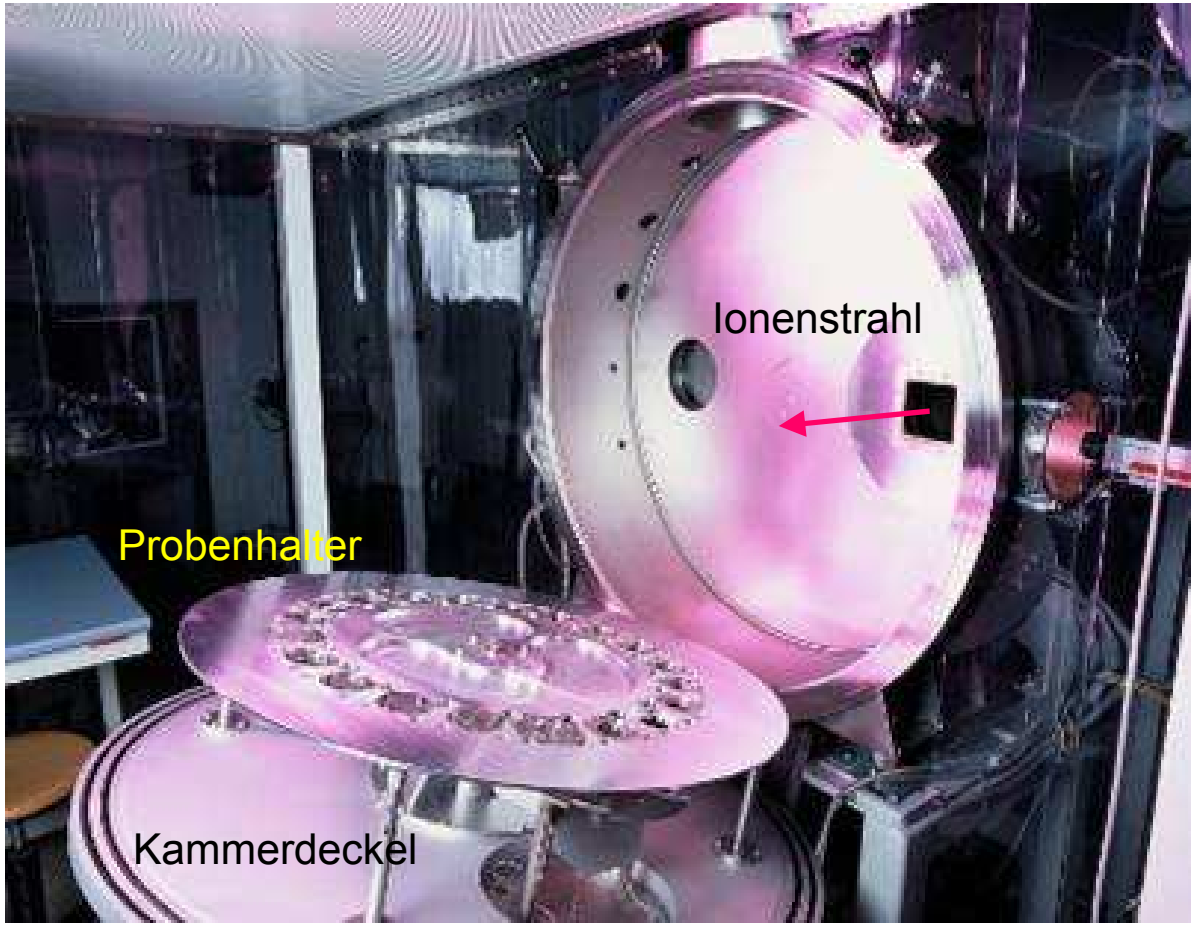
3-MV-Tandetron (Hochstromversion, HVEE)
Hochspannungserzeugung: *Kaskade* (*Dynamitron*)
Baujahr: 1993
Beschleunigungsspannung: 0,1 - 3,3 MV
Strahlstrom: bis 200 µA
Ionenarten: nahezu alle Ionenarten

<u>Anwendungen</u>:
Hochenergieimplantation, RBS, Nuklearmikroprobe

5-MV-Tandembeschleuniger EGP-10-1
Hochspannungserzeugung: *Van-de-Graaff Generator*
Baujahr: 1972
Beschleunigungsspannung: 0,8 - 4,5 MV
Strahlstrom: bis 10 µA
Ionenarten: fast alle Ionenarten

<u>Anwendungen</u>:
ERDA, NRA, extern Protonenstrahl,
Hochenergieimplantation, Detektor Entwicklung





Implantationskammer am 50kV- Implanter (Offen)

Fein fokussierter Ionenstrahl (FIB- Focused Ion Beam)

