

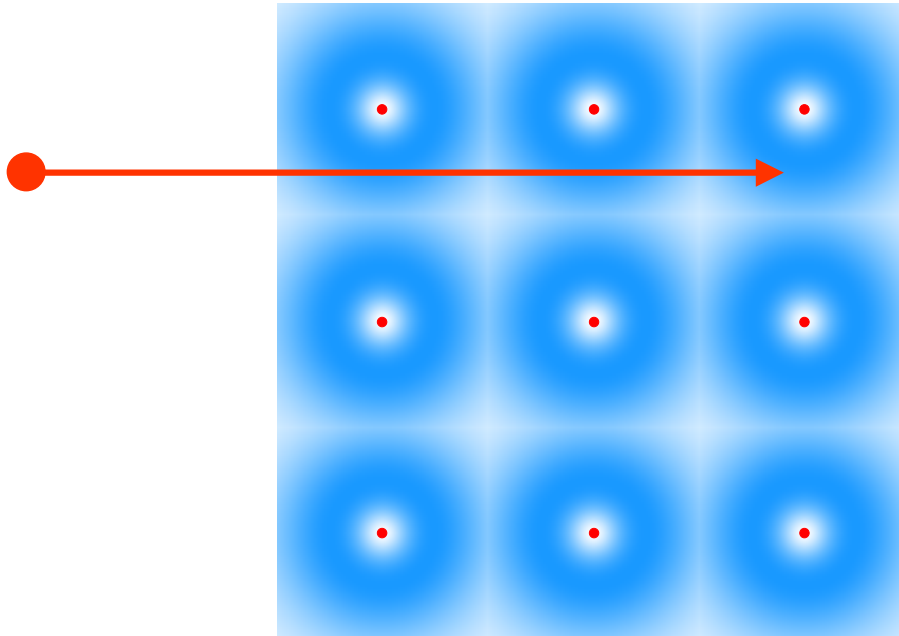
Abbremsprozesse von Ionen in Materie

1) Streuung (Stöße) des Projektils an Elektronen des Probenmaterials

Electronic Stopping

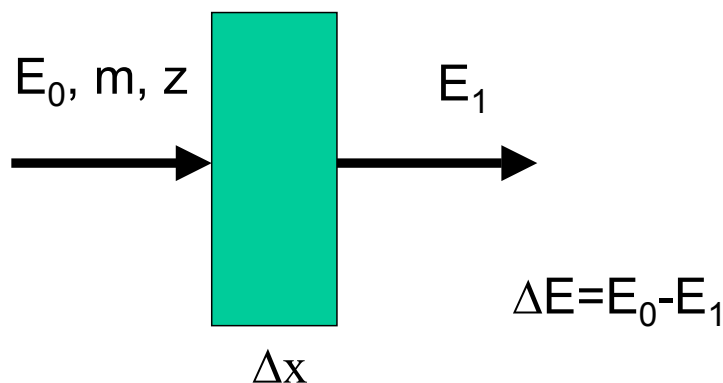
2) Streuung (Stöße) des Projektils an Atomen des Probenmaterials

Nuclear Stopping



Abbremsung von geladenen Teilchen (Ionen) in Materie:

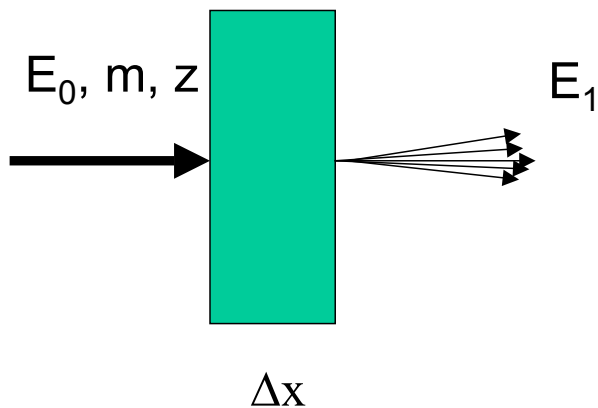
Grundbegriffe:



$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta x} = \frac{dE}{dx}$$

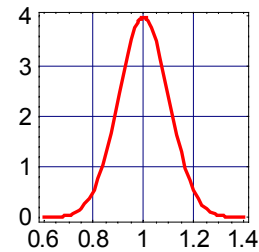
$\frac{dE}{dx}$: Bremsvermögen [Stopping Power]

Energie und Winkelverteilung:



Energieverteilung [Energy Straggling]:

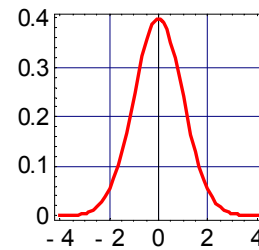
Da der Abremsvorgang auf quantenmechanische Prinzipien beruht, ist die Energie E_1 nicht scharf, sondern ergibt eine Verteilung, wenn die Messung mit mehreren Teilchen wiederholt wird.



Energie

Winkelverteilung [Angular Straggling]

Durch die Wechselwirkung mit den Targetatomen wird kann die Richtung der einfallenden Teilchen verändert werden, dies führt zu einer Winkelverteilung.



Winkel

Sowohl Energie- wie auch die Winkelverteilung können in erster Ordnung durch eine Gaussverteilung beschrieben werden. Die Verteilung wird meist durch die Breite bei halber Höhe [FWHM] charakterisiert werden.

Verwendete Einheiten

Bremsvermögen:	dE/dx	MeV/mm	pro Länge
Massenbremsvermögen:	$dE/d\xi$	MeV/(mg/cm ²)	pro Flächendichte
Abbremsquerschnitt	ϵ	eV/10 ¹⁶ Atome/cm ²	Atome pro Fläche

Massenbremsvermögen und Abbremswirkungsquerschnitt sind unabhängig von der Dichte des Materials !

