



Dosimetrie der ionisierenden Strahlungen

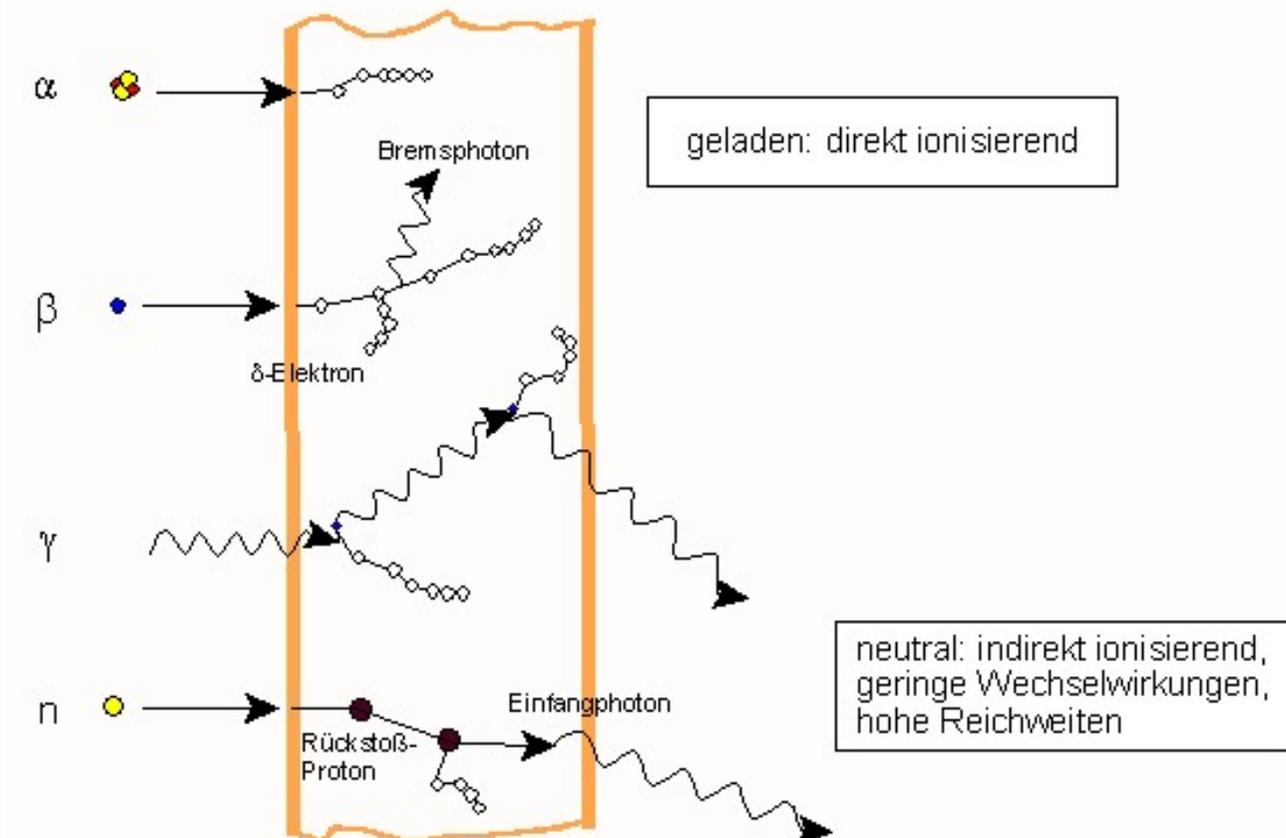
Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit der Materie

Teilchenstrahlungen

α , β^- , β^+
 n

EMS

γ , X





Physikalische Strahlendosimetrie:

sie soll in den Geweben an einer vorliegenden Stelle die absorbierte Energie bestimmen

