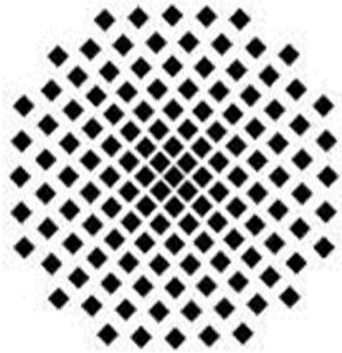




IBMT

VINZENZ
VONPAUL
KLINIKEN
gGMBH



MARIENHOSPITAL
STUTTGART

Strahlenphysik und Strahlenschutz

Christian Gromoll

Institut für Biomedizinische Technik, Universität Stuttgart

Marienhospital Stuttgart, Abt. für Med. Physik

christiangromoll@vinzenz.de

Lernziele

- **Physikalische Grundlagen ionisierender Strahlungen**
- **Wechselwirkung ionisierender Strahlungen mit Materie**
- **Dosisgrößen und deren Einheiten**
- **Gesetzliche Regelungen**

Die wichtigsten Strahlungsarten

- **α -Strahlung**
- **β -Strahlung**
- **γ -Strahlung**
- **Röntgenstrahlung**
- **Elektronenstrahlung**
- **Neutronenstrahlung**
- **Protonenstrahlung**
- **Ionenstrahlung.....**

Strahlungsarten

Strahlungsteilchen

β^- - Strahlung
Elektronenstrahlung

Elektronen

β^+ - Strahlung

Positronen

Neutronenstrahlung
Protonenstrahlung
 α - Strahlung

Neutronen
Protonen
 α - Teilchen

γ - Strahlung
Röntgenstrahlung

Photonen

Das Photon

$$c = \lambda \cdot f$$
$$E_{\text{ph}} = h \cdot f$$

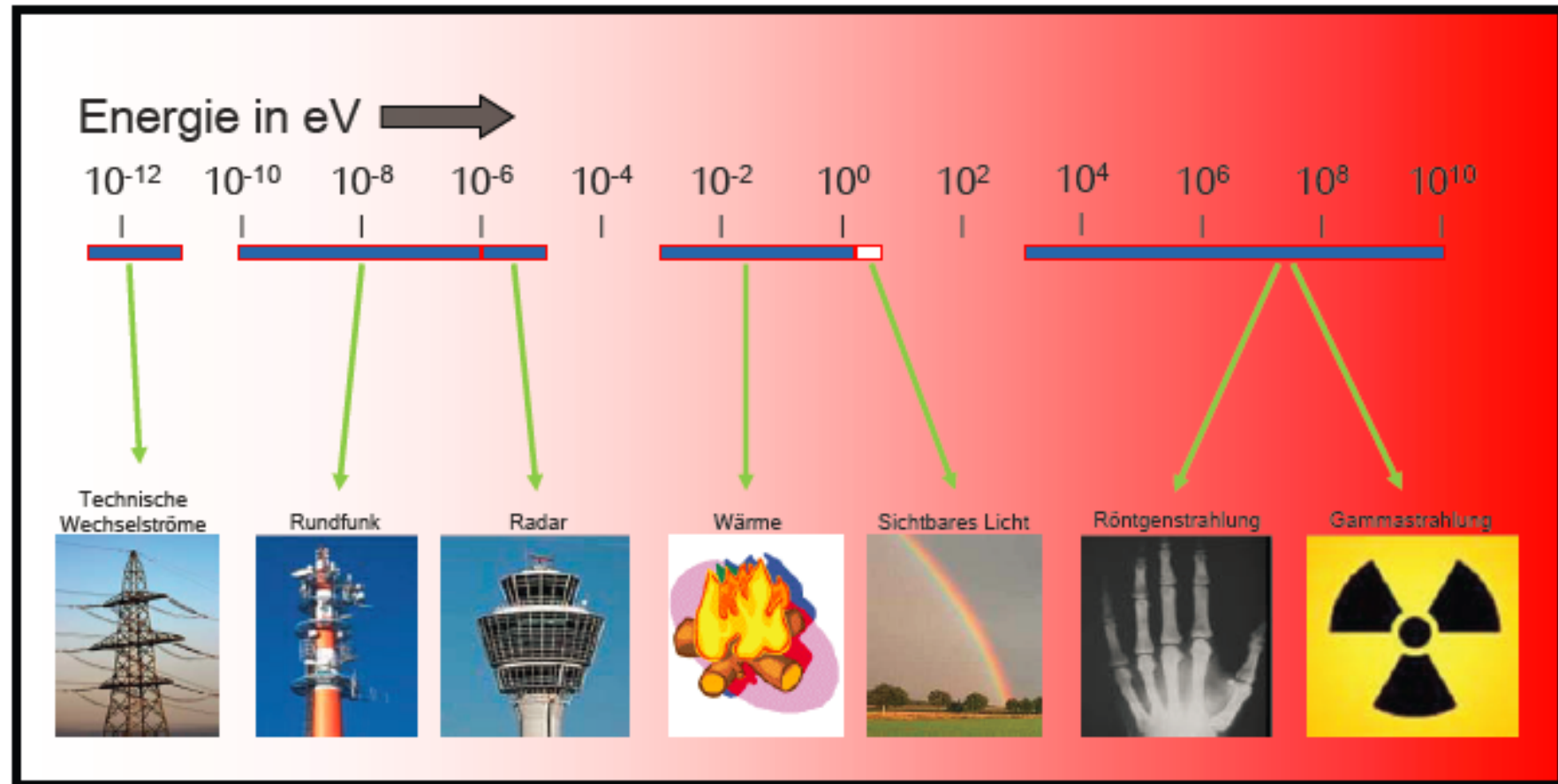
c : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

($2,997925 \cdot 10^8$ m/s)

h : Planck'sches Wirkungsquantum

($4,1356 \cdot 10^{-15}$ eV · s)

Spektrum der elektromagnetischen Strahlung



Das Photon

$$c = \lambda \cdot f$$
$$E_{\text{ph}} = h \cdot f$$

c : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

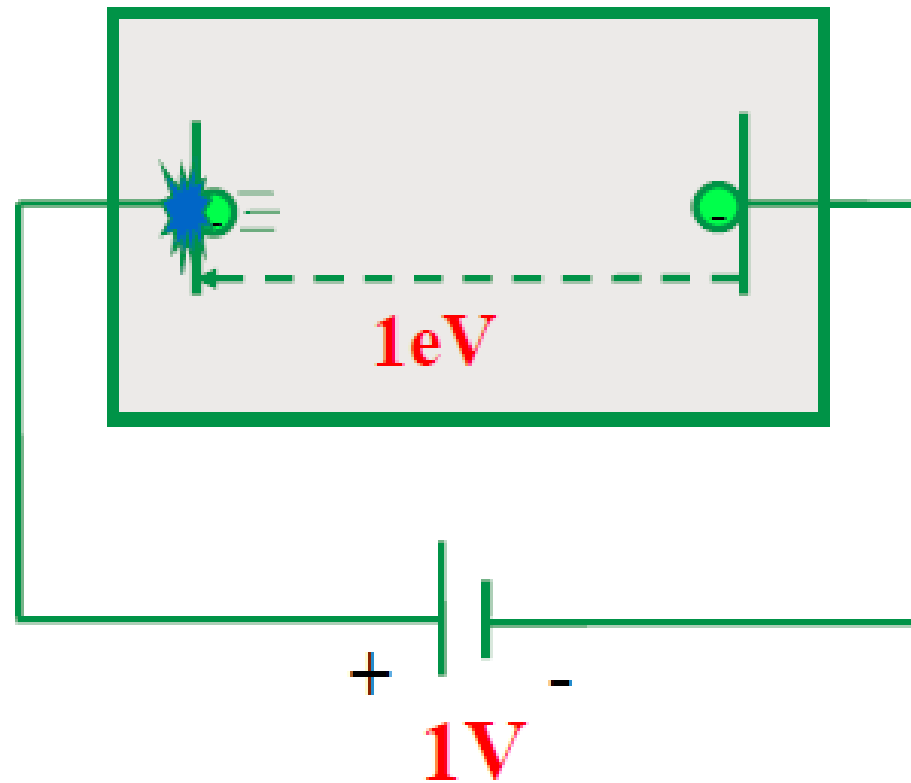
($2,997925 \cdot 10^8$ m/s)

h : Planck'sches Wirkungsquantum

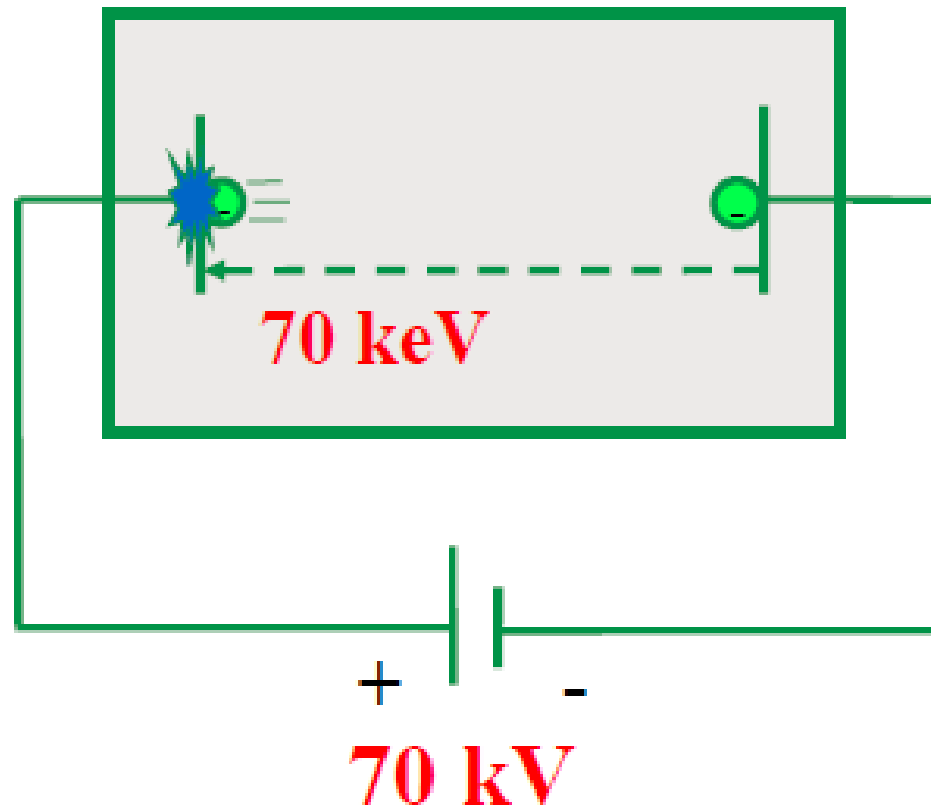
($4,1356 \cdot 10^{-15}$ eV · s)