Umrechnung

$$dE/d\xi = 1/\rho \cdot dE/dx$$

$$\epsilon = M L dE/d\xi \quad L = 6 \cdot 10^{23} \quad ; \quad M \text{ Atomgewicht}$$

Reichweite ("Range")

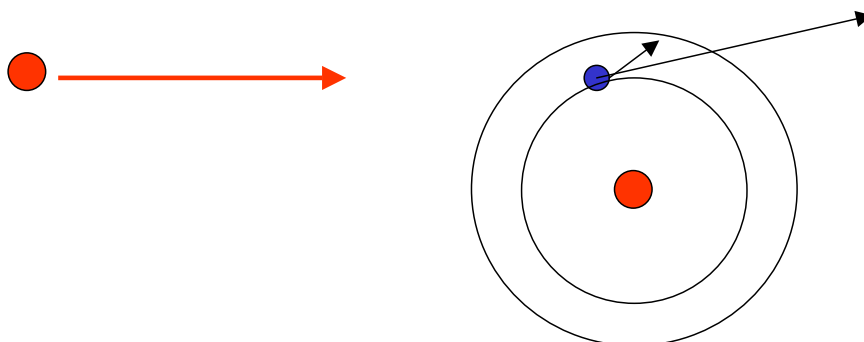
Als Reichweite R bezeichnet man die mittlere Distanz von der Oberfläche einer Probe eines Ions bis es ganz gestoppt ist. Da der Abbremsprozess ein statistischer Prozess ist, werden nicht alle Ionen, exakt in der gleichen Tiefe gestoppt. Die Reichweite kann aus dem Bremsvermögen berechnet werden:

$$R = \int_E^0 \frac{1}{dE / dx(E)} dE$$

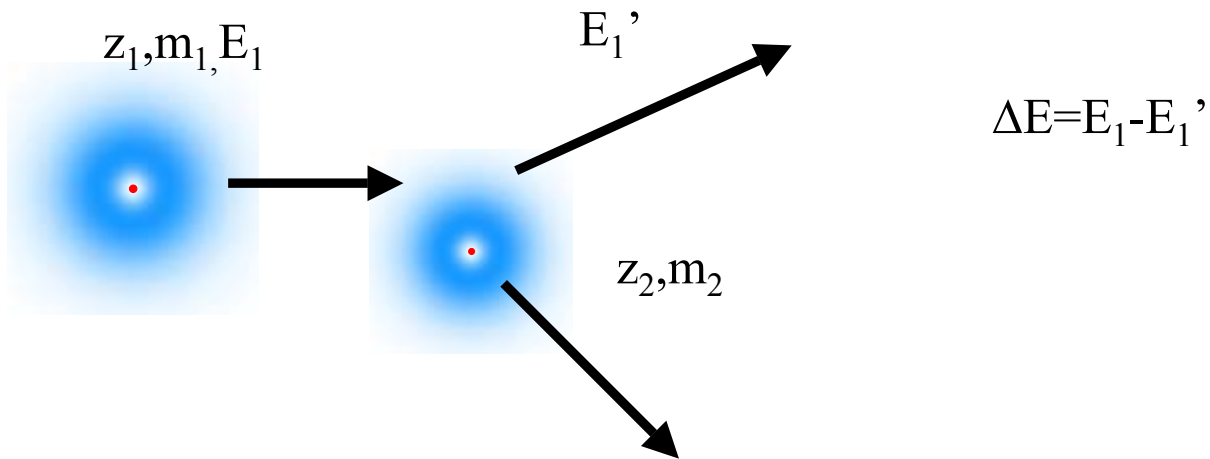
Da die Reichweite von der Dichte des Materials abhängt wird die Reichweite meistens in Einheiten mg/cm^2 angegeben:

Abbremsung durch Stösse mit Elektronen (Elektronische Abbremsung)

Bei der Streuung an Hüllenelektronen werden Atome angeregt oder ionisiert, dabei verlieren die einfallenden Teilchen kinetische Energie. Typische Energien, die pro Stoss übertragen werden sind für äussere Hüllenelektronen im Bereich von 3 -50 eV. MeV α -Teilchen machen somit bei der Abbremsung ca 10^5 Stösse. Da das Projektil viel schwerer ist als die Elektronen wird das Projektil nur sehr wenig abgelenkt beim Streuprozess



Abbremsung durch Streuung am Atom (Kern) [Nuclear Stopping]

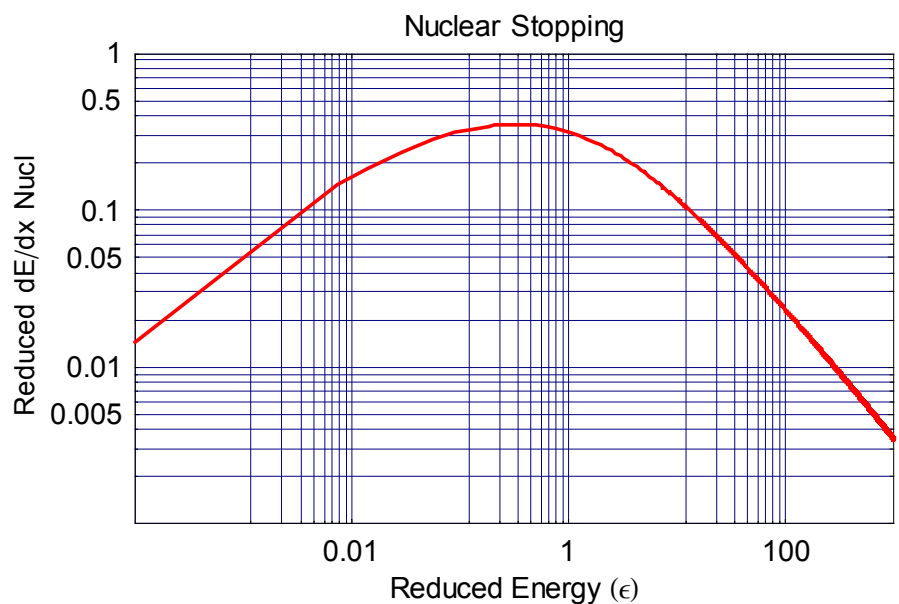


Sowohl Projektil und Target haben eine Elektronen Hülle !
Das Coulombpotential ist abgeschirmt. "Nuclear Stopping" ist von Bedeutung bei sehr tiefen Energien (10-100 eV)

