

2. Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

Teilchen – Strahlung

Wechselwirkung mit Materie

Schwere geladene Teilchen

$$M \gg m_e$$

- Elektromagn. WW
 - Ionisation + Anregung durch Stöße
 - Cherenkov Strhl
- Starke WW für Hadronen (Kernwechselwirkungen)

Elektronen

- Elektromagn. WW
 - Ionisation
 - Bremsstrhl
 - Cherenkov Strhl, Übergangsstrhl.

Photonen

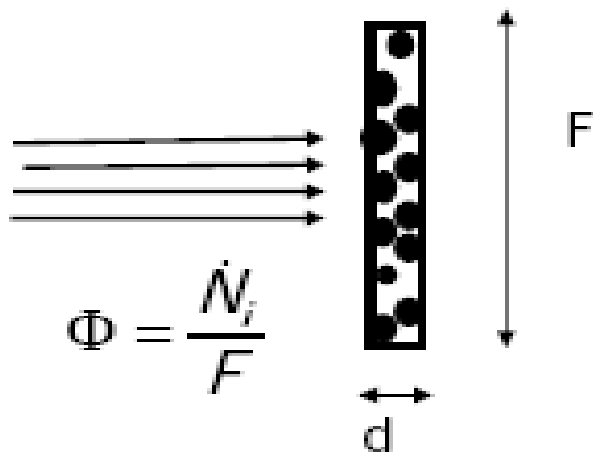
- Elektromagn. WW
 - Photoeffekt
 - Compton-Streuung
 - Paarbildung

Neutronen

- Starke WW $\left\{ \begin{array}{l} \text{elastische Kernstreuung} \\ \text{inelastische Kernstreuung} \end{array} \right.$

2.1 Begriffe

Erinnerung



$$n_t = \frac{\rho \cdot N_A}{M_{mol}}; \quad \text{z.B. } n_t(C^{12}) = \frac{\rho_{C^{12}} \cdot 6 \cdot 10^{23}}{12}$$

Zahl der Streuzentren N_t

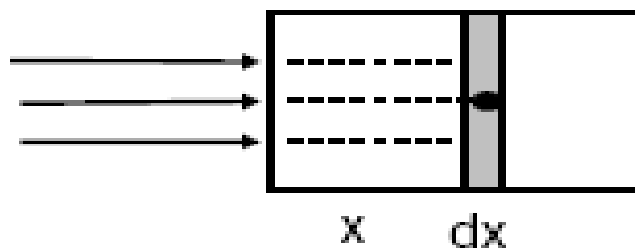
$$N_t = n_t \cdot F \cdot d = \frac{\rho \cdot N_A}{M_{mol}} \cdot F \cdot d$$

A [g/mol]

Rate gestreuter Teilchen

$$\dot{N}_s = \Phi \cdot N_t \cdot \sigma = \dot{N}_i \cdot n_t \cdot d \cdot \sigma$$