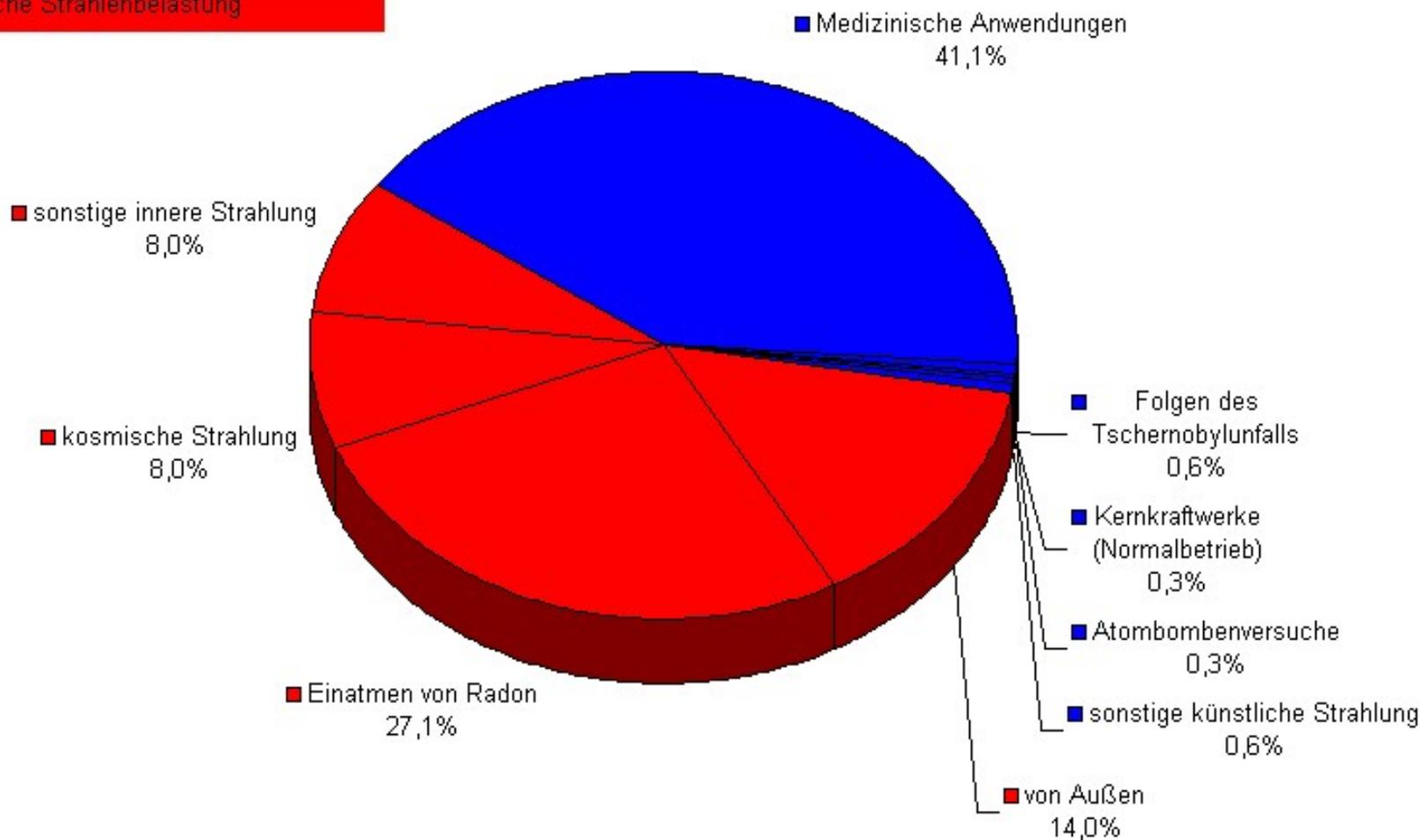
Aus dem Aspekt der biologischen Wirkung ist die Kenntnis der absorbierten Energie zwar von elementarer Bedeutung, *aber nicht ausreichend*.