Die Abbremsung durch Kernstöße kann universell gelöst werden für alle z_1, z_2 Kombination für Potentiale wie Thomas-Fermi

Reduzierter Radius:
 $x = r/a$

Reduzierte Energie:
 $\epsilon = E_c / (z_1 z_2 e^2 / a)$

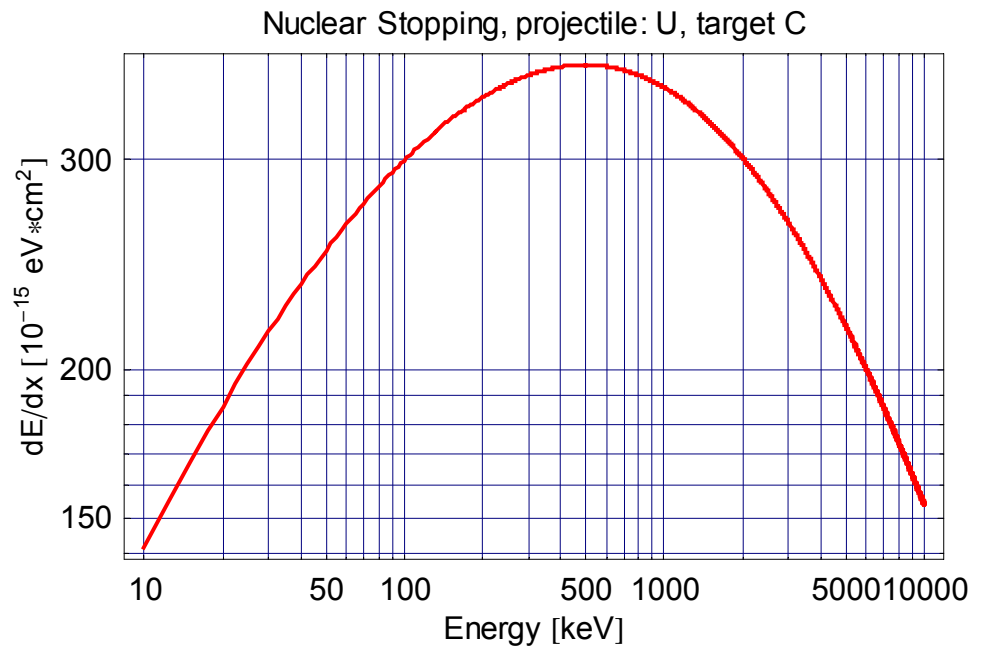


Numerische Integration:
dann Fit durch Punkte

$$s_n(\epsilon) \cong \frac{\ln(1 + 1.13836\epsilon)}{2(\epsilon + 0.01321\epsilon^{0.21226} + 0.19593\epsilon^{0.5})}$$

$$\epsilon \geq 30 \quad s_n(\epsilon) \cong \frac{\ln(\epsilon)}{2\epsilon}$$

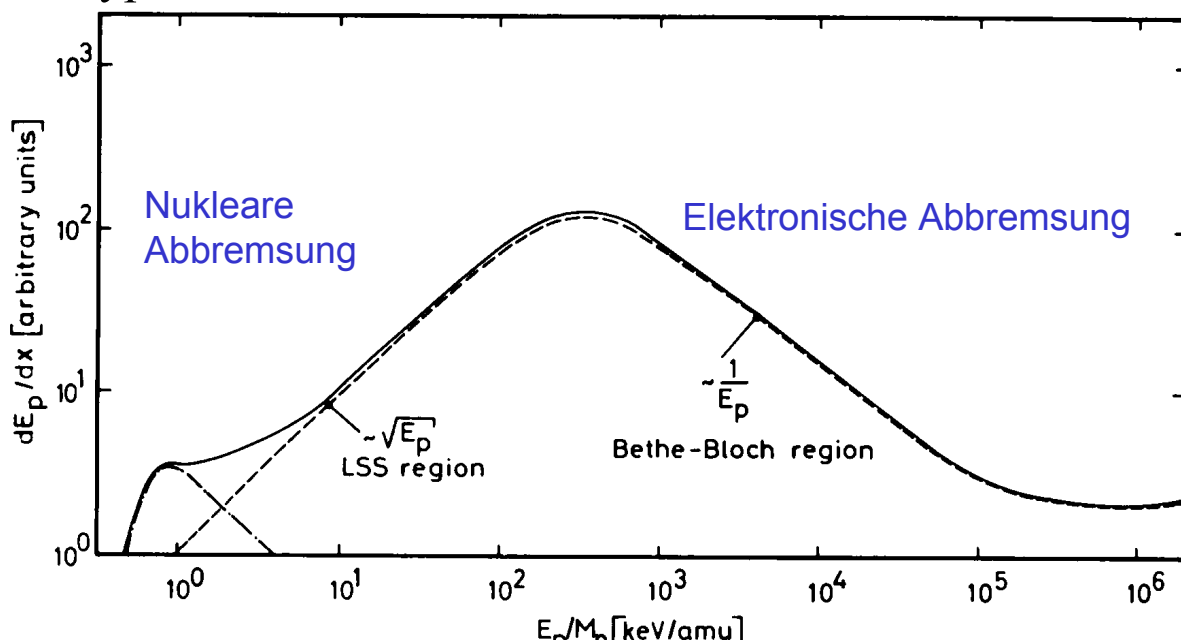
Umrechnung von der Universalkurve:



$$S_n(E_0) = \frac{0.8462 \cdot 10^{-15} z_1 z_2 m_1 s_n(\varepsilon)}{(m_1 + m_2)(z_1^{0.23} + z_2^{0.23})} \text{ eV / (atom / cm}^2\text{)}$$

$$\varepsilon = \frac{32.53 m_2 E_0}{z_1 z_2 (m_1 + m_2)(z_1^{0.23} + z_2^{0.23})}$$