Energie: 30-60 keV

Ionen:
Ga, Si, Au, Ge, Co, Nd, Li, …

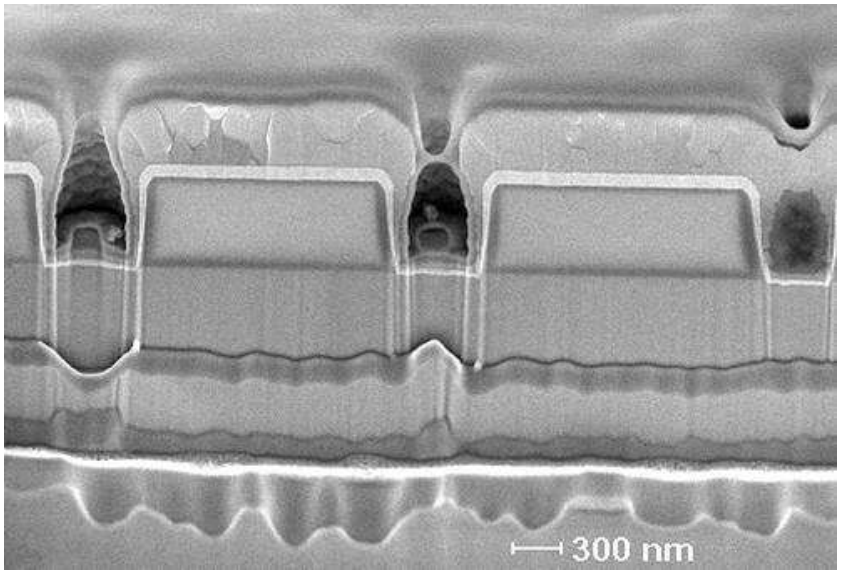
Strahlfleck: ∅ 10 .. 50 nm

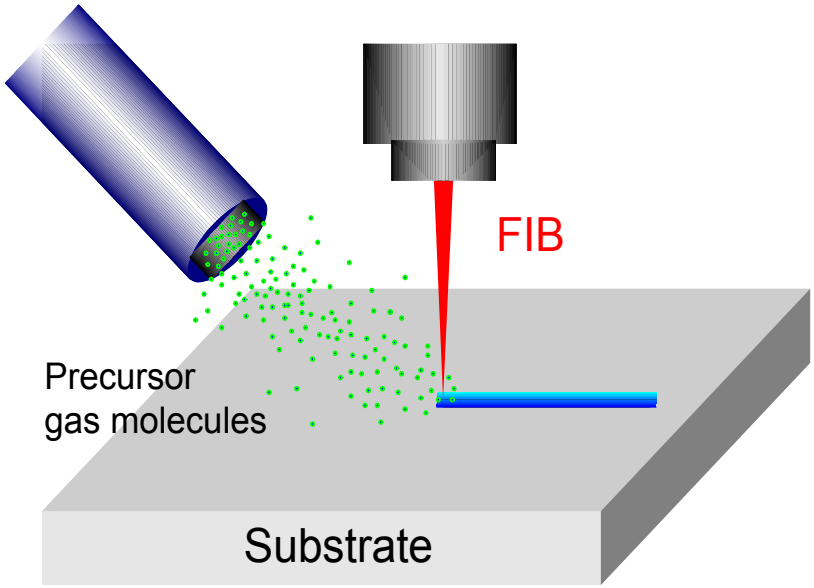
I*onenquelle*:
Flüssig-Metall-Ionenquelle

Legierungen
AuGeSi, AuGe, AuSi T_m ~ 365°C;
GaBi, GaBiLi T_m ~ 220 - 250°C;
CoNd T_m ~ 570°C;
…..

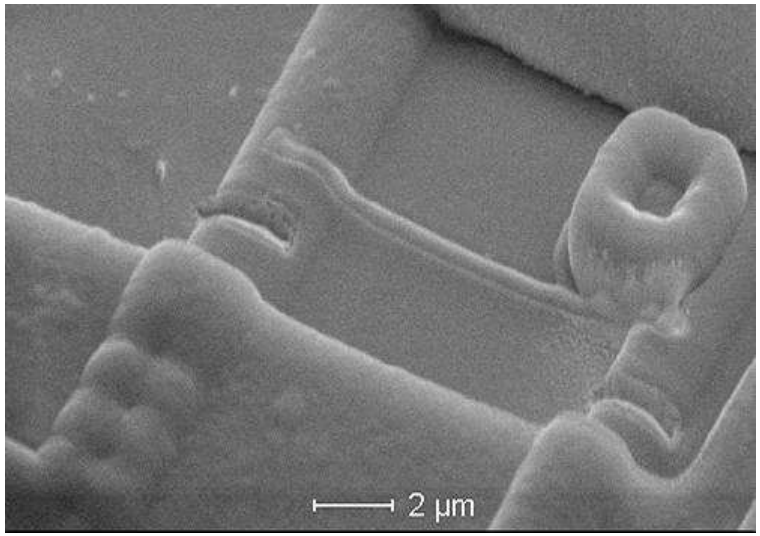
Anwendungen von FIB (Sputtern, FIBAD, Implantation)