Freie Weglänge



Aus der Wahrscheinlichkeit für Reaktion in dx nach Strecke x

$$dW(x) = W(x) \cdot n_t \cdot \sigma \cdot dx$$

erhält man die mittlere freie Weglänge λ

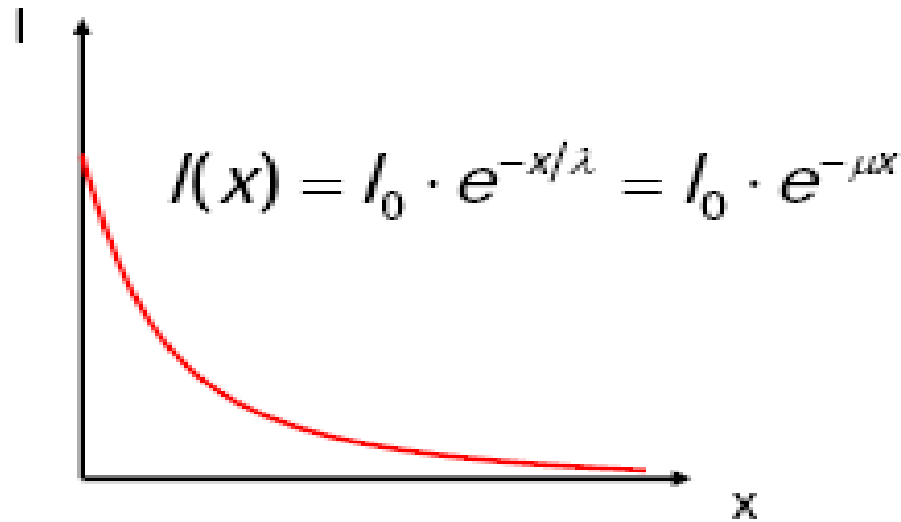
$$\lambda = \frac{1}{n_t \cdot \sigma}$$

$$-dN = N(x) n_t \sigma dx \quad \rightarrow \quad N(x) = N_i(x=0) e^{-n_t \sigma x}$$

a) Strahlabschwächung in Materie

(1) WW führt zur Absorption des Strahlteilchens (z.B. γ)

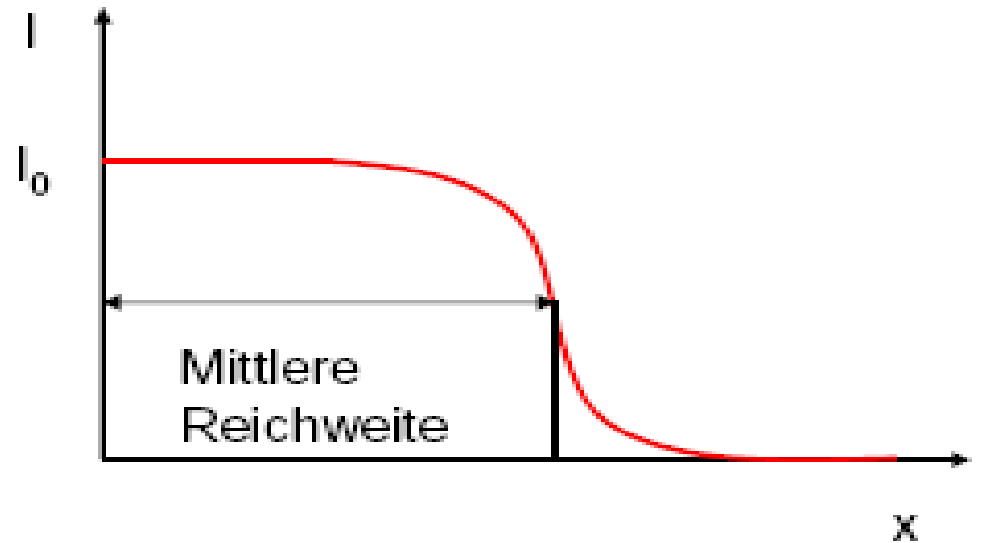
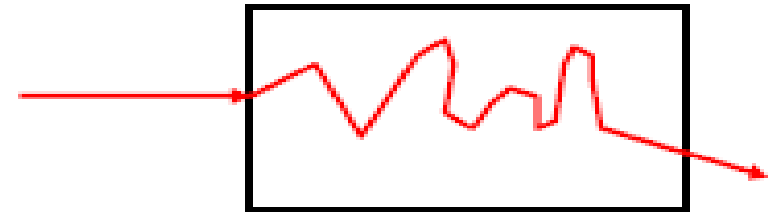
⇒ Intensität des Strahls



