

Inhalt der Vorlesung

1) Einführung

Physik des Körpers

2) Biomechanik

3) Blutkreislauf

4) Ohr

5) Auge

Diagnostische Methoden

6) Röntgendiagnostik

7) Nukleardiagnostik

8) Ultraschall

9) MRI

10) Bioelektrische Quellen

Therapeutische Methoden

11) Ionisierende Strahlung

12) Laser

11) Ionisierende Strahlung

11.1 Übersicht

11.2 Energiedeposition durch Photonen

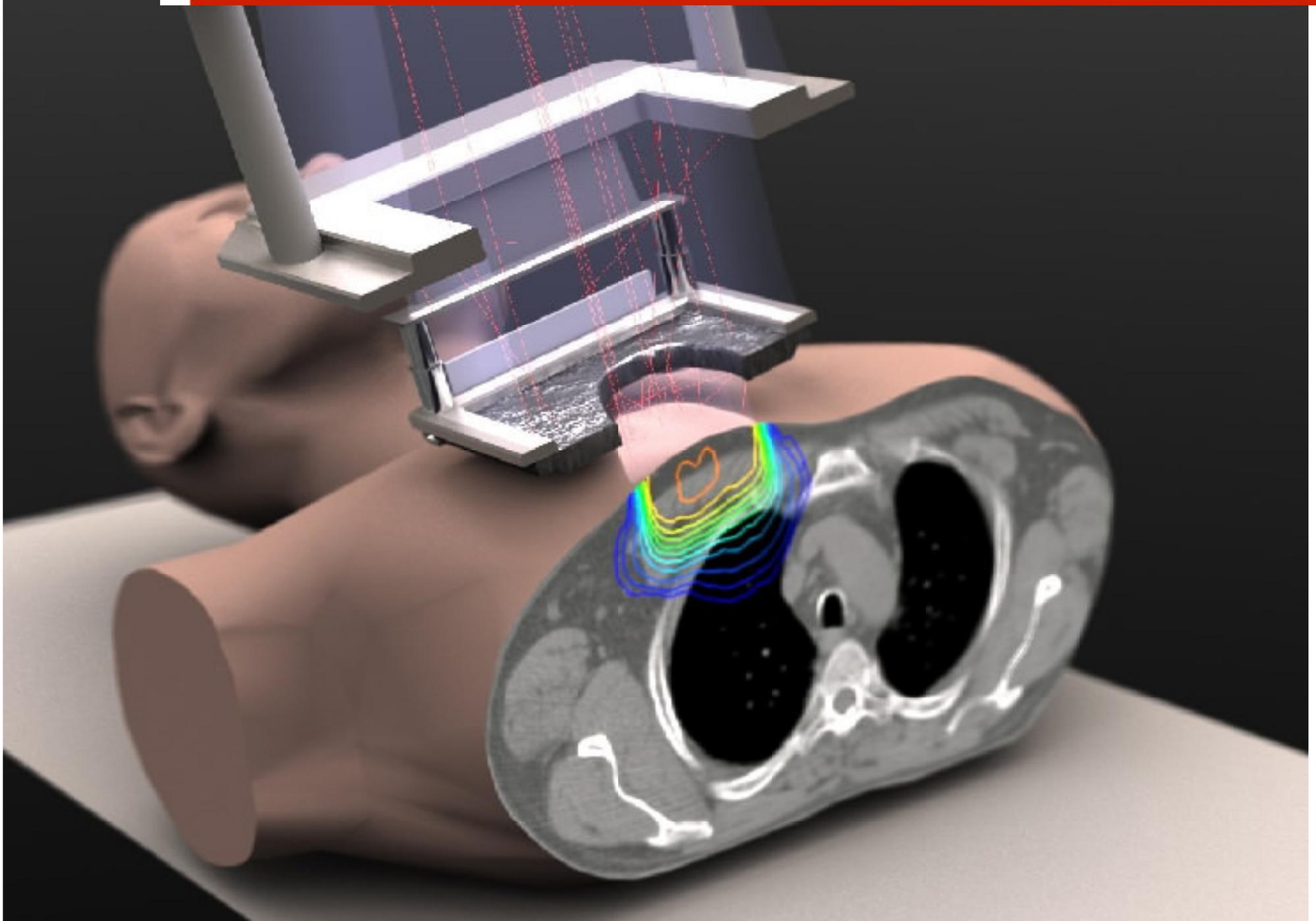
11.3 Energiedeposition durch Teilchen

11.4 Dosimetrische Grundbegriffe

11.5 Molekulare Strahlenbiologie

11.6 Strahlenschutz

11) Ionisierende Strahlung



Energiedeposition

Zweistufige Energiedeposition:

- **Primärprozesse**
 - γ $\rightarrow e^-$
 - n $\rightarrow p^+$
 - $\alpha, e^+, \dots \rightarrow$ **Ionisation, Anregung**
- **Sekundärelektronen**

Absorption und Streuung

Intensität: $I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$ $\mu = \tilde{\sigma} + \tau$

$\tilde{\sigma}$ Streukoeffizient : Richtungsänderungen

τ Absorptionskoeffizient

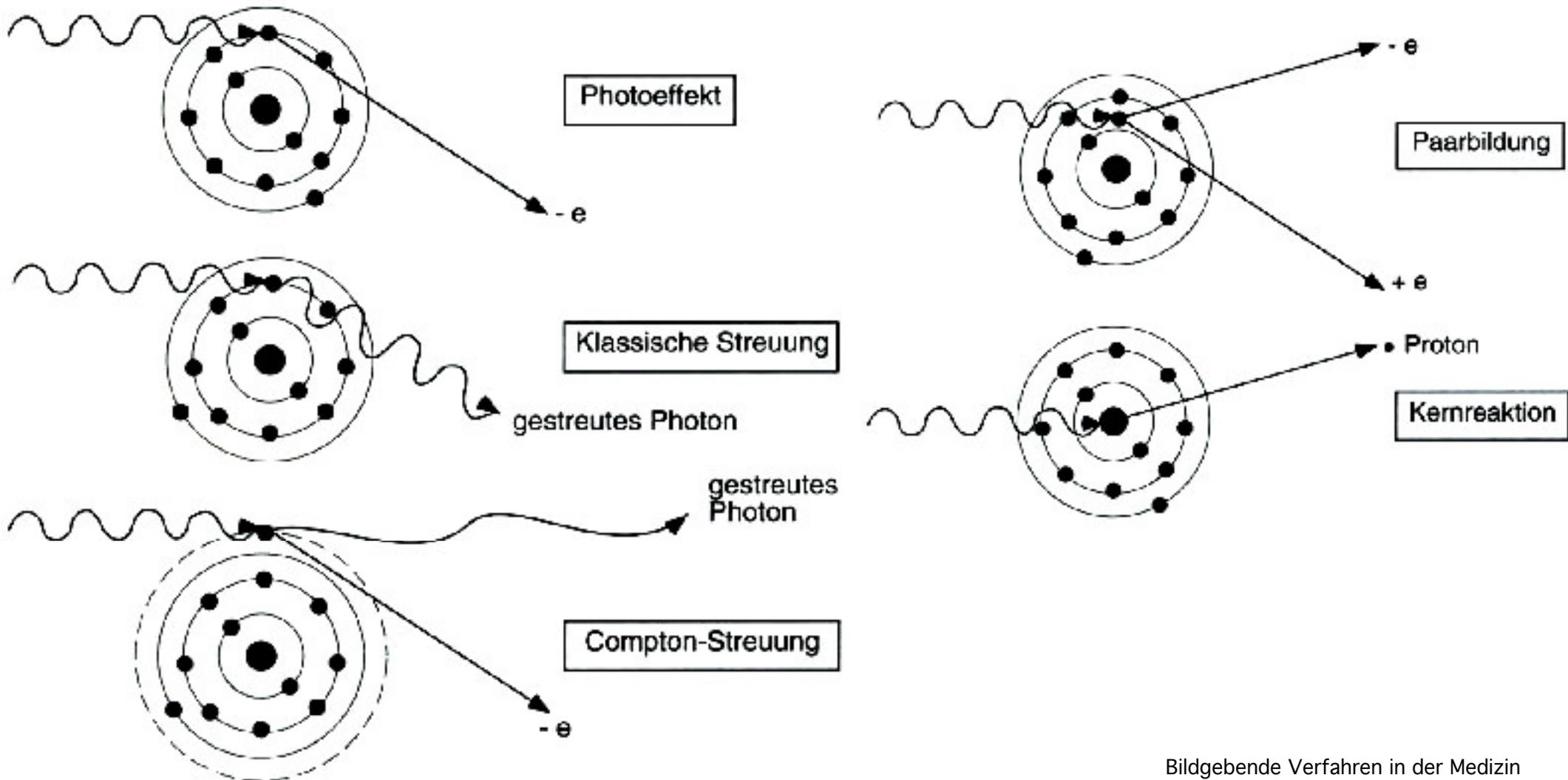
Aus KET: $\mu = \sigma n$

$$n = \frac{N_A \rho}{m_{mol}} \text{ Teilchendichte}$$

σ Wirkungsquerschnitt

Der Streukoeffizient $\tilde{\sigma}$ spielt nur bei der Eichung von Dosimetern eine Rolle

Primärprozesse Photonen



Streuung von Photonen

Beiträge zum Streukoeffizienten liefern:

Rayleigh-Streuung:

kohärente Streuung eines Photons am gesamten Atom:

$$\sigma_{\text{Rayl}} \sim Z^2 \dots Z^3$$

Thomson-Streuung:

elastische Streuung von Photonen an gebundenen Elektronen:

$$\sigma_T = 8 \frac{\pi}{3} r_e^2 = 8.38 \cdot (2.82 \cdot 10^{-15})^2 m^2 = 6.6 \cdot 10^{-29} m^2$$

Beiträge zum Absorptionskoeffizienten:

Photoeffekt, Compton-Effekt, Paarbildung

Photoeffekt

kinetische Energie der Elektrons:

$$E_{\text{kin}} = E_{\gamma} + E_{\text{B}}$$

E_{B} : Bindungsenergie des Elektrons

Wirkungsquerschnitt / Absorptionskoeffizient sind maximal für

$$E_{\gamma} \sim E_{\text{Bindung}}$$

Absorptionskoeffizient : Näherung

$$\tau_{ph} \sim \rho \left(\frac{Z}{E_{\gamma}} \right)^3 (1 + 0.008Z)$$

Absorptionskoeffizienten

Biologische Systeme: effektive Kernladung (Z_{eff})

Material	Z_{eff}	Z_{max}
Luft	7.64	8
Wasser	7.42	8
Muskel	7.42	8
Knochen	13.8	20
Fett	5.92	7

*nach R.G. Jaeger,
"Dosimetrie und Strahlenschutz"*

**unterschiedliche Z_{eff} für
Compton- und Photoeffekt**

Energieübetragung Ion - Materie:

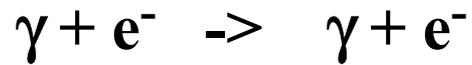
$$\sigma_{\text{photo}} \sim \frac{Z^{3...5}}{E_{\gamma}^{3...5}}$$

Auger-Effekt: $\text{Atom}_{\text{K}}^{+*} \rightarrow \text{Atom}_{\text{L,M}}^{++*} + e^{-}$

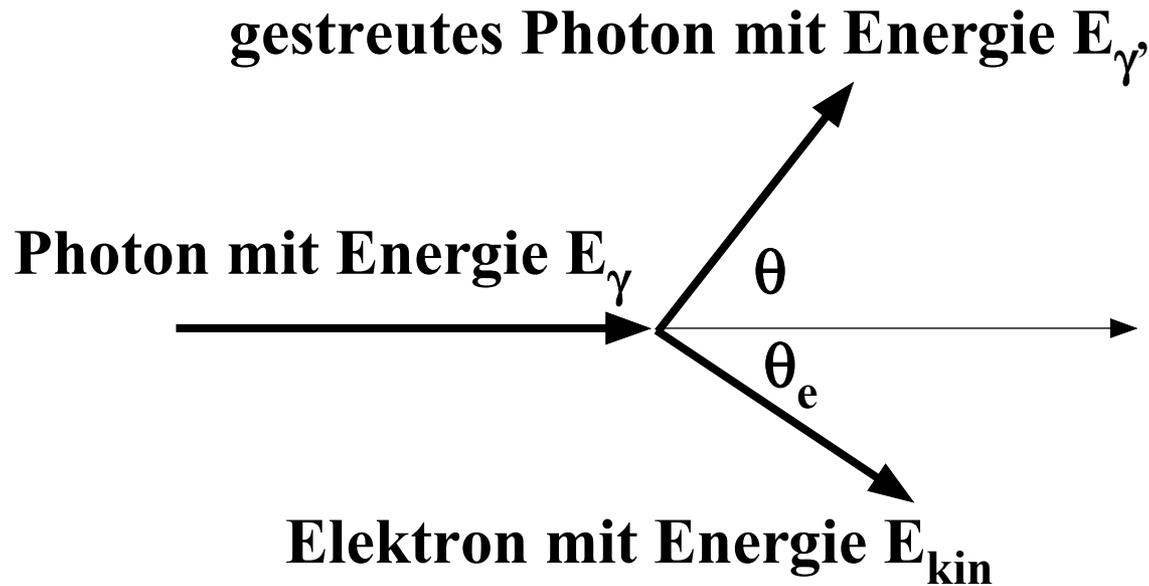
Fluoreszenz: $\text{Atom}_{\text{K}}^{+*} \rightarrow \text{Atom}_{\text{L,M}}^{+*} + \gamma$

**Auger-Elektronen besitzen sehr kleine Energien -> lokale Energiedeposition
Auger Effekt wichtig bei biologischen Systemen !**

Streuung an freien Elektronen:



Compton Effekt



von Bedeutung falls $E_\gamma \gg E_B$

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

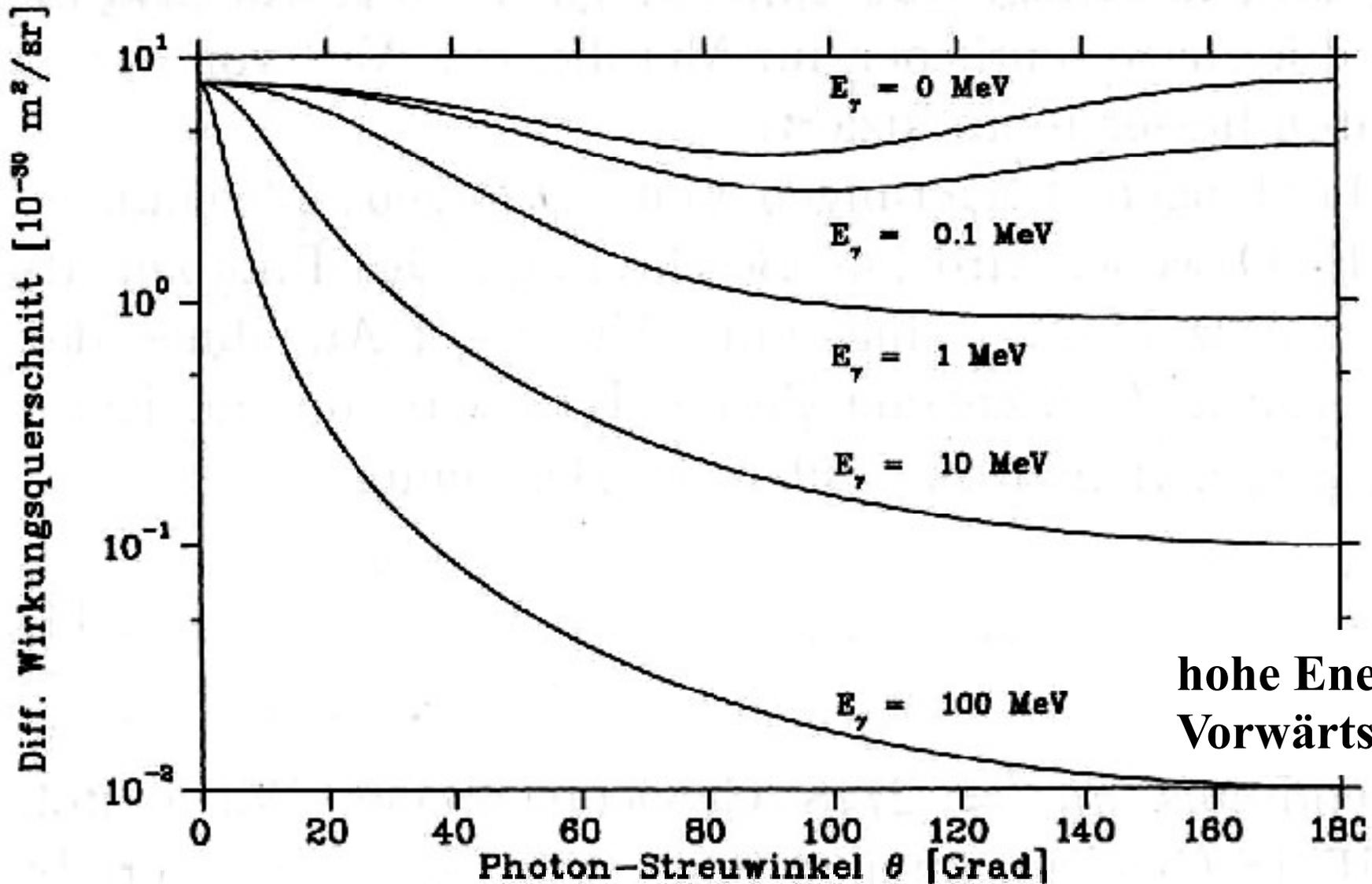
$$mc^2 = 0.511 \text{ MeV} = \text{Elektronenmasse}$$