Materialzerstäubung mit FIB:
Querschnitt einer IC-Struktur





Korrektur einer IC-Struktur:
Abtrennung und neue
Verbindung mittels FIB



Ionenstrahlanwendungen in Radiopharmazie

Zyklotron CYCLONE 18/9

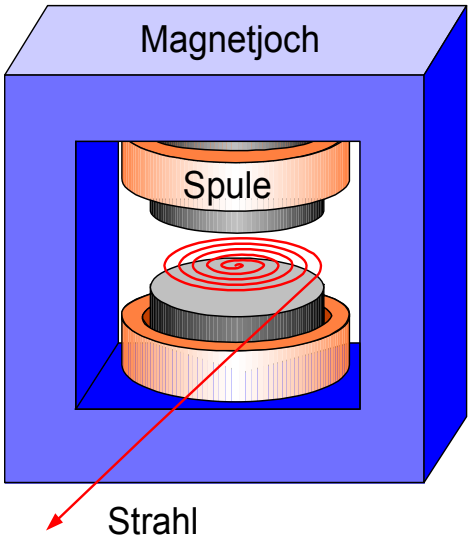
Kreisbeschleuniger mit konstantem Magnetfeld

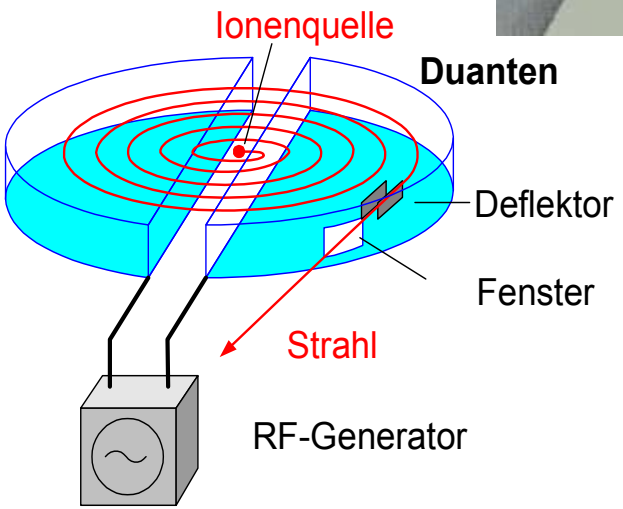
Beschleunigte Teilchen: **p**, **d**

Energie: 8 – 20 MeV

Herstellung von Radionukliden

^{11}C, ^{18}F, ^{13}N, ^{15}O, …





Zyklotronfrequenz

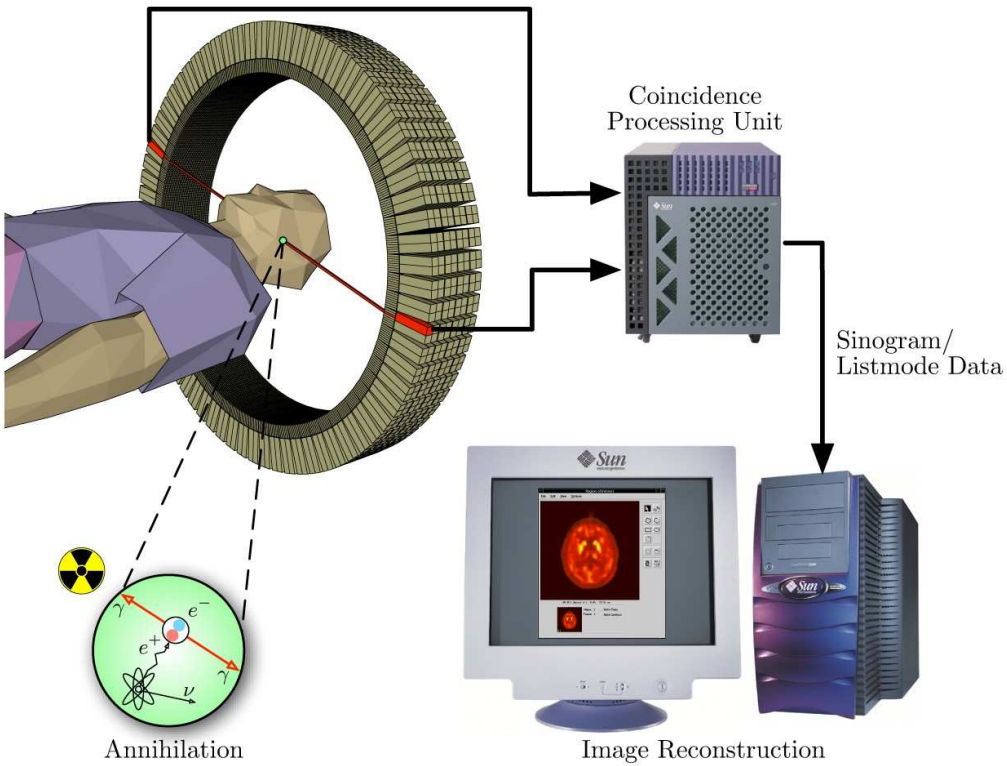
$$\omega_Z = \frac{Z \cdot e}{m(E)} \cdot B_z$$

Z - Ladungszahl des Ions,

$m(E)$ - Masse des Ions,

B_z - Magnetfeld

PET - Positronen-Emissions-Tomographie

Radionukliden: ^{11}C, ^{13}N, ^{18}F, ^{15}O (β^+-Strahler, $T_{1/2}$ ~ 2 – 110 min)

2-^{18}F-Fluor-2-desoxy-D-glucopyranose