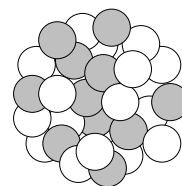


7. Kerne und Strahlung

7.1 Aufbau der Atomkerne

Atomkern besteht aus „Nukleonen“



Nukleonen		
	Proton p	Neutron n
Ladung	+e	0
Masse	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $=938,3 \text{ MeV}/c^2$	$m_n \approx m_p$
Spin <i>s</i>	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
magn. Mom.	$+2,79 \mu_K$	$-1,91 \mu_K$
Größe	$R \approx 10^{-15} \text{ m}$	

$$m_n - m_p = 1,29 \text{ MeV} / c^2$$

$$\mu_K = 3,15 \cdot 10^{-8} \text{ eV/T}$$

Atomkern

Z	Protonen	(Z = „Kernladungszahl“)
N	Neutronen	(N = „Neutronenzahl“)
A	„Nukleonen“	(A = Z+N „Massenzahl“)



◆ Größe des Kerns : $R \approx 1,2 \text{ fm} \cdot \sqrt[3]{A}$ (\Leftrightarrow Dichte konst.!)

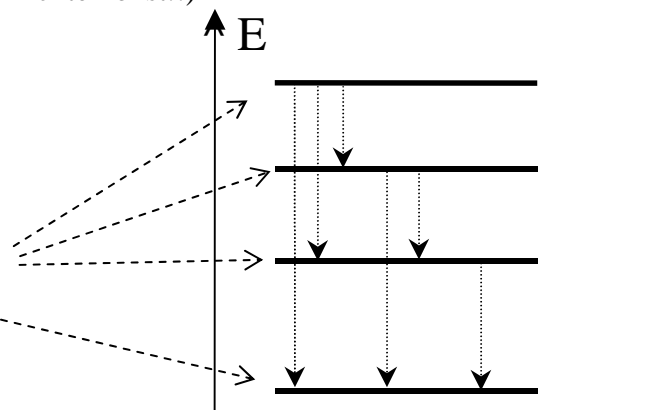
◆ rel. Atommasse : $M \approx A \frac{\text{g}}{\text{mol}}$

wie in Atomhülle ...

- ◆ p, n in „erlaubten“ Zuständen (mit fester Energie, Drehimpuls, ...)

- ◆ Zustand mit ...
höherer E. \Leftrightarrow angeregter Z.
niedrigster Energie \Leftrightarrow Grundzustand

- ◆ meist nur 1 od. 2 Isobare (Kerne mit festem A) stabil



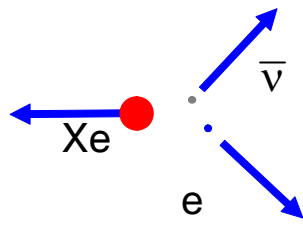
...	$^{131}_{56}\text{Ba}_{75}$	$^{131}_{55}\text{Cs}_{76}$	$^{131}_{54}\text{Xe}_{77}$	$^{131}_{53}\text{I}_{78}$	$^{131}_{52}\text{Te}_{79}$	$^{131}_{51}\text{Sb}_{80}$...
	11,5 d	9,7 d	stabil	8,02 d	25 Min.	23 Min.	
← zu viele Protonen				zu viele Neutronen →			

7.2 Zerfälle

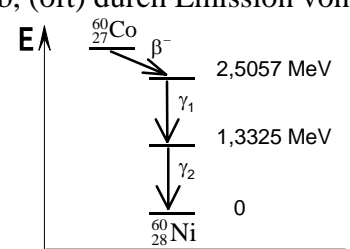
Wichtigste Zerfallsarten ...

α	<p>nur bei schweren Kernen, ab $Z \approx 60$</p> <p>$\alpha = {}^4_2\text{He}_2$ - Kern (He^{2+}-Ionen), $Q = +2e$</p> <p>Bsp.: $^{226}_{88}\text{Ra}_{138} \rightarrow ^{222}_{86}\text{Rn}_{136} + \alpha$ (+4.8 MeV!), $T = 1600 \text{ a}$</p> <p>Energie- u. Impulserhaltung $\Rightarrow \alpha$ erhält feste kin. Energie</p>
----------	--



β^-	<p>Kerne mit zu vielen Neutronen $(n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu} + \Delta E)$</p> <p>$\beta^-$ = Elektron, $Q = -e$,</p> <p>Bsp.: ${}^{131}_{53}\text{I}_{78} \rightarrow {}^{131}_{54}\text{Xe}_{77} + e^- + \bar{\nu}$, $T = 8,02 \text{ d}$</p> <p>3 Teilchen im Endzustand</p> <p>↳ e^- erhält kin. Energie 0 ... max. E., bei ${}^{131}\text{I}$: 0 ... 0.8 MeV</p>	
β^+	<p>Kerne mit zu vielen Protonen $(p + \Delta E \rightarrow n + e^+ + \nu)$</p> <p>$\beta^+$ = Positron (Anti-Elektron!), $Q = +e$,</p> <p>Bsp.: ${}^{18}_9\text{F}_9 \rightarrow {}^{18}_8\text{O}_{10} + e^+ + \nu$, $T = 110 \text{ Min.}$, e^+ Energie: 0...0.6 MeV</p>	

...

γ	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Nach α- oder β-Zerfall ... Kern ist i.d.R. nicht im Grundzustand ◆ Kern gibt Anregungsenergie ab, (oft) durch Emission von Photonen (γ-Quanten) <div style="text-align: center;">  </div> <p>Bsp. ${}^{60}\text{Co}$</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ β^--Zerf. in angeregten Zustand des ${}^{60}\text{Ni}$ ($T = 5.3 \text{ a}$), ➤ Übergang in Grundzustand (nach $\approx 10^{-12} \text{ s!}$) in 2 Stufen Emission von 2 γ mit 1.17 MeV und 1.33 MeV
----------	--

Zerfallsgesetz

$$-\frac{dN}{N} = \lambda dt$$

("-", da N abnimmt !)