Grenzfälle:

$$E_\gamma \rightarrow 0 : E'_\gamma \geq E_\gamma \left(1 - \frac{E_\gamma}{mc^2} 2\right) \quad E_\gamma \gg mc^2 : E'_\gamma^{Min} = \frac{mc^2}{2}$$

Diff. Wirkungsquerschnitt

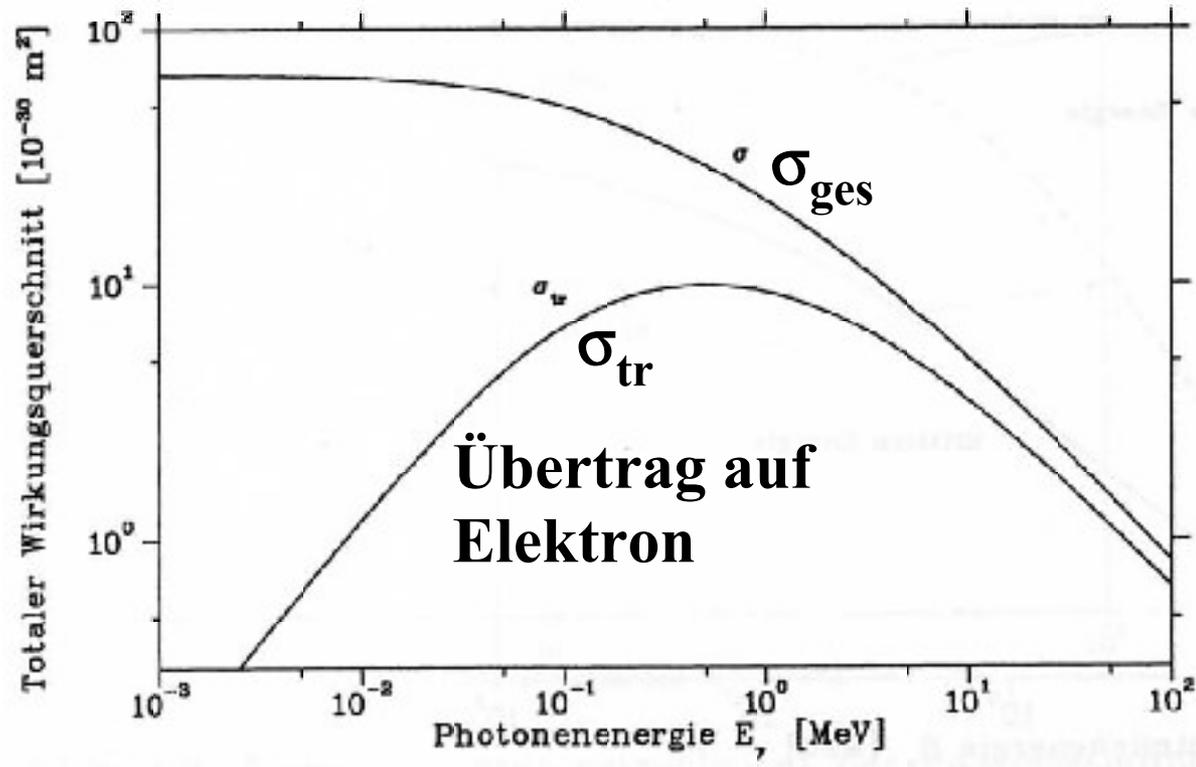
nach Klein u. Nishina



hohe Energie :
Vorwärtsstreuung

Energieaufteilung

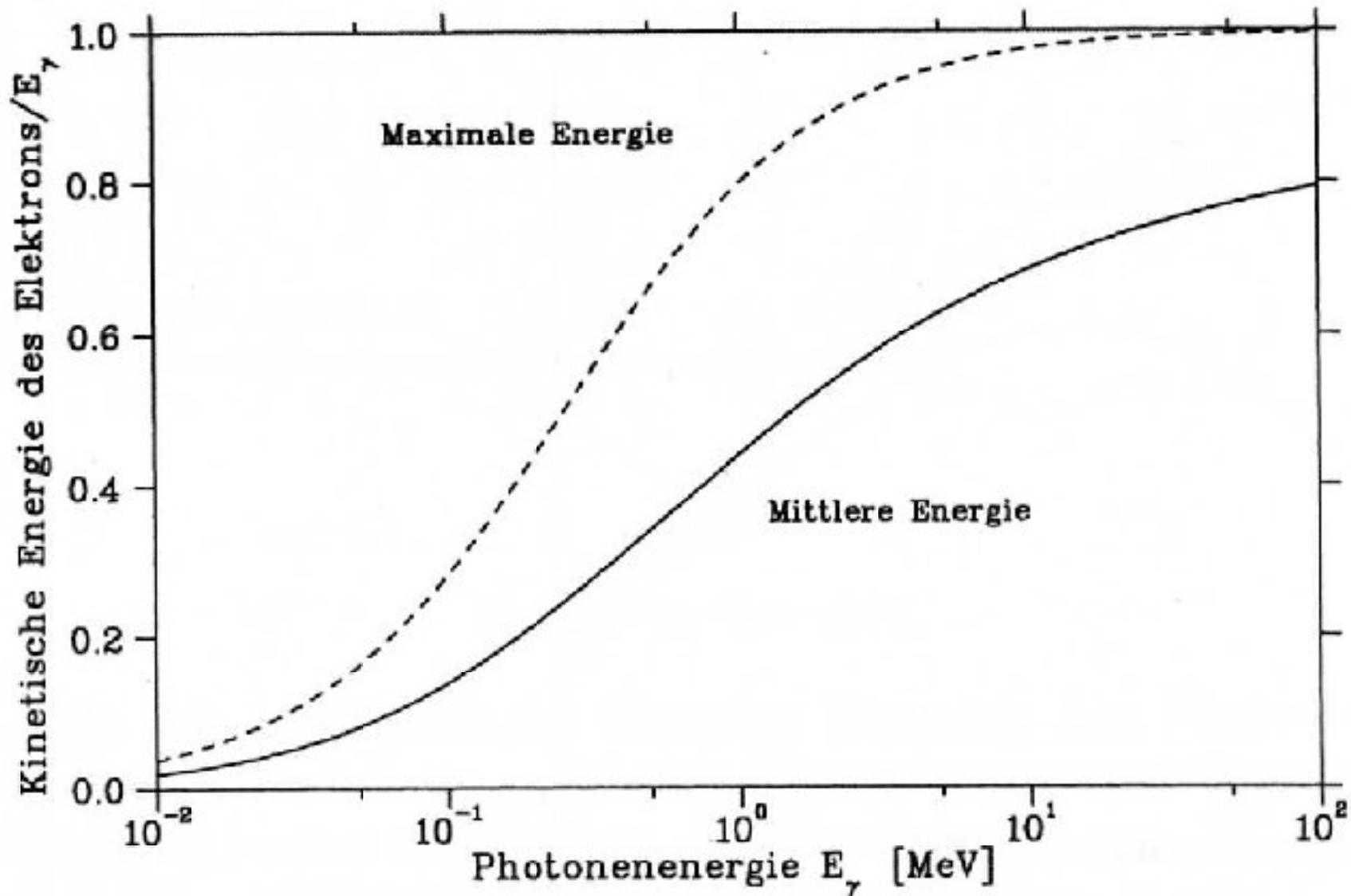
**Entscheidende Bedeutung für Bildgebung und Therapie:
wie wird die Energie aufgeteilt ?**



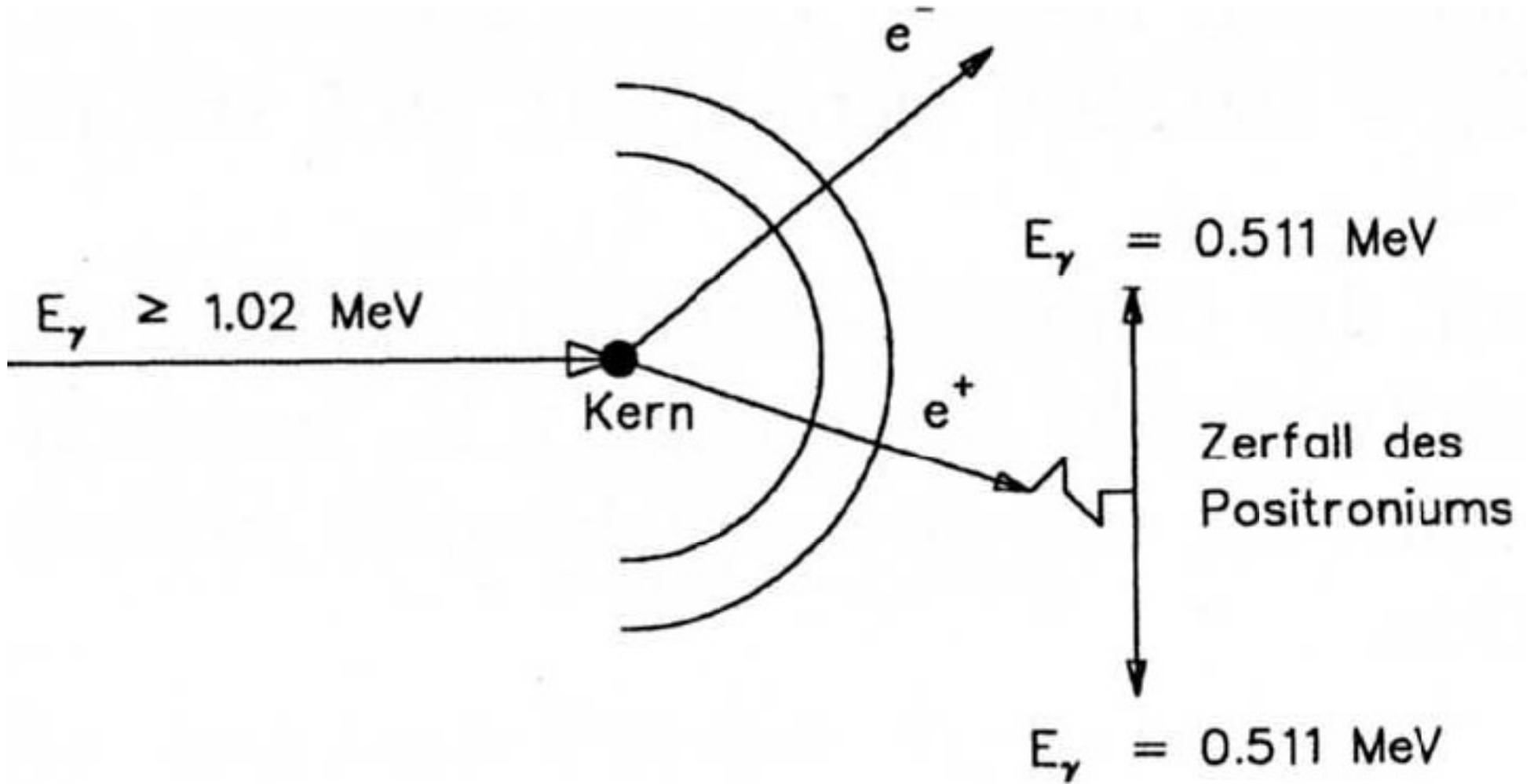
**niedrige Energie: gestreutes
Photon besitzt fast die
gesamte Energie**

**ab 10 MeV: Elektron besitzt
Hauptteil der Energie =>
verbleibt lokal im Gewebe**

Kinetische Energie des e^-



Paarbildung



Paarbildung

Nach Paarbildung:

Mittlere freie Weglänge Positron einige mm

Bildet mit Elektron eines Atoms ein “Positronium”

**Vernichtung Positronium
=> Vernichtungsstrahlung**

Massenschwächungskoeffizienten

Schwächungskoeffizient Röntgenstrahlen weitgehend \sim Dichte Material

\Rightarrow Def. Massenschwächungskoeffizient

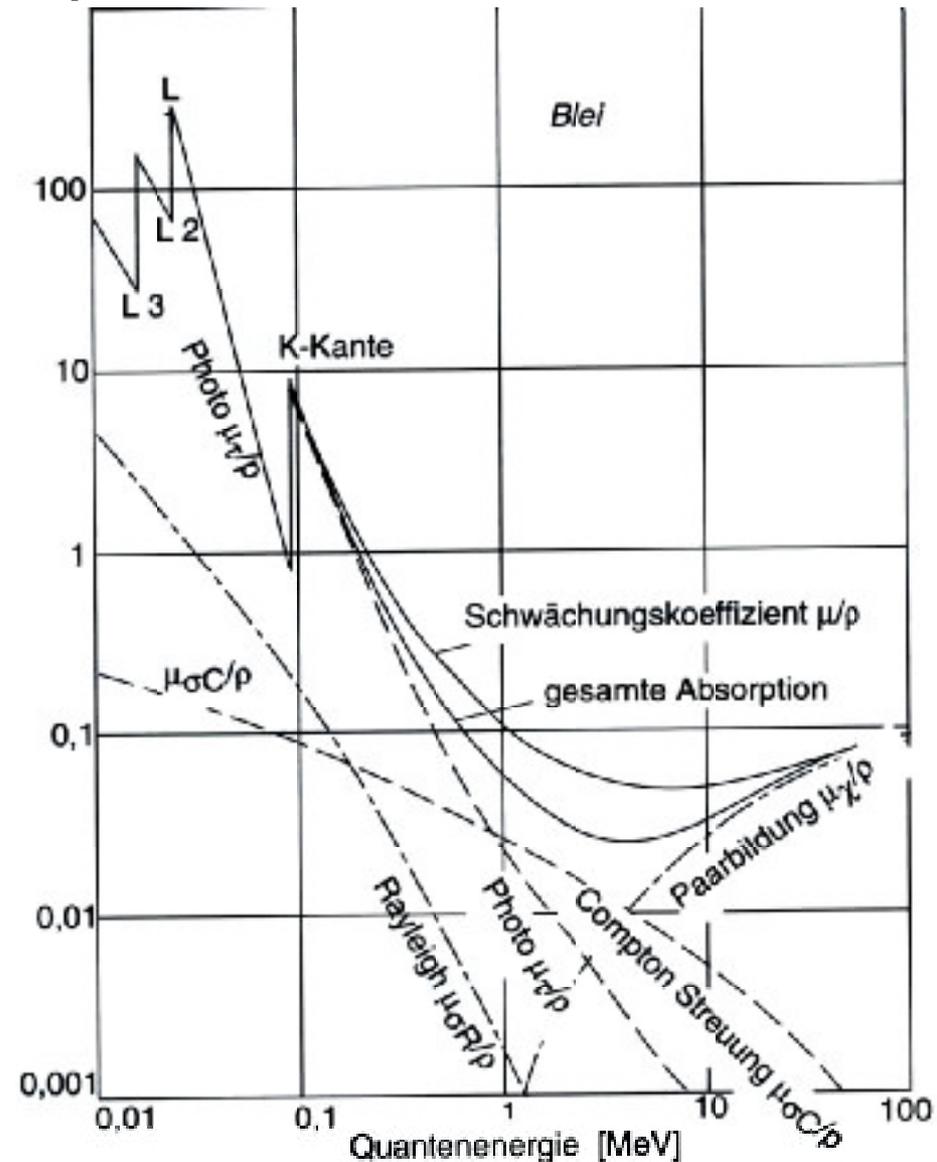
Blei / Wasser (0,01..100 MeV):