Typischer Verlauf



Elektronische Abbremsung:

keV/ amu

1-50	$dE/dx \sim v \sim \sqrt{E}$	(LL-Theorie)
100-500	maximum ("Bragg-Peak")	
$10^3 - 10^5$	$dE/dx \sim 1/E$	(Bohr Formel)
10^6	minimum	
10^6	Relativische Effekte (Bethe-Bloch Formel)	

Nukleare Abbremsung:

1-10

Bohrformel für elek. Abbremsung

$$\frac{dE}{dx} = 4 \pi \frac{N z_2}{m_e v^2} (z_1 e^2)^2 \ln \left(\frac{m_e v^2}{I} \right) \quad \text{eV/Atome/cm}^2$$

N Atome pro cm²

Z₁ Ladung des Projektil

Z₂ Ladung des Probe

m_e Elektronenmasse

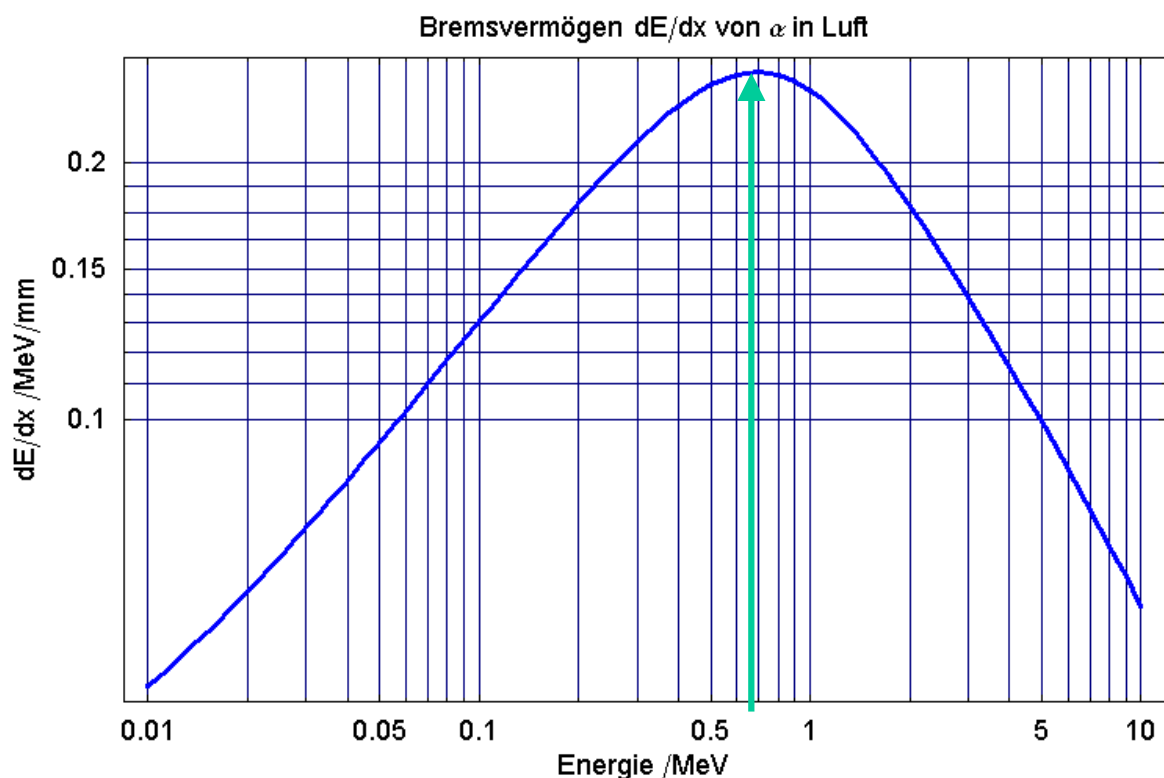
I = 11.5 z (eV)

v Projektilgeschwindigkeit

I Mittleres Ionisationspotential

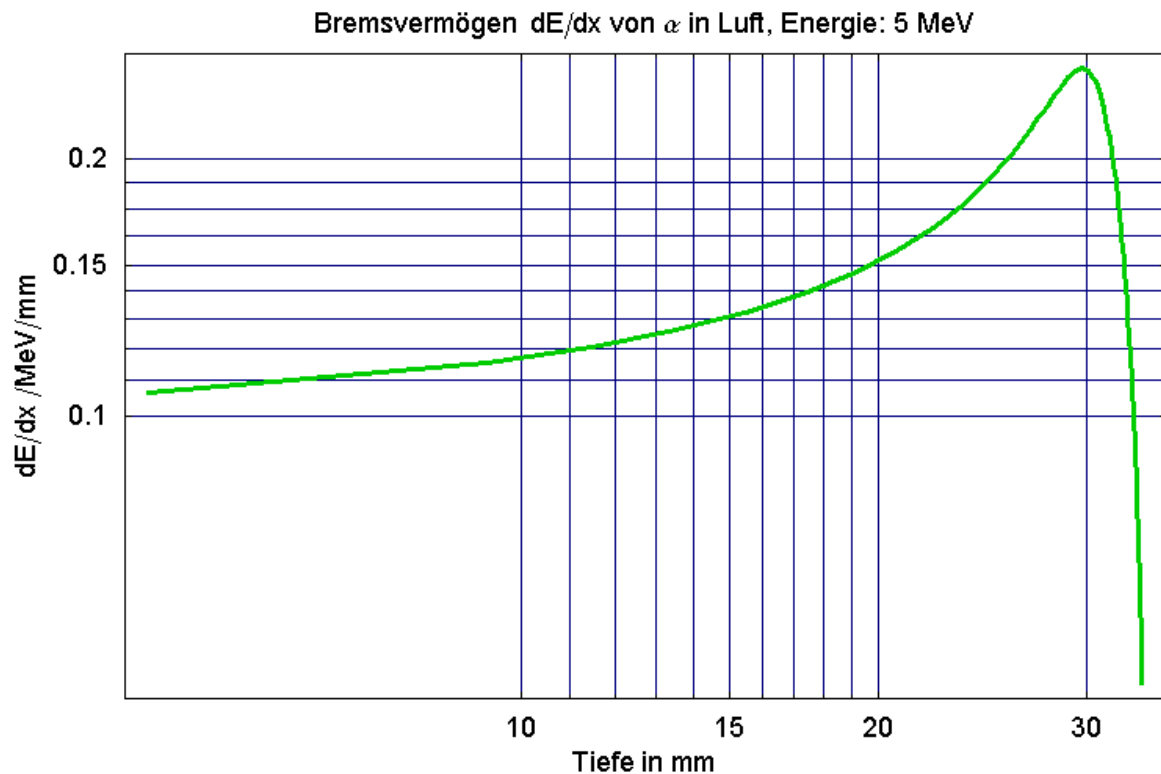
$$dE/d\xi(z_1) \approx dE/d\xi(z_2) , \text{ wenn } z \sim M, I_1 \sim I_2$$