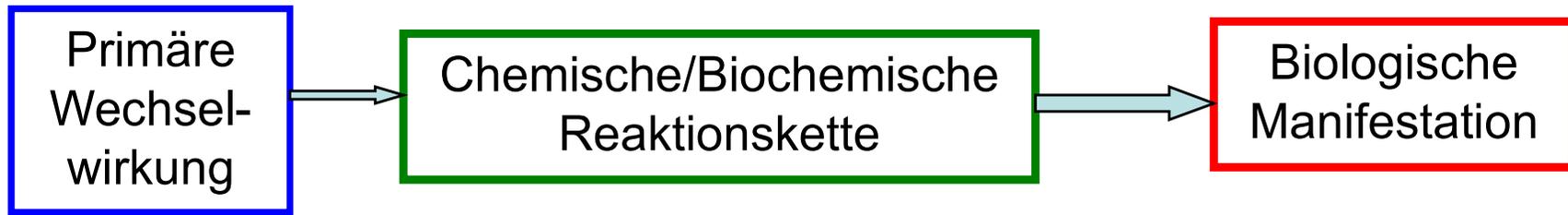
Biologische Strahlendosimetrie:

sie soll auf eine erlittene Dosis von unbekannter Größe anhand von gut meßbaren, statistisch auswertbaren biologischen Änderungen geschlossen werden.

Das Abschätzen des Ausmasses der schädlichen Wirkung ist die Aufgabe der Dosimetrie, in erster Linie zur Prophylaxe.