N : (mittlere) Zahl der zur Zeit t noch nicht zerfallenen Kerne

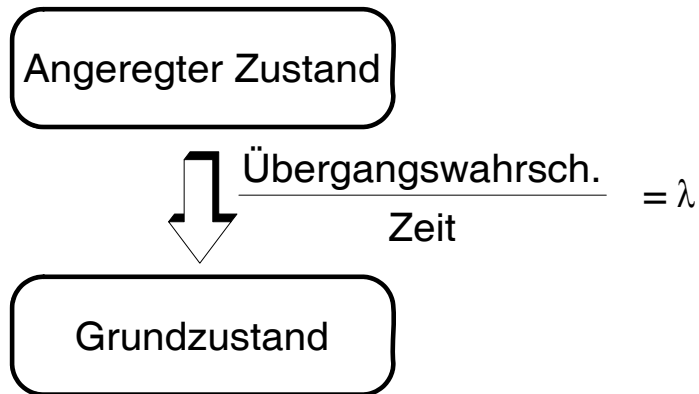
Dgl.: $-\frac{dN}{dt} = \lambda \cdot N \Rightarrow$ Lsg. der DGl.

$$\int \frac{1}{N} dN = -\int \lambda dt$$

$$\ln N = -\lambda \cdot t + C$$

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$= N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}$$



Anfangsbed., z.B. ↓ $C_{11} = N_0,$ $C_{22} = -C_{21}$	$N_1(0) = N_0, N_2(0) = 0$ (2-stufiger Zerfall) $N_1 = N_0 e^{-\lambda_1 t}$ $N_2 = C_{21}(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$
in DGL einsetzen \Rightarrow	$C_{21}(-\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}) = \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 C_{21}(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$ $\Rightarrow C_{21} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_0$

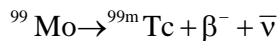
Lösung:

$$N_1 = N_0 e^{-\lambda_1 t}$$

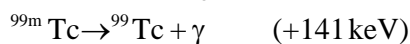
$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_0 \cdot (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

^{99m}Tc – Generator (Nuklearmedizin)

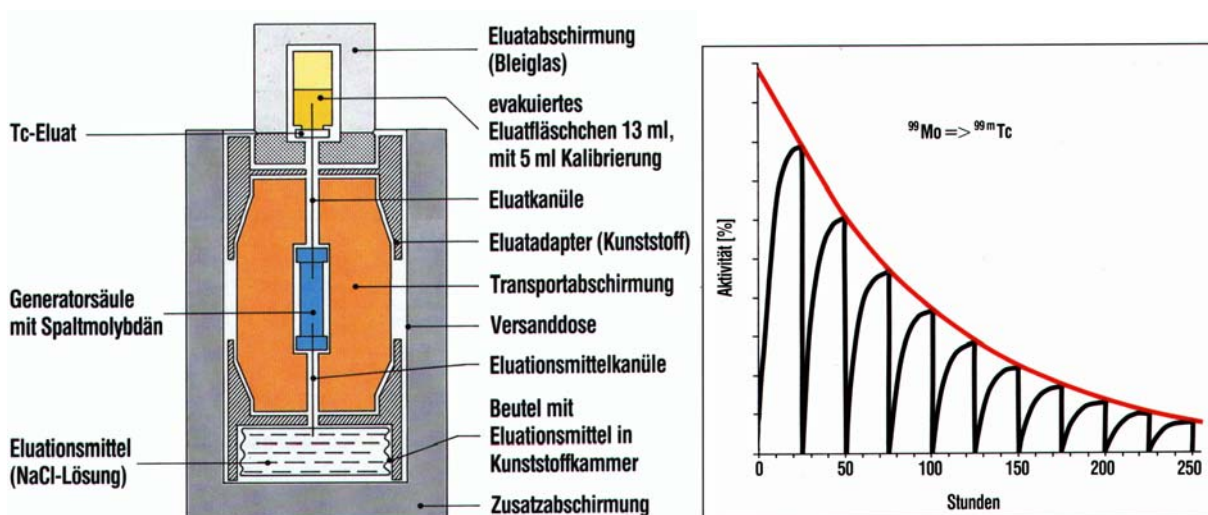
^{99m}Tc ist das meistverwendete Radionuklid in der nuklearmed. Bildgebung (Szintigraphie).



$T = 66 \text{ h}$



$T = 6 \text{ h}$

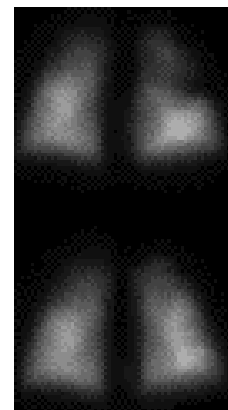
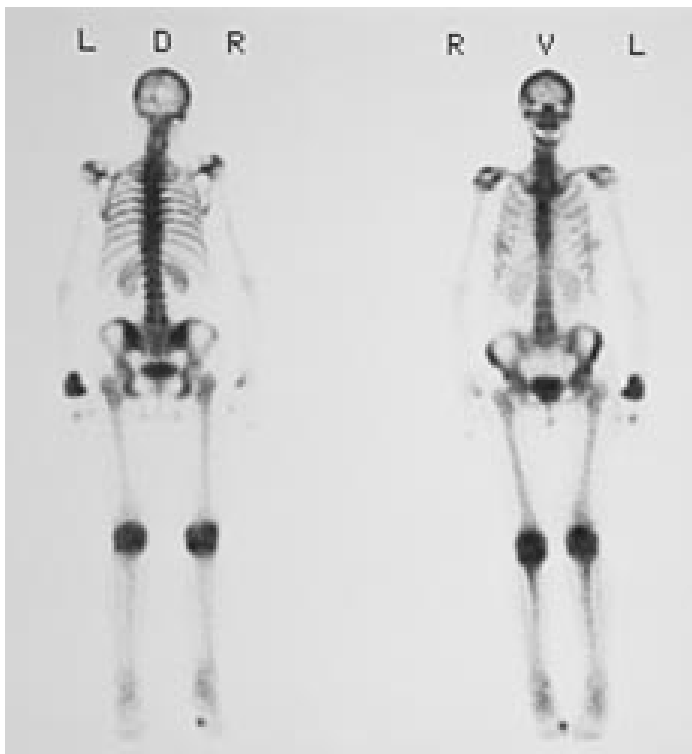
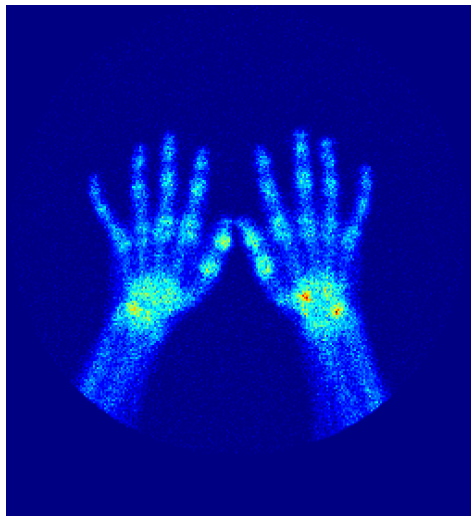
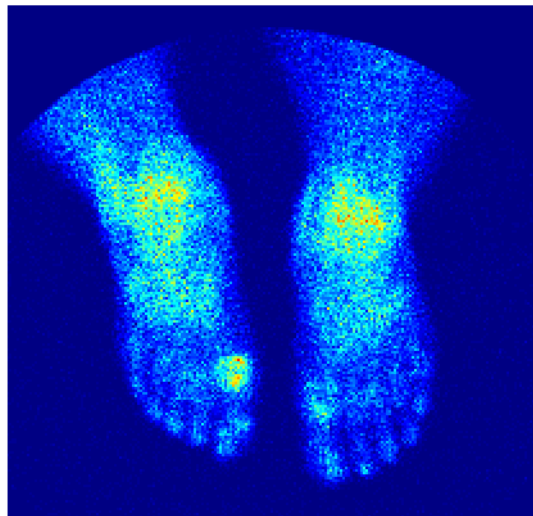
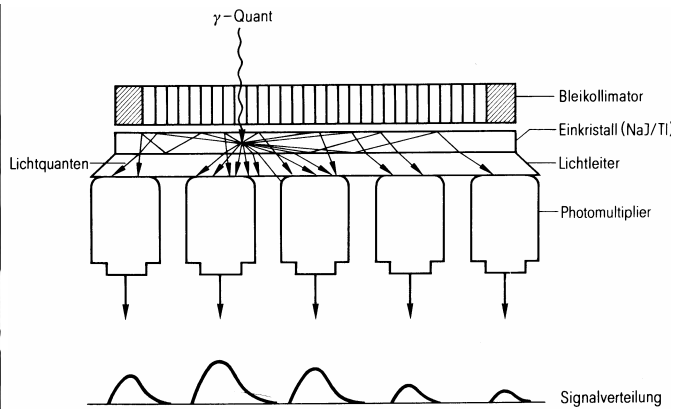