Bremsvermögen von α -Teilchen in Luft



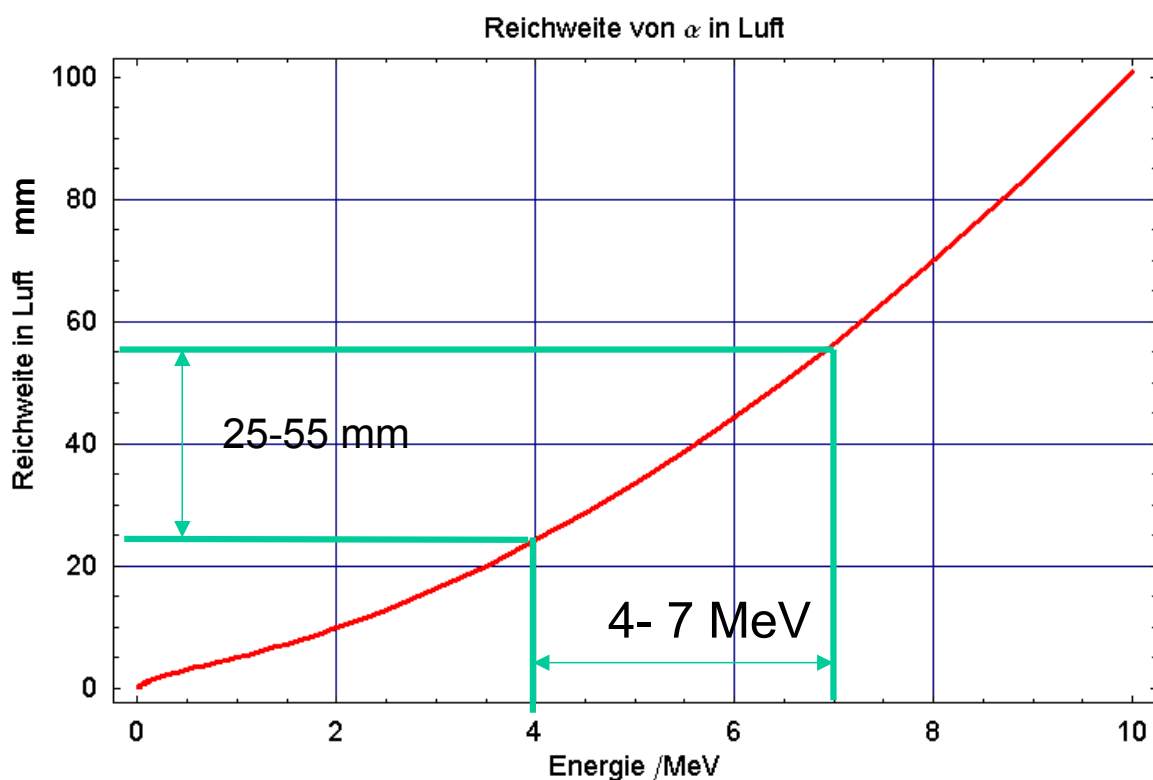
Die grösste Abbremsung liegt bei ca. 0.7 MeV