Alltägliche Strahlenbelastung



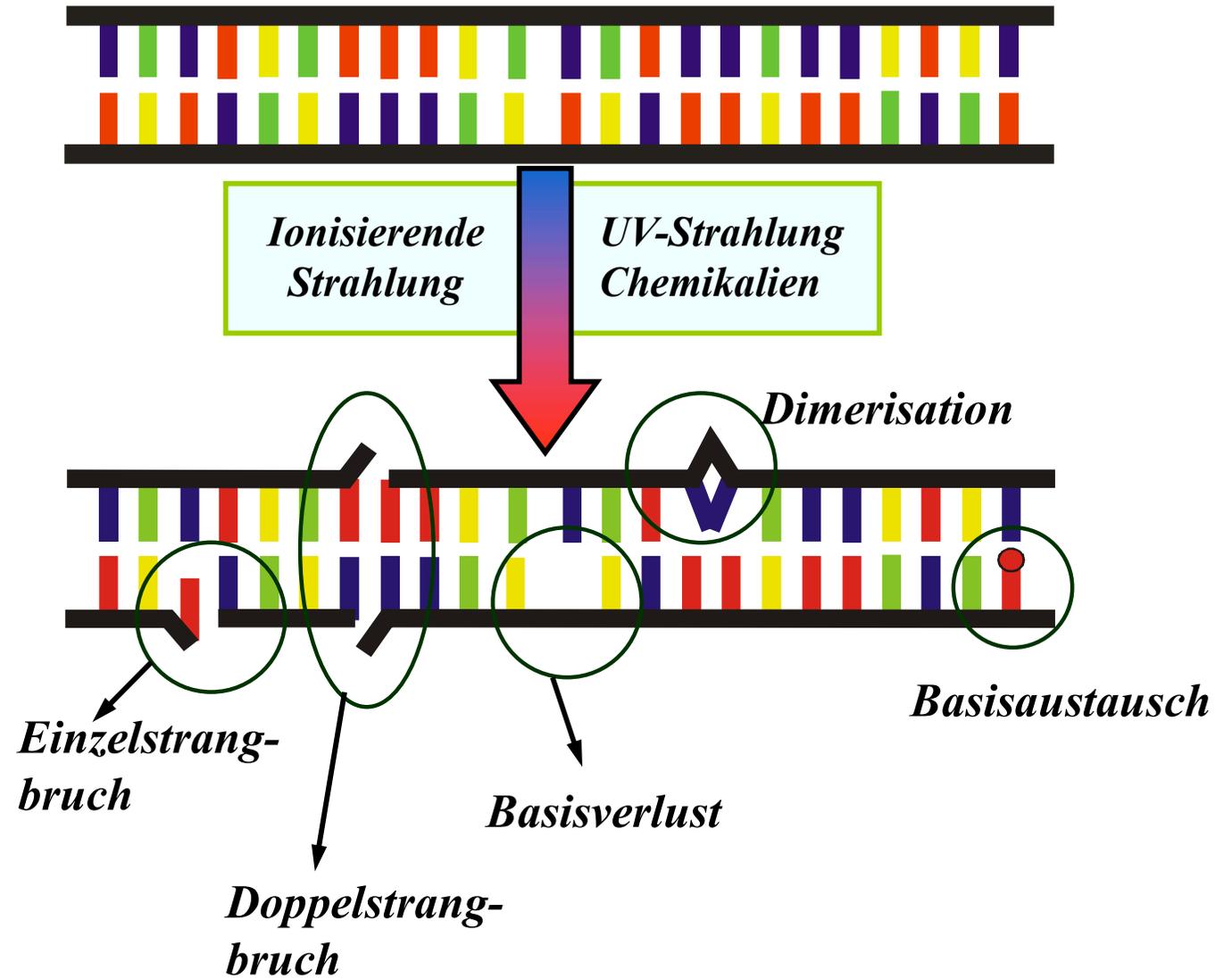
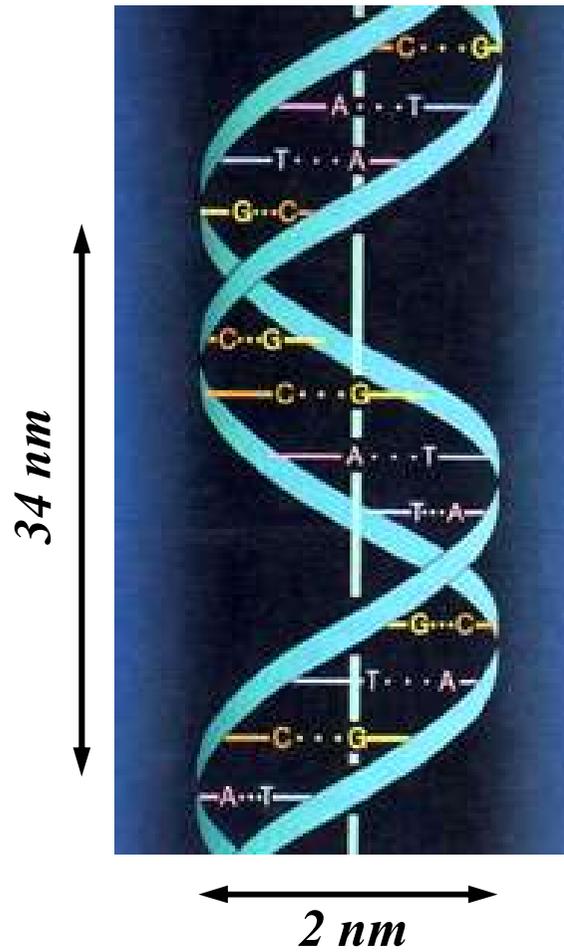


Zeitskala: ~ps

~ ns – μ s

Stunden/.../Jahren

Ereignis	Zeitskala
Physikalische Wechselwirkung	$<10^{-14}$ s
Chemisch-physikalische Vorgänge	10^{-12} — 10^{-8} s
(photo)chemische/biochemische Vorgänge	$\sim 10^{-7}$ s — Stunden
Schädigungen der biologischen Makromoleküle/Moleküle	10^{-3} s — Stunden
Frühschäden (Zelltod, Absterben des Organismus infolge der strukturellen Schaden)	Stunden — Wochen
Spätschädigungen (Tumoren, Mutationen...)	Jahren — Jahrzehnten





Strahlenwirkung

reversibel

irreversibel

Reparatur-Mechanismen

Strahlenverletzung, Strahlenkrankheit

akut

chronisch

Die Wirksamkeit der Reparatur- und Schutzmechanismen hängen von

- der Zellzyklusphase,
- dem Energiegehalt der Zelle,
- der Konzentration der Reparaturenzyklen im Zellplasma ab.