Anlieferung: **1 x wöchentlich**
^{99m}Tc - „Eluation“: täglich (ca. 1 Woche)

Szintigraphie

Zum orts aufgelösten Nachweis der Gammaquanten wird eine „Gammakamera“ verwendet. Da es für Gammastrahlung keine Linsen oder Spiegel gibt verwendet die Gammakamera (Blei-) Kollimatoren, um Gammaquanten aus eine bestimmten Richtung zu selektieren. Die Gammaquanten erzeugen in einer großen Platte aus Szintillatormaterial (meist ein NaI-Einkristall) Lichtblitze, deren Intensität und Position mit Photomultipliern gemessen wird. Schnittbilder können durch Single Photon Emission Computed-Tomography (SPECT) erzeugt werden.

Gammakamera



Lungen-
szintigraphie
Perfusion

Ventilation

7.3 Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

7.3.0 (Ionisierende) Strahlung

Strahlung aus ...

- geladenen „Teilchen-“ \Rightarrow direkt ionisierende Strahlung
- neutralen „Teilchen-“ \Rightarrow indirekt ionisierende Strahlung

α -Strahlen

${}^4\text{He}$ -Kerne (He^{2+} -Ionen), $Q = +2e$, $m \approx 4u$

(u : „atomare Masseneinheit“, $u = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$)

- Beschleuniger (Zyklotron)
- α - Zerfall, z.B.
 ${}_{88}^{226}\text{Ra}_{138} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn}_{136} + \alpha$ (+4.8 MeV!), $T = 1600 \text{ a}$ (Halbwertszeit)

β^- - / Elektronen - Strahlen

Elektronen, $Q = -e$, $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

- Beschleuniger (Lin.-Beschl.)
- β^- - Zerfall, z.B. ${}_{53}^{131}\text{I}_{78} \rightarrow {}_{54}^{131}\text{Xe}_{77} + e^- + \bar{\nu}$, $T = 8 \text{ d}$
kin. Energie des e^- : $0 \dots 0.8 \text{ MeV}$
- γ -Strahlung in Materie (Photo-, Comptoneff.,...)
- ... weitere Quellen von e^- -Strahlen
(z.B. WW zw. Kern und Hülle)

β^+ - / Positronen e^+ (Anti-Elektronen) - Strahlen

$Q = +e$, $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

- β^+ - Zerfall, z.B. : ${}_{9}^{18}\text{F}_9 \rightarrow {}_{8}^{18}\text{O}_{10} + e^+ + \nu$, $T = 110 \text{ Min.}$
 e^+ Energie: $0 \dots 0.6 \text{ MeV}$
- Paarbildung: $\gamma + (\text{Atom}) \rightarrow e^+ e^- (+ \text{Atom})$
Energie des $\gamma \Rightarrow$ Elektron-Positron-Paar
(für $E_\gamma > 2 \cdot m_e \cdot c^2 = 1,022 \text{ MeV}$!)

Weitere gel. Partikelstrahlen :

Protonen, Ionen,
Myonen (z.B. in Höhenstrahlung)...

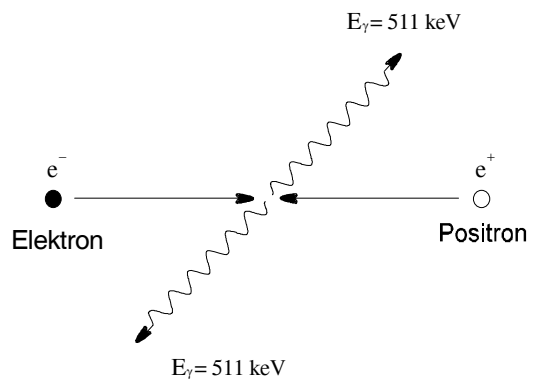
Röntgen- / γ - Strahlung

$Q = 0$, $m = 0$ (keine Ruhemasse)

(Röntgenstrahlen, ionisierende Strahlen : $\lambda < 100 \text{ nm}$)

- Übergänge in der Atomhülle (innere Schalen!)
- ... im Kern : „ γ - Zerfall“
- Bremsstrahlung (Röntgenröhre, Linac)

- Positronen-Elektronen-Anihilation
 $e^+ e^- \rightarrow \gamma + \gamma, E_\gamma = m_e \cdot c^2 = \underline{511 \text{ keV}}$
- weitere Quellen von γ -Strahlung ...
(z.B. Synchrotronstrahlung)



Neutronen

$$Q = 0, m \approx u$$

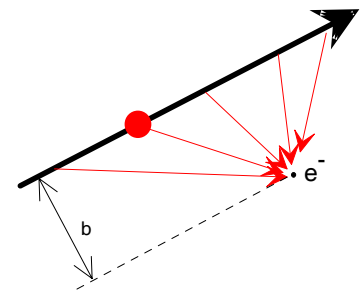
- Kernspaltung, z.B. ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{56}^{144}\text{Ba} + {}_{36}^{92}\text{Kr} + 2 \cdot n$
- Kernreaktionen, z.B. $\alpha + {}_4^9\text{Be} \rightarrow {}_6^{12}\text{C} + n$

7.3 Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

7.3.1 Geladene „Teilchen“ (Geschw. v , Masse m , Ladung: $Z \cdot e$)

a) Ionisation u. Anregung durch Stöße

Wechselwirkung über elektrisches Feld
mit den Elektronen im „Absorber“
⇒ Energie- und Impulsübertrag ⇒ Stöße mit e^-
⇒ Ionisation und Anregung der Atome/Moleküle



große Elektronendichte n_e in Materie:

$$n_e = \frac{\rho \cdot Z_{\text{Abs}} \cdot N_A}{M}$$

ρ : Dichte

Z_{abs} : Anz. e^- /Molekül (Ordnungsz.)