Diagnostischer Energiebereich

$\approx 0,1$ MeV

Blei: Photoabsorption überwiegt
(insb. K-Kante)

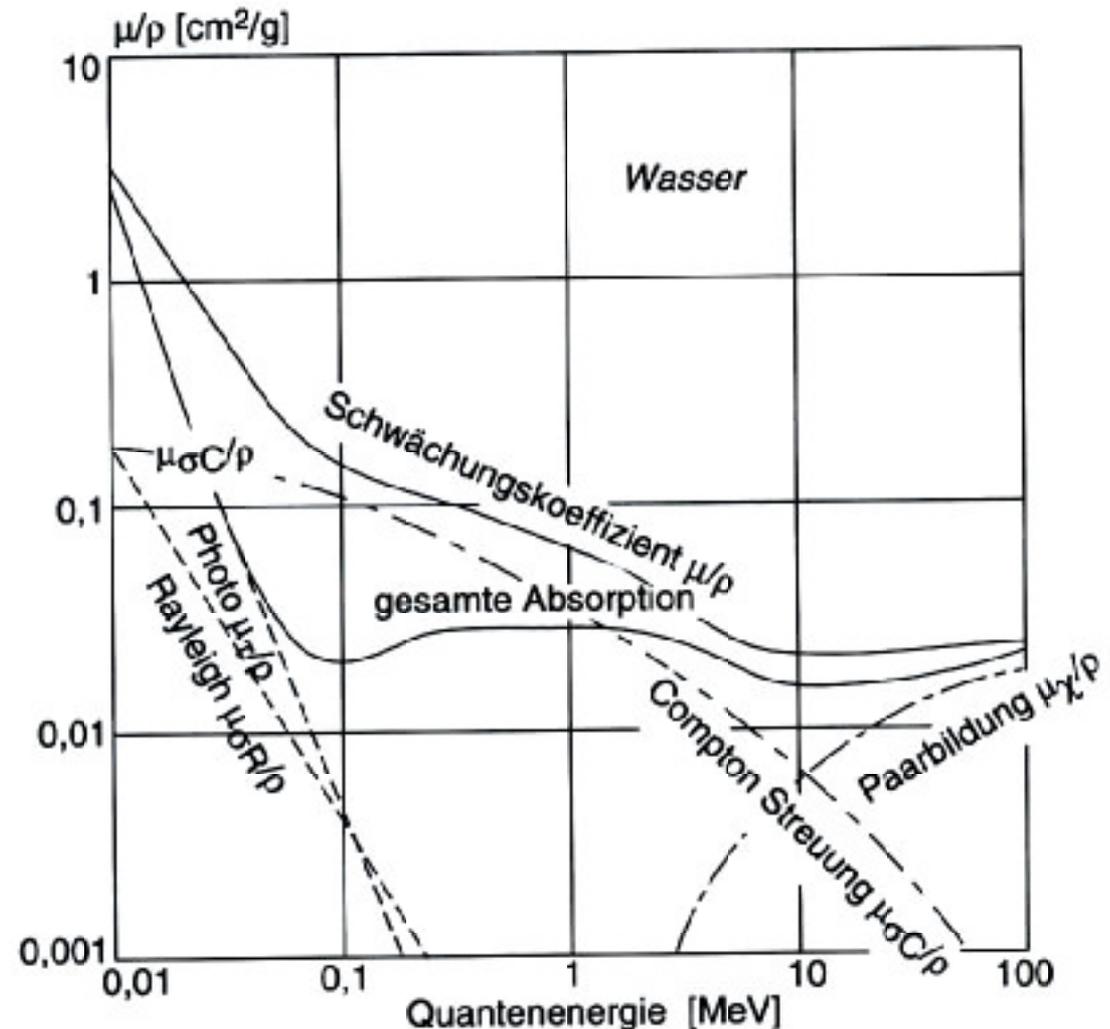
μ/ρ [cm^2/g]



Absorption in Wasser

Wasser: Compton-Streuung überwiegt => Streustrahlung!

Wasser ~ weiches Körpergewebe:



Bildgebung mit Photonen

Welche Photonenenergien sind am besten geeignet?

Für hohe Qualität des Transmissionsbildes:

- hohes Signal

Transmission Photonen durch 10cm Wasser-/Knochenschicht

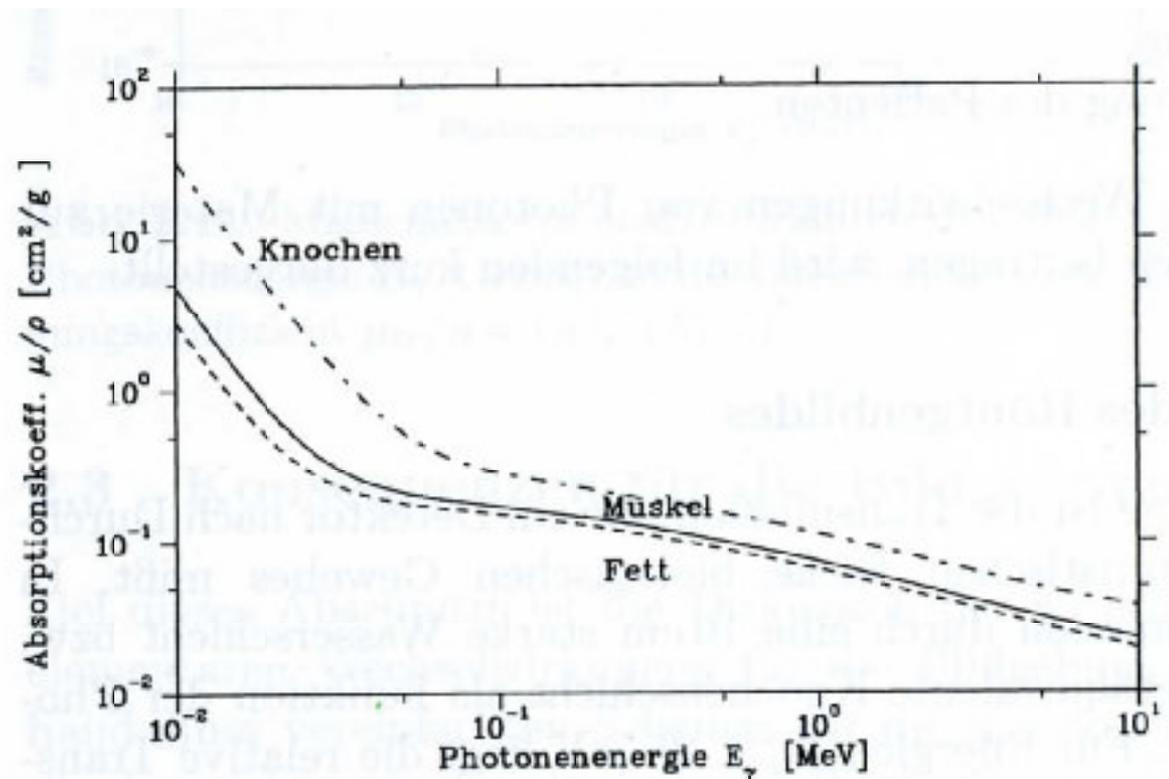
=> $E > 25 \text{ keV}$ (Photoeffekt, Compton-Effekt)

sonst Transmission $< 1\%$

- hoher Kontrast

Größter Unterschied μ/ρ bei kleinen Energien

(Photoeffekt $\sigma \sim Z^{3..5}$)



Bildgebung mit Photonen

- **hohes SNR**
Statistische Schwankung der #Photonen
Wegen Dosisbelastung max. # Photonen
begrenzt; => SNR begrenzt
- **hohe räumliche Auflösung**
- **wenig Streustrahlung**
Entsteht durch Compton-Streuung

Strahlenbelastung

- niedrige Dosisbelastung

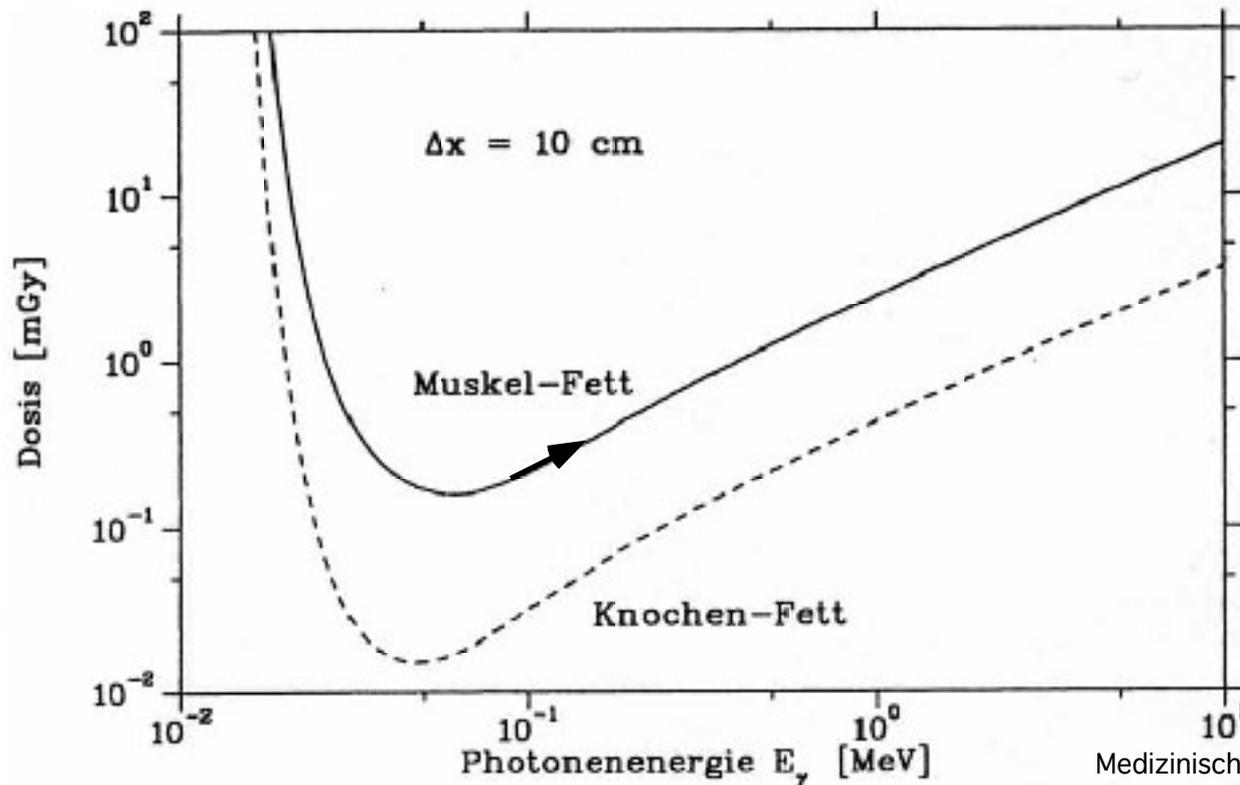
Dosisbelastung hängt stark von Photonenergie ab

=> es gibt ein Minimum!

=> Energetisches Fenster für Bildgebung $\approx 40..80$ keV

Mammographie: 25..30 kV

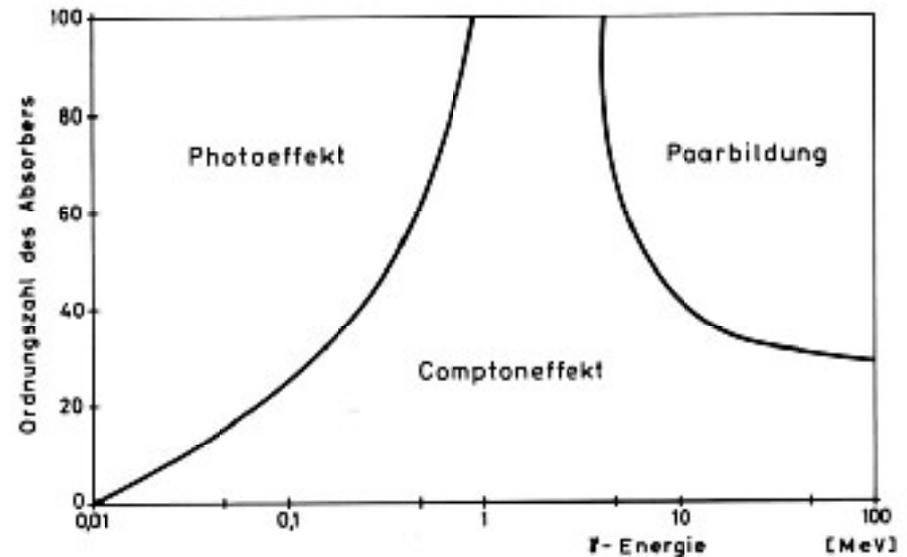
CT: 80..120 kV (dickere Gewebeschicht)



Strahlentherapie

Konsequenzen für Strahlentherapie mit Photonen

$E < 0.1$ MeV: Photoeffekt und Compton-Effekt dominieren
=> Energiedeposition schon in oberen cm Gewebe.
=> Photonen mit $E < 0.1$ MeV sind zur Behandlung tieferliegender Tumore ungeeignet.



Medizinische Physik, Band 2: Medizinische Strahlenphysik
J. Bille, W. Schlegel (Hrsg.)

Strahlentherapie

E = 0.1..1 MeV: Compton-Effekt dominiert

:-(>50% Energie in gestreuten Photonen

:-) Anteil der übertragenen Energie nimmt bei E > 1 MeV kontinuierlich zu (-> Dosisbelastung)

**Aber: Techn. Aufwand => 1.25 MeV (⁶⁰Co-Therapie)
bis 6 MeV (20 MV LINAC)**

Dosisberechnung: Bestimmung der durch Kaskaden von Photonen und Elektronen im Gewebe deponierten Dosis

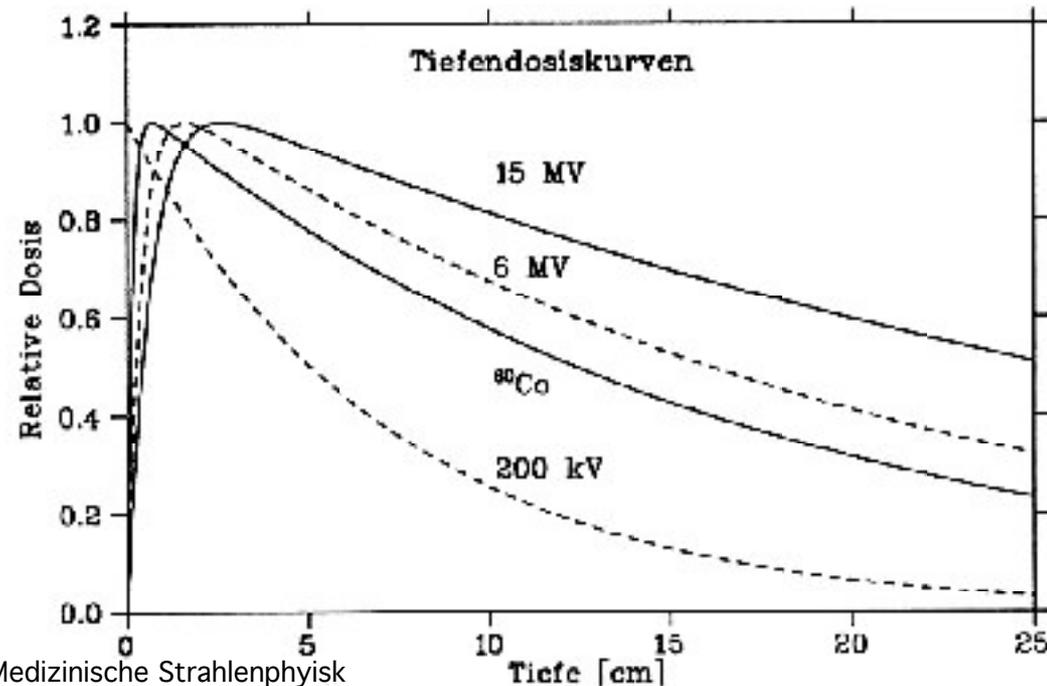
Aufbaueffekt:

e⁻: Energieverlust = -gewinn (ab gewisser Eindringtiefe)