Dosis der erlittenen Strahlenbelastung

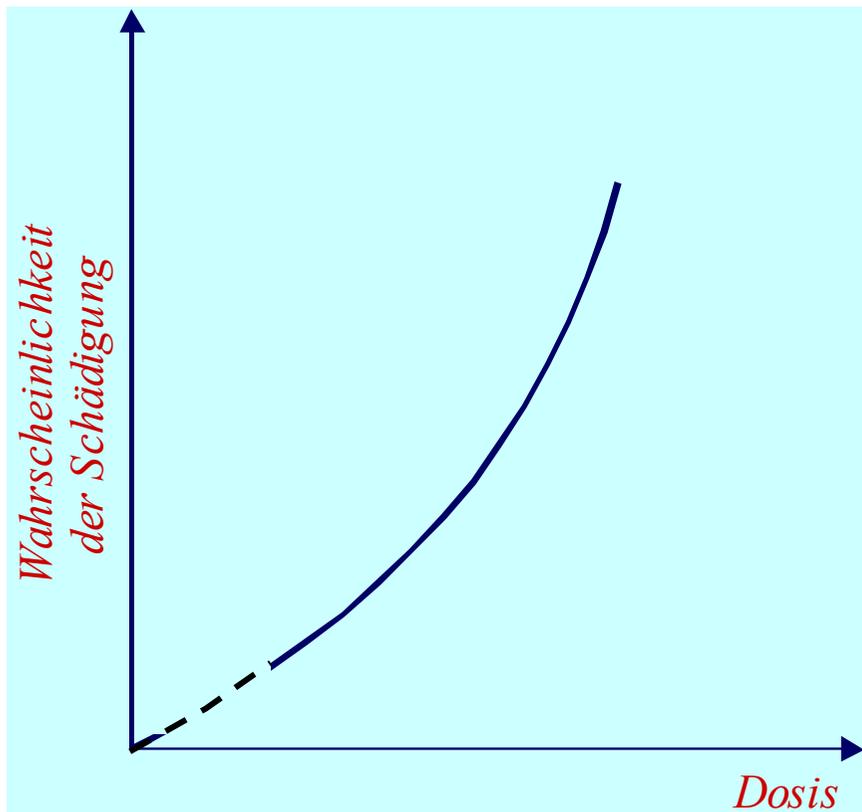


Biologische Wirkung der Strahlung (Strahlenschäden)

➤ *Stochastische Wirkung*

➤ *Deterministische Wirkung*

Stochastische Wirkung



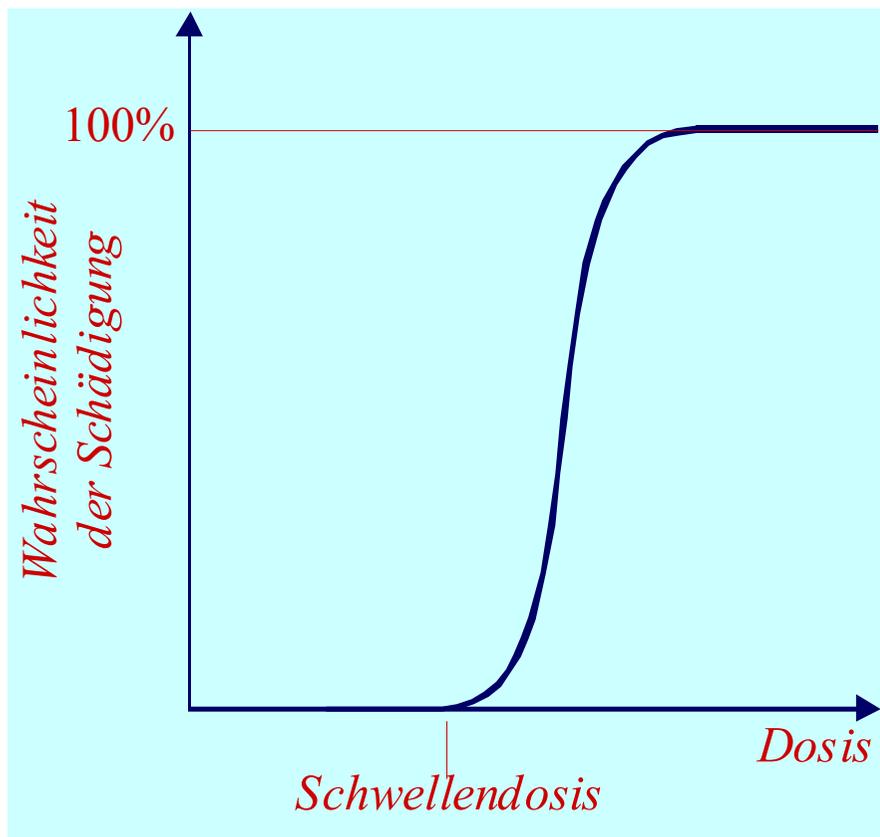
- auf Molekül- oder Zellebene jeder Strahlenschädigung