Bremsvermögen als Funktion der Tiefe

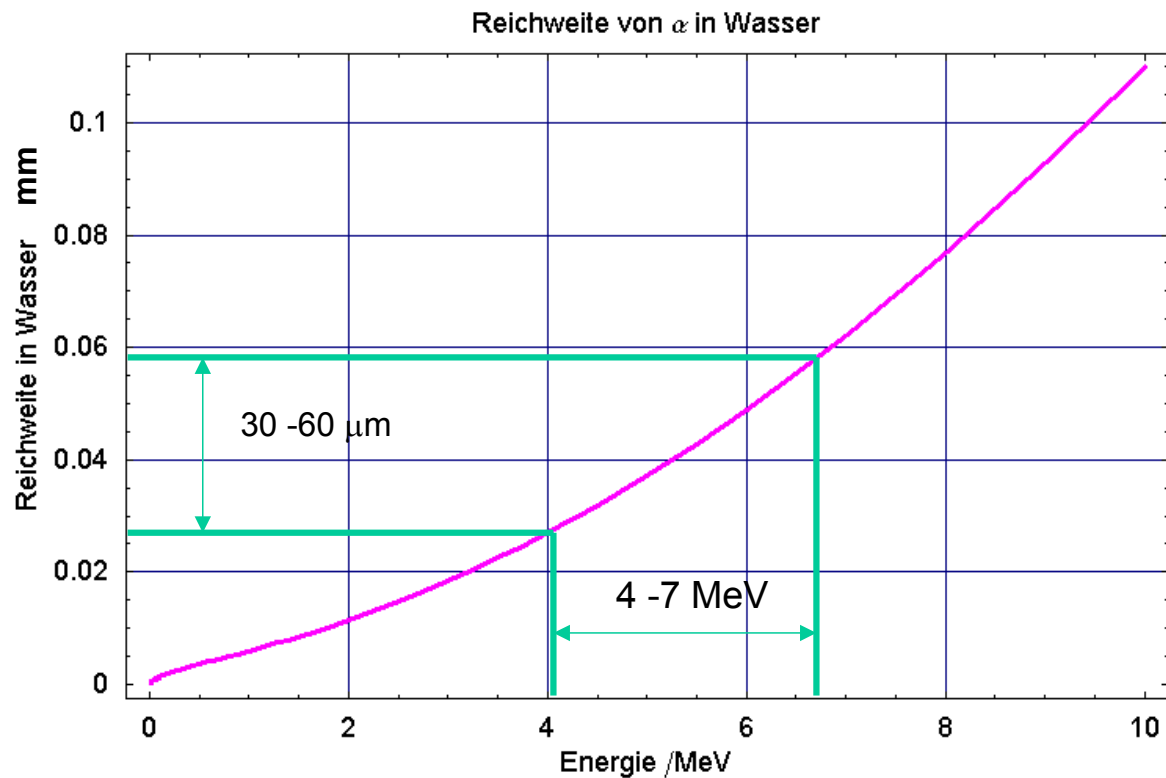


Die Abbremsung ist am grössten kurz bevor die Teilchen gestoppt sind ("Bragg-Peak")