N_A : Avogadro-Konst. ($6 \cdot 10^{23}$ 1/mol)

M : Molmasse, $M \approx A \cdot 1 \text{ g/mol}$

$$\text{Bsp.: Wasser } n_e = \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10 \cdot 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}}{18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} = 3.3 \cdot 10^{29} \frac{1}{\text{m}^3} = 3.3 \cdot 10^{11} \frac{1}{\mu\text{m}^3}$$

- ⇒ Der Prozeß der Energieabgabe durch Stöße mit Elektronen verläuft quasi kontinuierlich!
- ⇒ Ein schnelles geladenes Teilchen in Materie wird (quasi kontinuierlich) gebremst und verliert ständig Energie

$$\text{lineares Bremsvermögen: } S = - \frac{dE}{dx} \quad (\text{MeV/cm})$$

$$\text{Massenbremsvermögen: } S/\rho = -\frac{dE}{\rho dx} \quad (\text{MeV}/(\text{g}/\text{cm}^2))$$

Impuls- und Energieübertrag auf einzelnes e^- (Abstand b)

- Annahmen: Energie, Geschw. "groß", „schwere“ Teilchen
 WW-Zeit Δt "klein"
 \Rightarrow Hüllen- e^- bleibt während WW am gl. Ort
 \Rightarrow Teilchen fliegt geradlinig weiter, $v \approx \text{const.}$
 \Rightarrow Long.-Komp. von \vec{F} heben sich weg, $\Delta\vec{p} \perp$ "Bahn"

Impulsübertrag (Newton II): $\Delta\vec{p} = \int \vec{F}(t) dt$

stark vereinfacht :

$$\Delta p = F \cdot \Delta t$$

$$\Delta p = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 b^2} \cdot \frac{2b}{v}$$

$$\Delta p = \frac{2}{vb} \cdot \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0}$$

Energieübertrag

$$\Delta E = \frac{\Delta p^2}{2m_e} = \frac{Z^2}{v^2} \cdot \frac{e^4}{b^2 8\pi^2 \epsilon_0^2 m_e}$$

rechnerisch:

$$\Delta p = \int F_{\perp}(t) dt \quad , \quad dx = v dt$$

$$\Delta p = \frac{1}{v} \cdot \int F_{\perp}(x) dx$$

$$|\vec{F}| = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad , \quad F_{\perp} = |\vec{F}| \cdot \frac{b}{r} \quad , \quad r = \sqrt{x^2 + b^2}$$

$$\Delta p = \frac{1}{v} \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} b \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{(x^2 + b^2)^{\frac{3}{2}}} dx = \frac{1}{v} \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} b \cdot \frac{2}{b^2}$$

$$\Delta E \sim Z^2 \quad , \quad \Delta E \sim \frac{1}{v^2}$$

Energieübertr. auf "alle" e^- , genauere Rechnung, relativist. und QM-Effekte ...

$$\text{Bethe-Bloch-Gl.: } S = -\frac{dE}{dx} = \frac{e^4}{4\pi\epsilon_0^2 m_e} \cdot n_e \cdot \frac{Z^2}{v^2} \left\{ \ln \frac{2m_e v^2}{I} - \ln(1-\beta^2) - \beta^2 \right\}$$

☞ Nur für „schwere Teilchen“! ☞ WW von Elektronen \rightarrow weitere Korrekturen!

Etwas einfacher für prakt. Rechnungen: \rightsquigarrow

$$S/\rho = 4\pi r_e^2 (m_e c^2) N_A \cdot \frac{Z_{\text{Abs}}}{M} \cdot \frac{Z^2}{\beta^2} \left\{ \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I} - \underbrace{\ln(1-\beta^2) - \beta^2}_{\approx 0 \text{ für } v \ll c!} \right\}$$

mit $r_e = e^2 / (4\pi\epsilon_0 m_e c^2) = 2.818 \cdot 10^{-15} \text{ m}$, $m_e c^2 = 511 \text{ keV}$, $\beta = v/c$

I ist eine Materialkonstante, Wasser : $I = 75 \text{ eV}$

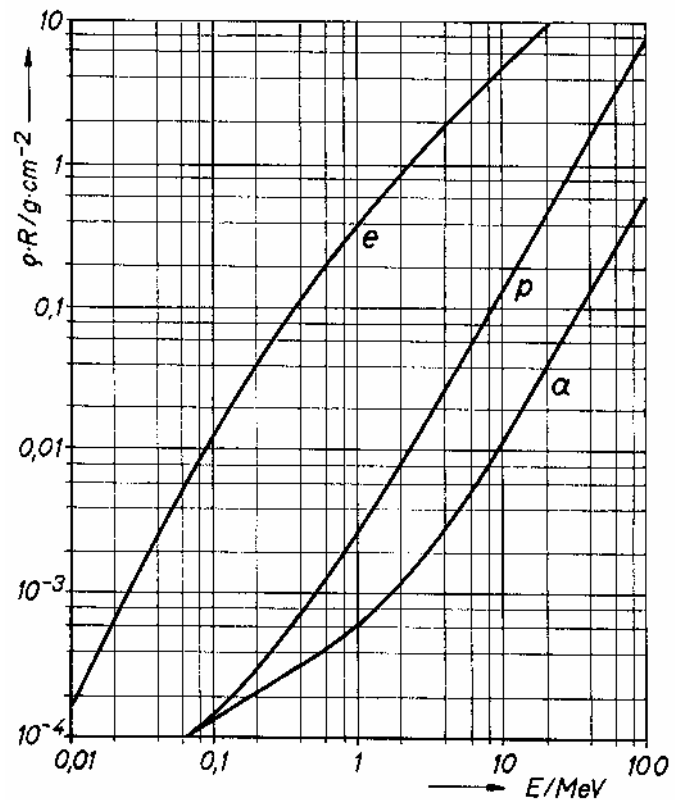
(mittl. Anregungsenergie) Luft: $I = 86 \text{ eV}$ Blei: $I = 820 \text{ eV}$

Reichweite R

Aus Bremsvermögen und Anfangsenergie ...