$$1 \text{ eV} = 1,602189 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

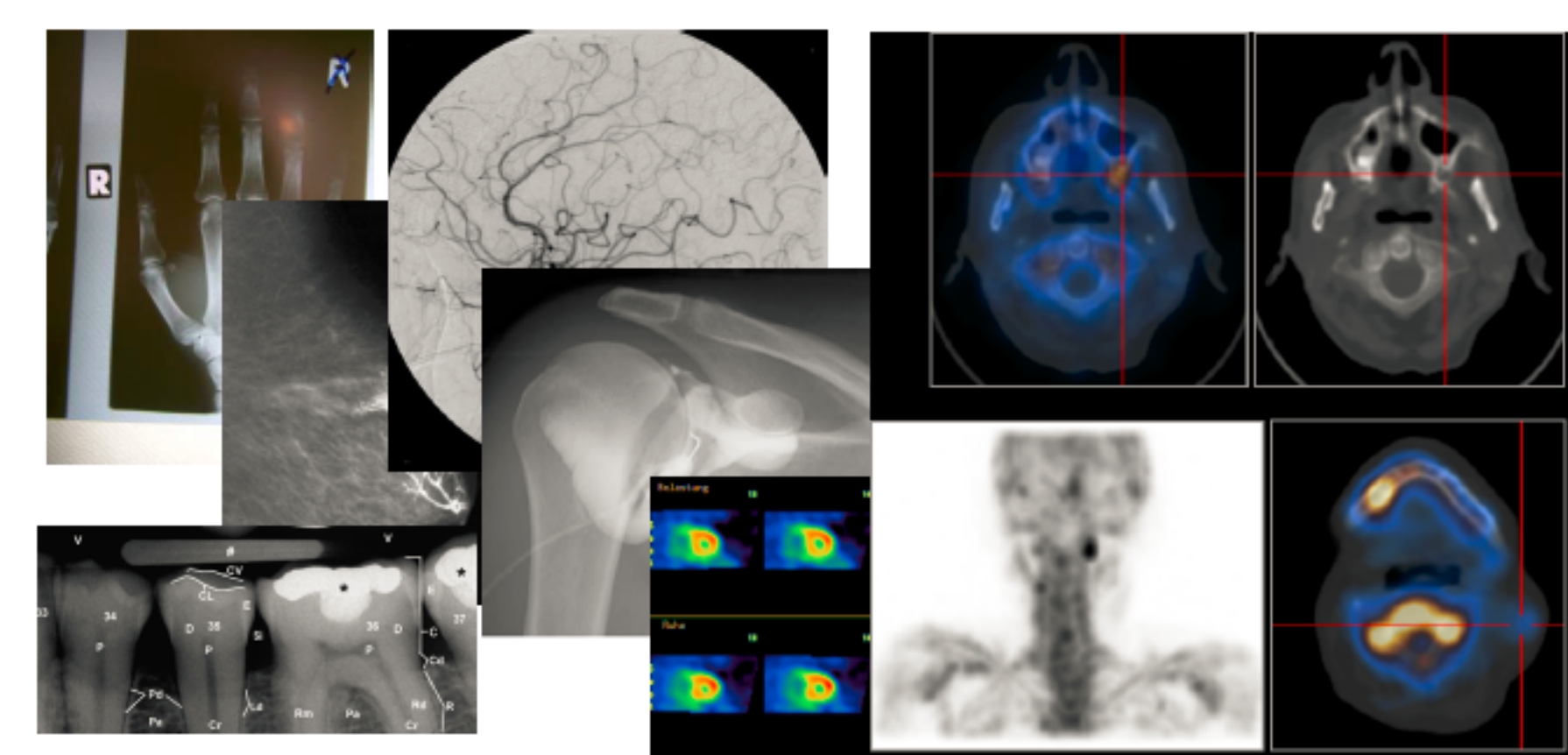
Energieeinheit Elektronenvolt



Energieeinheit Elektronenvolt

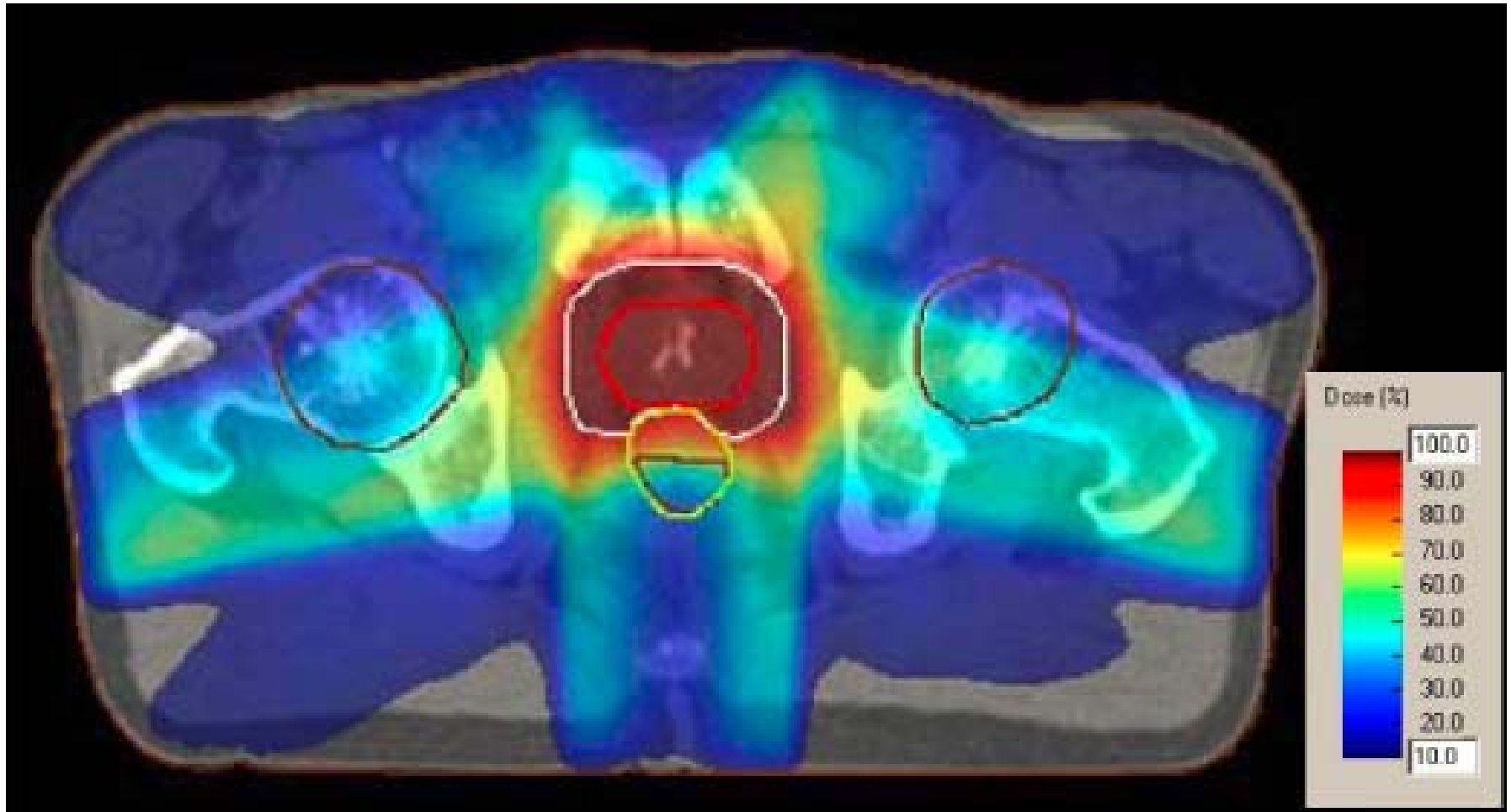


Radiologische Bilgebung



- Röntgenbild
- (Röntgen-)Computertomographie
- Szintigrafie (SPECT=Single Photon Emmissions Tomographie)

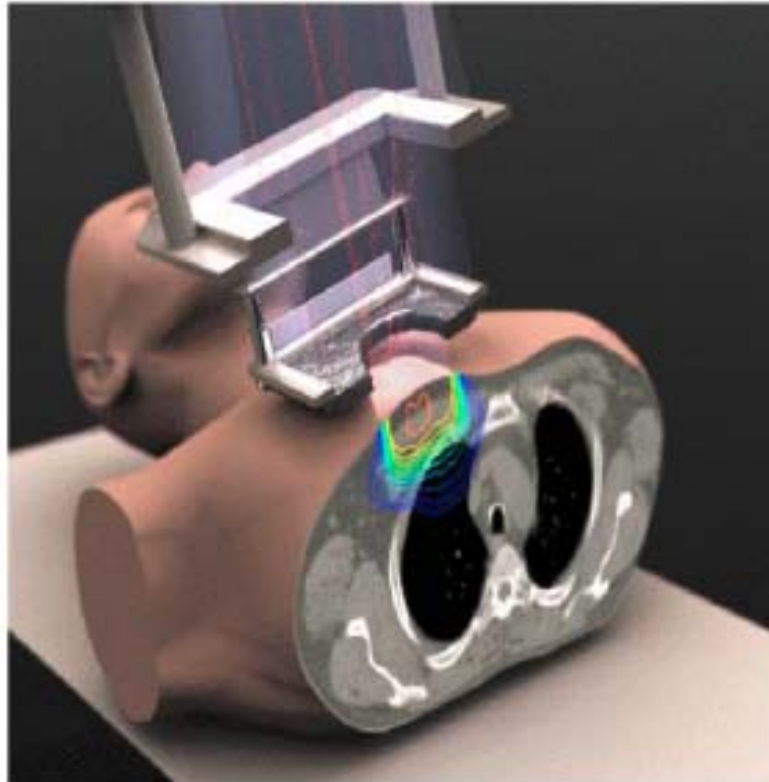
Strahlentherapie mit Photonen



Elektron

- Das leichteste elektrisch geladene Elementarteilchen
- $m_e = 9.1093826(16) \cdot 10^{-28} \text{ g}$
- Ladung $-1.60217653 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- Stabil, Lebensdauer $> 10^{24}$ Jahre
- Punktförmig bis $< 10^{-19} \text{ m}$
- **Anwendung als Betastrahlung in der Nuklearmedizin**
- **Anwendung als Teilchenstrahlung in der Strahlentherapie**

Strahlentherapie mit Elektronen



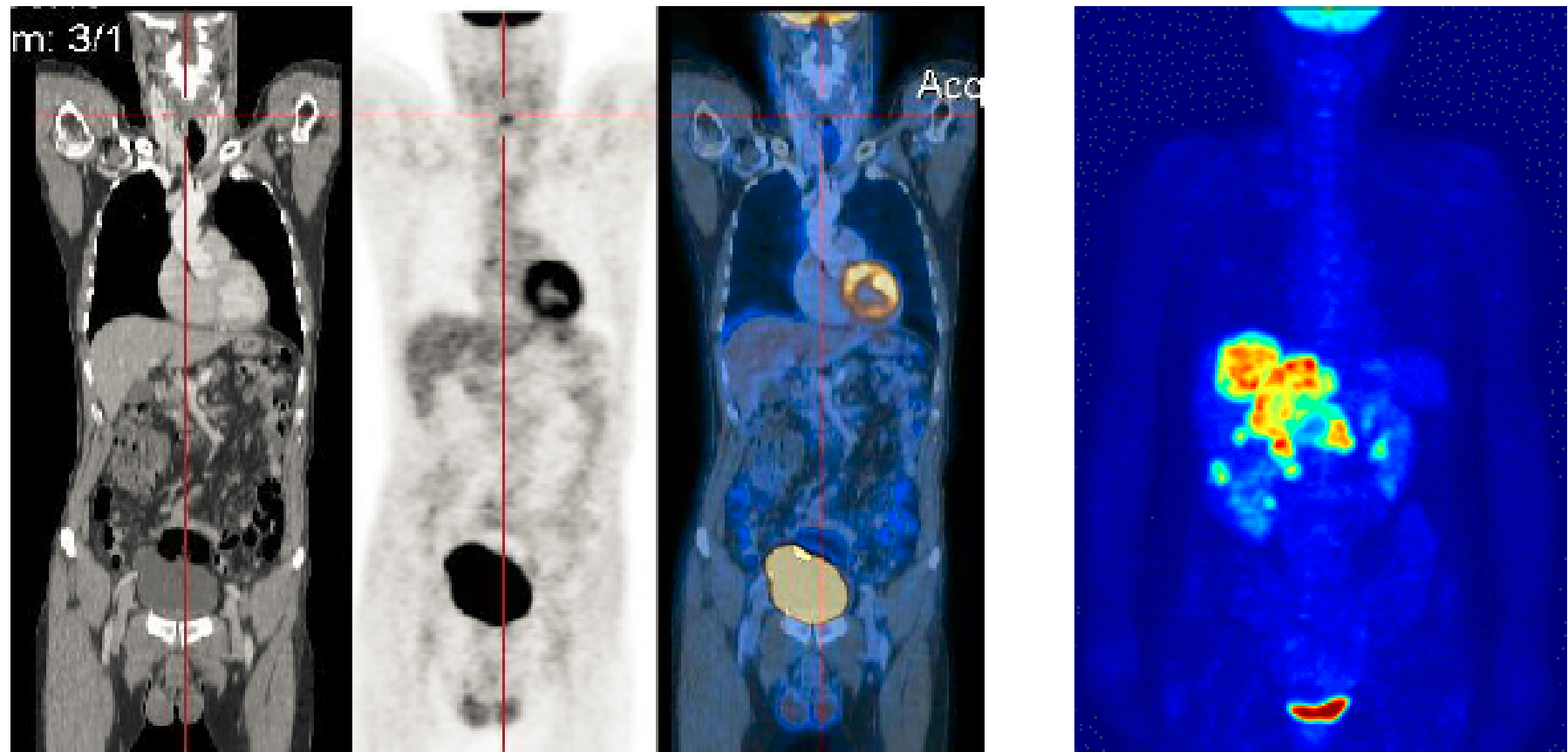
Quelle: Dr. Thiel, Augenklinik de LMU, Mathildenstrasse

Aus: Prof. Dr. Dieter Suter (TU Dortmund) Experimentelle Physik III: Vorlesung Ionisierende Strahlung

Positron

- Gleiche Masse wie Elektronen $9.10938215 \cdot 10^{-31} \text{kg}$
- Ladung $+1.60217653 \cdot 10^{-19} \text{C}$
- Entsteht beim β^+ -Zerfall, beim Zerfall pos. Myonen oder durch Paarbildung
- Verhält sich bei höheren Energien wie ein Elektron, bei niedriger Energie „Vernichtung“ von e^+ und e^- unter Emission von 2 γ -Quanten.
- **Anwendung in der Medizin bei der Positronen-Emissions-Tomografie PET**

Positronen-Emissionstomographie (PET)



α -Teilchen

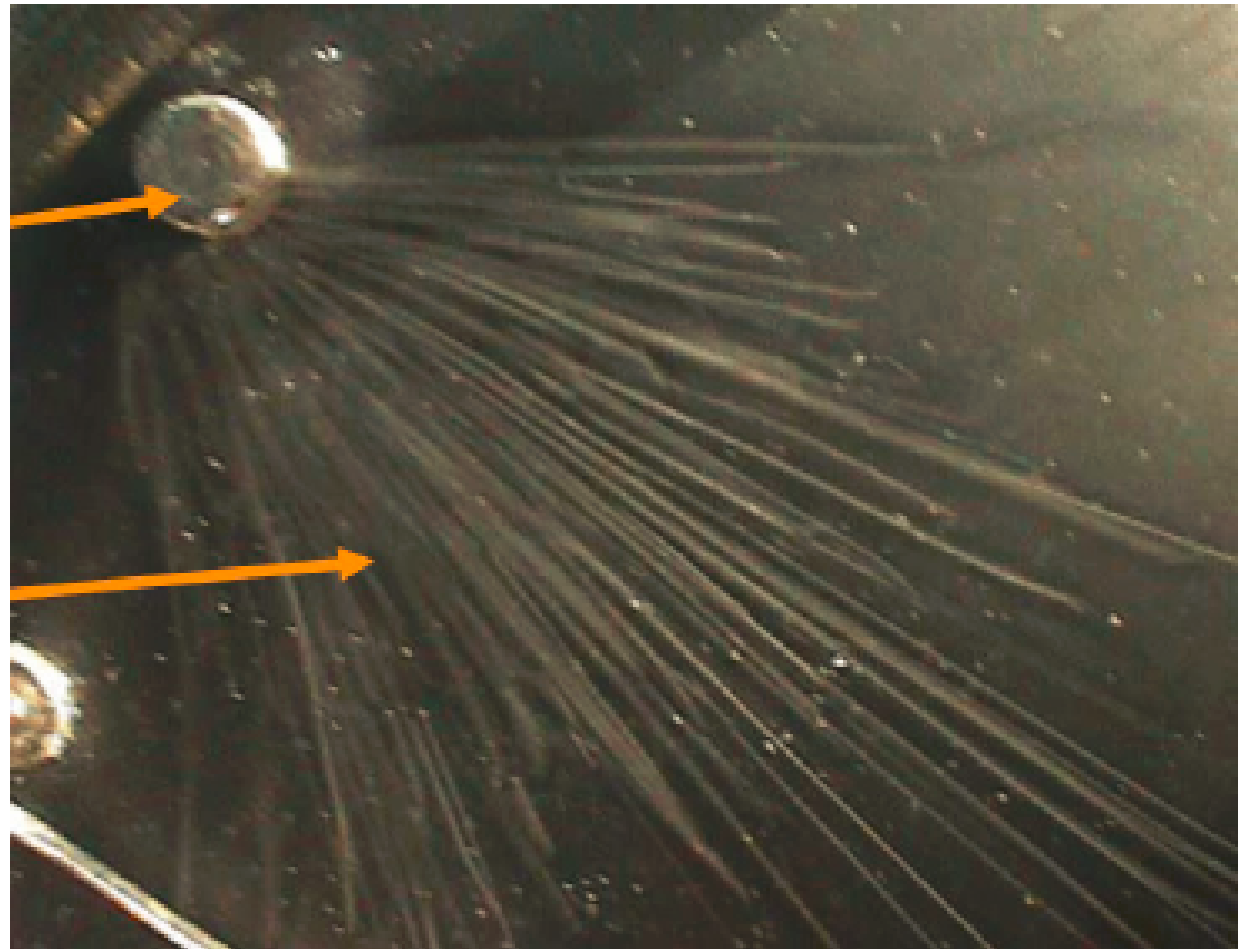
- Masse $4.001506179127 \text{ u} = 6.64465598 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- Entsteht beim α -Zerfall
- Helium-Kern
- **Anwendung in der Medizin bei der Nuklid-Therapie, z.B.**
 - **Bi-213 bei Knochen-Metastasen**
 - **Ra-224 bei Morbus Bechterew ?**