Abschwächungskoeffizient

$$\mu = \frac{1}{\lambda} = n_t \cdot \sigma$$

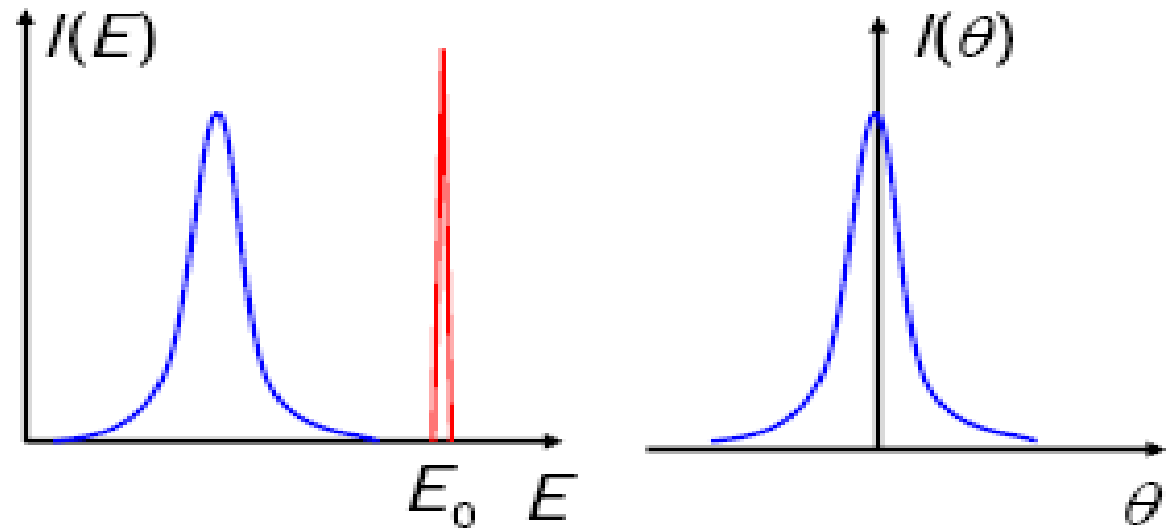
(2) WW führt zu Energieverlust



$$I(x) = \text{const.}$$

Bis zum Abstoppen des Teilchens

Statistische Natur der WW führt zu Energie und Winkelverschmierung der nicht gestoppten Teilchen



b) Massenbelegung

Statt durch die Dicke werden Absorber durch die Massenbelegung charakterisiert