- geladenen Teilchen geben auf Strecke R gesamte Energie ab
- geladenen Teilchen haben definierte Reichweite

Reichweiten

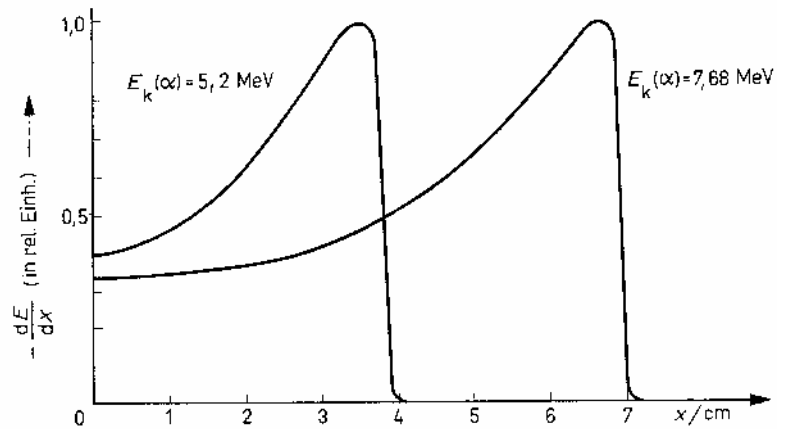


$E_{\text{kin}}/\text{MeV}$		Luft R/mm	Wasser $R/\mu\text{m}$
1	e	3300	4000
	p	23	28
	α	5	6
5	e	21000	25000
	p	330	400
	α	32	39

- Die Reichweite von e^- aus β -Zerfällen (E max. ca. 1 MeV) in Wasser (Gewebe) beträgt maximal **einige mm** !
- Die Reichweite von α aus α -Zerfällen ($E \approx 5$ MeV) in Wasser (Gewebe) beträgt **ca. 0.040 mm** !

- Kurz vor Erreichen der max. Reichweite ist der Energieverlust maximal („Bragg-Kurve“)

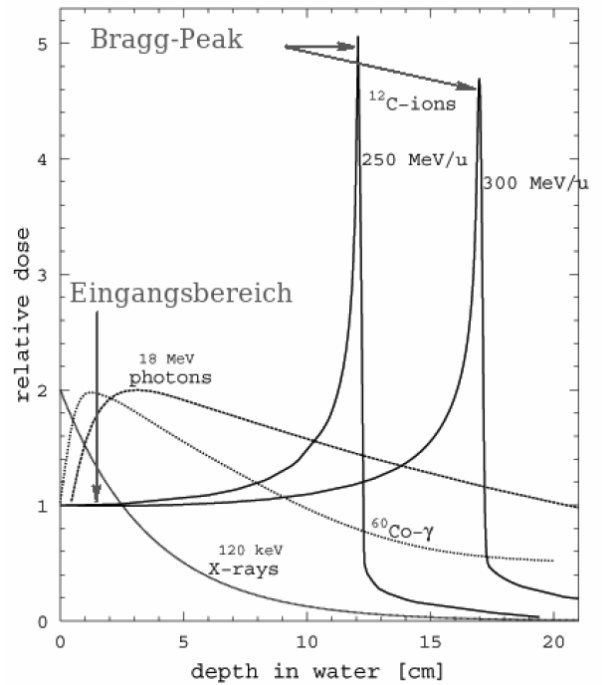
Abhängigkeit des Energieverl. von α -Teilchen in Luft von der Schichtdicke (Bragg-Kurve)



⇒ Strahlentherapie mit schweren Ionen!



Behandlungsraum in der GSI



Vergleich der Energiedeposition (Dosis) in Wasser vom Röntgen-/Gammastarhlung und C-Ionen

Siehe auch : www.gsi.de/portrait/Broschueren/Therapie/Krebstherapie.html

- b) Für **Elektronen und Positronen**:
zusätzlich zu Stoßionisation und Anregung
Energieverlust durch **Bremsstrahlung**

Kraft auf Elektron in der Nähe eines Kerns: $\sim Z_{Abs} \cdot e^2$,

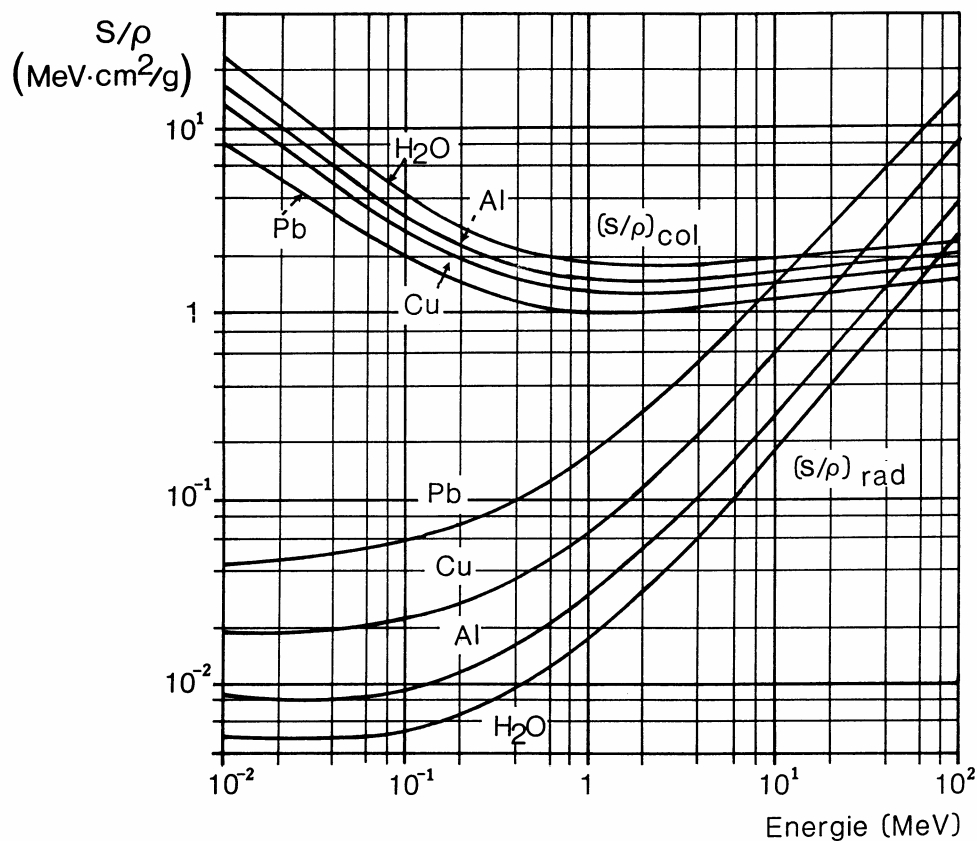
Beschleunigung $a \sim \frac{Z_{Abs} e^2}{m_e}$.

abgestrahlte Intensität: $\sim a^2 \sim Z_{Abs}^2 \frac{e^4}{m_e^2}$.

Bremsstrahlung $\Rightarrow \sim \frac{1}{m_e^2} \Rightarrow$ nur wichtig bei **Elektronen/Positronen**

$\sim Z_{Abs}^2 \Rightarrow$ Absorber mit großem Z_{abs} .

