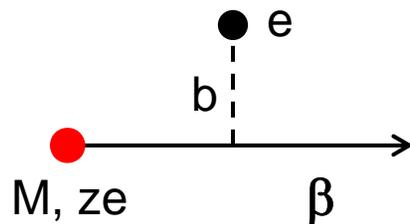


2.5 Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

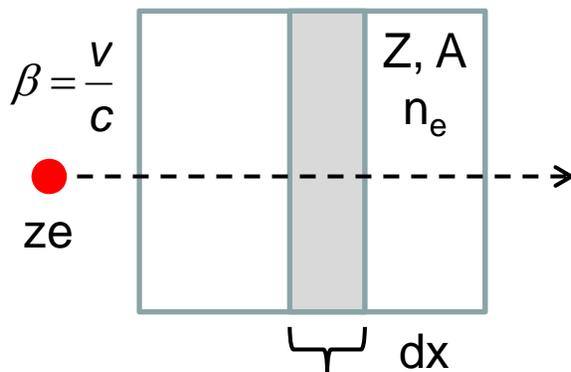
a) Energieverlust geladener Teilchen durch Ionisation

(für schwere Teilchen, d.h. keine Elektronen)

Beim Durchgang durch ein Medium ionisieren geladene Teilchen die Atome des Mediums und verlieren dadurch selbst Energie: E-Feld der bewegten Ladung übt Kraft auf gebundene Elektronen aus und ionisiert die Atome aufgrund des Impulsübertrags.



Mittlerer Energieübertrag ergibt sich durch Integration über die möglichen Stoßparameter b und unter Berücksichtigung QM-Effekte (genaue Rechnung schwierig)



Mittlerer Energieverlust dE pro Strecke dx beschrieben durch Bethe-Bloch Formel:

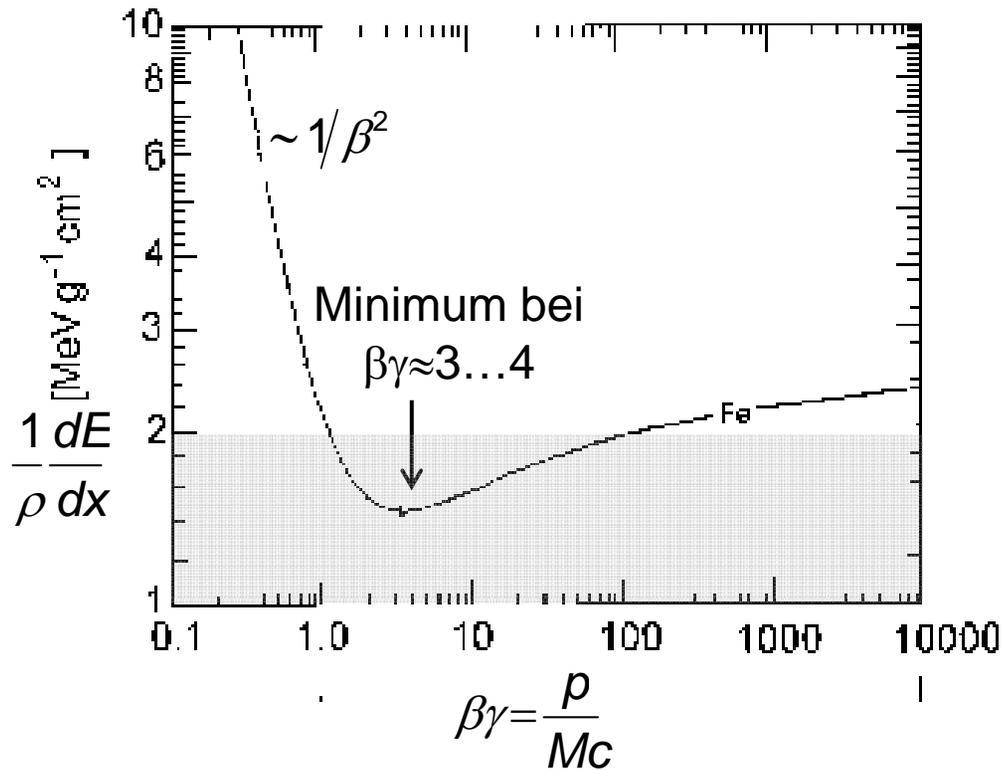
$$\frac{dE}{dx} = \underbrace{\left(\rho N_A \frac{Z}{A} \right)}_{n_e} \frac{4\pi z^2 e^4}{m_e^2 c^2 \beta^2} \cdot \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} \right)^2 - \beta^2 \right]$$