$$\tilde{X} = X \cdot \rho \quad \left\{ \begin{array}{l} x \text{ Dicke des Absorbers} \\ \rho \text{ Dichte des Absorbers} \end{array} \right.$$

Man verwendet statt

Dicke des Absorbers x [cm] die Massenbelegung \tilde{X} [g/cm²]

Abschwächungskoeff. μ [cm⁻¹] der Massenabschwächung $\tilde{\mu}$ [cm²/g]

(In Lit. und Vorlesung wird nicht immer unterschieden)

2.2 Energieverlust schwerer geladener Teilchen $M \gg m_e$

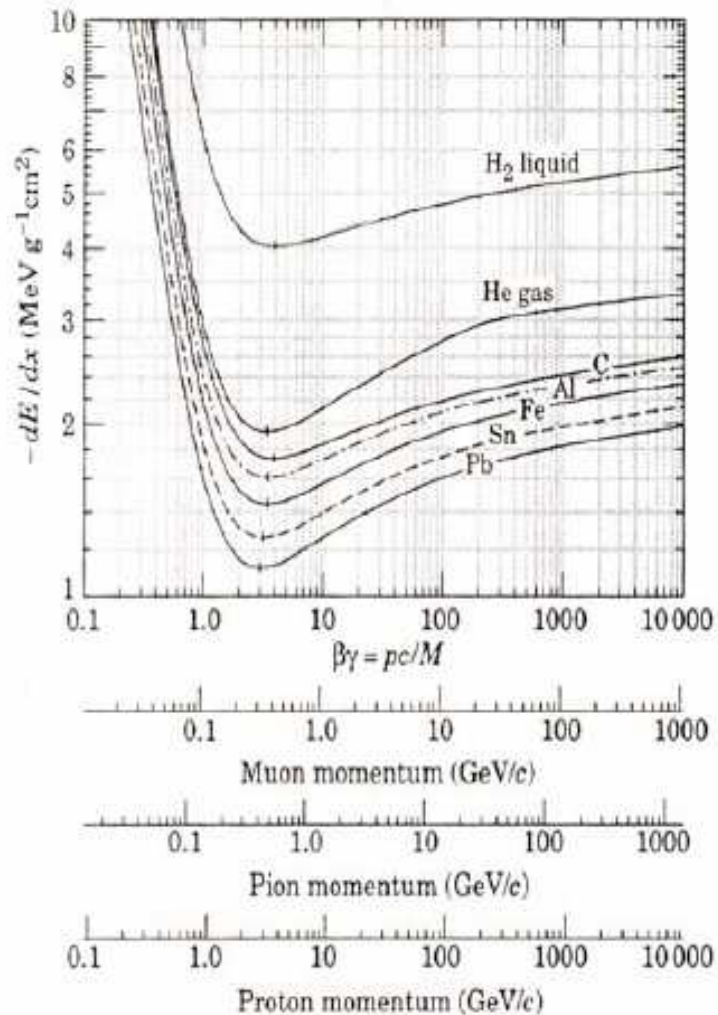
a) Bethe-Bloch Formel für spezifischen Energieverlust durch Ionisation