Bei großen Energien nimmt Bremsstrahlung zu, $S_{Rad} \sim E$

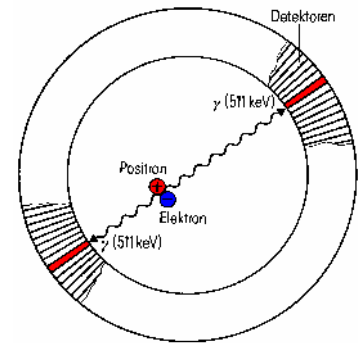
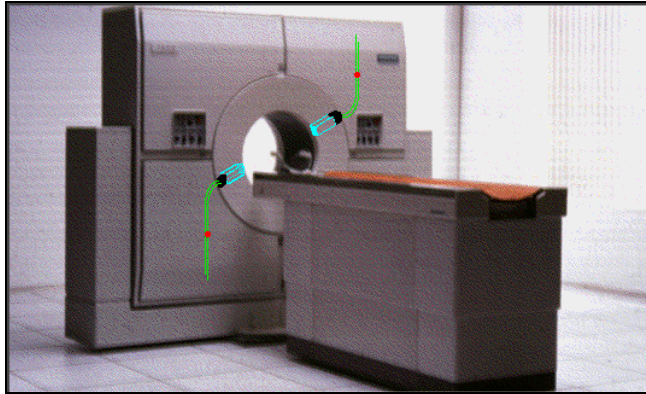


c) Nur für **Positronen: Paarvernichtung**

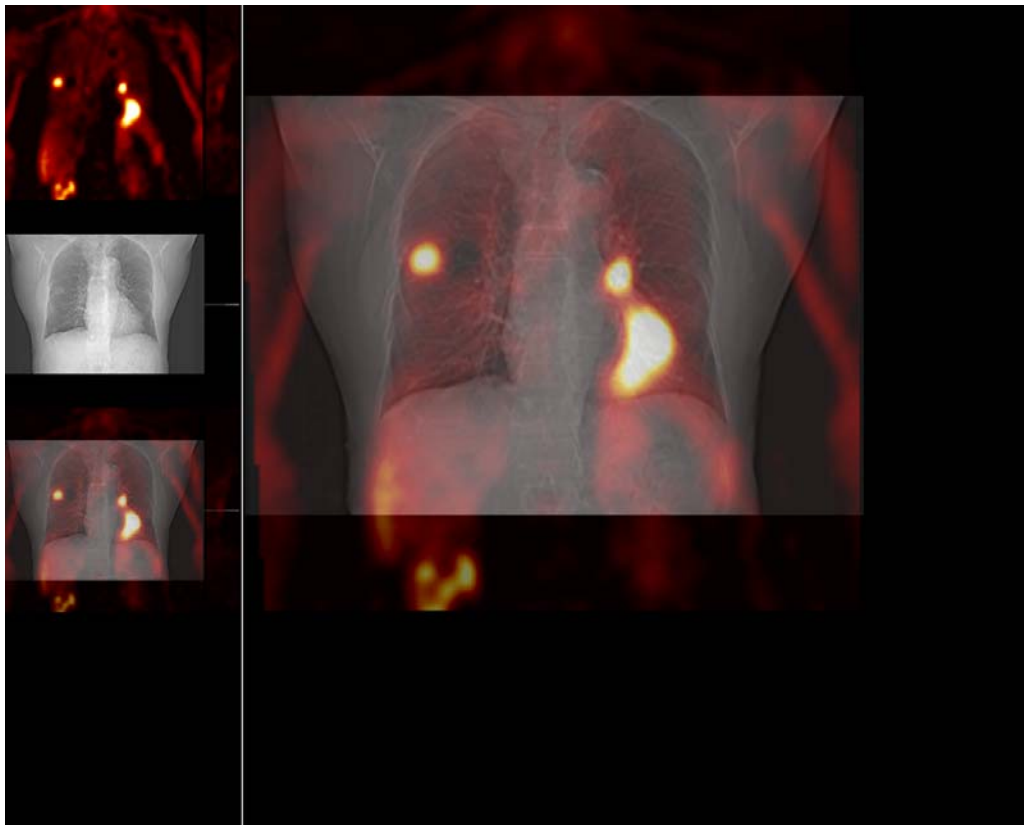
$$e^+ e^- \rightarrow \gamma + \gamma, \quad \text{Zwei } \gamma, 180^\circ \text{ (Impulserhaltung!)}, \text{ jeweils } E_\gamma = m_e \cdot c^2 = \underline{\underline{511 \text{ keV}}}$$

Anwendung z.B. in der **Positronen-Emissions-Tomographie (PET)**

Mit Positronenstrahler markierte Moleküle, z.B. ^{18}F -Fluor-Desoxyglukose (^{18}F -FDG) dienen z.B. als „Tracer“, um einen Tumor zu markieren.



PET-Gerät Siemens ECAT EXACT HR+



Metastasen in
der Lunge nach
Rektumkarzinom

PET-Bild (rot)
und
Überlagerung
mit CT-Bild

Für alle geladenen Teilchenstrahlen:

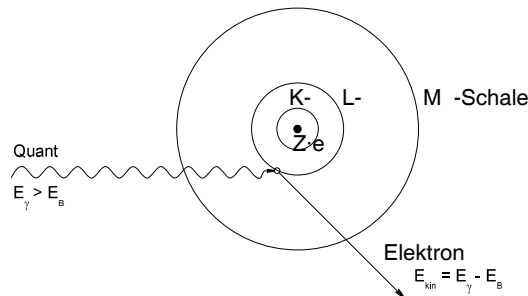
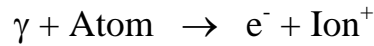
d) **Streuung und Vielfachstreuung**

Ablenkung von urspr. Flugrichtung, besonders häufig bei niedriger Energie

...