α -Teilchen

α -Teilchen

α -Quelle

Nebelspuren der
 α -Strahlung



Neutron

- Masse $1.67492716 \times 10^{-27}$ kg
- Durchmesser $\approx 10^{-15}$ m
- Freies Neutron zerfällt mit HWZ = 886 s
- Kernbaustein (Nukleon)
- Keine Ladung
- **Anwendung in der Medizin bei der Strahlen-Therapie mit Neutronen**

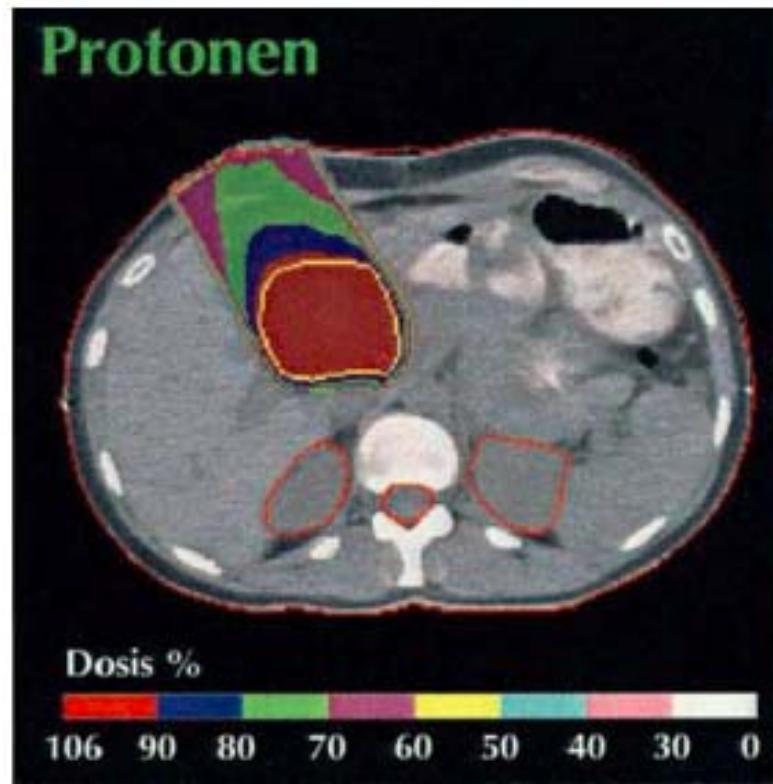
Proton

- Masse $1.67262171(29) \times 10^{-27}$ kg
- Stabil, Lebensdauer $> 10^{32}$ Jahre
- Ladung $+1.60217653 \times 10^{-19}$ C
- **Anwendung in der Medizin bei der Strahlen-Therapie mit energiereichen Protonen (Bragg-Peak)**

Zyklotron



Strahlentherapie mit Protonen



Quelle: Charité, Berlin



Quelle: RPTC, München

Strahlungsarten

Strahlungsart	direkt ionisierend	indirekt ionisierend
<u>Korpuskularstrahlungen</u>	Elektronenstrahlung β - Strahlung Protonenstrahlung α - Strahlung	Neutronenstrahlung
Photonenstrahlungen oder elektromagnetische Strahlungen		Röntgenstrahlung γ - Strahlung

Strahlungsarten

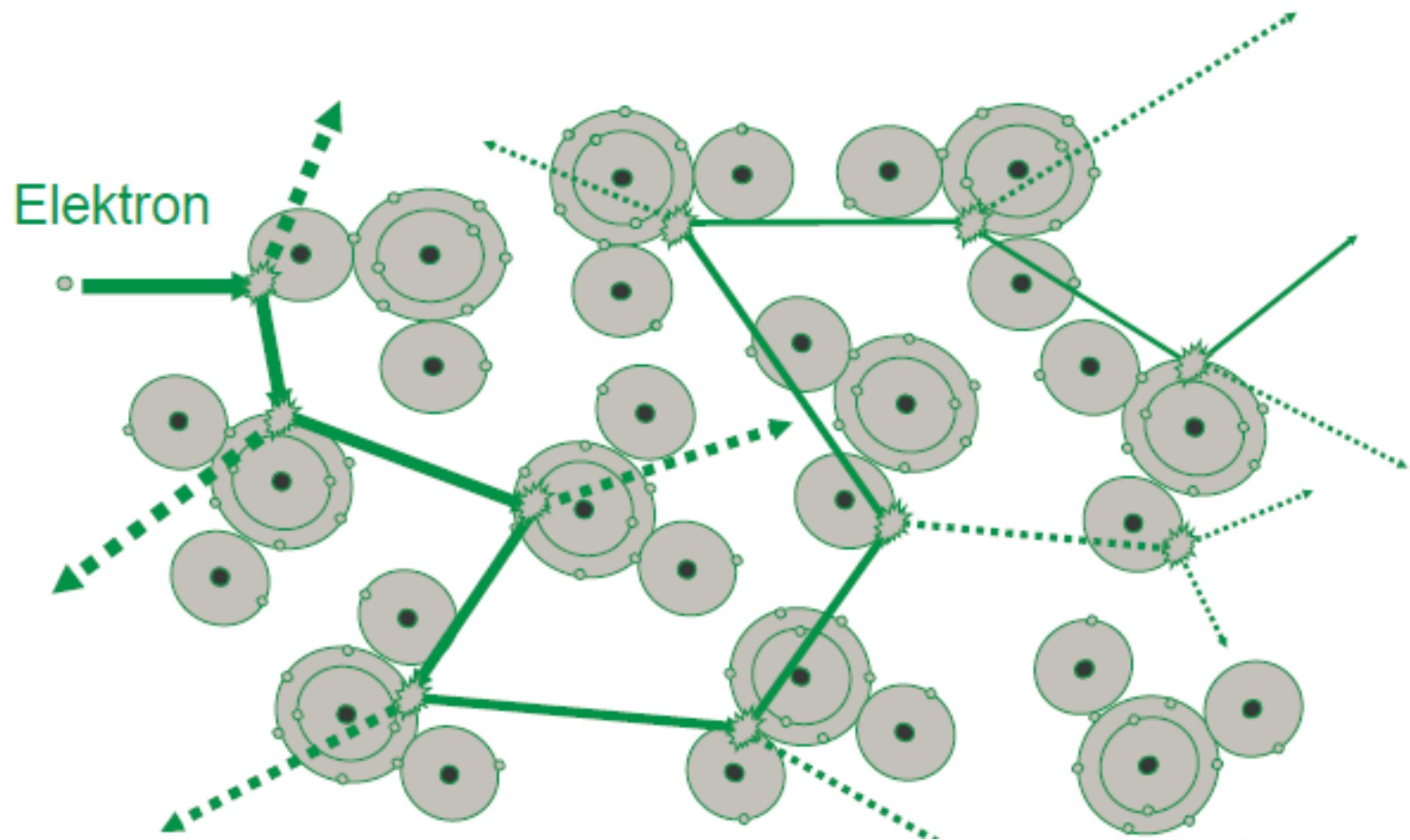
Strahlungsart	direkt ionisierend	Indirekt ionisierend
Korpuskulare strahlungen	Elektronenstrahlung β - Strahlung Protonenstrahlung α - Strahlung	Neutronenstrahlung
Photonenstrahlungen oder elektromagnetische Strahlungen		Röntgenstrahlung γ - Strahlung

Direkt ionisierende Strahlung

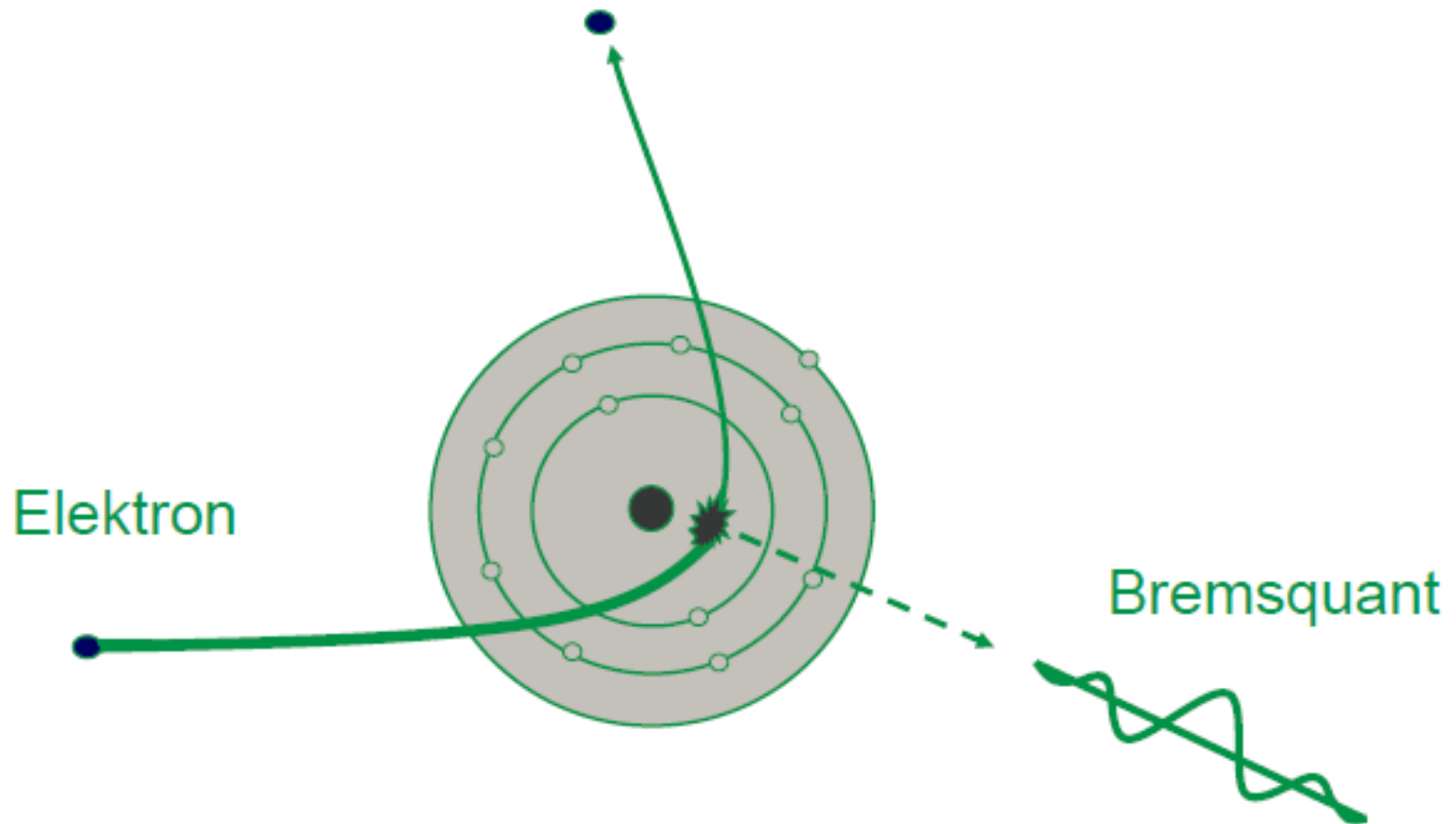
geladene Teilchen, die auf ihrer Bahn durch die Materie die Atome *unmittelbar* in vielen Stößen zu ionisieren vermögen.

⇒ **endliche Reichweite !**

Inelastische Stöße von Elektronen



Bremsstrahlungserzeugung



WW von Elektronen mit Materie

- WW mit der Atomhülle
elastische Stöße

inelastische Stöße

**Anregung
Ionisation**

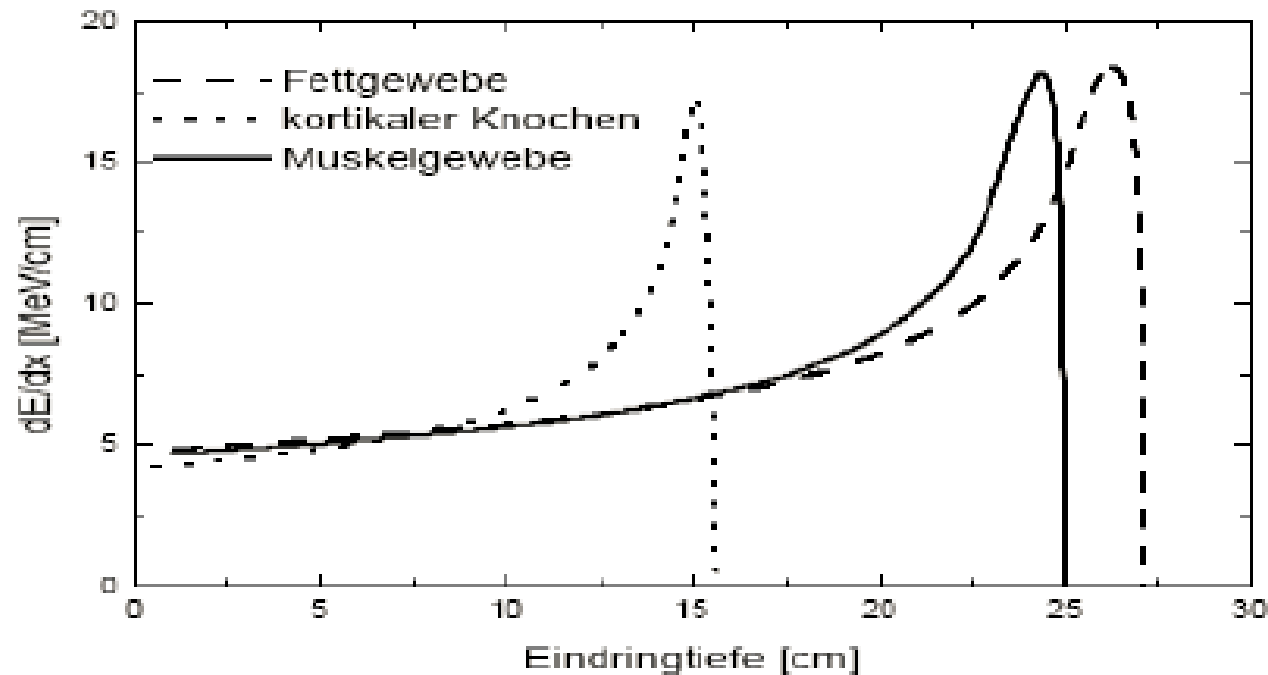
- WW mit Atomkernen
elastische Streuung

inelastische Streuung

**Bremsstrahlungs-
erzeugung**

- Kernreaktionen
- Cerenkov-Effekt

Eindringtiefe von 200 MeV Protonen in Gewebe



Berechneter Verlauf der Abhängigkeit des Energieverlustes eines Protonenstrahles der Eintrittsenergie $E_p = 200$ MeV in Muskel- und Fettgewebe und kortikale Knochen von der Strahl-Eindringtiefe.