Tiefer: Photoabsorption wirkt entgegen

=> Tiefendosiskurven besitzen

Maximum



Energiedeposition von Neutronen

Neutronen spüren keine Coulomb-Kraft \Rightarrow Streuung/Einfang von langsamen Neutronen

Wechselwirkung n - Atomhülle ist magnetisch;
für medizinische Aspekte vernachlässigbar

$$V_{\text{Hülle}} \sim 500 \text{ neV}$$
$$V_{\text{Kern}} \sim 5 \text{ MeV}$$

Energieübertrag bei Stoßprozess:

Für n - p Stoß:

$$\Delta E = \frac{4 \frac{m_N}{M_K}}{\left(1 + \frac{m_N}{M_K}\right)^2} E_n \cos^2 \theta$$

$$\Delta E = E_n \cos^2 \theta$$

Mittelung über die Winkel im Schwerpunktsystem, für isotrope Streuung

$$\Delta E = \frac{E_n}{2}$$

Wirkungsquerschnitt

Abschätzung: Absorption ~ Aufenthaltsdauer

$$\sigma \propto \frac{1}{v} \propto \frac{1}{\sqrt{E_n}}$$

Zahlenwerte für $E_n = \frac{3}{2}kT \sim \frac{1}{40} \text{ eV}$

	$\sigma_{\text{Streu}}[\text{barn}]$	$\sigma_{\text{abs}}[\text{barn}]$	Prozeß
${}^1_1\text{H}$	38	0,33	(n, γ)
${}^{12}_6\text{C}$	4,8	0,032	(n, γ)
${}^{14}_7\text{N}$	10	1,75	(n, p)
	4,2	0,13	(n, γ)
${}^{16}_8\text{O}$		0,0002	(n, γ)

Bethe-Bloch Formel

Energieübertag für schwere geladene Teilchen

$M \gg m$, Ladung z

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi z^2 r_e^2 \frac{mc^2}{\beta^2} \frac{N_A \rho Z}{m_{mol}} \left\{ \ln \frac{2mc^2 \beta^2}{I(1 - \beta^2)} - \beta^2 \right\}$$

Typische Werte LET für einige Strahler (g/cm³)

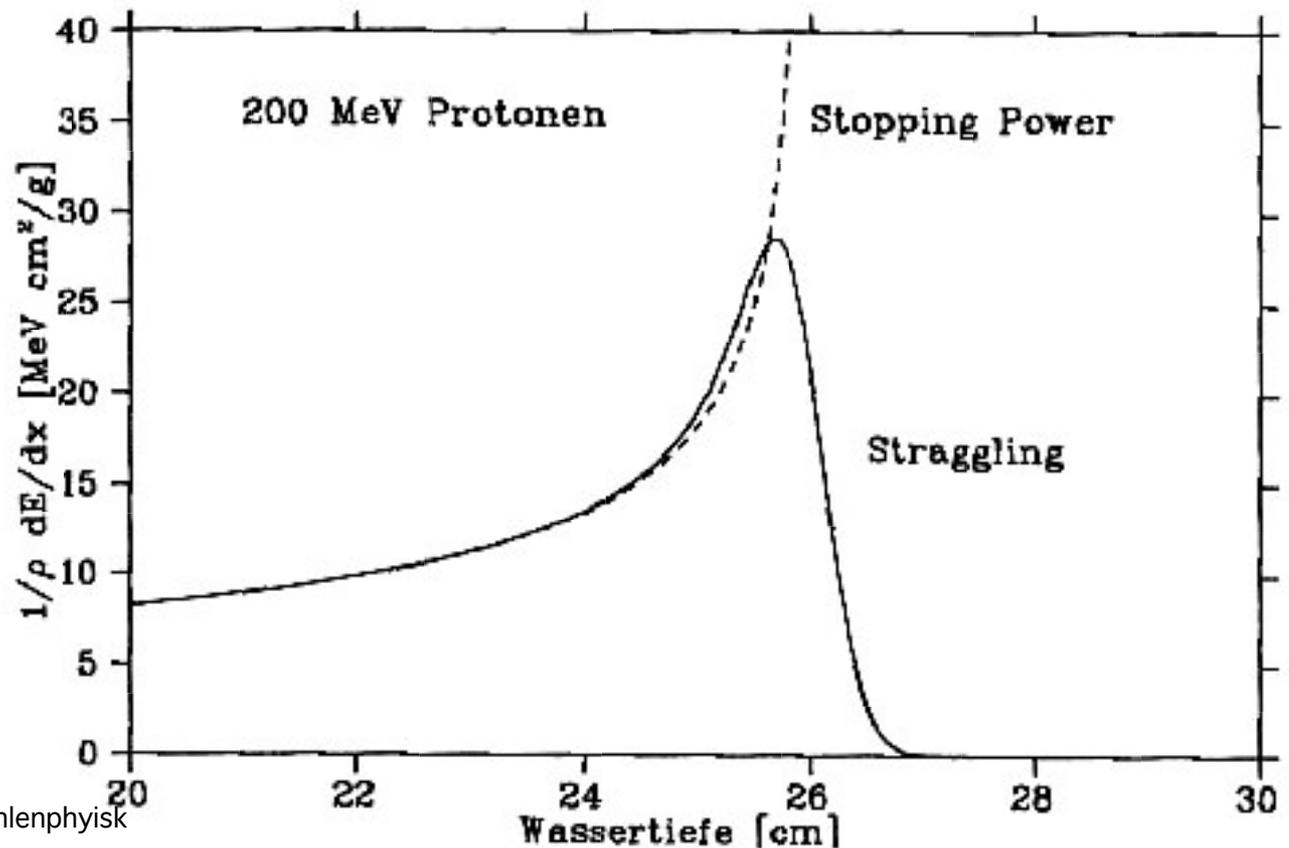
Strahler	keV/μ
8 MeV γ	0,2
⁶⁰ Co γ	0,3
200 keV γ	2,5
340 MeV p	0,3
2 MeV p	17
27 MeV α	25
5 MeV α	90
3.4 MeV α	130
100 MeV C ⁶⁺	160
160 MeV Ne ¹⁰⁺	450
330 MeV Ar ²⁰⁺	1300

Strahlentherapie

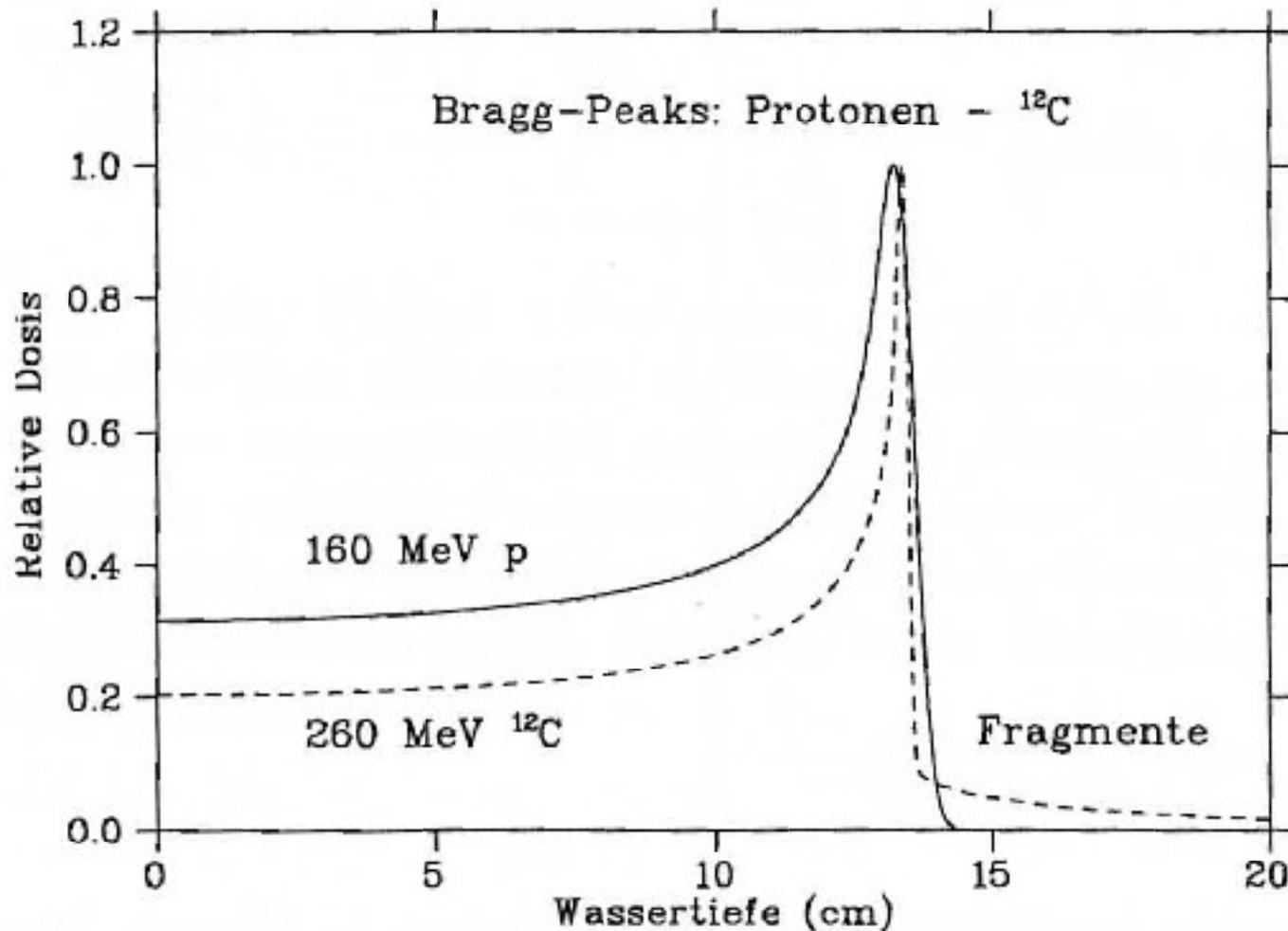
Konsequenzen für Strahlentherapie mit geladenen, schweren Teilchen

Protonen und leichte Atomkerne als Projektile

Tiefendosiskurve für 200 MeV Protonen in Wasser



Schwere Ionen



Medizinische Physik, Band 2:
Medizinische Strahlenphysik
J. Bille, W. Schlegel (Hrsg.)

**Vgl Tiefendosiskurve Protonen / schwere Ionen (^{12}C)
=> schwere Ionen: bessere Dosiskonformation im Zielvolumen
aber: Fragmentierung => Dosisuntergrund nach Bragg-Peak)**

Energieverlust von Elektronen

modifizierte Bethe-Bloch Formel:

$$-\frac{dE}{dx} \Big|_{Stoss} = 2\pi r_e^2 \frac{mc^2}{\beta^2} \frac{N_A \rho Z}{m_{mol}} \left\{ \ln \frac{\tau^2 (\tau + 2)}{2(I/mc^2)^2} + F(\tau) \right\}$$

mit

$$\tau = \frac{T_{kin}}{mc^2}$$

$$F(\tau) = 1 - \beta^2 + \frac{\tau^2/8 - (2\tau + 1) \ln z^2}{(\tau + 1)^2}$$

Energieverlust durch Bremsstrahlung

$$-\left. \frac{dE}{dx} \right|_{\text{Bremsstrahlung}} = 4Z^2 \frac{N_A \rho}{m_{\text{mol}}} r_e^2 E \ln \frac{183}{Z^{1/3}}$$

Kritische Energien ε_c

Material	ε_c [MeV]	X_0 [cm]
Pb	9.5	0.56
Fe	27.4	1.76
Polystyrol	109	42 (Szintill.) 109
Wasser	92	36

Sekundärelektronen

werden erzeugt durch Stöße.

Voraussetzung:

- Primärteilchen hat hinreichend hohe Energie
- Vorbeiflug dicht am Molekül

Hohe Energien => Bindungsenergie vernachlässigbar

$$\frac{d^2w}{dE dx} = 2mc^2 \pi r_e^2 \frac{z^2}{\beta^2} Z \frac{N_A \rho}{m_{mol} A} \cdot \frac{1}{E^2}$$

Stoßparameter

$$b = \sqrt{2mc^2 \frac{z^2 r_e^2}{\beta^2} \frac{1}{E}} = \sqrt{10^6 eV \frac{(2.8 fm)^2}{10^{-4} \cdot 10^2}} = 28 pm$$

Häufigkeiten

70% der Primärenergie wird auf Sekundärteilchen übertragen

Sekundärteilchen haben meist geringe Energie

=> kurze Reichweite

=> Primärionisationshaufen - cluster

Typische Häufigkeitsverteilung:

Ionenpaare	Häufigkeit
-------------------	-------------------

1	63,3%
---	-------

2	20,4%
---	-------

3	9,2%
---	------

≥ 4	7,1%
----------	------

Dosimetrische Grundbegriffe

Ursache:

Aktivität A (Präparatstärke)

Quellstärke: Aktivität, die tatsächlich aus Quelle heraustritt

Wirkung:

Dosis, Dosisleistung

Zusammenhang:

$dD/dt \approx k * A / r^2$ (Punktförmige Quellen oder weit weg)

-> spezifische Gammastrahlenkonstante $\Gamma = k / (4 \pi)$

Wirkung auf biologisches Material:

Äquivalentdosis (-leistung) $H = Q * D$

Ursache hier: Im Gewebe deponierte Energiedichte -> LET

Dosimetrische Größen

Energiedosis

$D = \text{absorbierte Energie} / \text{Masse} = dW / dm$

Einheit: Gray (Gy) $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} / \text{kg}$

früher: Rad (rd) $1 \text{ rd} = 10^{-2} \text{ Gy}$

Energiedosisleistung

Energiedosis / Zeit = dD / dt

Einheit: Gy / s

Ionendosis (besonders
bei Röntgenstrahlung
noch in Gebrauch)

$J = \text{gebildete Ladungsmenge} / \text{Masse} = dQ / dm$

Einheit: C / kg

früher: Röntgen (R) $1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C} / \text{kg}$

Ionendosisleistung

$j = dJ / dt$

Einheit: A / kg

Äquivalentdosis

$H = Q \cdot D$

$Q = \text{strahlenabhängiger Bewertungsfaktor}$

Einheit: Sievert (Sv) $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J} / \text{kg}$

früher: rem $1 \text{ rem} = 10 \text{ mSv}$

Äquivalentdosisleistung dH / dt

Einheit: Sv / s

Strahlenschäden

Strahlenschäden resultieren aus Anregung, Ionisation und Dissoziation von Atomen und Molekülen

Früher höhere natürliche Strahlenexposition => Hinweis auf sich nicht vermehrende Schäden

**Mittlere jährliche Strahlenbelastung des menschlichen Körpers
≈ 2 mSv (interne & externe Bestrahlung durch natürliche Quellen)
(m = 75 kg; 30 eV mittlere Ionisationsenergie Gewebe/Wasser)
=> 1 Milliarde Ionisationsprozesse pro Sekunde und Körper!**

=> Hinweis auf hochwirksame Reparaturmechanismen

Strahlenschäden = DNS-Mutation (≈ 6% der natürlichen Mutationsrate!)

**Biologische Strahlenwirkung ist von der Dosisleistung abhängig
(Ungültigkeit der Produktregel; Zeit * Intensität ≠ Wirkung)**

**Es gibt auch Hinweise auf biopositive Strahlenwirkung (Hormesis)
-> induzierbare Reparaturenzyme!**

Wirkung auf Zellen

Wechselwirkung ionisierender Strahlen mit biologischen Objekten

Stark unterschiedliche Zeitskalen!

Physikalische Vorgänge

(10^{-18} - 10^{-12} s)

Ionisation, Dissoziation und Anregung durch den absorbierten Strahlenanteil

Direkter Effekt, Energieabsorption direkt im biologischen Molekül (dieser Prozeß ist sehr unwahrscheinlich)

Indirekter Effekt, Energieabsorption in der Umgebung, z. B. H_2O (dieser Prozeß findet in der Praxis statt)

Direkt angeregte; ionisierte oder dissoziierte biologische Moleküle

Dissoziierte oder ionisierte Moleküle (insbesondere des Zellwassers o.ä.)