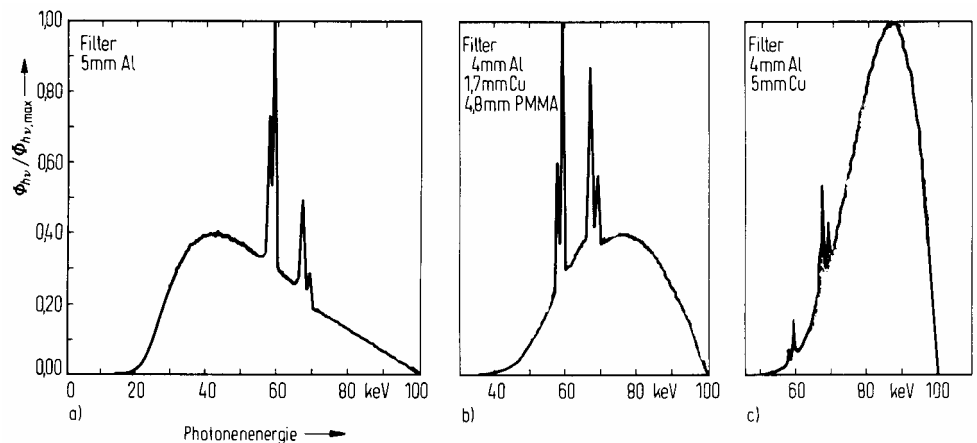
7.3.2 WW von γ -Strahlung mit Materie

a) Photoeffekt



- Atom wird ionisiert ($\text{Ion}^+ + e^-$)
- γ wird absorbiert, 100% der Energie lokal deponiert
- Mindestenergie = Bindungsenergie des e^- : E_B
 e^- erhält kin. Energie $E_{kin} = E_\gamma - E_B$.
- nicht an freien e^- (E.- u. \vec{p} -Erhaltung!)
Atom wird als Stoßpartner benötigt, deshalb ...
- Schwächungskoeff stark von Z abhängig: $\mu_{ph} \sim Z^5$
 \Rightarrow schwere Elemente (Pb $Z = 82$, I $Z = 53$, Ba $Z = 56$!) absorbieren (stark)⁵!
- bevorzugt an inneren Elektronen (K, L, M),
 μ steigt sprunghaft (\approx Faktor 10), wenn Bindungsenergie einer inneren Schale überschritten wird („K-Kante“ etc.)! Sonst: $\mu_{ph} \sim E_\gamma^{-3}$

Absorption des
niederenerget.
Teils der
Röntgenstr.
durch Filter



Wegen der starken Energieabhängigkeit des Photoeffekts wird niederenergetische Strahlung stärker absorbiert („Strahlaufhärtung“).

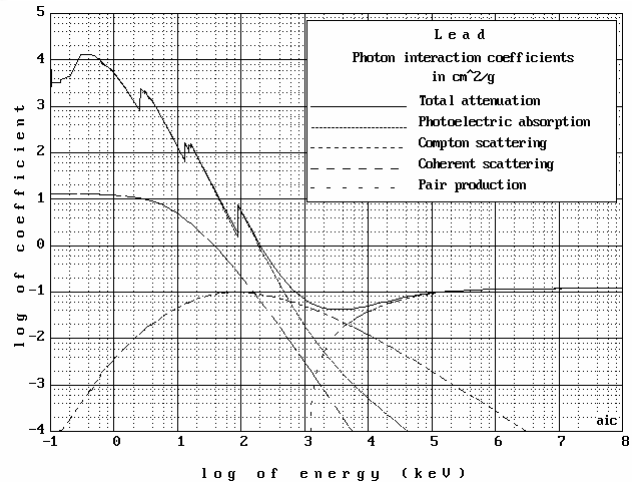
Massenschwächungskoeffizient

μ/ρ für **Blei**

(Gesamtschw. und Koeff. für Photoeffekt, Comptoneffekt etc.) als Fkt. der Energie

($\log_{10}(E_\gamma / 1 \text{ keV})$)

- Bis ca. 200 keV sind die anderen Prozesse gegenüber dem Photoeffekt vernachlässigbar
- Absorptionskanten
K: 88.01 keV ; L: 15.86, 15.20, 13.04 keV; M: 3.85 keV



Beispiel: Schwächung von **100 keV** Strahlung durch **1 mm Blei**

100 keV, $\mu/\rho = 5.6 \text{ cm}^2/\text{g}$, Blei : $\rho = 11.35 \text{ g/cm}^3 \Rightarrow \mu = 5.6 \cdot 11.35 \text{ 1/cm} = 63.6 \text{ 1/cm}$

Intensität: $I(d) = I_0 \cdot e^{-\mu d} = I_0 \cdot e^{-63.6 \cdot 0.1} = I_0 \cdot 1.7 \cdot 10^{-3}$

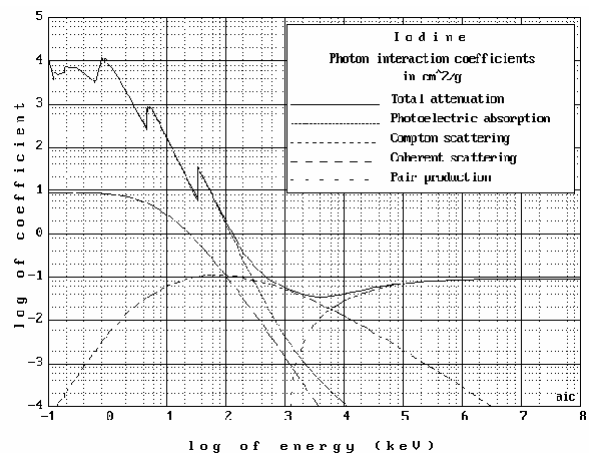
Anz. d. Quanten: $N(d) = N_0 \cdot e^{-\mu d} = N_0 \cdot e^{-63.6 \cdot 0.1} = N_0 \cdot 1.7 \cdot 10^{-3}$

Massenschwächungskoeffizient

μ/ρ für **Jod**

Absorptionskanten :

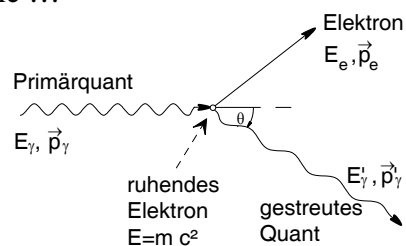
K: 33.17 keV; L: 5.19, 4.85, 4.56 keV; M: 1.072 keV



b) Comptonstreuung

Bis ca. 20 keV: „klassische Streuung“ der Licht-, „Welle“ (kohärente Streuung)

Aber : Bei hoher Quantenenergie ...



- Streuung von γ an freien e^- bzw. an schwach gebundenen e^- ($E_B \ll E_\gamma$).
- γ gibt Energie an e^- ab, ändert Richtung

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{mc^2} \cdot (1 - \cos\theta)}$$

- Nur ein Teil der Energie wird lokal deponiert (wichtig für Strahlenschutz und Dosimetrie!!)
- Schw.-Koeff. $\sim Z$ (Anzahl der e^- !), wichtigster Prozeß bei „leichten“ Materialien (Gewebe!)
- schwach energieabhängig, für $E_\gamma \gg m_e \cdot c^2$: $\sim 1/E_\gamma$
Wasser : zw. ≈ 30 keV u. ≈ 25 MeV häufigster Prozeß!