WW von Ionen/Protonen mit Materie

- Coulomb-WW mit der Atomhülle

elastische Stöße

inelastische Stöße

Anregung

Ionisation

- Coulomb-WW mit Atomkernen

elastische Streuung

inelastische Streuung

Bremsstrahlung

bei $v/c \approx 1$

- Hadronische WW (Kernreaktionen)

Kernumwandlung

**Aktivierung, Teilchen-
emission, Spallation**

Strahlungsarten

Strahlungsart	direkt ionisierend	indirekt ionisierend
<u>Korpuskularstrahlungen</u>	Elektronenstrahlung β - Strahlung Protonenstrahlung α - Strahlung	Neutronenstrahlung
Photonenstrahlungen oder elektromagnetische Strahlungen		Röntgenstrahlung γ - Strahlung

Strahlungsarten

Strahlungsart	direkt ionisierend	indirekt ionisierend
<u>Korpuskulare Strahlungen</u>	Elektronenstrahlung β - Strahlung Protonenstrahlung α - Strahlung	Neutronenstrahlung
Photonenstrahlungen oder elektromagnetische Strahlungen		Röntgenstrahlung γ - Strahlung

Indirekt ionisierende Strahlung

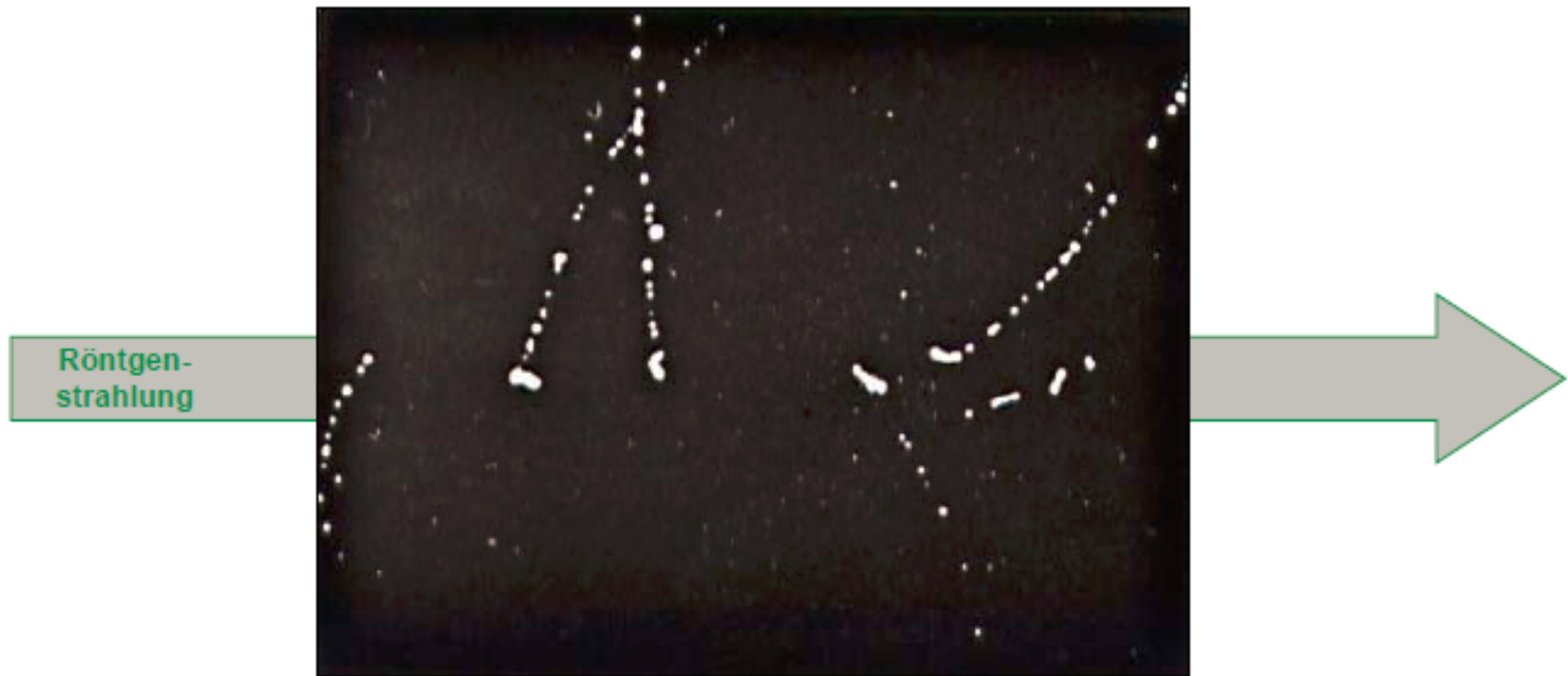
ungeladene Teilchen, bei denen sich die WW in *zwei Stufen* vollzieht:

In der *ersten Stufe* werden in relativ wenigen großen WW geladene Teilchen erzeugt,

in der *zweiten* übertragen diese geladenen Teilchen ihre Energie *unmittelbar* in vielen Stößen auf die Materie.

⇒ **keine endliche Reichweite, nur Schwächung !**

Nebelkammeraufnahme Röntgenstrahlen



Exponentielles Schwächungsgesetz für Röntgenstrahlung

$$I(x) = I(0) \cdot e^{-\mu x}$$

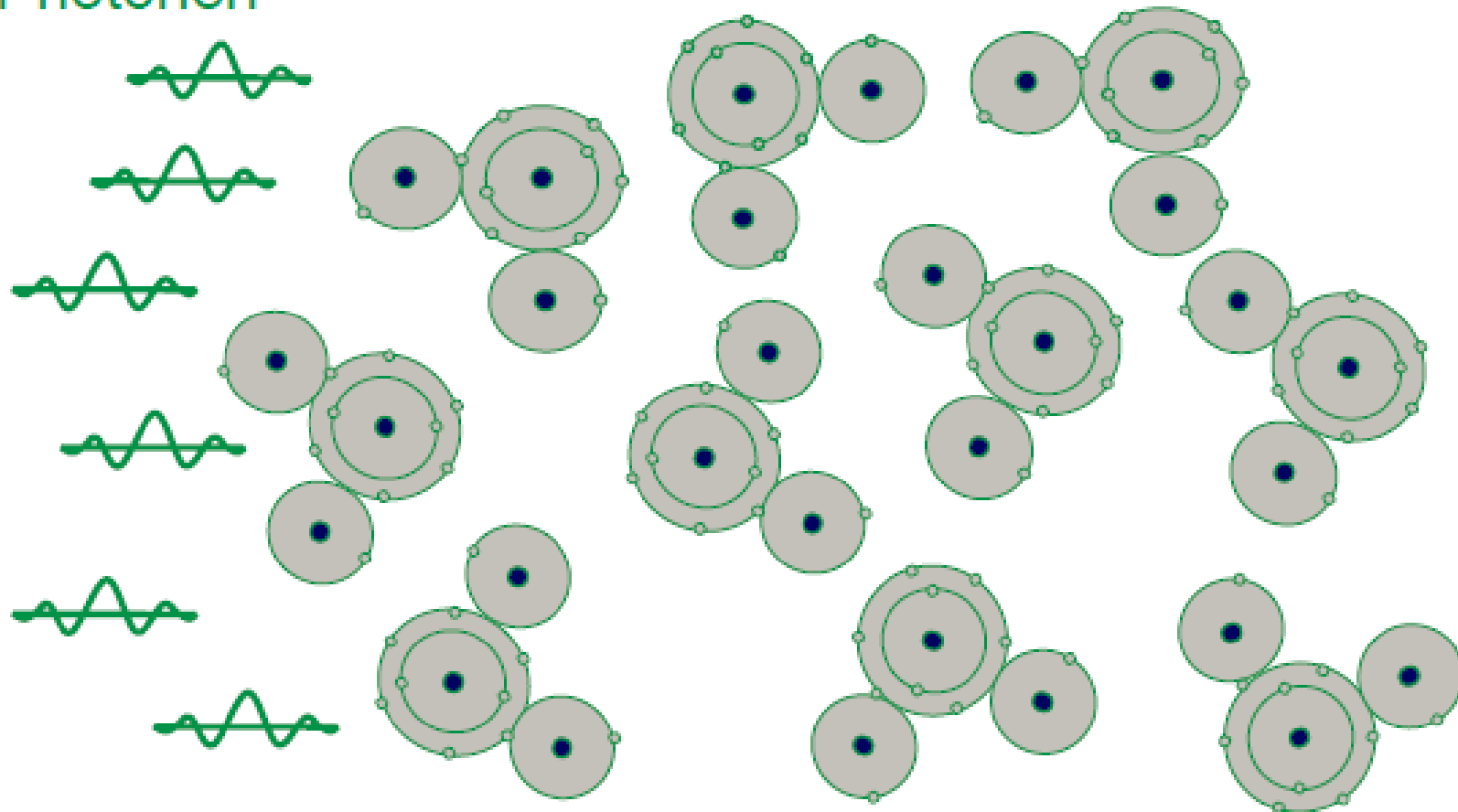
I : Intensität der Strahlung

x : Gewebetiefe

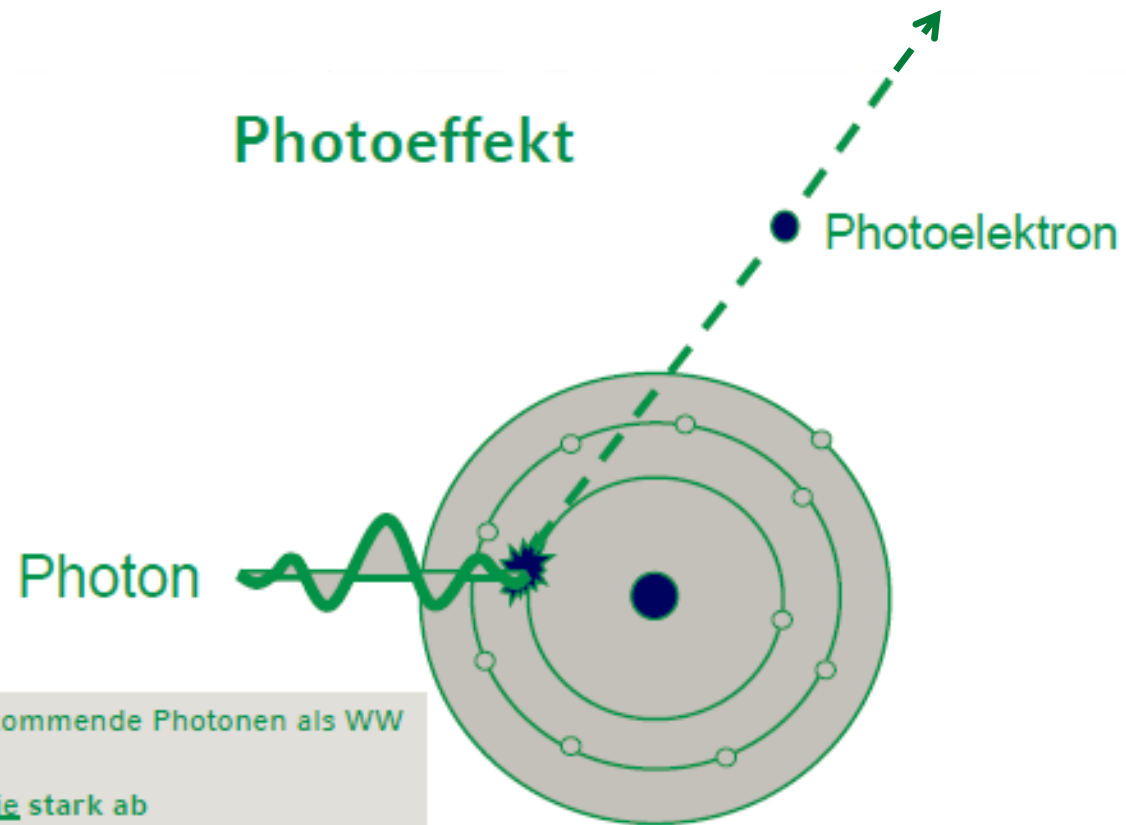
μ : Schwächungskoeffizient

WW Photonen mit Materie

Photonen



Photoeffekt

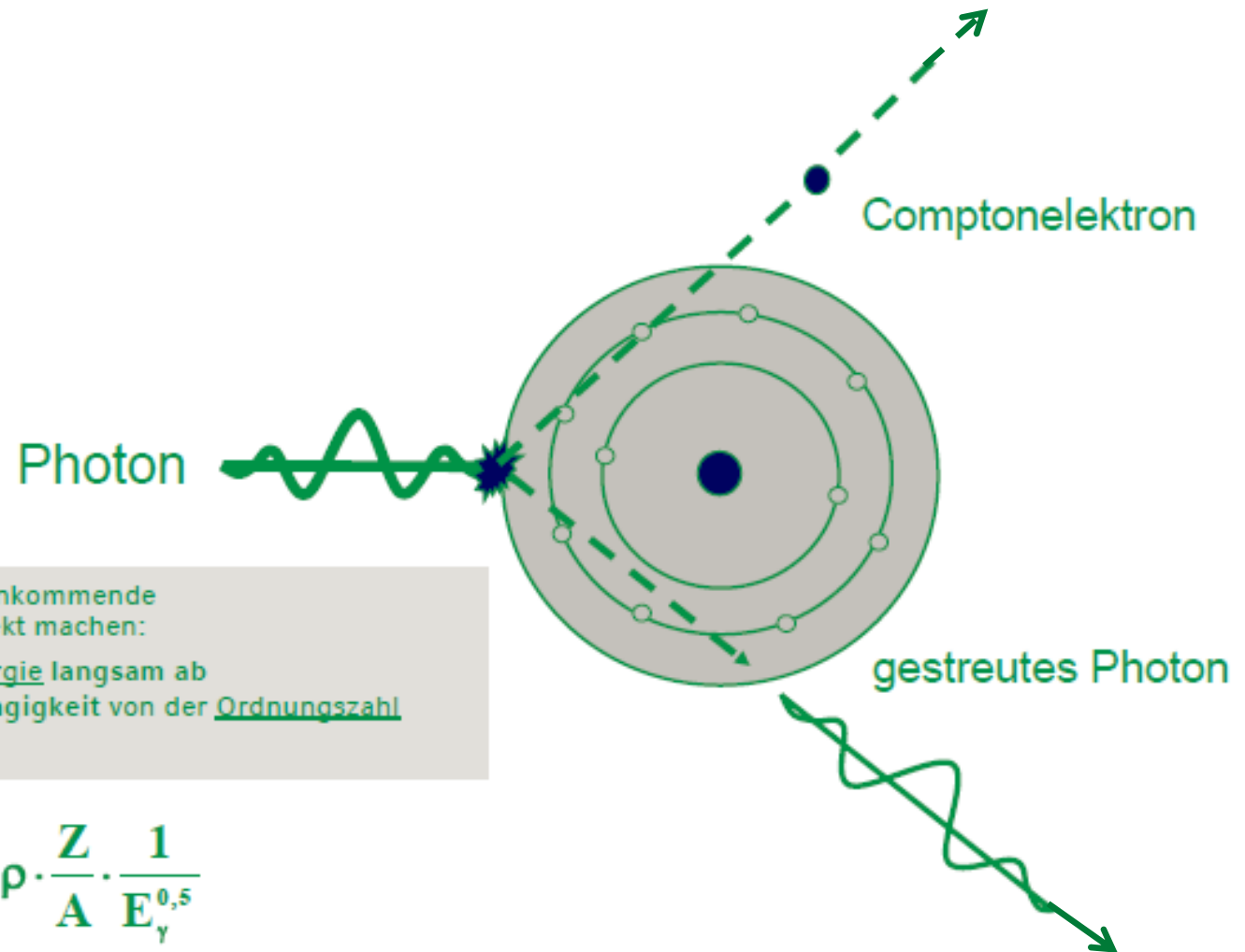


Die Wahrscheinlichkeit, dass ankommende Photonen als WW Photoeffekt machen:

- nimmt mit wachsender Energie stark ab
- nimmt mit wachsender Ordnungszahl stark zu

$$\tau \propto \rho \cdot \frac{Z^4}{A} \cdot \frac{1}{E_\gamma^3}$$

Comptoneffekt

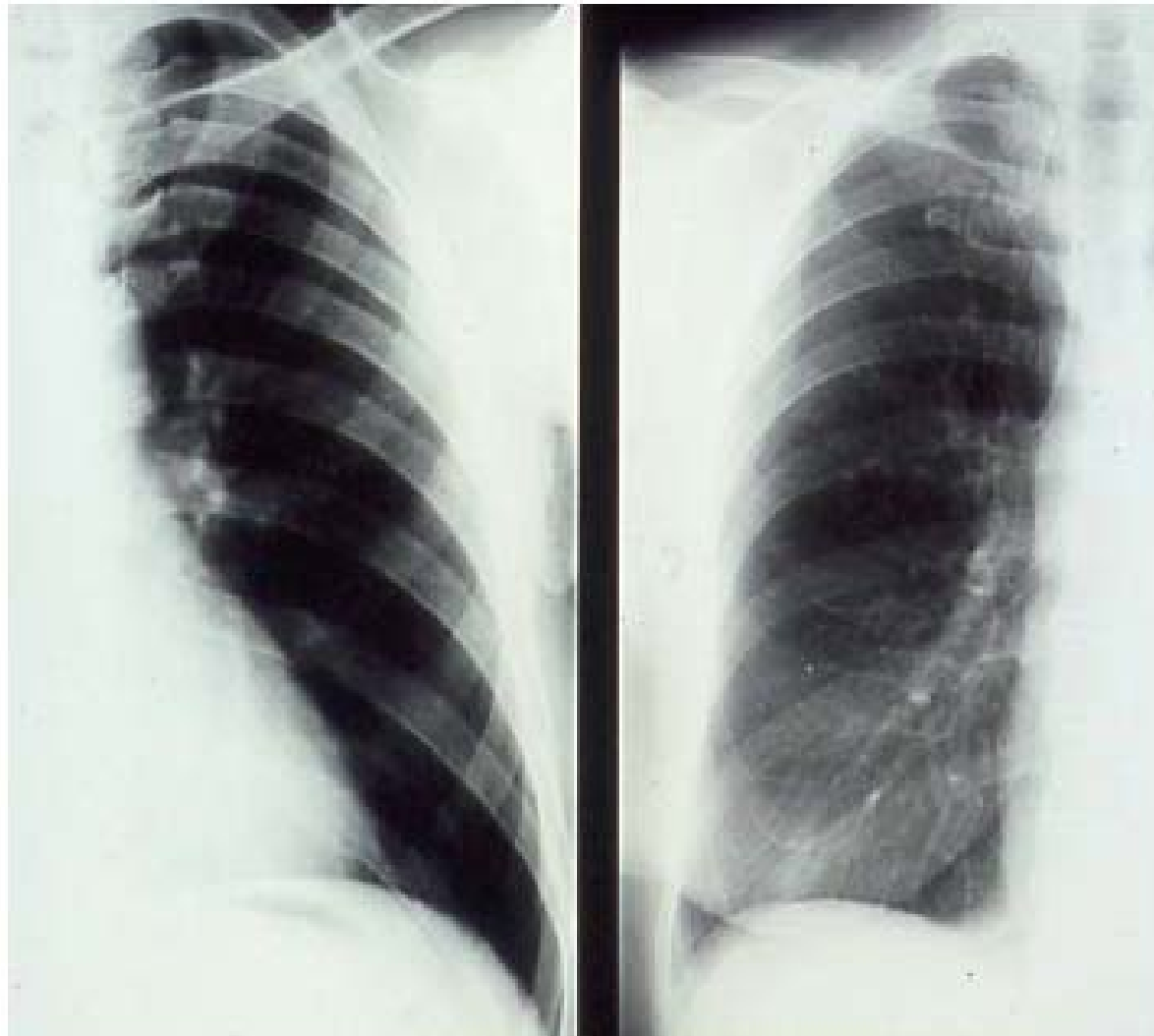


Die Wahrscheinlichkeit, dass ankommende Photonen als WW Comptoneffekt machen:

- nimmt mit wachsender Energie langsam ab
- zeigt praktisch keine Abhängigkeit von der Ordnungszahl

$$\sigma_c \propto \rho \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{1}{E_\gamma^{0,5}}$$

Abhängigkeit des Kontrastes von der Röntgen-Spannung



60 kV

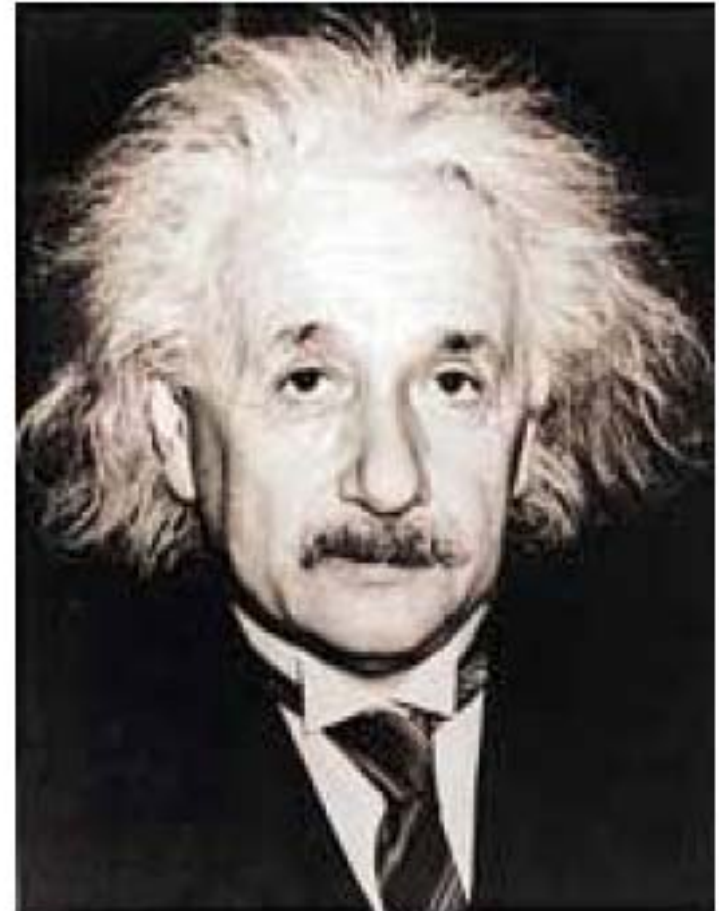
117 kV

Äquivalenz von Masse und Energie

$$E = m \cdot c^2$$

$$E_{\text{Ges}} = E_0 + E_{\text{kin}}$$

{ Gesamtenergie =
Ruheenergie + Bewegungsenergie }



Paarbildung

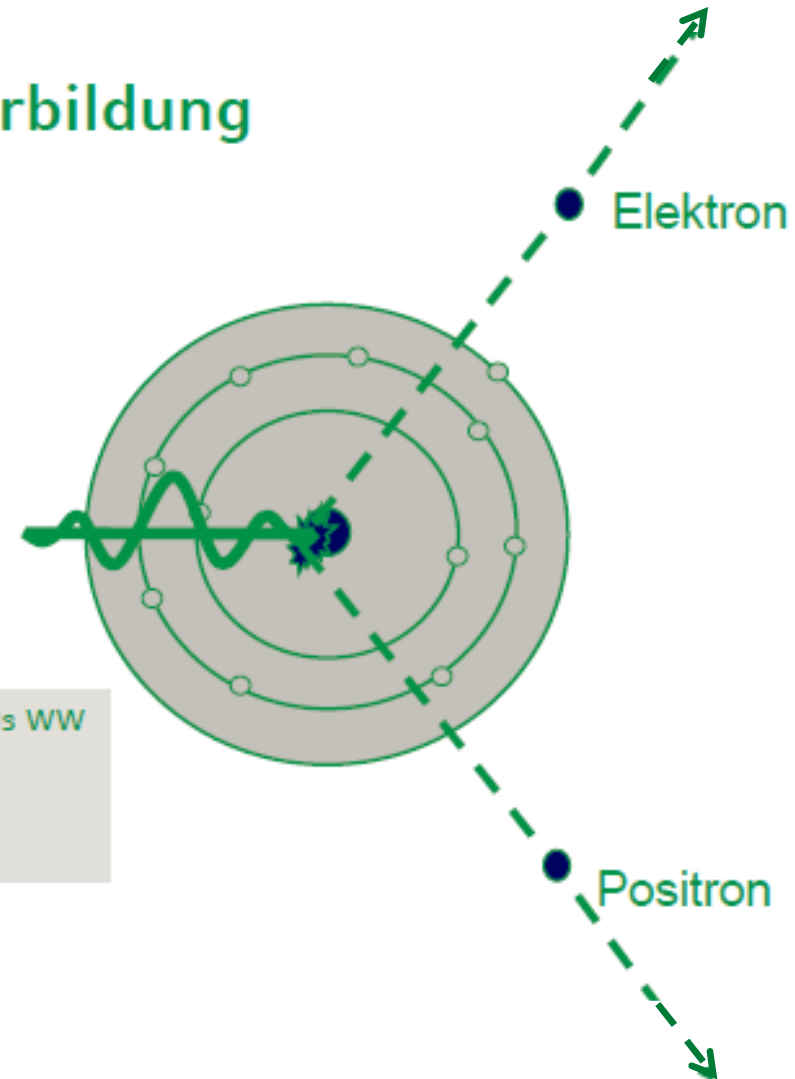
→ **Schwelle:** $E_\gamma > 1022 \text{ keV}$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ankommende Photonen als WW
Paarbildung machen:

- nimmt mit wachsender Energie zu
- nimmt mit wachsender Ordnungszahl zu

$$\kappa \propto \rho \cdot \frac{Z^2}{A} \cdot \log E_\gamma$$

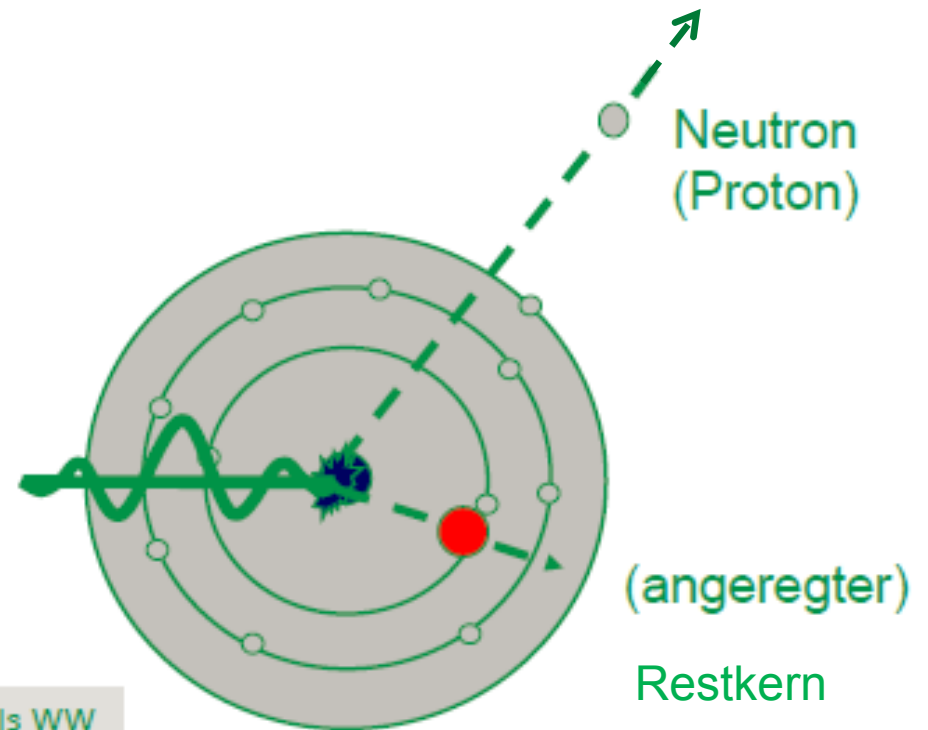
Paarbildung



Kernphotoeffekt

→ Schwelle: Bindungsenergie der Nukleonen
 $E_\gamma \gg 8 \text{ MeV}$ z.B. bei ^{16}O