I = mittl. Ionisationspotential

Häufig wird statt $\frac{dE}{dx}$ die Größe $\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$ angegeben, die eine geringere Materialabhängigkeit aufweist:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = K \frac{Z}{A} z^2 \frac{1}{\beta^2} \cdot \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} \right)^2 - \beta^2 \right] \quad K = 0.307 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$$

Typ.
1...2
MeV·
g⁻¹cm²



Beispiel: Eisen

$$\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$$

$$\left. \frac{dE}{dx} \right|_{\min} \approx$$

$$1.5 \times 7.8 \text{ MeV/cm}$$

Energieverlust durch Ionisation (Bethe-Bloch)

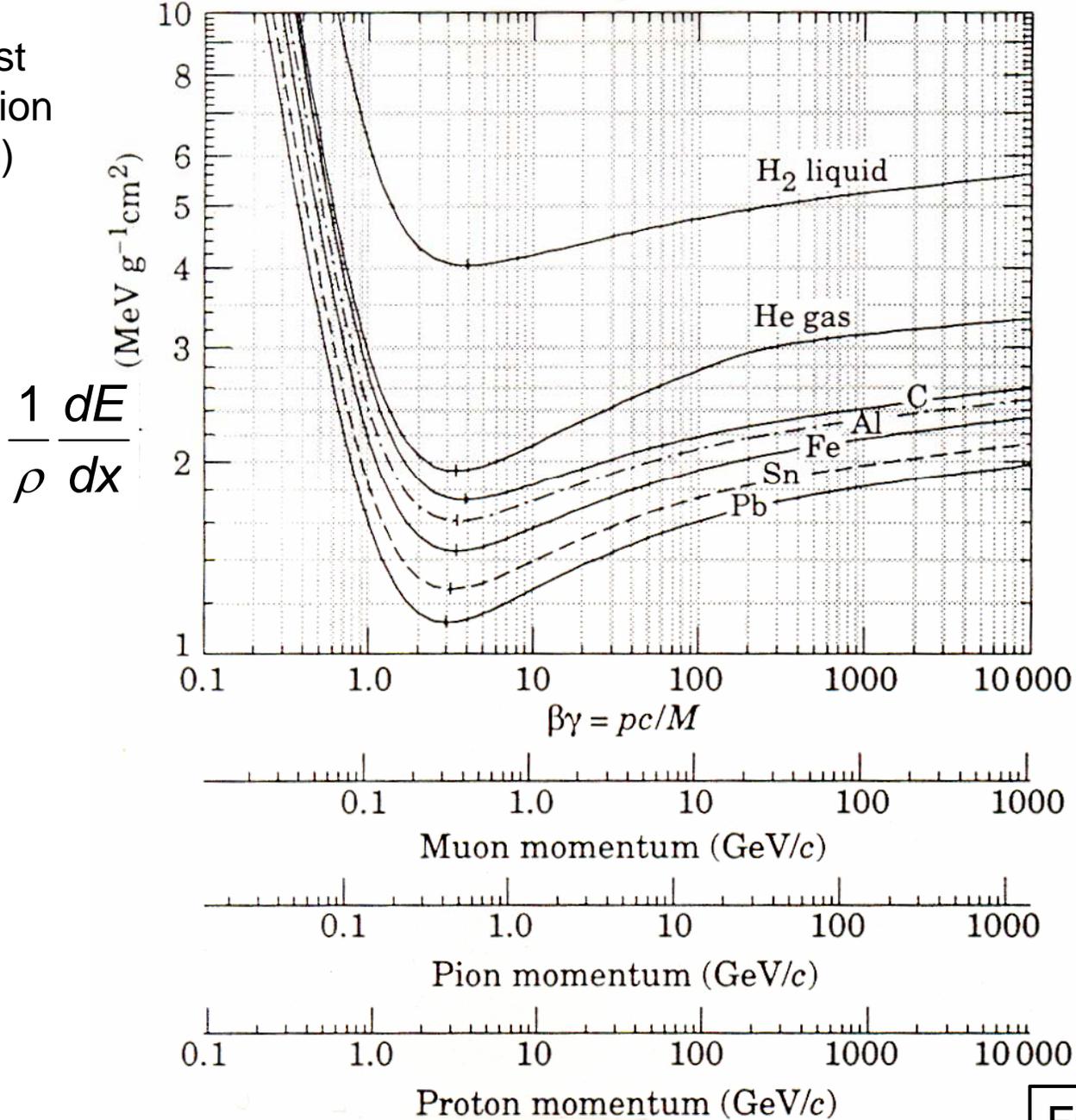


Fig-TP-2.4

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

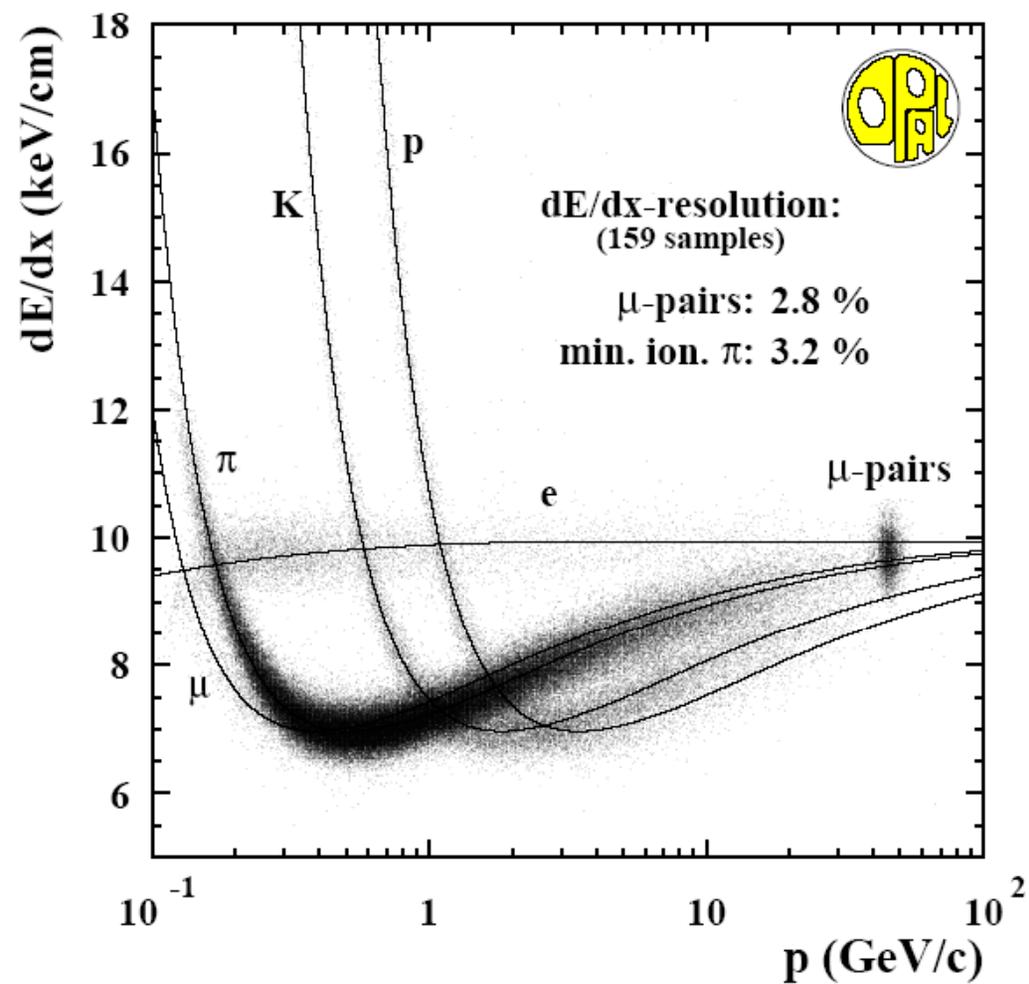
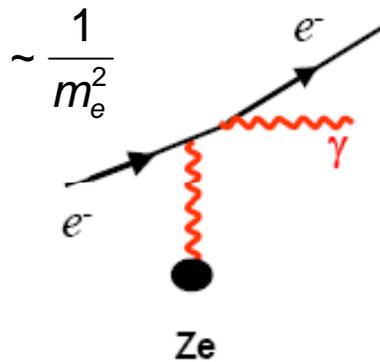