Chemische Vorgänge

(10^{-12} -1 s)

Radikale

diffusible Radikale

Reaktion mit z.B. Nukleinsäuren

molekulare Veränderungen

Biologische Phase

(bis mehrere Jahre)

Stoffwechsel

Mutationen

Stoffwechsel

Strahlenspätchäden (Krebs)

submikroskopische Schäden

sichtbare Schäden

Zelltod

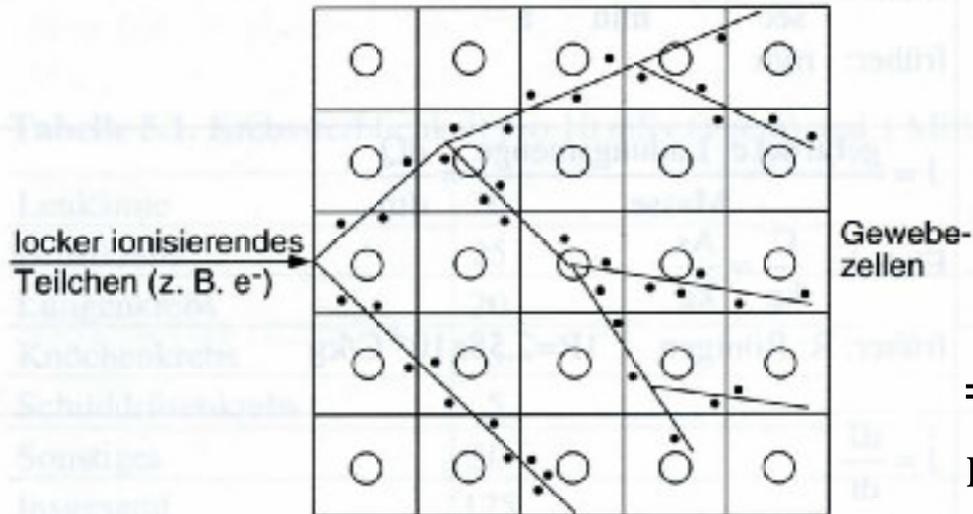
Tod des Organismus

Störungen in der Elektronehülle

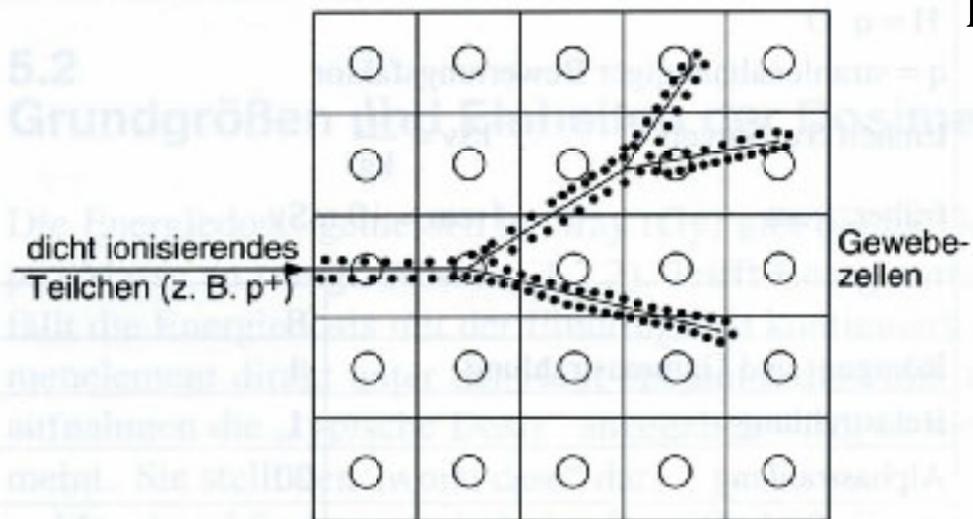
- **Anregung**
(kann zu Instabilität/Schäden führen)
- **Ionisation**
(größte Wahrscheinlichkeit für
hochenergetische Strahlung
=> “ionisierende Strahlung”)
- **Dissoziation**
(meist Sekundärprozeß;
bewirkt letztendlich die
biologische Schädigung!)

Wirkung der Strahlung

Grotthus-Drapersches "Gesetz": Nur der absorbierte Teil der auf ein biologisches Objekt treffenden Strahlung wird wirksam.



=> Unterschiedliche Strahlungsarten rufen unterschiedliche # an biologisch wirksamen, geladenen Teilchen in Zelle hervor



Biologische Wirkung

Maß für zu erwartende biologische Wirkung:

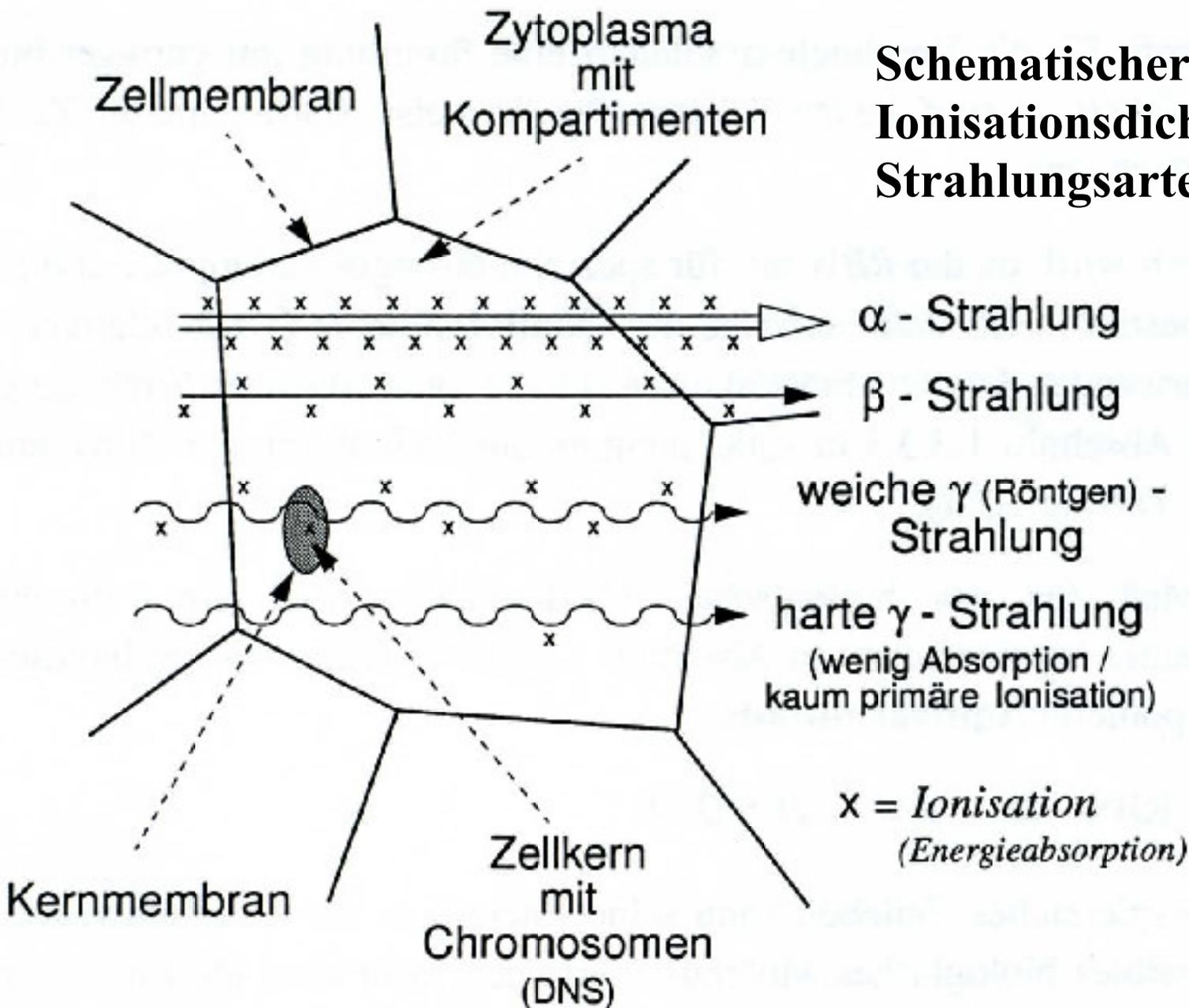
Ionisationsdichte := # Ionisationen entlang Weg durch eine Zelle

-> Meßtechnisch schwer zu erfassen

=> Linearer-Energie-Transfer LET

=> Ionisationsdichte rechnerisch ermittelbar

Ionisationsdichte



Schematischer Bau einer Zelle und Ionisationsdichte verschiedener Strahlungsarten

Definition LET

DIN 6814-z (oder Int. Commission of Radiation Units (ICRU), Publication Nr. 40):

Der Lineare Energietransfer (LET) geladener Teilchen in einem Medium ist der Quotient aus dem mittlerem Energieverlust dE , den das Teilchen durch Stöße erleidet, bei denen der Energieverlust kleiner als eine vorgegebene Energie Δ ist, und dem dabei zurückgelegten Weg des Teilchens ds :

$$\text{LET} = L_{\Delta} = (dE/ds)_{\Delta}$$

Beschränkung auf Δ ist wichtig um Infos über die lokal dichte Wirkung benachbarter Ionisationsstöße zu erhalten, die für die Schädigung von Zellen verantwortlich sind.

LET < 3.5 keV/ μm : locker (weich) ionisierende Strahlung

LET > 3.5 keV/ μm : dicht (hart) ionisierende Strahlung

Weitere Faktoren

Biologische Wirkung kann nicht allein durch LET prognostiziert werden!

Berücksichtigt werden muss:

- **Physiologischer und cytologisch-morphologischer Zustand der Zelle**
- **Räumliche und zeitliche Verteilung der Dosis**
- **...**

Biologische Wirksamkeit

=> Relative Bezugsgröße einführen; Vergleich mit definierter Strahlenquelle:

Relative biologische Wirksamkeit $RBW_u = (D_{ref} / D_X)_u$

einer Strahlungsart X, die das gleiche biologische Bestrahlungsergebnis u ergibt (z.B. % für Überlebensfähigkeit einer Zellenart)

D_{ref} : Referenz-Energiedosis; meist 250 keV Röntgenstrahlung oder Co-60-Gammastrahlung=> RBW meist > 1

Nachteil RBW: nur für spezielle biologische Objekte und Strahlungsarten definiert

=> In der Praxis Verwendung des Qualitätsfaktors Q
Festlegung per Konvention

Maß für biologisches Schädigungspotential:
Im biologischen Objekt deponierte Äquivalentdosis

$$H = RBW * D$$

bzw.

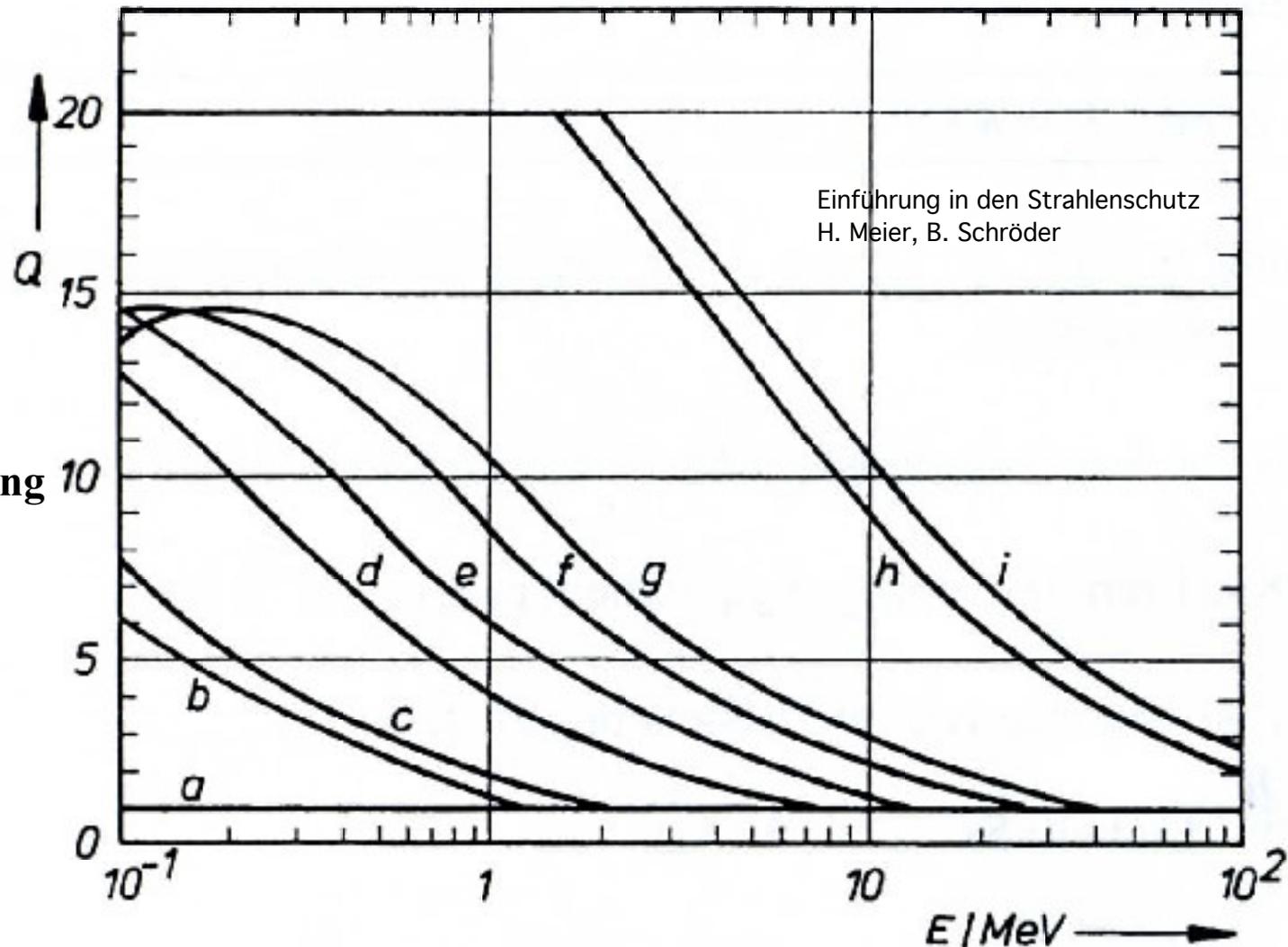
$$H = Q * D$$

LET vs. Q

Genauer Zusammenhang zwischen LET und Q wird immer noch durch die ICRP (International Commission of Radiation Protection) diskutiert.

Abhängigkeit Q
verschiedener Teilchen
von ihrer kinetischen
Energie:

- a: e^- , Röntgen-, Gammastrahlung
- b: Myonen
- c: π^- -Mesonen
- d: K-Mesonen
- e: Protonen
- f: Deuteronen
- g: Tritonen
- h: ^3He -Ionen
- i: Alphateilchen



Verschiedene Definitionen

Gegenüberstellungen Q verschiedener Institutionen und Zusammenhang mit LET:

Strahlungsart	Q-(neuer Q ¹ -)Faktor			LET (L _∞ in H ₂ O) [keV / μm]
	ICRU 40	ICRP 60	StrlSchV	
Photonen	1 (E>30keV)	1 (pauschal)	1	≤3,5
Elektronen	1 (E>30keV)	1 (Ausnahmen)	1	≤3,5
Protonen	25 (pauschal)	1 (Ausnahmen)	5 (E>2MeV)	3,5...≈200 (je
α-Teilchen	25 (pauschal)	20 (Ausnahmen)	20	nach
Neutronen	25 (pauschal)	5-20 (je nach E)	5-20 (je nach E)	Energie)
schwere Kerne	25 (pauschal)	20	20	s. groß (?)