Anzahl der **nicht gestreuten** Quanten: $N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x}$

aber: Energiefluß nimmt schwächer ab,

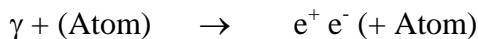
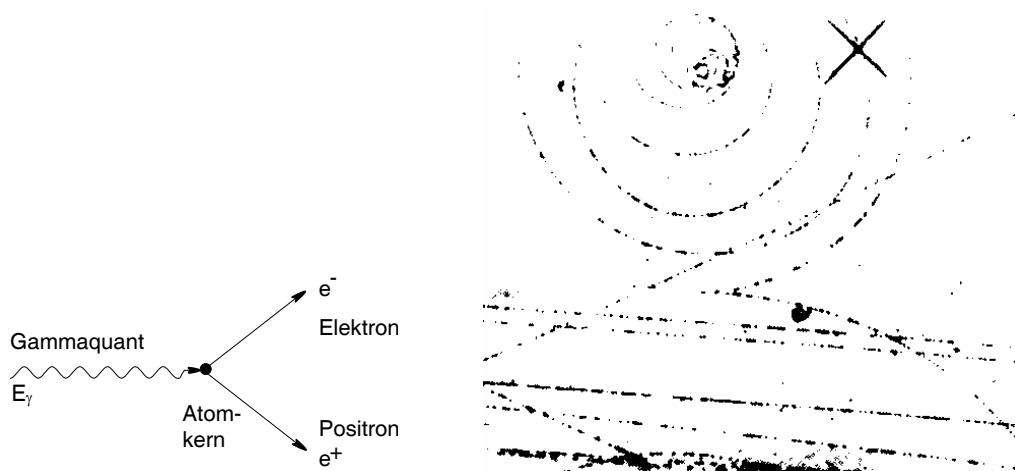
lokal absorbierte Energie ist kleiner

⇒ Energieumwandlungskoeffizient η ($\eta < \mu$!)

zur. Ber. des Energieflusses, E.-Absorption und Dosis: (analog zum Schwächungskoeff.): $I(x) = I_0 \cdot e^{-\eta x}$

bzw. in Schichtd. Δx abs. Intens.: $\Delta I_{abs}/I_0 = \eta \cdot \Delta x$

c) Paarbildung



- Bildung von e^+ - e^- Paaren
- γ wird absorbiert
- nur für $E_\gamma > 2 \cdot m_e \cdot c^2 = 1,022$ MeV
- Prozeß läuft nicht im Vakuum, Atom/Kern ist nötig, um „Rückstoß“-Impuls aufzunehmen
- Positron wird abgebremst, wird mit e^- vernichten ...
- ab $E_\gamma \approx 20$ MeV dominierender Prozeß (z.B. bei Linac)

7.3.4 Strahlendosis

Strahlenwirkungen

- direkte Schädigung (z.B. der DNS) durch die Strahlung
- indirekte Strahlenwirkung:
Radiolyse des Wassers, Erzeugung von Radikalen
(≈ 7 Radikale / 100 eV),
„chem. Angriff“ auf Biomoleküle, abhängig vom Wasser- u. Sauerstoffgehalt!
- Abhängig von Wirksamkeit der **Reparaturmechanismen**
⇒ besonders strahlenempfindlich: Zellteilungsphase (Mitose)
 - Strahlenempfindlichkeit eines Organs abh. von „Wachstumsfraktion“
 - Besonders strahlenempfindlich: Embryo, blutbildendes u. lymphatisches System (Knochenmark, Lymphknoten, Milz), Keimdrüsen u. Tumoren

Energiedosis: $D = \frac{dE}{dm}$ (Energie, die auf Materie übertragen wird) / Masse

Einheit: 1 J/kg = 1 Gy = 1 Gray

Äquivalentdosis: $H = q \cdot D$ (q = „Bewertungsfaktor“)

[H] = 1 J/kg = 1 Sv (Sievert)

Bewertungsfaktor q ...

- „bewertet“ „**Relative Biologische Wirksamkeit**“ RBW
- berücksichtigt unterschiedliche Ionisationsdichte dE/dx verschiedener Strahlenarten
- für γ , β : q = 1 (festgelegt)

	q
γ	1
e^- , e^+	1
α $E_a < 3$ MeV	20
Spaltfragmente, schwere Ionen	20
p $E_p \approx 0,7$ MeV	10

Effektive Äquivalentdosis $H_{eff} = \sum w_i H_i$

- Wichtung mit unterschiedlicher Strahlenempfindlichkeit der verschiedenen Organe (entspr. Äquivalentdosis bei Ganzkörperbestrahlung mit gleichem Strahlenrisiko)

Organ	Wichtungsfaktor w_i
Keimdrüsen	0.25
Brust	0.15
rotes Knochenmark	0.12
Lunge	0.12
Knochenoberfläche	0.03
Schilddrüse	0.03
Rest (max. 5 Organe)	$5 \cdot 0.06$

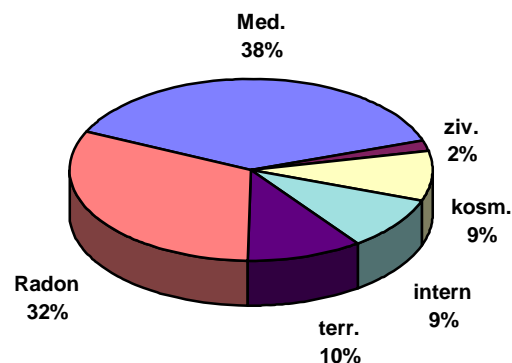
Natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition

	µSv/a
Äußere Strahlenquellen:	
kosmische Strahlung (50° nördl. Br., NN)	500
nat. rad. Stoffe der Umwelt (²³⁸ U, ²³² Th, ⁴⁰ K, ²²⁰ Rn, ²²² Rn...)	490
Innere Strahlenquellen (radioaktive Stoffe im Körper):	
¹⁴ C	16
⁴⁰ K (je nach Organ)	100 ... 200
²²⁶ Ra, ²²⁸ Ra (Max. in Knochen)	30 ... 720
²²⁰ Rn (in der Lunge)	1750
²²² Rn (in der Lunge)	1300

Gesamte natürliche Äquivalentdosisleistung $\approx 1 \dots 2 \text{ mSv/a}$ ($\approx 0,1 \text{ µSv/h} \dots 0,2 \text{ µSv/h}$)

Mittlere eff. Äquivalentdosis in Deutschland aus versch. natürlichen und zivilisatorischen Quellen:

	mSv/a
Med.	1.5
ziv	0.08
kosm.	0.36
intern	0.37
terr.	0.41
Radon	1.26



Literatur:

📖 zu 7. „Kerne u. Strahlung“

Krieger/Petzold, Strahlenphysik, Dosimetrie u. Strahlenschutz, Teubner Verlag

Band 1: Grundlagen, WW Strahlung u. Materie

Band 2: Strahlentherapie, klin. Dosimetrie

Kamke/Walcher Kap. 15

Hering et. al Kap. 8.10