Fig-TP-2.5

b) Energieverlust für Elektronen

Neben Energieverlust durch Ionisation dominiert bei “schnellen“ Elektronen Energieverlust durch **Bremsstrahlung**:



Elektronen werden im Coulomb-Feld des Kerns beschleunigt und emittieren Bremsstrahlung.

Energieverlust beschrieben durch charakteristische Größe des Mediums: Strahlungslänge $X_0 \sim 1/Z^2$

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Brems} = \frac{1}{X_0} \cdot E$$

Typische Strahlungslängen:

C: 18.8 cm

Al: 8.9 cm

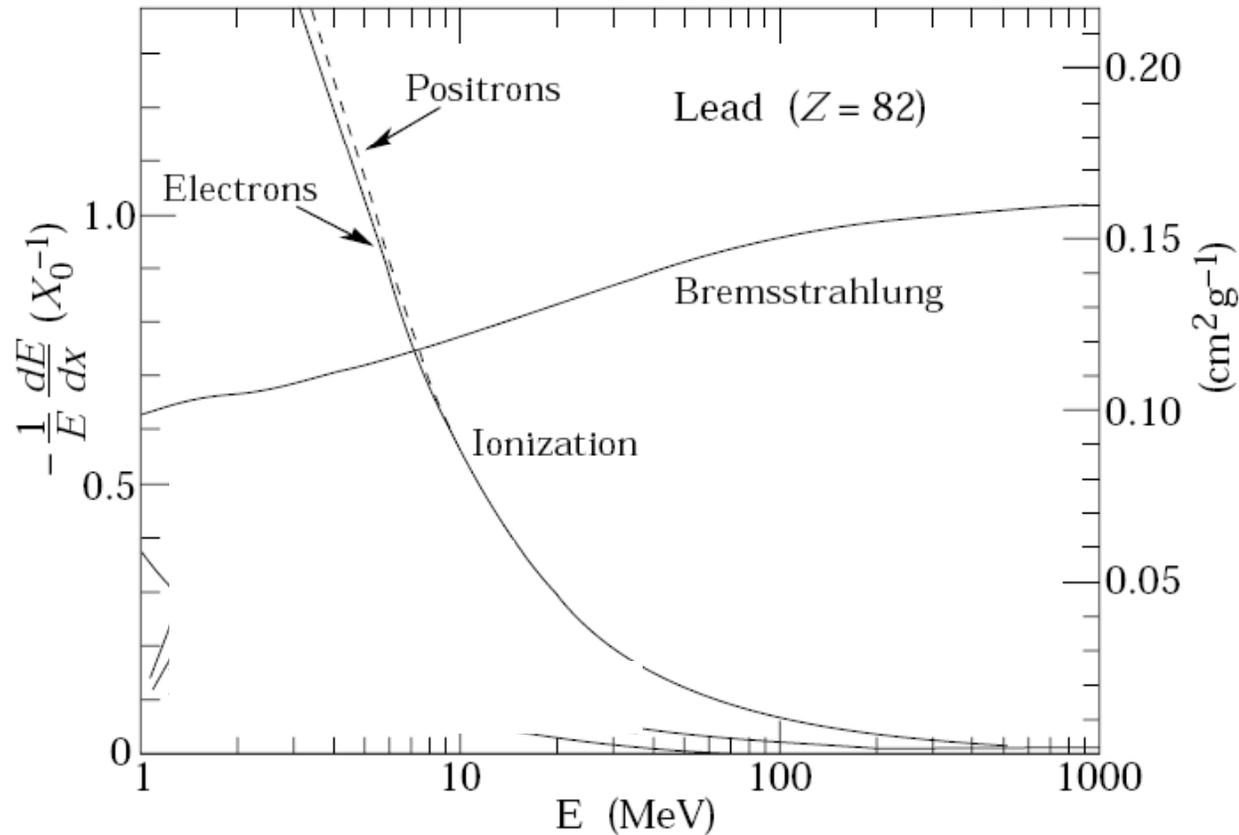
Pb: 0.6 cm

Bem. 1. $-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Brems} \sim \frac{1}{m^2} \quad e/\mu \sim m_\mu^2 / m_e^2 \sim 4 \times 10^4$