	Strahlenart	Energie [MeV]	LET [keV/μm]	QF
großer LET	α-Strahlen	5,0	bis 200	20
	schnelle n	6,2	bis 200	20
	Protonen	2,0	bis 200	5
kleiner LET	Rö-Strahlen	0,2	2,5	1
	60-Co-γ-Str.	1,25	0,3	1
	β-Strahlen	2,0	0,3	1

Direkte Wirkung

Wegen ihrer molekularen Masse und des mengenmäßig häufigen Vorkommen sind 4 Arten von Makromolekülen einer Zelle besonders treffergefährdet:

1) Proteine:

Relativ geringe Gefahr der strahlungsbedingten Denaturierung (Verlust der notwendigen Konfiguration für die Funktion); Defekte (auch intakte) Moleküle werden unterschiedlich schnell durch Abbau & Neusynthese ersetzt (turnover)

2) Polysaccharide:

Extrem strahlungsresistente Verbindungen; mögliche chemische Veränderung in der Regel ohne Folgen für Stoffwechsel

3) Lipide:

**Mögliche Bildung von Peroxiden => Permeabilitätsstörungen
Schaden jedoch meist gering**

Wirkung auf DNS

4) Nukleinsäuren:

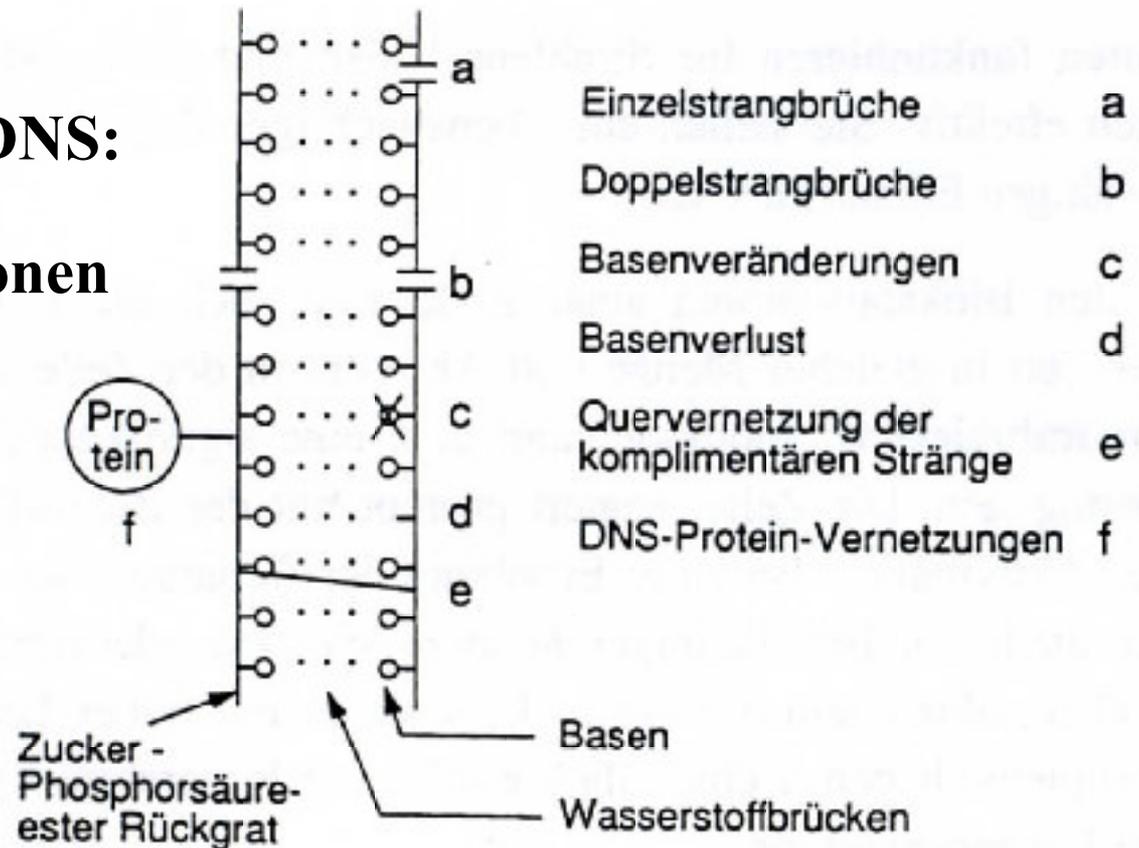
Labilste biologische Moleküle;

Entscheidend für die Auswirkung ionisierender Strahlung auf die Zelle!

**Mutation: Sprunghafte und irreversible Veränderung des Genoms
muß nicht von Nachteil sein (-> Evolution)**

**Übersicht über
Schädigungsmöglichkeiten der DNS:**

**Nur 6% der natürlichen Mutationen
auf Grund von Strahlung!**



Reparaturmechanismen

Selbst sehr primitive Lebewesen besitzen Reparaturmechanismen:

- turnover

Alle lebenswichtigen Makromoleküle werden nach einer gewissen Funktionsdauer wieder in Bausteine zerlegt und gleichzeitig durch Neusynthese ersetzt.

(Bsp.: Im Genom des Menschen werden pro Tag mehrere 1000 Basen spontan entfernt und durch neue ersetzt)

- Strahlenschutzstoffe

Insbes. SH-Gruppen-haltige Aminosäuren wie Cystein und Methionin

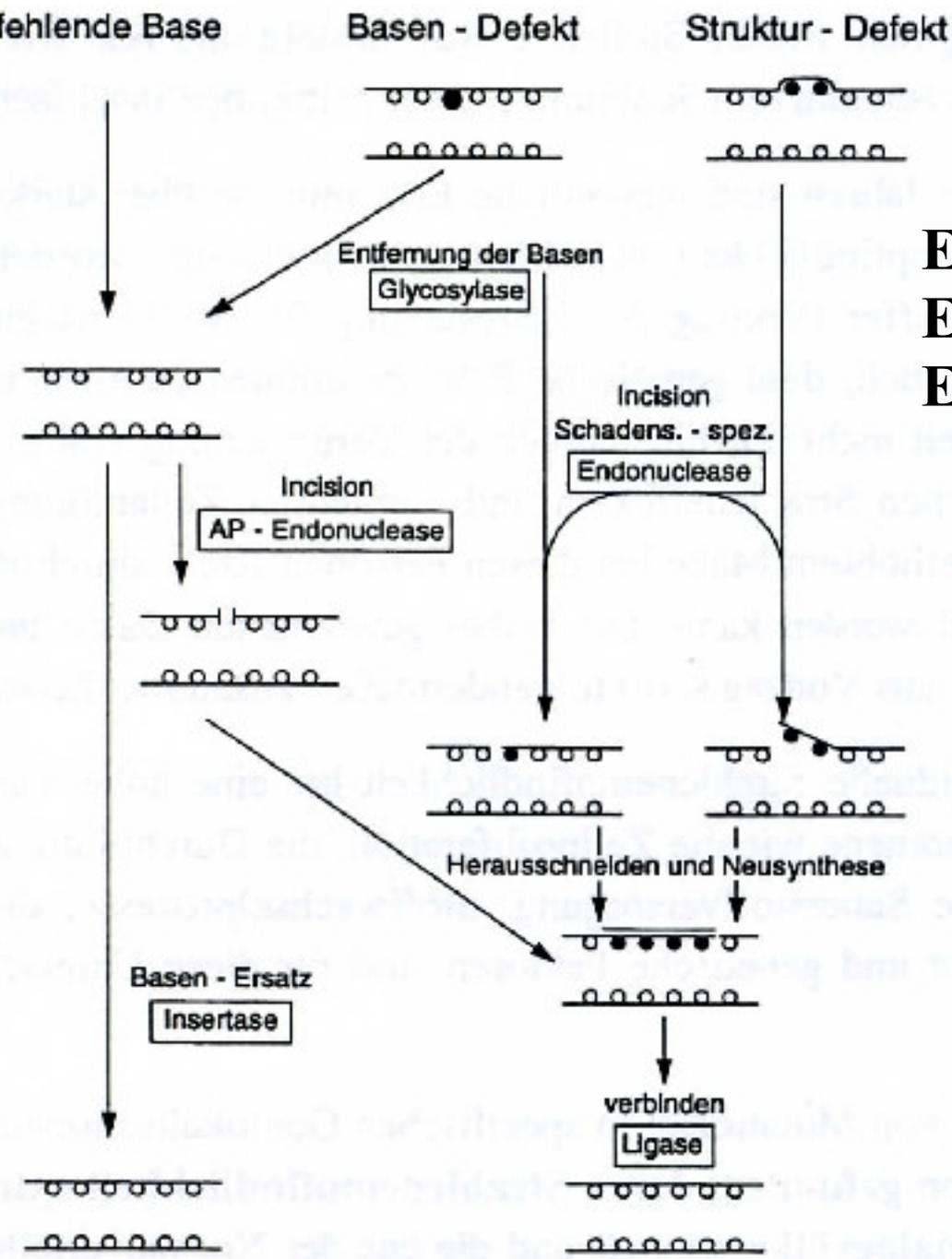
SH-Gruppen werden leicht oxidiert

OH⁻-Radikalfänger

Auch bei alkoholischen Verbindungen R-OH

Funktionsweise Reparaturenzyme:

DNS Reparatur



reparierte DNS

Enzymatische DNS-Reparatur
Effektivster Mechanismus zur
Eindämmung zu hoher Mutationsraten

Reparaturen funktionieren für alle Schäden gleich effektiv

Reparaturenzyme sind nicht zu jeder Zeit in gleicher Menge und Aktivität in Zellen enthalten; sie sind induzierbar.

=> Erhöhung der Reparaturrate durch beschleunigte Neusynthese oder reduziertem turnover

=> Biopositive Wirkung (Hormesis)

Hormesis



**Untersuchungen von Anwendungen in den Radiumbädern in Böhmen, Radon-Stollen in Bad Gastein und Bad Kreuznach
Radioaktive Schlamm packungen auf Ischia**

Hormesis-Effekt ev. bei locker ionisierender Strahlung (α , n)

Aber auch: Starke Unterschiede in der Strahlungsempfindlichkeit von Menschen (Faktor 10 !)

Keine Hormesiseffekte bei Personen mit erhöhter Strahlenempfindlichkeit (z.B. wegen eingeschränkten DNA-Reparatursystemen)

Produktregel

Ungültigkeit der Produktregel

Intensität * Zeit \neq Wirkung
(0.01 Sv * 100 h \neq 1 Sv * 1 h)

- **Induzierbarkeit der Reparaturenzyme**
- **Es wird Zeit benötigt (1..2 Std. nach Beginn der Induktion)**

Unterscheidung der Bestrahlung in der Strahlenmedizin:

- **Einmalige Dosis**
Aufnahme der Dosis in kurzer Zeit -> größte Wirkung pro Doseinheit
- **Fraktionierte Dosis**
Kleine Einzeldosen -> Erholung/Reparatur in Bestrahlungspausen möglich
Wird in Therapie-Praxis angewendet
(um gleiche Wirkung auf bösartige Zellen zu erzielen wird höhere Gesamtdosis benötigt als bei einmaliger Anwendung)
- **Protrahierte Dosis**
Länger dauernde Bestrahlung mit niedriger Dosisleistung.
Erholungs-/Reparaturfähigkeit erhöht (verglichen mit einmaliger Dosis)

Indirekte Strahlenwirkung

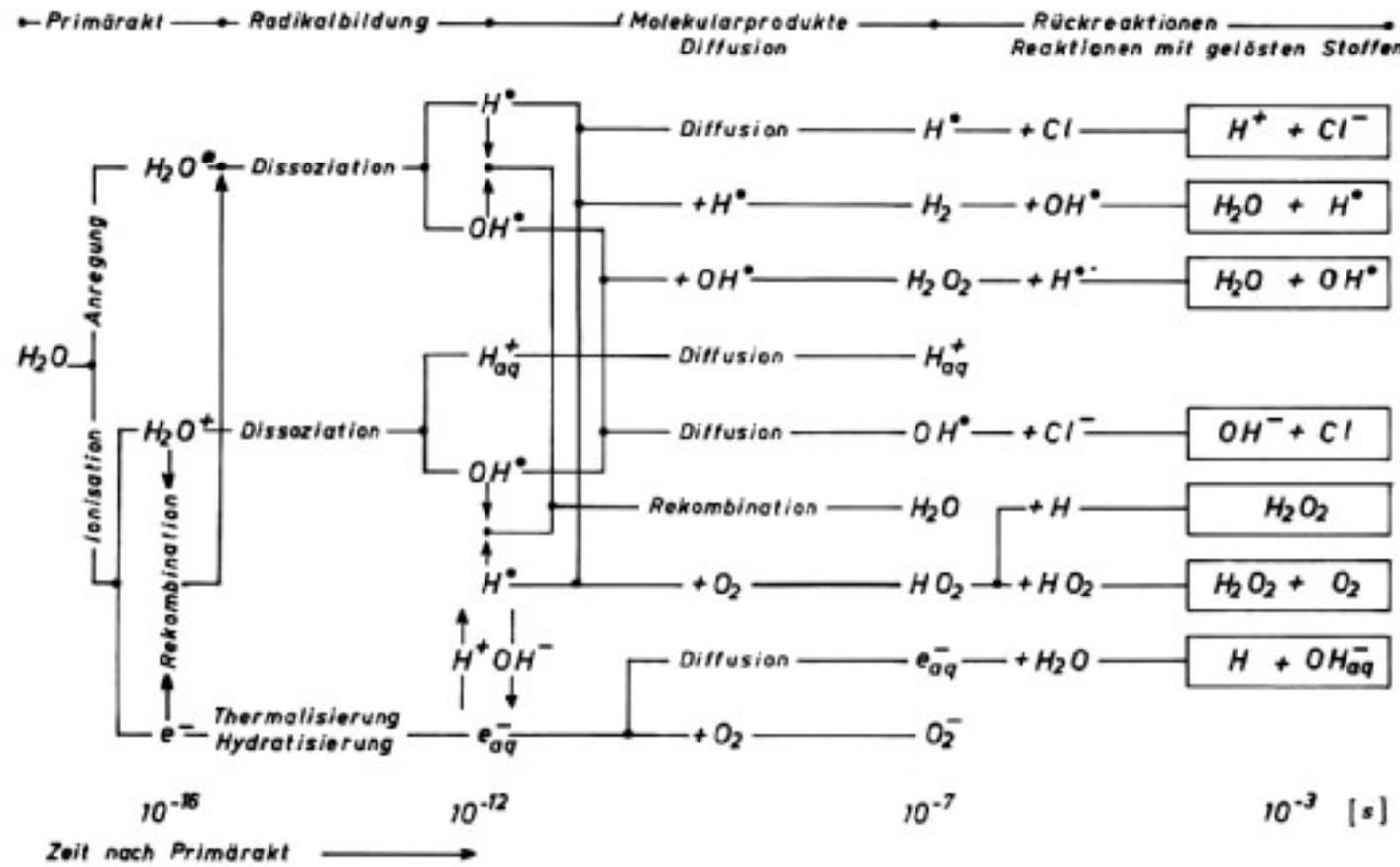
Wegen mengenmäßigem Vorherrschen in allen Lebewesen ist Wasser der bedeutendste Energieüberträger.

Primärreaktionen: - Ionisation (Dissoziation, indirekte Radikalbildung)
 - Dissoziation (direkte Radikalbildung)

=> diffusible Radikale (hauptsächlich aus H_2O und H_2O_2)

=> sekundär wird die Strahlungsenergie an Makromoleküle weitergegeben

OH[•]-Radikale dominieren bei der biologischen Strahlenwirkung!



Strahlenwirkungen

Stochastische Strahlenwirkung:

- **Wahrscheinlichkeit des Auftretens von erkennbaren Strahlenfolgen direkt proportional zur Dosis.**
- **Schwellendosis existiert nicht.**

Nichtstochastische Strahlenwirkung:

- **Schwere der Folgeerscheinungen direkt proportional zur Strahlendosis.**
- **Individuelle Schwellendosis existiert.**

Mögliche Folgen:

- **Genetische Strahlenschäden**

Genetische Mutationen betreffen Keimzellen von Individuen.

Übertragung genetischer Schäden auf 1. Filialgeneration konnte beim Menschen noch nicht nachgewiesen werden.

- **Somatische Strahlenschäden**

sind auf das bestrahlte Individuum beschränkt.