$$-\frac{dE}{d\bar{x}} = -\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = K \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} \right)^2 - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

N_A	Avogadro's number	$6.022\,1415(10) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
ze	Charge of incident particle	
Z	Atomic number of absorber	
A	Atomic mass of absorber	g mol^{-1}
K/A	$4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 / A$	$0.307\,075 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$ for $A = 1 \text{ g mol}^{-1}$
r_e	Classical electron radius $e^2 / 4\pi\epsilon_0 m_e c^2$	$2.817\,940\,325(28) \text{ fm}$
I	Mean excitation energy	eV (<i>Nota bene!</i>)
δ	Density effect correction to ionization energy loss	

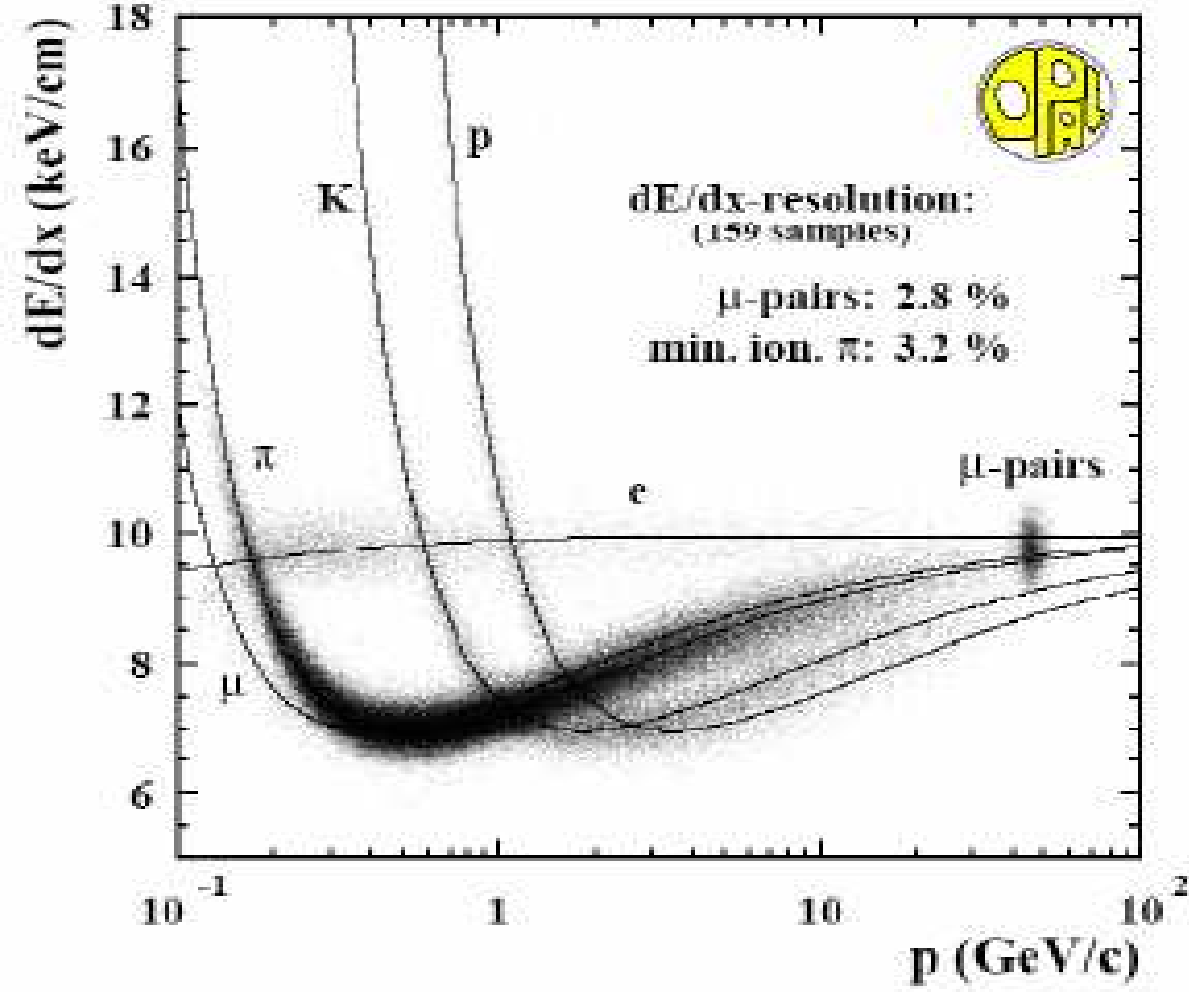
<http://pdg.lbl.gov/2006/reviews/passagerpp.pdf>