2. kritische Energie E_C : $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{Ion} = \left(-\frac{dE}{dx}\right)_{Brems} \quad E_C \approx 560 \text{ MeV}/Z$

Relativer Energieverlust pro X_0 für Elektronen

2-16d



Unterschied zwischen Elektronen und Positronen bei kleinen Energien ist eine Folge der Ununterscheidbarkeit für Elektronen.

Fig-TP-2.6

c) Wechselwirkung von Hadronen

Neben der Ionisation trägt für hochenergetische Hadronen die “starke WW” mit dem Absorbermaterial zum Energieverlust bei:

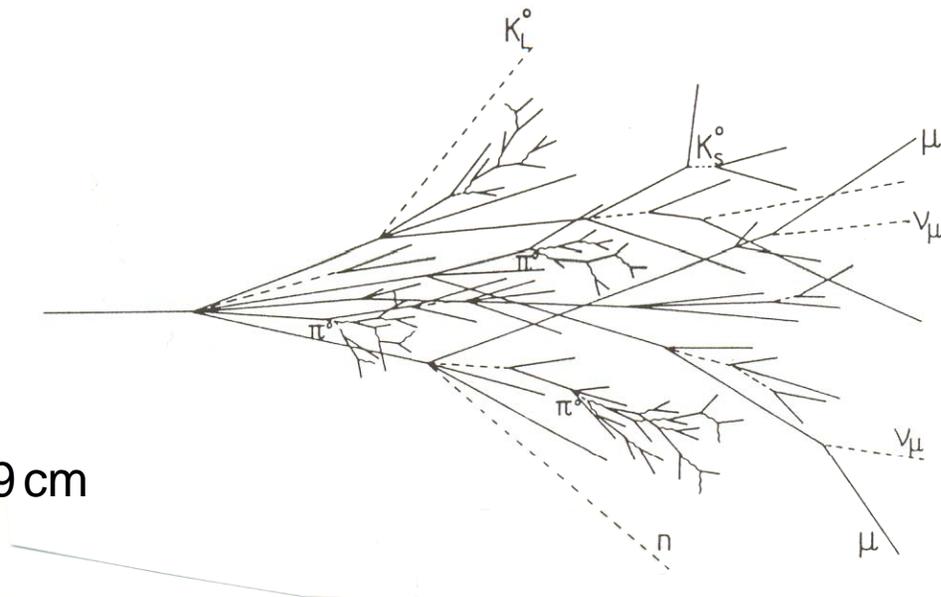


Die entstehenden Sekundärhadronen können selbst wieder “stark” mit dem Medium wechselwirken \rightarrow Ausbildung einer **Kaskade / hadronischen Schauers**