Frühschäden sind mit großen Strahlendosen verbunden ($1x > 1 \text{ Sv}$)

Spätschäden sind in der Regel stochastisch (kleinere Dosen), können aber auch nach Erholung von Frühschäden auftreten

und nichtstochastischen (Früh-) Schäden:

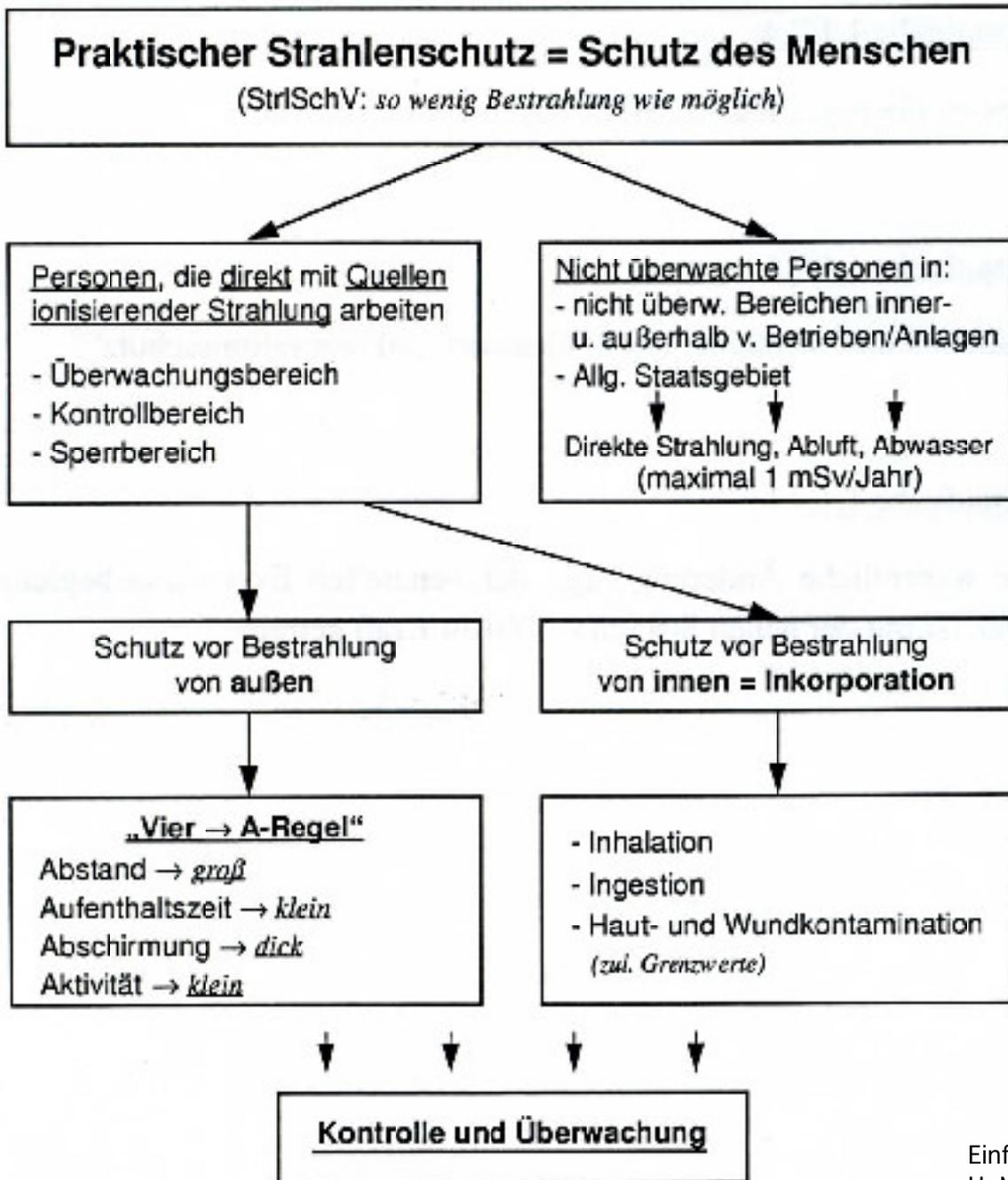
Dosis [Sv]	Wahrscheinlicher Effekt / Frühschaden
0.25	Schwellenwert ohne klinisch nachweisbare Manifestation
0.25-0.75	keine deutlichen Effekte; geringe vorübergehende Veränderungen des Blutes (bei Gruppenvergleichen nachweisbar)
0.8-1.2	Übelkeit und Erbrechen (bei $\approx 10\%$), Müdigkeit, sonst keine ernsthaften Krankheitsersch.
1.3-1.7	Übelkeit und Erbrechen innerhalb eines Tages (25%), meist leichte Strahlenkrankheit (Strahlenkater)
1.8-2.2	Übelkeit und Erbrechen innerhalb eines Tages (50%), allgemeine Mattigkeit, Kreislaufschwäche (mittlerer Strahlenkater), deutliche Blutbildveränderung
2.2-3.3	Übelkeit und Erbrechen innerhalb eines Tages ($\approx 100\%$), schwere Strahlenkrankheit, 20% Todesfälle innerhalb 3-6 Wochen ohne Behandlung; Erholung der Überlebenden in 3 Mon.
4-5	Schwere Strahlenkrankheit, starke Blutbildveränderung, Schädigung des Immunsystems, 50% Todesfälle innerhalb eines Monats ohne Spezialbehandlung; Erholung der Überlebenden nach 6 Monaten
5.5-7.5	Übelkeit und Erbrechen innerhalb von wenigen Stunden; schwere Strahlenkrankheit und nahezu 100% Todesfälle innerhalb eines Monats ohne Spezialbehandlung; Erholung der Überlebenden nach ca. 6 Monaten
10	Übelkeit und Erbrechen innerhalb von 1-2 Stunden; keine Überlebenschance ohne Spezialbehandlung; auch mit Spezialbehandlung (Knochenmarktransplantation und völlig sterile Versorgung in Spezialkliniken u. a. m.) überlebt nur ein Teil der Bestrahlten
50-100	Zerebrales Erbrechen, schockartige Bewegungseinschränkung und Kreislaufversagen; Tod nach Stunden
1000	Zerebrale Lähmung und sofortige Zerstörung des Zentralen Nervensystems, Tod bereits während der Bestrahlung

Tödliche Dosis

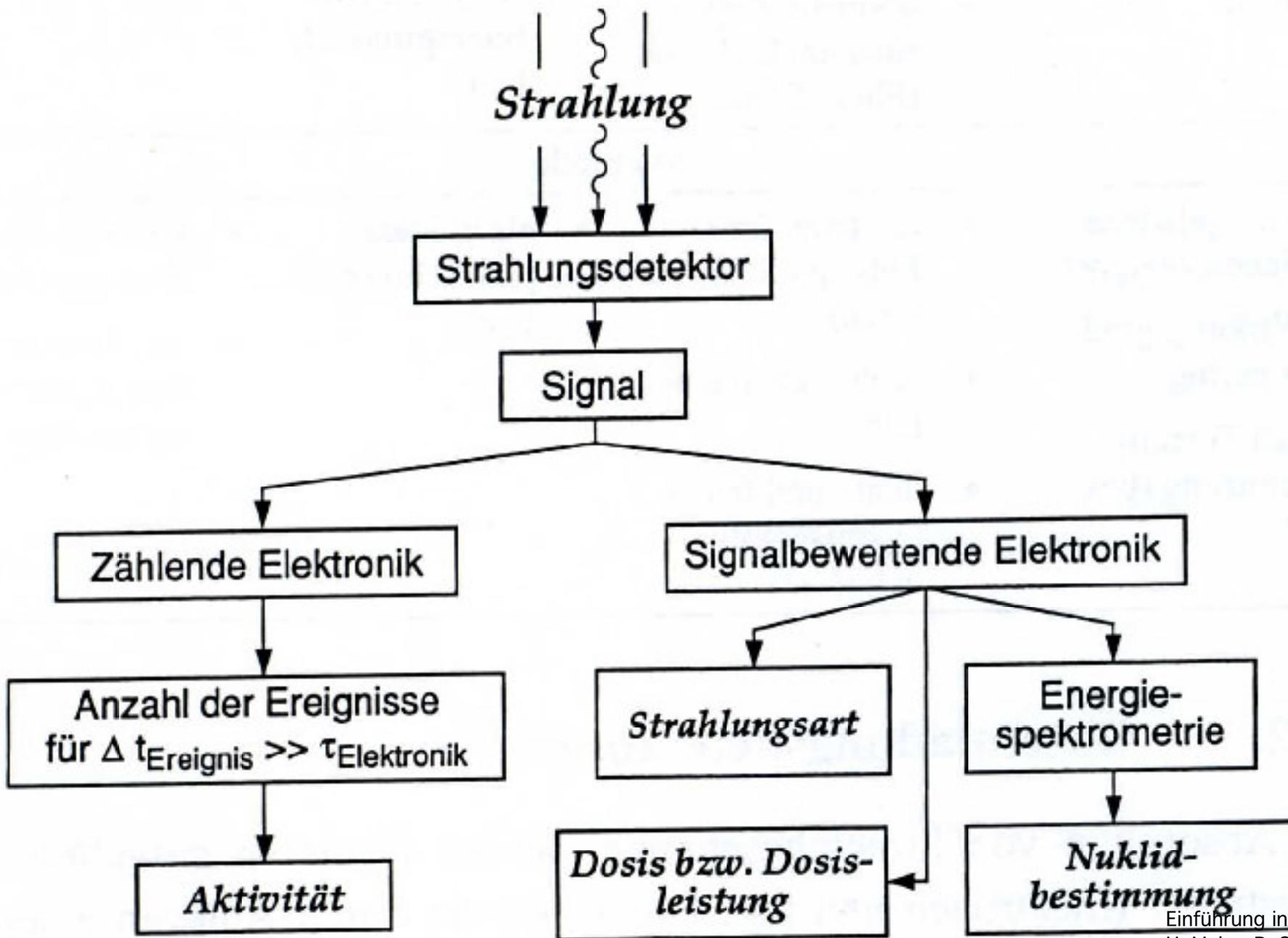
Äquivalentdosen LD 50/30 [Sv], die bei Ganzkörperbestrahlung ohne medizinische Intensivbehandlung bei 50% der bestrahlten Lebewesen zum Tod innerhalb von 30 Tagen führt:

Organismus	Äquivalentdosis LD 50/30 in Sv
Tabak-Mosaik-Virus	2000
Amöben, Wespen	1000
Schnecke	200
Fledermaus	150
Escherichia Coli	50
Forelle	15
Hamster	9-11
Goldfisch	8,5
Kaninchen, Ratte	6
Rhesusaffe	5,5
Hund	4-5,5
Mensch	4,5
Schwein	4-5,5
Ziege	3,5
Meerschweinchen	2,5-4

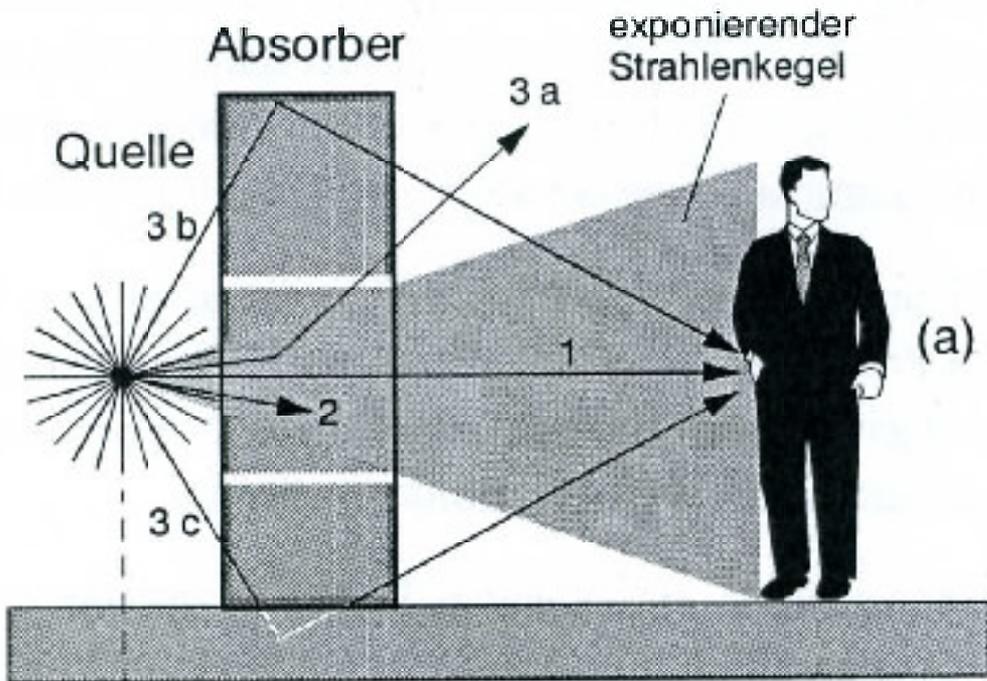
Praktischer Strahlenschutz



Strahlenmessung



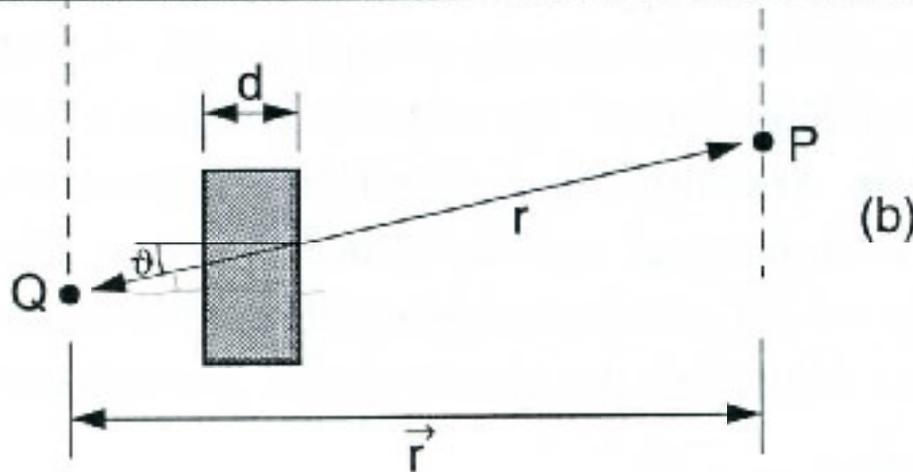
Abschirmung



(a)

**Geladene Teilchen besitzen begrenzte Reichweite in Materie (Dosis=0).
Neutrale Teilchen können (nur) beliebig in Intensität reduziert werden.**

=> Absorbermaterial kann nicht beliebig gestaltet sein (Streuung)



(b)

Aufbaustrahlung: hätte ohne Absorber die exponierte Person gar nicht erreicht.