Reichweite von α -Teilchen in Luft

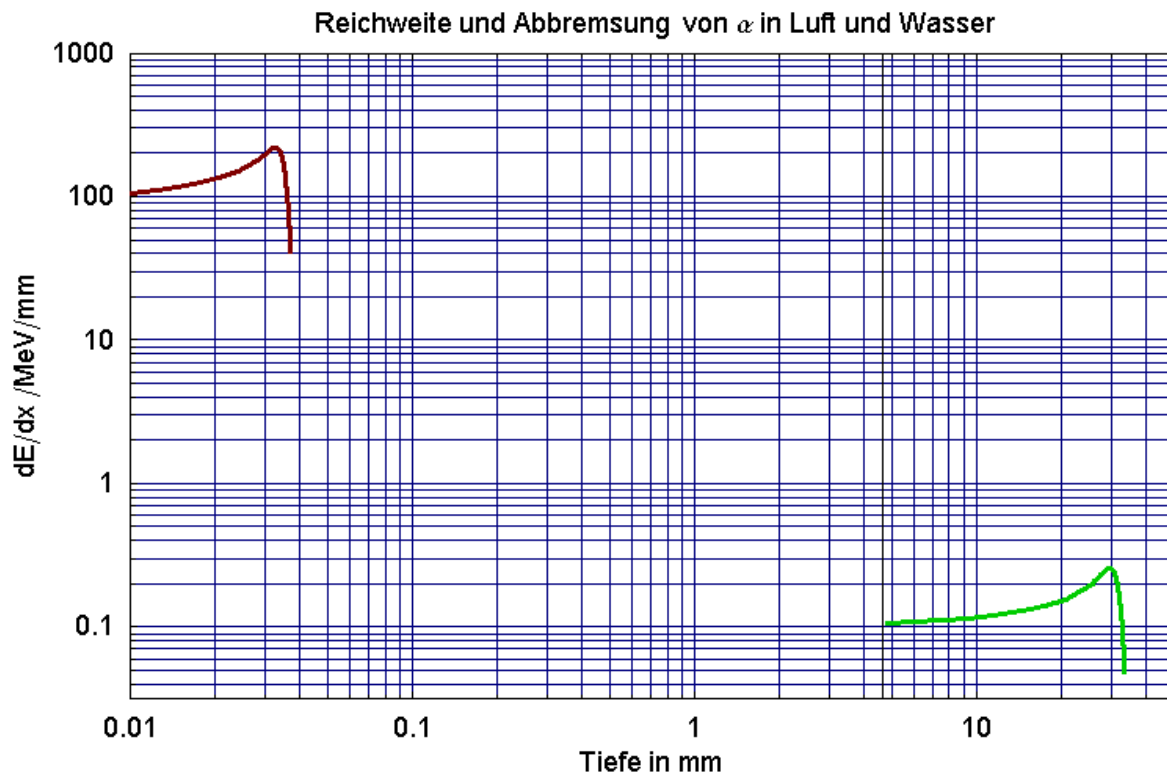


Reichweite von α in Wasser

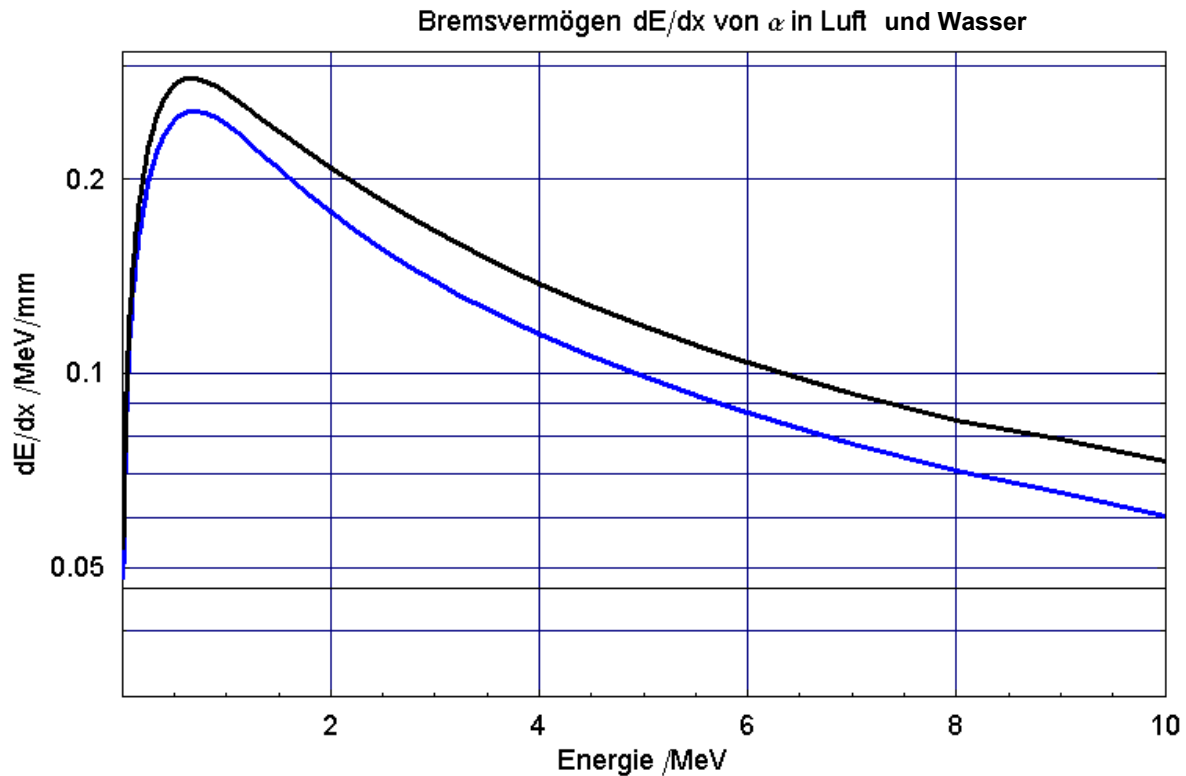


α -Teilchen haben in Wasser Reichweiten von eingen 10 μm !

Vergleich Wasser und Luft



Vergleich des Bremsvermögens für verschiedene Materialien normiert auf gleiche Dichte



$$dE/d\xi(z_1) \approx dE/d\xi(z_1)$$

Abbremsung von Elektronen

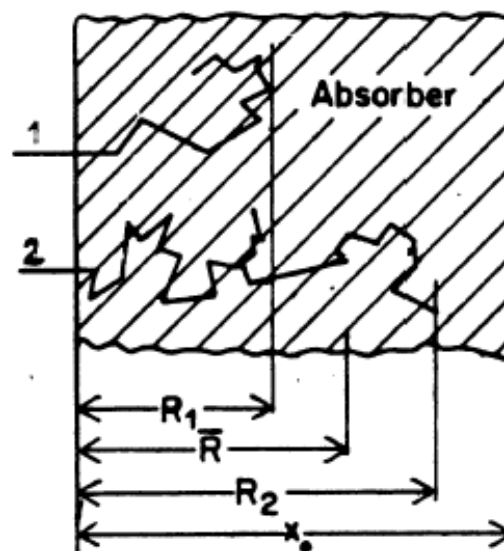
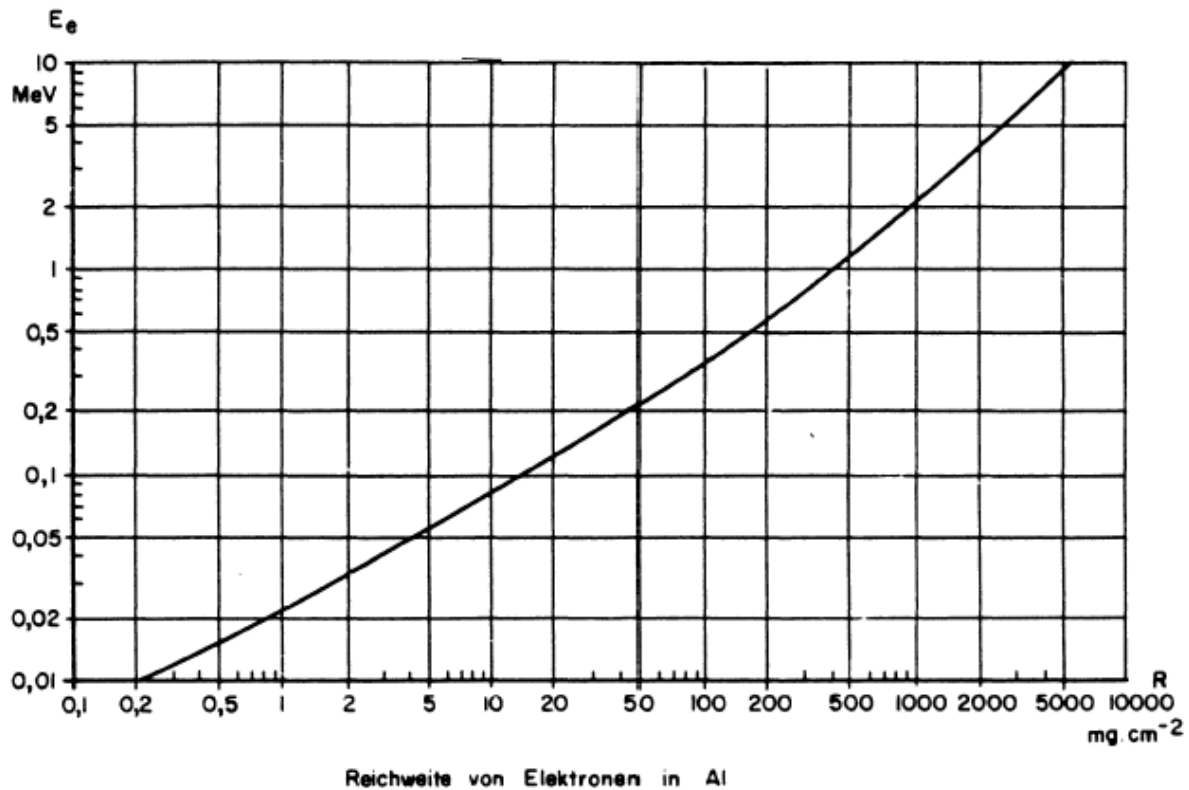