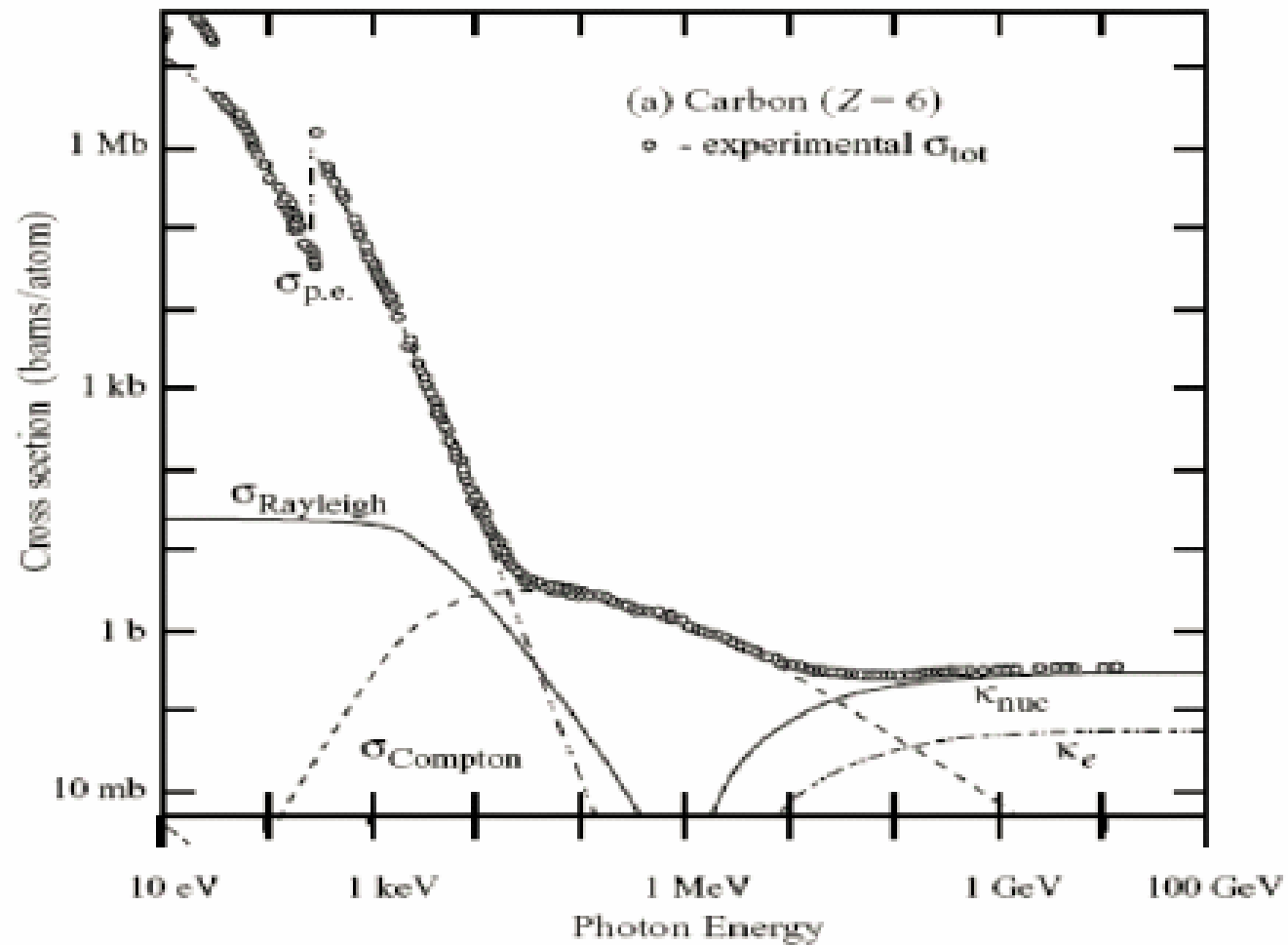
Photon



Die Wahrscheinlichkeit, dass ankommende Photonen als WW Kernphotoeffekt machen, zeigt Riesenresonanzen.

Energieabhängigkeit: Ist maximal bei 20-25 MeV für leichte, 10-15 MeV für schwere Kerne.
von der Ordnungszahl in erster Näherung unabhängig

Massen-Abschwächungskoeffizient



WW Photonenstrahlung mit Materie

- WW mit der Atomhülle

Kohärente Streuung

Rayleighstreuung

Photoionisation

Photoeffekt

Inkohärente Streuung

Comptoneffekt

- WW mit dem Coulombfeld der Atomkerne

Teilchen-Antiteilchenerzeugung

Paarbildungseffekt

- WW mit dem Atomkern

Teilchenemission+Aktivierung

Kern-Photoeffekt

WW von Neutronen mit Materie

WW mit Atomkernen

Elastische Streuung

Impulsübertrag
max. bei Protonen

Inelastische Streuung

Anregung

Kern ist angeregt → Emission von γ -Quanten

Kernreaktionen

thermische Neutronen: **Neutroneneinfang**

Kern ist angeregt → Emission von γ -Quanten

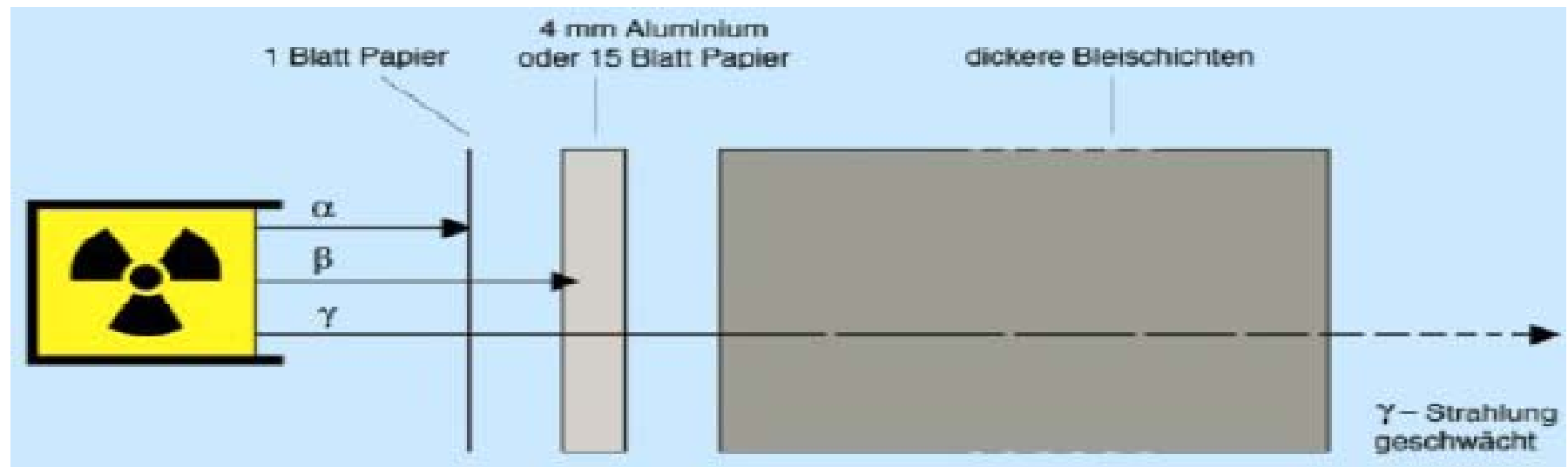
schnelle Neutronen: **Teilchenemission, Spallation**

Reaktionen mit Abstrahlung geladener Teilchen (n,p)-, (n,d)-, (n, α)-

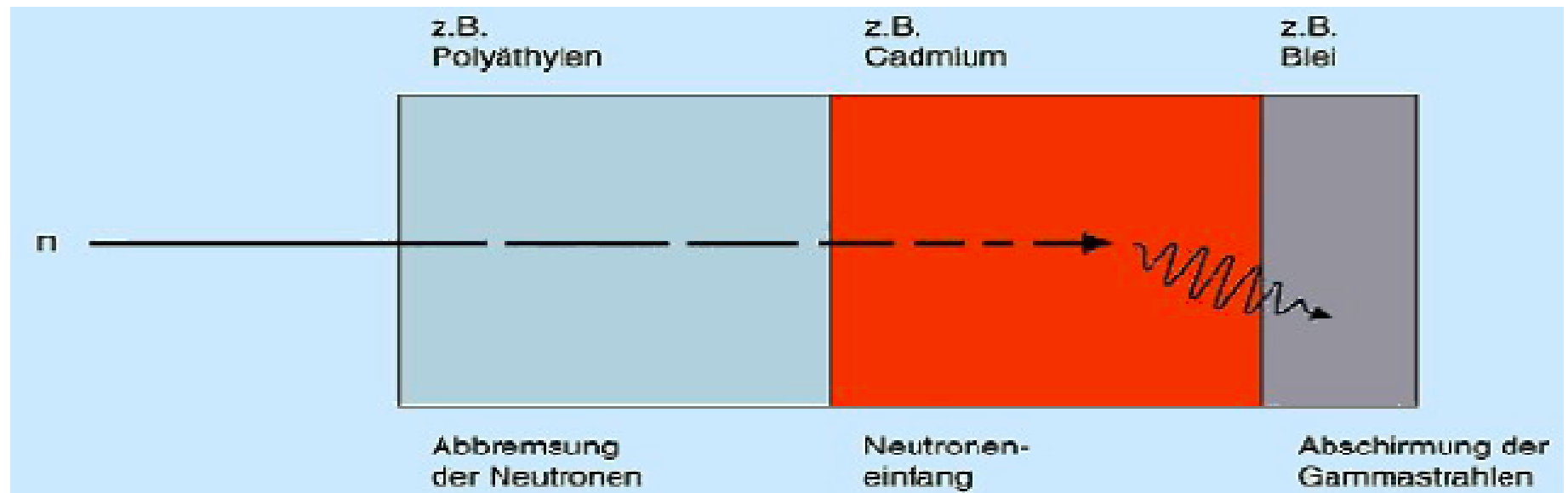
Kernspaltung

Spaltprodukte sind i.A. instabil

Unterschiedliche Absorption von Strahlung



Unterschiedliche Absorption von Strahlung



Toxizität von Strahlung

- **Strahlenart, Strahlenenergie**
- **Organ, Gewebe**
- **Zeitlicher Verlauf**

Energiedosis

$$\text{Energiedosis} = \frac{\text{absorbierte Energie}}{\text{Masse}}$$

$$D_w = \frac{dW_D}{dm}$$

Einheit: Gray (Gy)

$$1\text{J/kg} = 1\text{Gy}$$

alte Einheit: rad (1 rad = $1 \cdot 10^{-2}$ Gy)

Linearer Energietransfer (LET)