Typ. Wechselwirkungslängen
für Hadronen:

$$\sigma(p+C) \approx 230 \text{ mb}$$

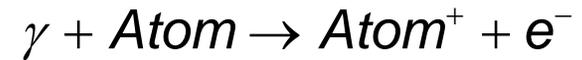
\rightarrow
$$\lambda_{WW} = \frac{A}{\rho N_A \sigma} \approx 39 \text{ cm}$$



d) Wechselwirkung von Photonen mit Materie

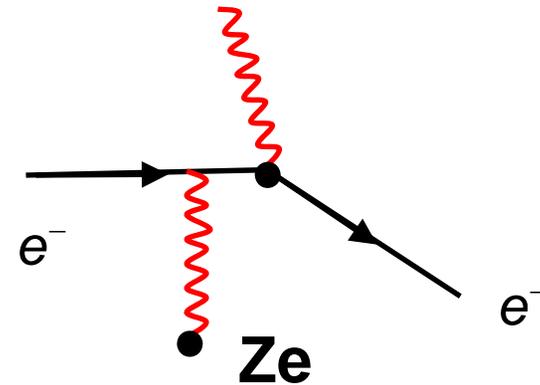
2-17a

Photoeffekt an gebundenen Elektronen:

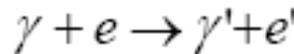
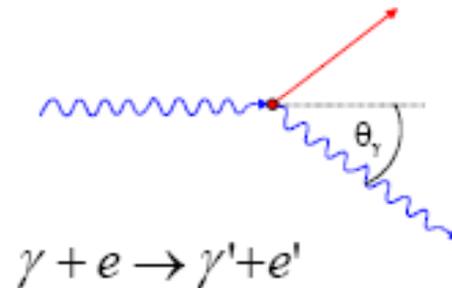
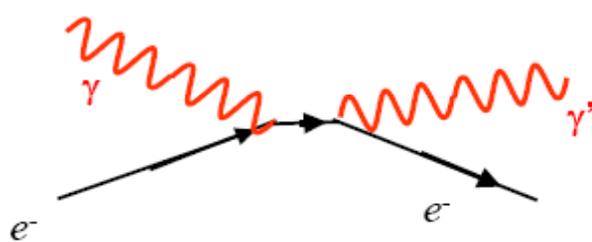


Aufgrund 4er-Impulserhaltung ist Prozess nur in der Nähe eines dritten Streupartners möglich: Effekt am stärksten für die am stärksten gebundenen Elektronen:
 → Schaleneffekt (K,L Schalen).

Energie des Photons vollständig absorbiert.

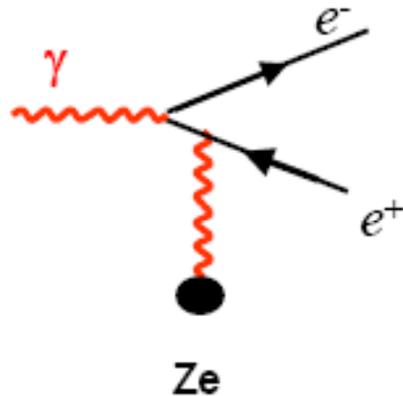


Compton-Effekt an quasifreien Elektronen:



$$E_{\gamma'} = E_{\gamma} \frac{1}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_e} (1 - \cos \theta_{\gamma})}$$

Paarbildung an einem Stoßpartner:



Für $E_\gamma > 2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV}$ ist γ Konversion in e^-e^+ möglich.

Wg. 4er-Impulserhaltung ist zusätzlicher Rückstoßpartner notwendig.