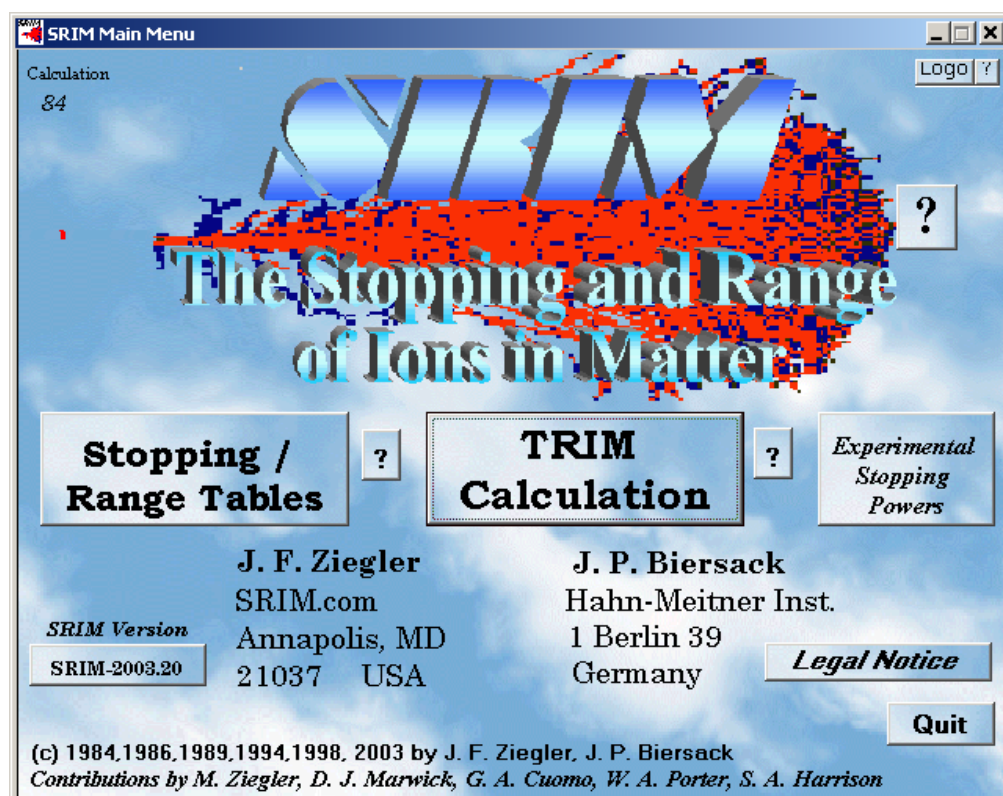
Fig. 4.16

Bei der Abbremsung von Elektronen gibt es die gleichen Prozesse. Bei der Elektron-Elektron Streuung sind beide Stosspartner gleich schwer. Es kommen deshalb grosse Streuwinkel vor. Die Elektronen-Bahn ergibt eine Zick-Zack Linie

Reichweite von Elektronen in Aluminium



Simulationsprogramm SRIM
www.srim.org



SRIM Tabelle allgemeine Information

```

=====
                        Calculation using SRIM-2003
                        SRIM version ---> SRIM-2003.20
                        Calc. date   ---> Juni 11, 2005
=====
Disk File Name = SRIM Outputs\Helium in ICRU-104 Air, Dry (gas)
Ion = Helium [2] , Mass = 4.003 amu
Target Density = 1.3000E-03 g/cm3 = 5.2873E+19 atoms/cm3
Target is a GAS
===== Target Composition =====
      Atom   Atom   Atomic   Mass
      Name   Numb   Percent   Percent
      ----   ----   -
      O       8     023.20    025.07
      N       7     075.50    071.42
      Ar      18     001.30    003.51
=====
Bragg Correction = 0.00%
Stopping Units = MeV / mm
See bottom of Table for other Stopping units

```

Ion Energy	dE/dx Elec.	dE/dx Nuclear	Projected Range	Longitudinal Straggling	Lateral Straggling
2.00 MeV	1.778E-01	1.463E-04	9.87 mm	365.25 um	398.58 um
2.25 MeV	1.659E-01	1.322E-04	11.32 mm	423.82 um	420.04 um
2.50 MeV	1.556E-01	1.207E-04	12.88 mm	482.11 um	443.05 um
2.75 MeV	1.467E-01	1.112E-04	14.53 mm	540.54 um	467.68 um
3.00 MeV	1.389E-01	1.031E-04	16.28 mm	599.33 um	493.96 um
3.25 MeV	1.320E-01	9.617E-05	18.12 mm	658.62 um	521.92 um
3.50 MeV	1.258E-01	9.017E-05	20.06 mm	718.50 um	551.55 um
3.75 MeV	1.203E-01	8.491E-05	22.09 mm	779.03 um	582.84 um
4.00 MeV	1.153E-01	8.026E-05	24.21 mm	840.24 um	615.76 um
4.50 MeV	1.065E-01	7.242E-05	28.72 mm	1.06 mm	686.46 um
5.00 MeV	9.912E-02	6.604E-05	33.58 mm	1.28 mm	763.45 um

```

-----
Multiply Stopping by      for Stopping Units
-----
1.0000E-01                eV / Angstrom
1.0000E+00                keV / micron
1.0000E+00                MeV / mm
7.6926E+00                keV / (ug/cm2)
7.6926E+00                MeV / (mg/cm2)
7.6926E+03                keV / (mg/cm2)
1.8913E+02                eV / (1E15 atoms/cm2)
1.6510E+01                L.S.S. reduced units
=====

```