Am Ionisationsminimum (und bis 2 Größenordnungen höher) für alle festen Stoffe $\frac{dE}{d(\rho x)} \sim 2 \text{ MeV}/\text{gcm}^{-2}$; (Faustregel für MIP Teilchen)

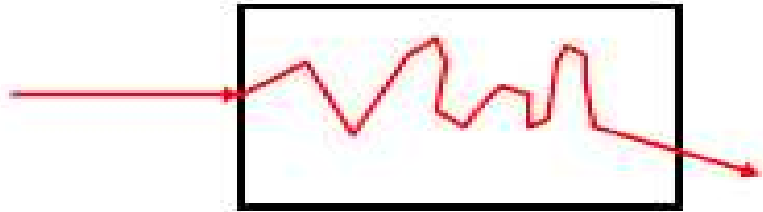


Teilchenidentifikation mittels spezifischem Energieverlust

Kennt man den Impuls eines Teilchens so kann man den spezifischen Energieverlust zur Identifikation eines Teilchens benutzen



b) Energieverlust beim Durchgang durch Absorber endlicher Dicke



Mittlerer
Energieverlust

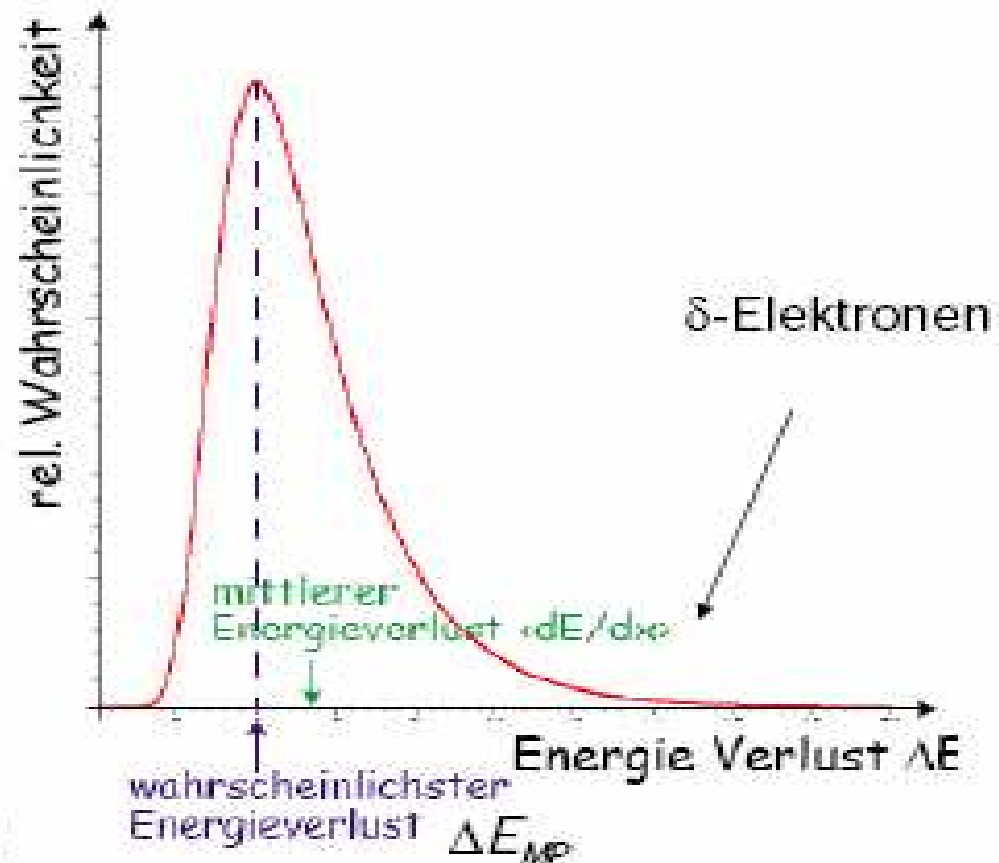
$$\langle \Delta E \rangle = \int \frac{dE}{dx} dx$$

Aufgrund statistischer Fluktuationen weicht für dünnen Absorber der gemessene Energieverlust vom mittleren Energieverlust (Bethe-Bloch) ab.



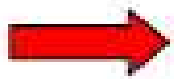
Landau-Verteilung für gemessenen Energieverlust

Für dicke Absorber geht die Verteilung in eine symmetrische Gauß-Verteilung über: $\Delta E_{MP} = \langle \Delta E \rangle$