→ Kinematische Schwelle

$$E_\gamma > 2m_e c^2 + \frac{2m_e^2}{M_K} c^2 \quad (\text{Streuung am Kern})$$

$$E_\gamma > 4m_e c^2 \quad (\text{Streuung an Hüllelektronen})$$

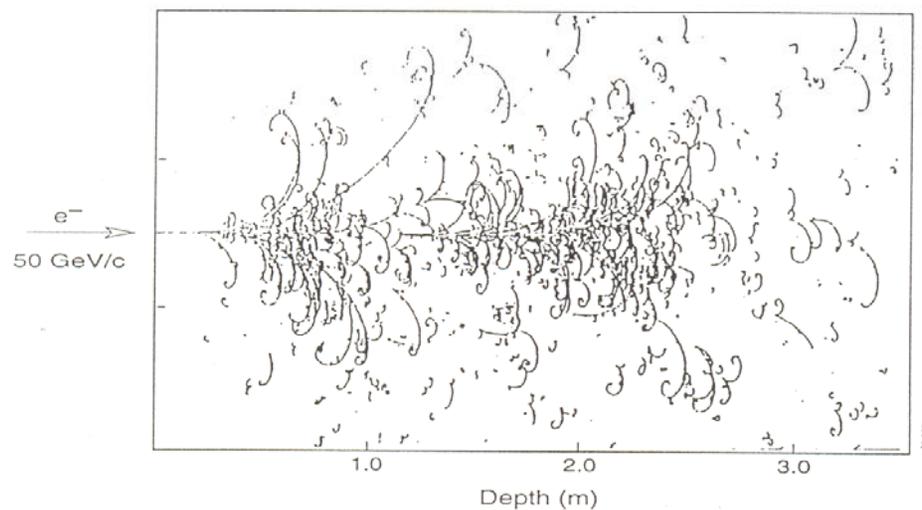
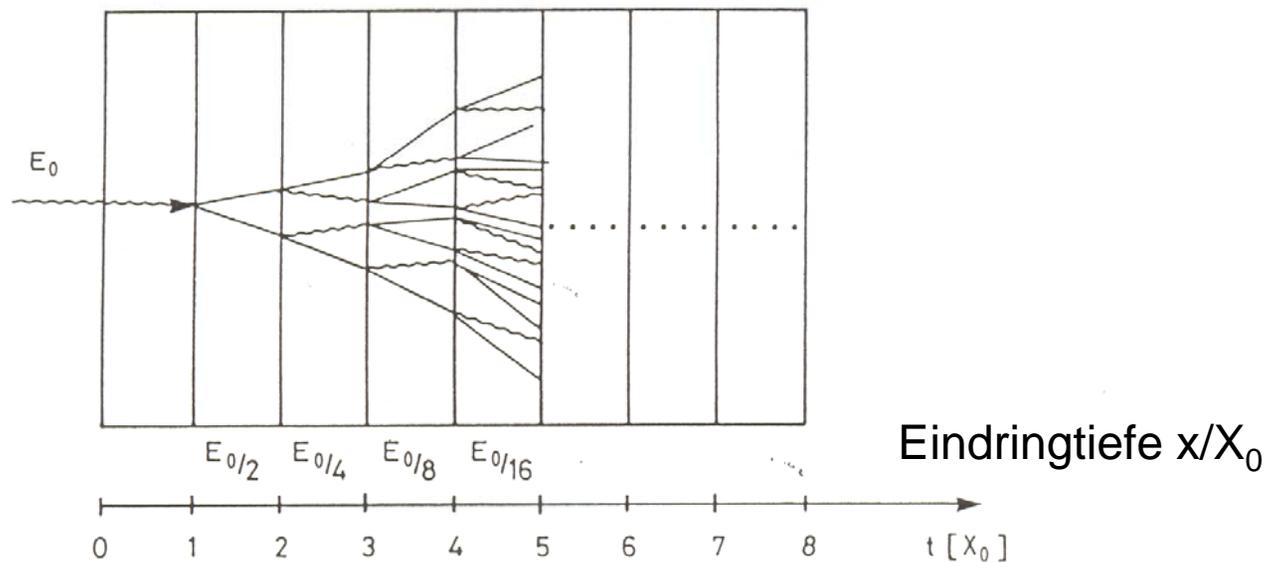
Feynman-Graphen für Paarbildung und Bremsstrahlung ähnlich:

Energie- bzw. Intensitätsverlust wird in beiden Fällen durch die materialspezif. Strahlungslänge X_0 beschrieben:

Bremsstrahlung $E(x) = E_0 e^{-x/X_0}$

Paarbildung $I(x) = I_0 e^{-x/X_0}$

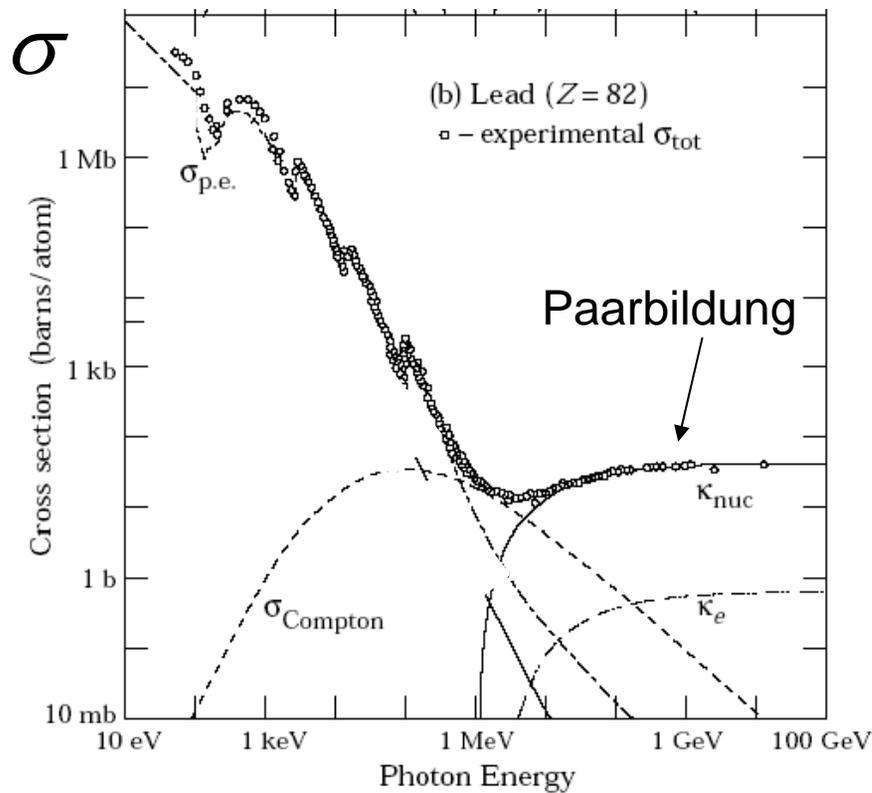
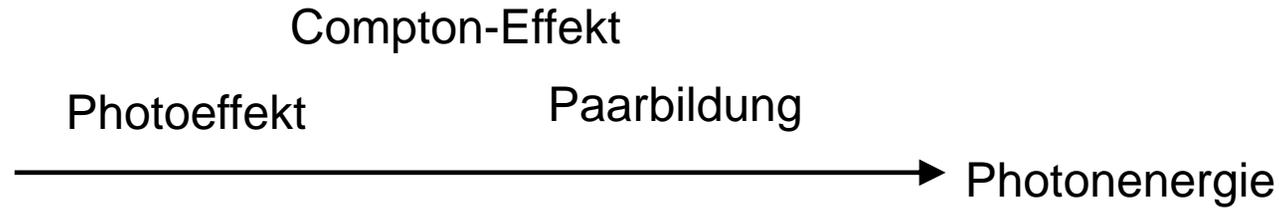
Kombination von Bremsstrahlung und Paarbildung führt für hochenergetische Elektronen bzw. Photonen zu **elektromagnetischen Schauern**:



Blasenkammer-
Aufnahme eines
Elektronenschauers

Wechselwirkung von Photonen mit Materie

2-18b



Abschwächung der einfallenden Photonintensität

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

$$\mu = \mu_{Ph} + \mu_C + \mu_{Paar}$$

mit
$$\mu_i = \rho \frac{N_A}{A} \sigma_i$$

Fig-TP-2.7