Abschätzung

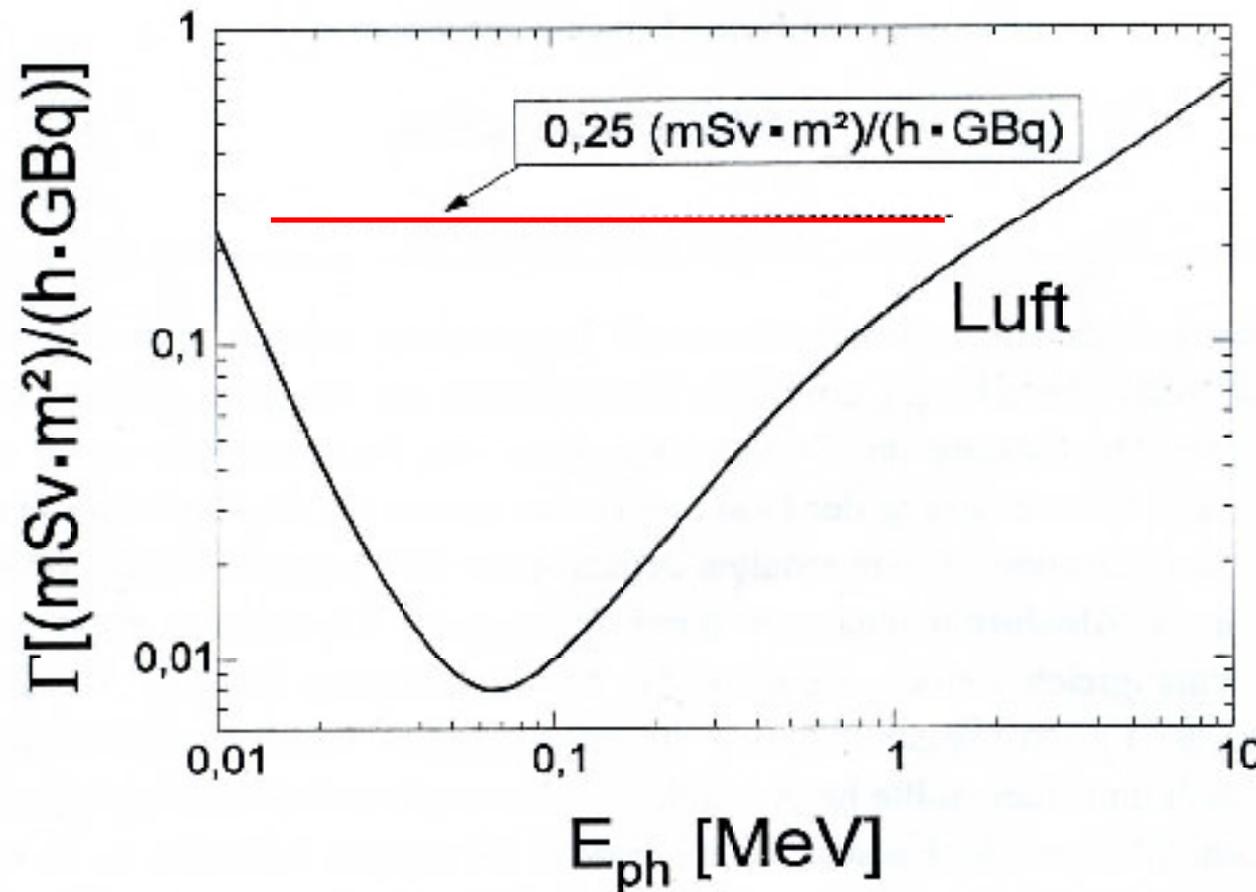
Grobe Faustformel zur Abschätzung der Dosisleistung für Quelle mit Aktivität A (Luft):

4 GBq, 1m \Rightarrow 1 mSv/h

4 MBq, 1m \Rightarrow 1 μ Sv/h

4 kBq, 1m \Rightarrow 1 nSv/h

Überschätzung der Strahlenwirkung
= mehr Sicherheit



Strahlenbelastung des Menschen

Neue Strahlenschutzverordnung: Unterscheidung zwischen

1) Körperdosen als
Schutzgrößen (Grenzwerte)

Organ-(Äquivalent-)Dosis:

$$H_T = w_R * D_{T,R}$$

Strahlen-Wichtungsfaktor w_R

Art und Energiebereich	w_R
Photonen, alle E	1
Elektronen, Myonen, alle E	1
n E < 10 keV	5
n 10...100 keV	10
n 100...2000 keV	20
n 2...20 MeV	10
n E > 20 MeV	5
Protonen, außer Rückstoß- protonen, E > 2 MeV	5
Alphateilchen, Spaltfrag- mente, schwere Kerne	20

Gewebe-Wichtungsfaktor

Effektive Dosis:

$$E = \sum w_T * H_T$$

Gewebe-Wichtungsfaktor w_T

Gewebe oder Organe	w_T
Keimdrüsen	0.20
Knochenmark (rot)	0.12
Dickdarm	0.12
Lunge	0.12
Magen	0.12
Blase	0.05
Brust	0.05
Leber	0.05
Speiseröhre	0.05
Schilddrüse	0.05
Haut	0.01
Knochenoberfläche	0.01
Andere	0.05

2) Äquivalentdosen als Messgrößen (operative Größen) in der Dosimetrie Qualitätsfaktor Q

Alle Größen sind radiologisch bewertete Energiedosen.

Operative Größen für Dosismessung da Körperdosen in der Regel nicht messbar sind; liefern unter realistischen Expositionsbedingungen eine Abschätzung für Körperdosen

**Ortsdosis-Messgrößen dienen dem präventiven Strahlenschutz
=> Grundlage zur Einrichtung von Strahlenschutzbereichen**

Personendosis-Messgrößen sind ein individuelles Maß für die Exposition einer einzelnen Person.

Strahlung	zu überwachende Schutzgröße	Äquivalentdosis i.d. Ortsdosimetrie	Äquivalentdosis i.d. Personendosimetrie
durchdringend	effektive Dosis	Umgebungs-Ä. $H^*(10)$	Tiefen-Personendosis $H_p(10)$
geringe Eindringtiefe	lokale Hautdosis, Körperdosis der Füße, Arme & Hände	Richtungs-Äquivalentdosis $H'(0,07,\Omega)$	Oberflächen-Personendosis $H_p(0,07)$
	Körperdosis der Augenlinse	Richtungs-Äquivalentdosis $H'(3,\Omega)$	$H_p(3)$

Natürliche Strahlenexposition

Durchschnittliche effektive Dosis der Bevölkerung der BRD (1998)

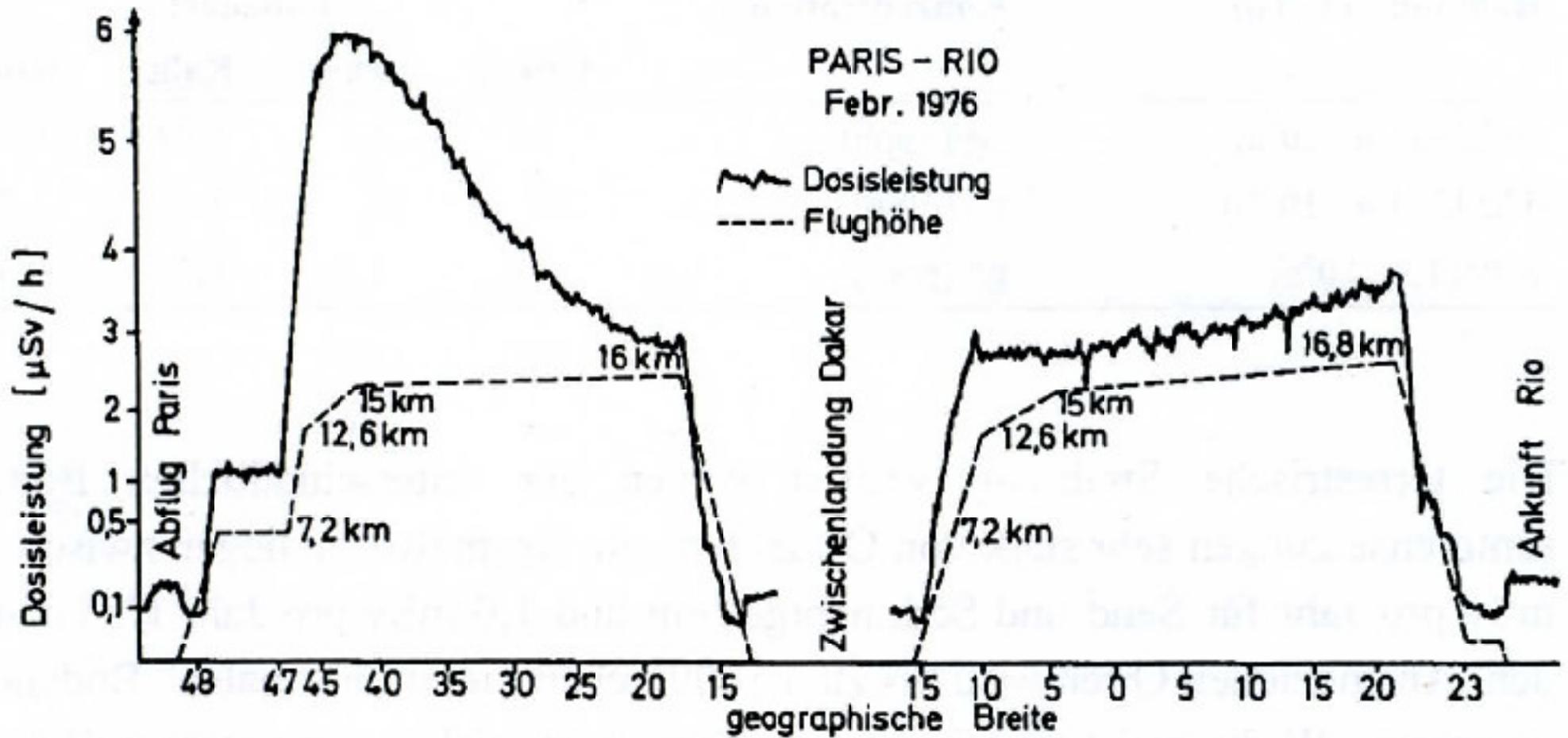
Strahlenquelle	mittlere eff. Dosis [mSv/a]
Durch kosmische Strahlung	≈0,3
Durch terrestrische Strahlung (gesamt)	≈0,4
Aufenthalt im Freien (5h/d)	≈0,1
Aufenthalt in Häusern (19h/d)	≈0,3
Durch Inhalation von Radonfolgeprodukten (gesamt)	≈1,4
Aufenthalt im Freien (5h/d)	≈0,2
Aufenthalt in Häusern (19h/d)	≈1,2
Durch Ingestion von natürlichen radioaktiven Stoffen	≈0,3
Summe der natürlichen Strahlenexposition	≈2,4

Zivilisatorische Exposition

Strahlenquelle	mittlere eff. Dosis [mSv/a]
Durch kerntechnische Anlagen	<0,01
Durch Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin	≈1,5
Durch Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in Forschung, Technik und Haushalt	<0,01
Industrieerzeugnisse	<0,01
technische Strahlungsquellen	<0,01
Störstrahler	<0,01
Durch berufliche Strahlenexposition (Beitrag zur mittleren Strahlenexposition der Bevölkerung)	<0,01
Durch besondere Vorkommnisse	0
Durch Fallouts von Kernwaffenversuchen	<0,01
von außen im Freien	<0,01
durch inkorporierte radioaktive Stoffe	<0,01
Strahlenexposition durch den Unfall im KKW Tschernobyl	<0,015
Summe der zivilisatorischen Strahlenexposition	≈1,6

Höhenstrahlung

Flug Paris - Rio (Höhenstrahlung)



Medizinische Strahlenbelastung

	Strahlenbelastung [mSv]	
Röntgendiagnostik (Film)		
Lunge (Einzelaufnahme)	0,3-1,0 (Haut)	0,1-0,4 (E)
Magen (\approx 5 Aufnahmen)	60 (Haut)	9 (E)
Zähne	bis 10 (Kiefer, Haut)	0,01 (E)
Mammographie	bis 60 (Haut)	0,5 (E)
Röntgendiagnostik (Bildwandler)		
Magen	< 10 (Haut)	< 1 (E)
Gliedmaßen		< 0,01 (KM, E)
CT		10-30 (E)
Röntgentherapie		
Entzündungsbehandlung	500-2000 (pro Organ)	
Krebsbekämpfung	3000-50000 (pro Organ)	
Maximaldosen	100000 (Haut)	
Nukleardiagnostik		
Schilddrüse Tc 99 m	4 (SD)	0,6 (E)
Niere Tc 99 m	5 (Niere)	18 (Blase), 0,7 (E)
Leber Tc 99 m		2,3 (E)
Herz Tc 201		17 (E)
Nukleartherapie		
Beseitigung eines autonomem Adenoms (Schilddrüsenwucherung) J 131	500000 (SD)	100 (E)

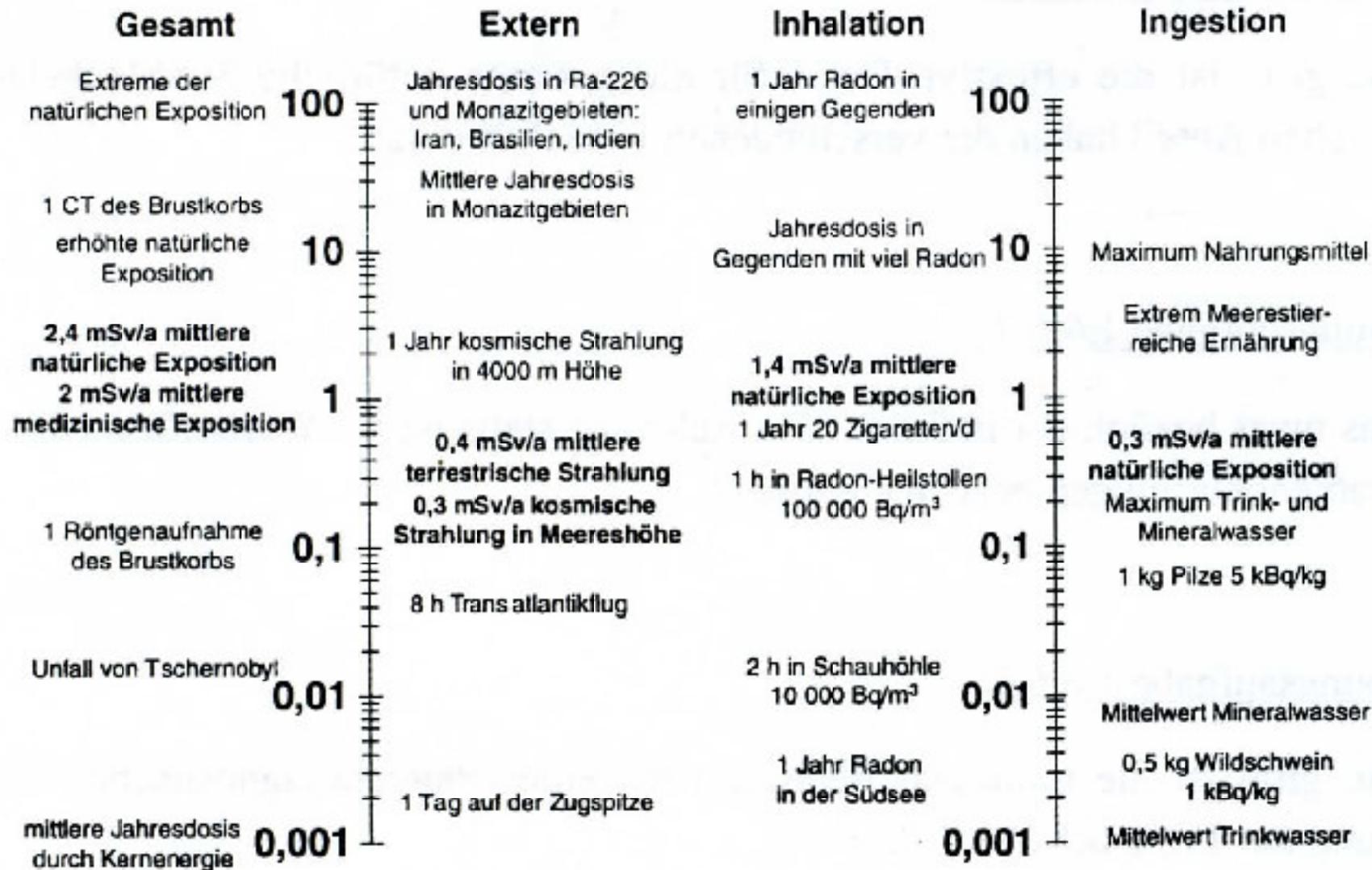
Dosisleistungen

Typische Äquivalentdosisleistungen

Strahlenquelle	Äquivalentdosisleistung
KKW-Belastung	$\approx 10^{-10} \text{ Sv / h}$
Normalbetrieb, maximal TV (d=5cm)	$\approx 2 \cdot 10^{-9} \text{ Sv / h}$
(d=2,5cm)	$\approx 10^{-10} \text{ Sv / h}$
natürliche Radioaktivität	$\approx 10^{-7} \text{ Sv / h}$
Radiojodabbildung der Schilddrüse	$\approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ Sv / h}$
Röntgenaufnahme der Lunge	$\approx 3,6 \text{ Sv / h} (10^{-3} \text{ Sv / s})$
Krebstherapie	
Co60-Bestrahler	$\approx 30 \dots 50 \text{ Sv / h}$
Linearbeschleuniger	$\approx 100 \text{ Sv / h}$

Variabilität der Strahlenexposition des Menschen

Bereiche der Strahlenexposition Erwachsener: Effektive Dosis in mSv



Typische Dosen

Spektrum typischer Äquivalentdosen