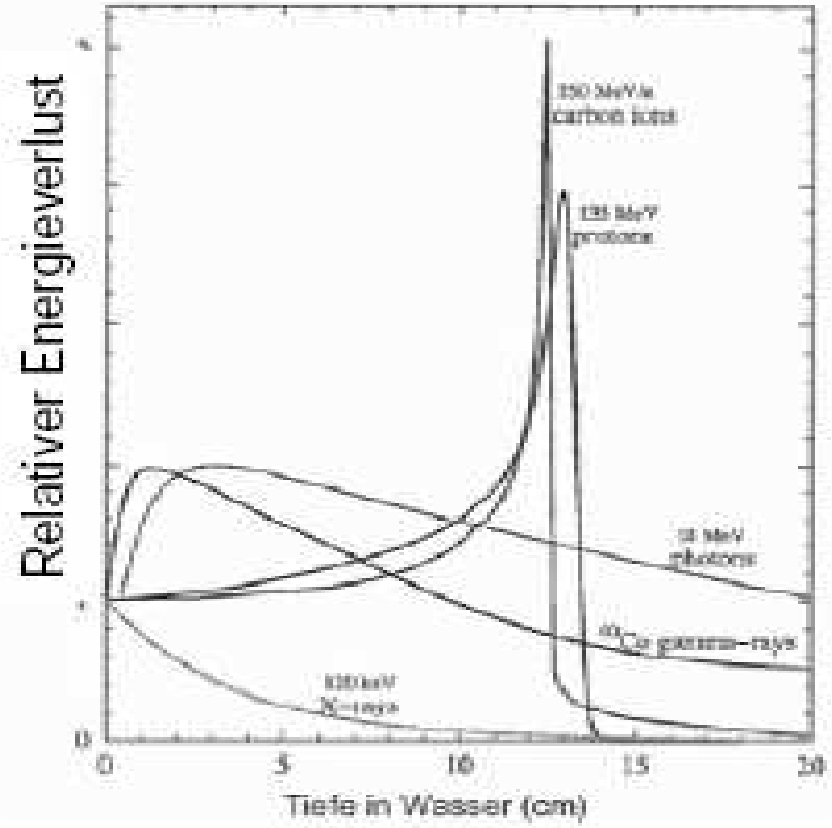
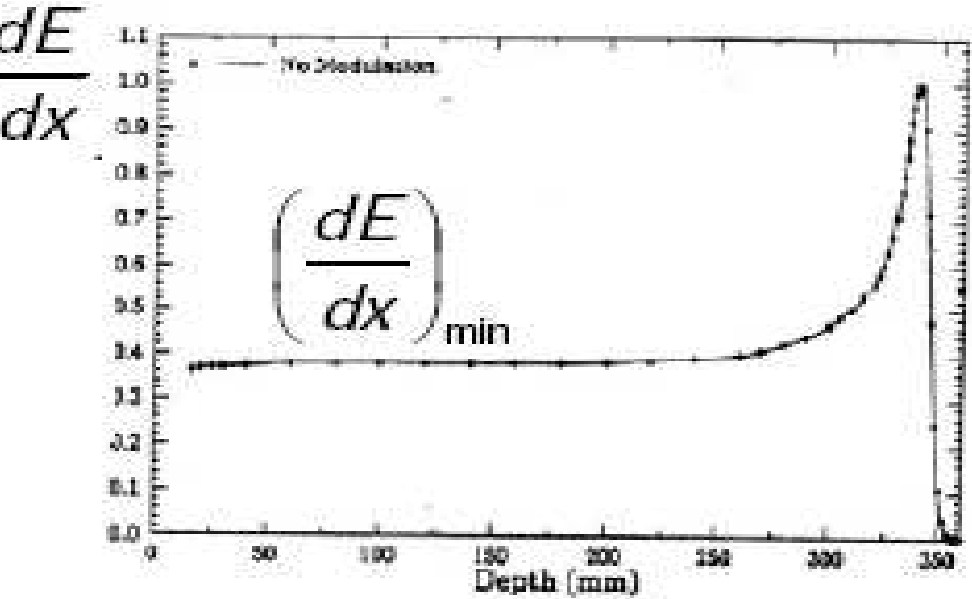


c) Abstoppen von Teilchen in Absorbern: Bragg-Peak

Beim Abbremsen von Teilchen kommt es zu einem starken Anstieg des spezifischen Energieverlustes



Macht man sich bei der Tumorbehandlung zunutze



Energieverlust von Elektronen

- Ionisation für $E < E_c \sim \frac{600 \text{ MeV}}{Z} \rightarrow$ sehr ähnlich Bethe-Bloch
- $E > E_c$: Strahlungsbereich,
 “Synchrotronstrahlung” \rightarrow Bremsstrahlung $\propto \frac{1}{m_e^4}$
 (irrelevant für schwerere Teilchen)

$$E = E_0 e^{(-x/X_0)}; \text{ x: Dicke der Schicht, } X_0 \text{ Strahlungslänge}$$

Material	Z	Dichte (g/cm ³)	E_c [MeV]	Strahlungslänge X_0	
				g/cm ²	cm
H ₂ (flüssig)	1	0.071	340	62.8	887
He (flüssig)	2	0.125	220	93.1	745
C	6	1.5	103	43.3	28
Al	13	2.70	47	24.3	9.00
Fe	26	7.87	24	13.9	1.77
Pb	82	11.35	6.9	6.4	0.56
Luft		0.0012	83	37.2	30870
Wasser		1	93	36.4	36.4