$$\text{LET} = L_{\Delta} = \left(\frac{dE}{dS} \right)_{\Delta}$$

Einheit: J/m bzw. keV/mm

Teilchen

Elektronen, Röntgen-,
Gammastrahlung

Protonen

Teilchen aus Kern-
reaktionen

schwere Rückstoß-
kerne

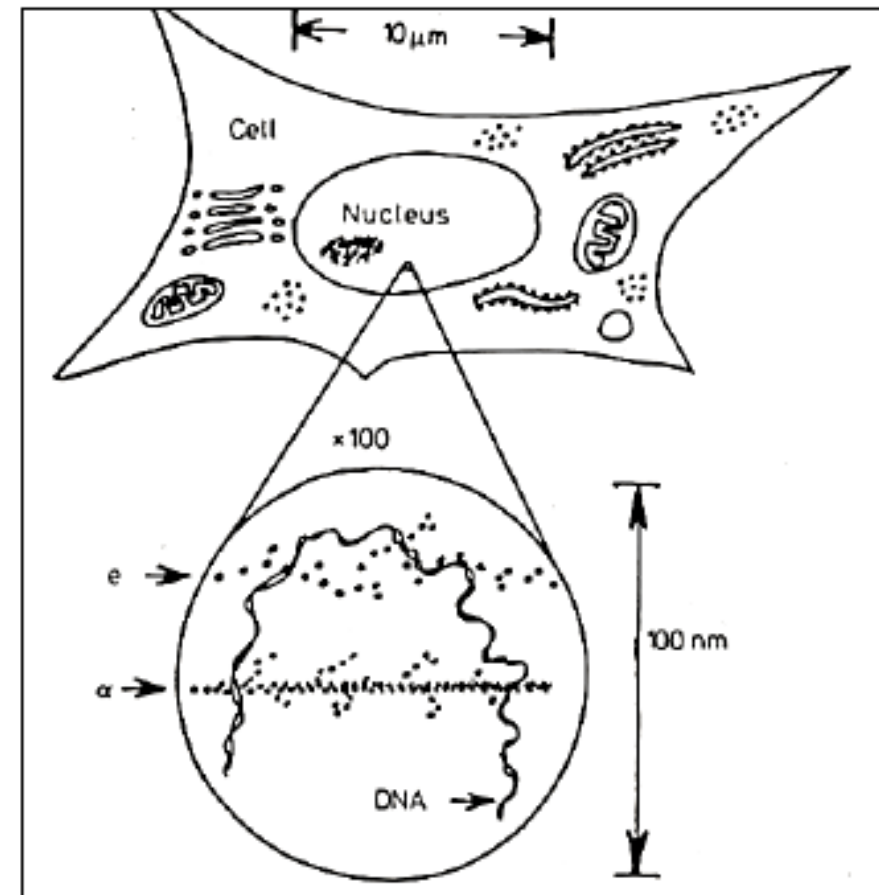
L_{Δ} in keV/ μ m

0,2 - 30

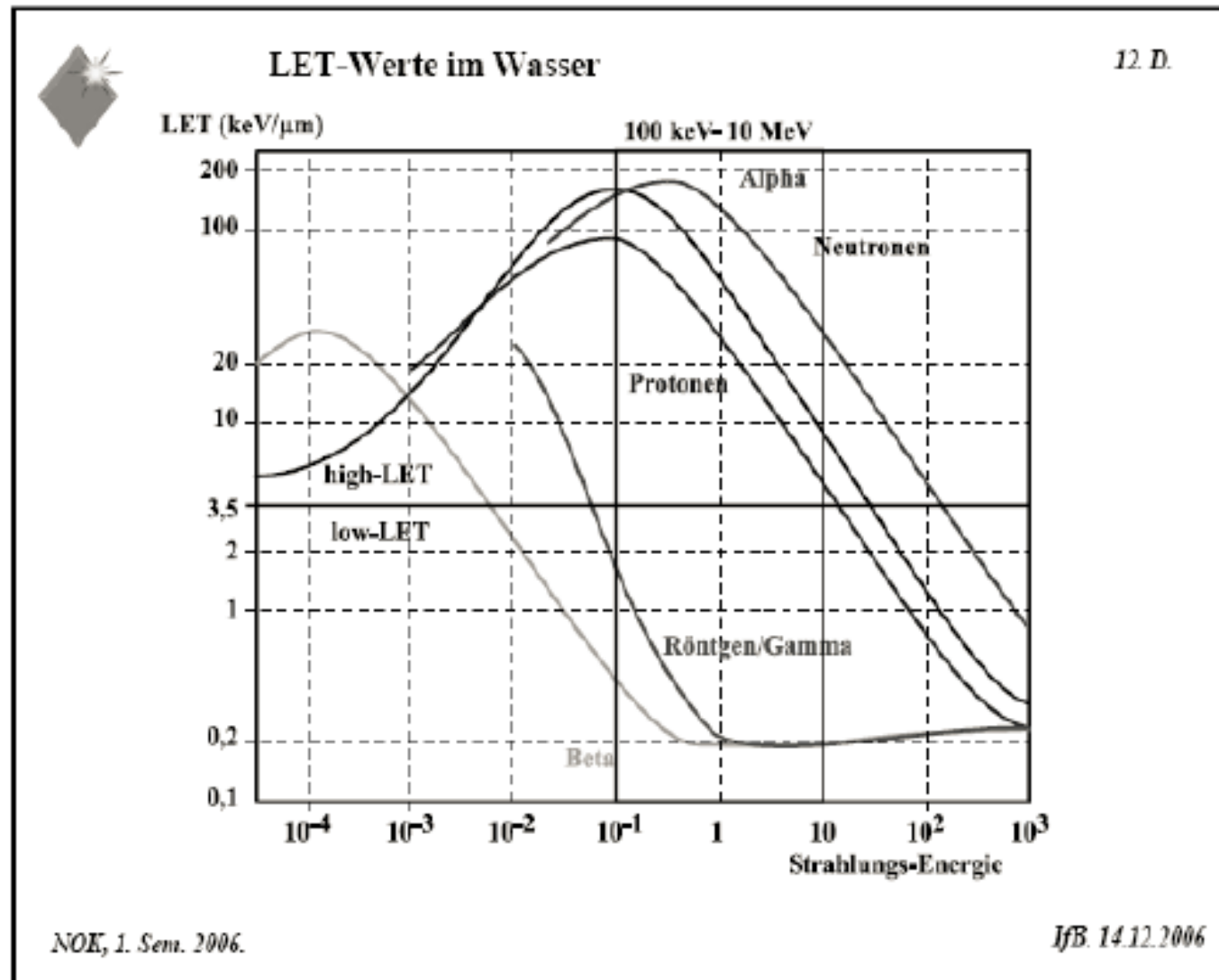
5 - 100

40 - 250

100 - 4000



Linearer Energietransfer



Äquivalentdosis

Äquivalentdosis = Qualitätsfaktor x Energiedosis

$$H = q \times D$$

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

alte Einheit: rem ($1\text{ rem} = 10^{-2}\text{Sv}$)

Dosisgrößen im Strahlenschutz

Operative Größen (ICRU)

Äquivalentdosis H

$$H = Q \cdot D$$

(Punktgröße)

Ortsdosis

Umgebungs-
äquivalentdosis
 $H^*(10)$

Richtungs-
äquivalentdosis
 $H'(0,07,\Omega)$

Personendosis

$$H_p(d)$$

Schutzgrößen (ICRP)

Körperdosis
(Mittelwertgröße)

Organdosis

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R}$$

$$H_T = \sum H_{T,R} \rightarrow$$

Effektive Dosis

$$E = \sum w_T \cdot H_T$$

Dosisgrößen im Strahlenschutz

Operative Größen (ICRU)

Äquivalentdosis H

$$H = Q \cdot D$$

(Punktgröße)

Organdosis

Umgebungs-
äquivalentdosis
 $H^*(10)$

Richtungs-
äquivalentdosis
 $H^*(0,07,\Omega)$

Personendosis

$$H_p(d)$$

Schutzgrößen (ICRP)

Körperdosis
(Mittelwertgröße)

Organdosis

Effektive Dosis

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R}$$

$$H_T = \sum H_{T,R} \rightarrow$$

$$E = \sum w_T \cdot H_T$$

Energiedosis
gibt die durch das Gewebe
absorbierte Energie an

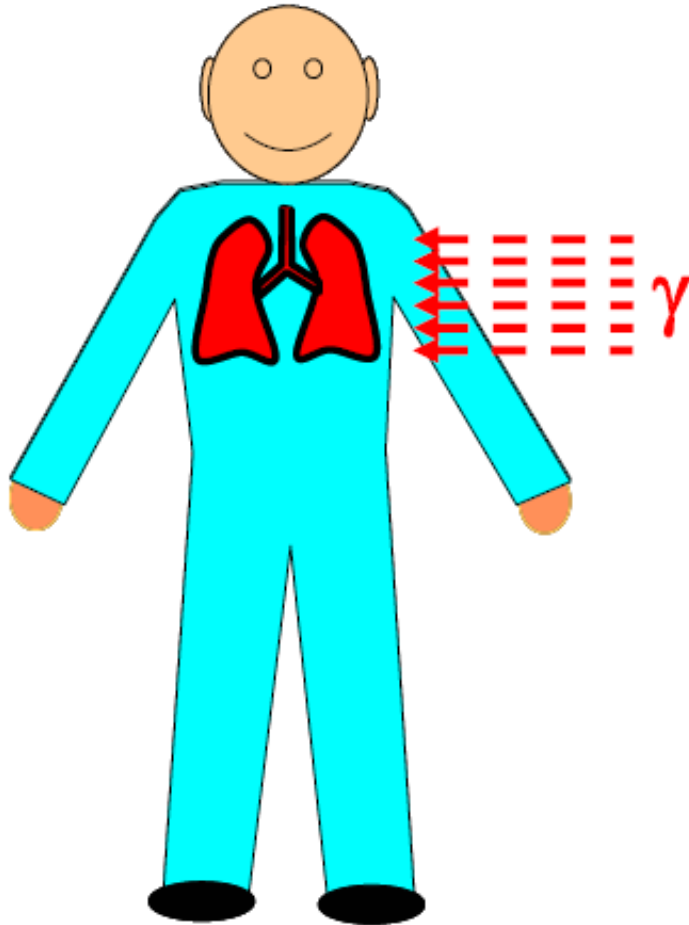
Multiplikation mit dem
Strahlungs-Wichtungsfaktor

Organdosis
Äquivalentdosis
in einem Gewebe oder Organ
wichtet die Energiedosis unter
Berücksichtigung der biologischen
Wirksamkeit der Strahlungsarten

Strahlungswichtungsfaktoren w_R

Art	Energiebereich	w_R
Photonen, alle Energien		1
Elektronen und Myonen, alle Energien		1
Neutronen, Energie	< 10 keV	5
	10 keV bis 100 keV	10
	> 100 keV bis 2 MeV	20
	> 2 MeV bis 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Protonen, außer Rückstoßprotonen, Energie > 2 MeV		5
Alphateilchen, Spaltfragmente, schwere Kerne		20

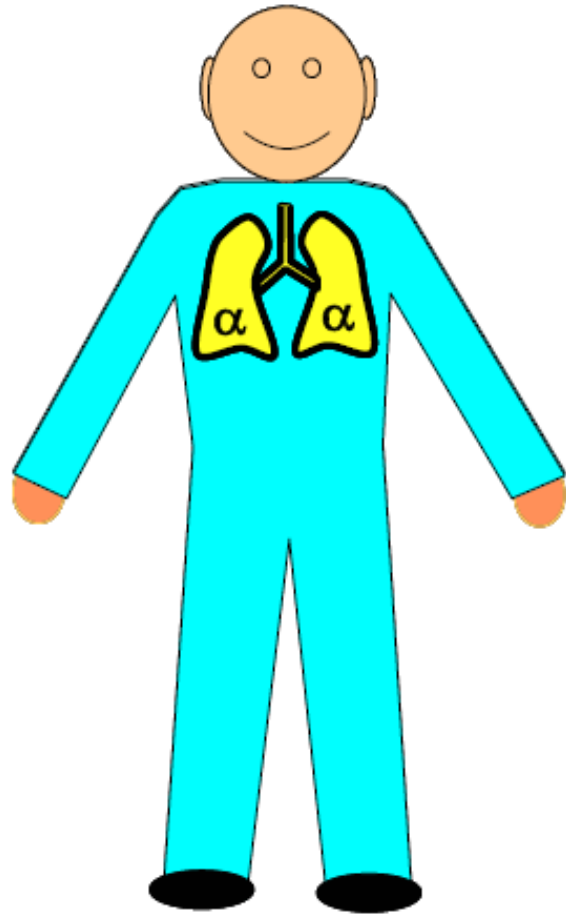
Berechnung der Organdosis



$$H_{\text{Lunge}, \gamma} = w_{\gamma} \cdot D_{\text{Lunge}, \gamma}$$

$$H_{\text{Lunge}, \gamma} = 1 \cdot 0,2 \text{ mGy} = 0,2 \text{ mSv}$$

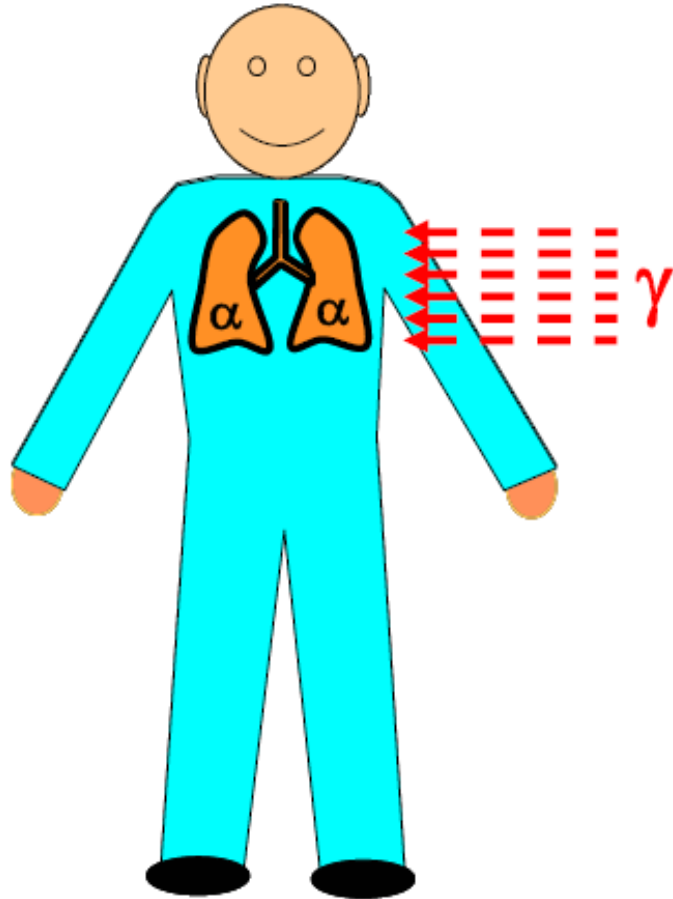
Berechnung der Organdosis



$$H_{\text{Lunge}, \alpha} = w_{\alpha} \cdot D_{\text{Lunge}, \alpha}$$

$$H_{\text{Lunge}, \alpha} = 20 \cdot 0,06 \text{ mGy} = 1,2 \text{ mSv}$$

Berechnung der Organdosis



$$H_{\text{Lunge}, \gamma} = w_{\gamma} \cdot D_{\text{Lunge}, \gamma}$$

$$H_{\text{Lunge}, \gamma} = 1 \cdot 0,2 \text{ mGy} = 0,2 \text{ mSv}$$

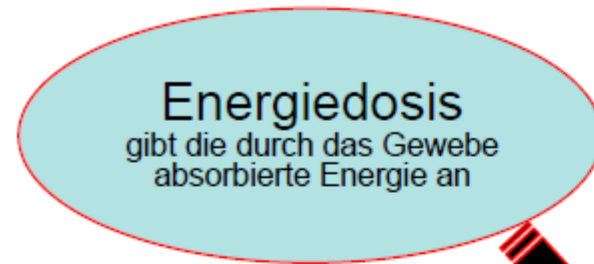
+

$$H_{\text{Lunge}, \alpha} = w_{\alpha} \cdot D_{\text{Lunge}, \alpha}$$

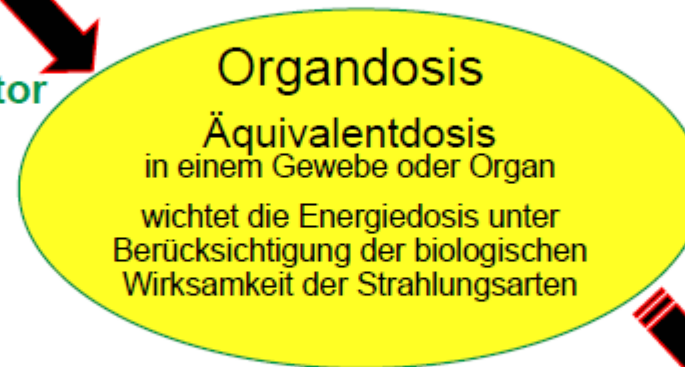
$$H_{\text{Lunge}, \alpha} = 20 \cdot 0,06 \text{ mGy} = 1,2 \text{ mSv}$$

=

$$H_{\text{Lunge}} = \sum H_{\text{Lunge}, \gamma+\alpha} = 1,4 \text{ mSv}$$



Multiplikation mit dem
Strahlungs-Wichtungsfaktor



Multiplikation mit dem
Gewebe-Wichtungsfaktor



Dosisgrößen im Strahlenschutz

Operative Größen (ICRU)

Äquivalentdosis H
 $H = Q \cdot D$
(Punktgröße)

Organdosis

Umgebungs-
äquivalentdosis
 $H^*(10)$

Richtungs-
äquivalentdosis
 $H^*(0,07,\Omega)$

Personendosis

$H_p(d)$

Schutzgrößen (ICRP)

Körperdosis
(Mittelwertgröße)

Organdosis

Effektive Dosis

$$H_{T,R} = w_R \cdot D_{T,R}$$

$$H_T = \sum H_{T,R} \rightarrow$$

$$E = \sum w_T \cdot H_T$$

Gewebewichtungsfaktoren w_T

Organe oder Gewebe	Gewebewichtungsfaktoren	
	ICRP (StrlSchG)	ICRP 60 (RöV alt)
Keimdrüsen	0,08	0,20
Rotes Knochenmark	0,12	0,12
Dickdarm	0,12	0,12
Lunge	0,12	0,12
Magen	0,12	0,05
Blase	0,04	0,05
Brust	0,12	0,05
Leber	0,04	0,05
Speiseröhre	0,04	0,05
Schilddrüse	0,04	0,05
Speicheldrüsen	0,01	
Haut	0,01	0,01
Knochenoberfläche	0,01	0,01

Effektive Dosis

Effektive Dosis = Gewebe-Wichtungsfaktor · Organdosis

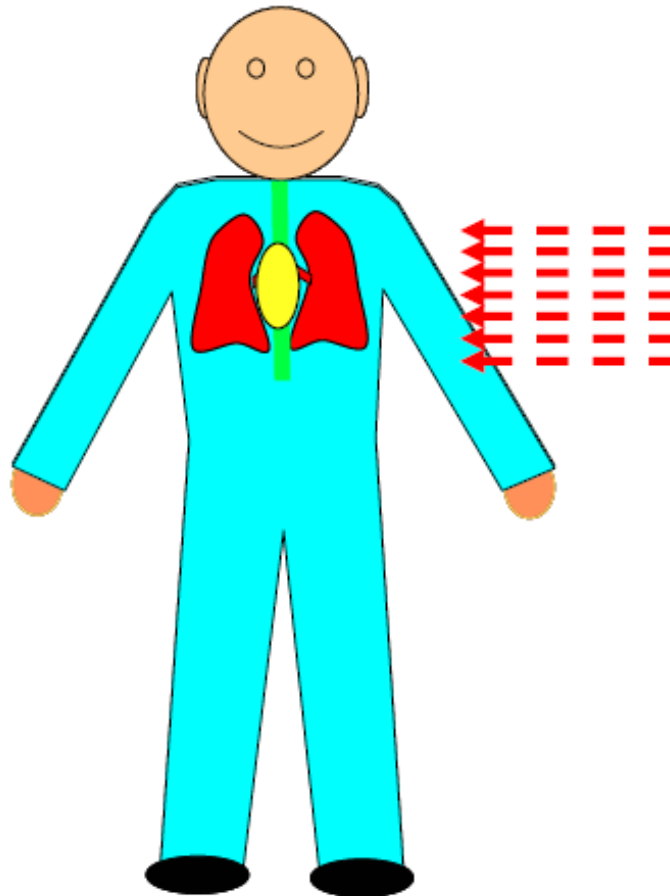
$$E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

mit $\sum_T w_T = 1$

Einheit: Sievert (Sv)

Effektive Dosis

Wicht. Verstandnis !!



$$w_{\text{Lunge}} \cdot H_{\text{Lunge}} \\ = 0,12 \cdot 18 \text{ mSv} = 2,2 \text{ mSv}$$

+

$$w_{\text{rot. Knochenmark}} \cdot H_{\text{rot. Knochenmark}} \\ = 0,12 \cdot 5 \text{ mSv} = 0,6 \text{ mSv}$$

+

$$w_{\text{Oesoph.}} \cdot H_{\text{Oesoph.}} \\ = 0,05 \cdot 14 \text{ mSv} = 0,7 \text{ mSv}$$

=

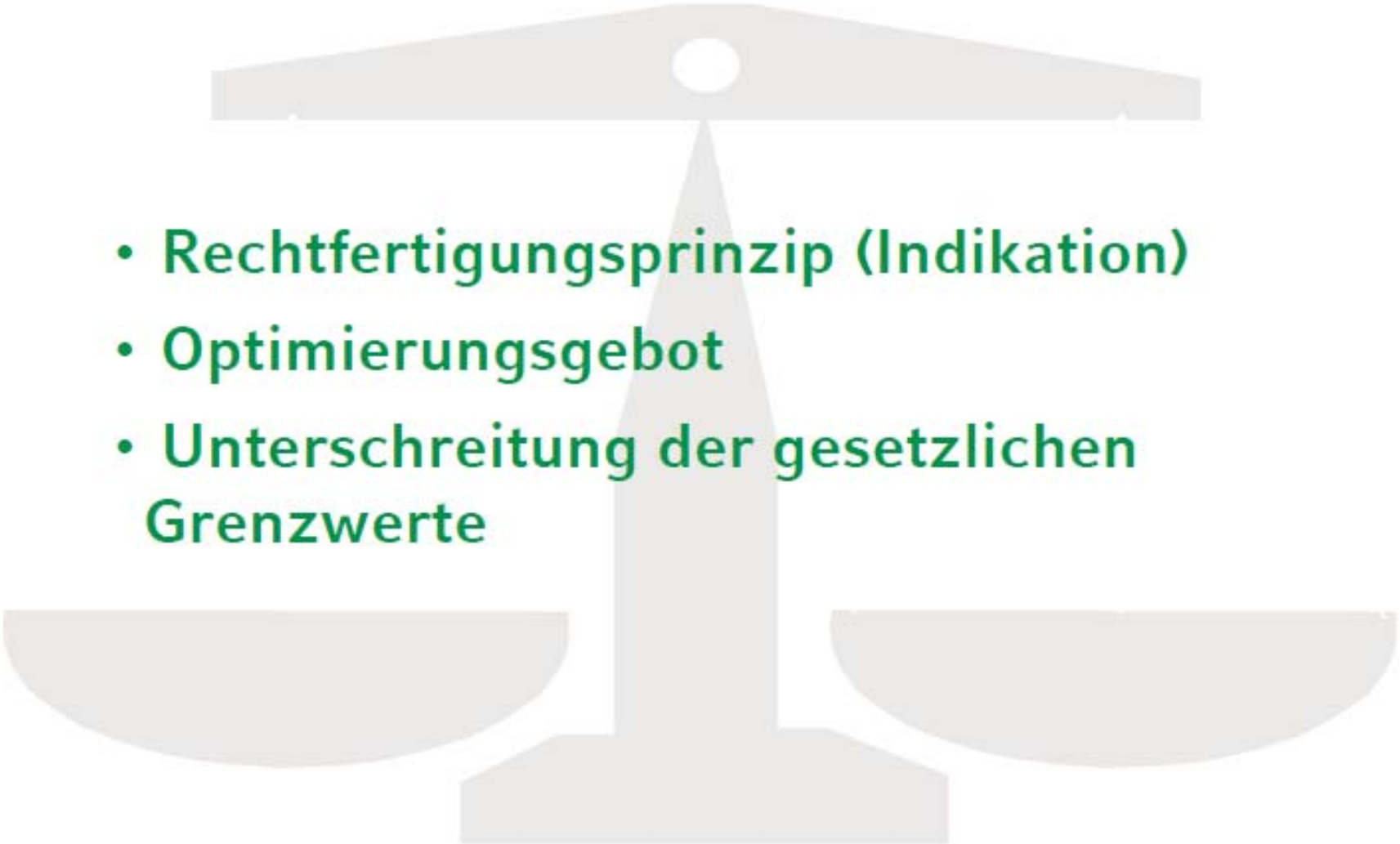
$$E = \sum w_T \cdot H_T = 3,5 \text{ mSv}$$

ME

Äquivalentdosen

Dosis	Herkunft bzw. Auswirkung	
1. 2-4 mSv	Jährliche natürliche Strahlenbelastung	
2. 0.2-1 mSv	Röntgenaufnahme der Lunge	
3. Ca. 10 mSv	Röntgenaufnahme des Beckens	
4. 250-500 mSv	Reversible Blutbildveränderungen	
5. 1.0-1.2 Sv	Haarausfall, Übelkeit („Strahlenkater“)	
6. 4-5 Sv	LD 50	
7. 7 Sv	100 % der betroffenen Personen sterben innerhalb von	{ 30 Tagen 5 Tagen
8. 50 Sv		

Grundsätze des Strahlenschutzes

- 
- **Rechtfertigungsprinzip (Indikation)**
 - **Optimierungsgebot**
 - **Überschreitung der gesetzlichen Grenzwerte**

Strahlenschutz – rechtliche Grundlagen



Anwendungsbereich

Strahlenschutzverordnung § 2

„folgende Tätigkeiten:

- a) Umgang mit künstlich erzeugten radioaktiven Stoffen

.....

- d) Errichtung und Betrieb von Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlen mit einer Teilchen- oder Photonenenergie von mindestens 5 Kiloelektronenvolt

.....

keine Regelungen für:

.....

- die Errichtung und den Betrieb von Röntgeneinrichtungen und Störstrahlern nach der Röntgenverordnung“

Röntgenverordnung § 1

„Röntgeneinrichtungen und Störstrahler, in denen Röntgenstrahlung mit einer Grenzenergie von mindestens 5 Kiloelektronvolt durch **beschleunigte Elektronen** erzeugt werden kann und bei denen die Beschleunigung der Elektronen auf eine Energie von 1 Megaelektronvolt begrenzt ist.“

Anwendungsbereich

Strahlenschutzverordnung § 2

„folgende Tätigkeiten“

a) Umgang mit radioaktiven Stoffen

.....

d) Errichtung, Betrieb und Stilllegung von Anlagen zur Erzeugung von ionisierender Strahlung durch Teilchenbeschleuniger oder Kernreaktoren

mindestens 5 Kiloelektronenvolt

keine

die

Röntgen

der



Nuklearmedizin



Strahlentherapie

Röntgenverordnung § 1

„Röntgenanlagen“

dene

Gren

5 Kilo

Elek

dene

auf e

1 Me



Röntgendiagnostik

Beruflich strahlenexponierte Personen

Definition nach § 54 StrlSchV:

Personen, die einer beruflichen Strahlenexposition durch Tätigkeiten nach § 2 Abs. 1 Nr. 1 ausgesetzt sind,.....

- Tätigkeiten:
- a) Umgang mit künstlich erzeugten radioaktiven Stoffen
 -
 - d) Errichtung und Betrieb von Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlen mit einer Teilchen- oder Photonenenergie von mindestens 5 Kiloelektronenvolt

(zum Merken: Tätigkeiten: zielgerichteter Umgang mit Strahlung

Arbeiten : Umgang mit Strahlung ist nur nebensächlich)

Grenzwerte der Strahlenexposition [mSv]

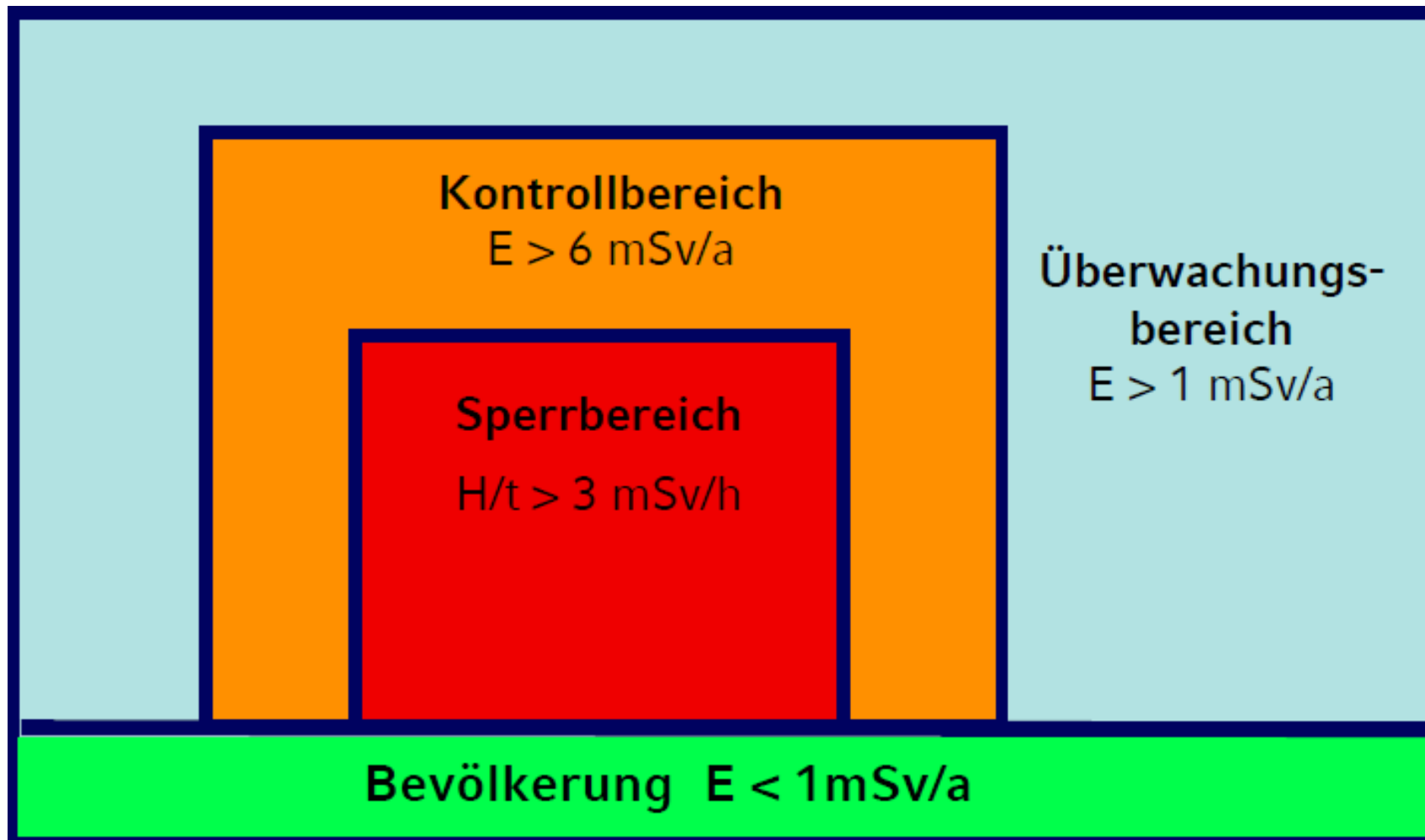
	Berufl. Strahlenexponierte Personen		Einzelperson der Bevölkerung (bzw. Pers. unter 18 J.)
	Kategorie A	Kategorie B	
Effektive Dosis	20	6	1
1. Organdosis für: Augenlinse	150	45	15
2. Organdosis für: Haut, Hände, Unterarme, Füße oder Knöchel	500	150	50
3. Organdosis für: Keimdrüsen, Gebärmutter, rotes Knochenmark	50	-	-
4. Organdosis für: Schilddrüse, Knochenoberfläche	300	-	-
5. Organdosis für: Dickdarm, Lunge, Magen, Blase, Brust, Leber, Speiseröhre, andere Organe soweit nicht unter 3 genannt	150	-	-

Gebärfähige Frauen:
2 mSv / Monat an der Gebärmutter

Ungeborenes Kind:
1 mSv ab Mitteilung bis Ende der Schwangerschaft

Berufslebensdosis:
400 mSv

Strahlenschutzbereiche



Literatur:

- *Hanno Krieger: Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes*, Veröffentlicht von Vieweg+Teubner Verlag, 2004
ISBN 3519004879, 9783519004875