Erhöhung der Dosis erhöht “nur” die Wahrscheinlichkeit der Geschwulstentstehung, aber nicht den Schweregrad der Krankheit.

Es gibt keine Schwellendosis!

z.B.: Entstehung von bösartigen Geschwülsten (Krebs)

Deterministische Wirkung



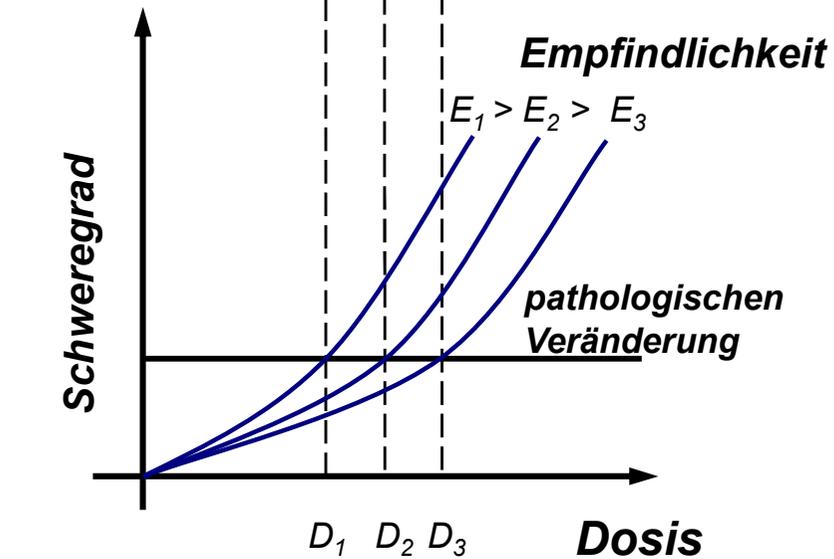
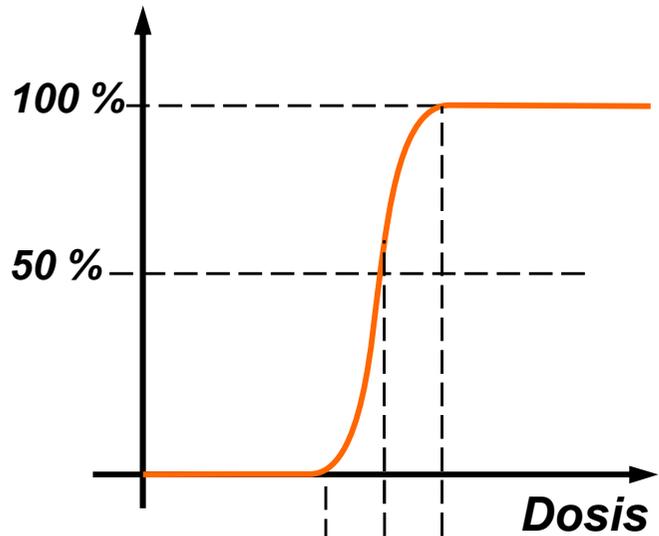
z.B.:

- Strahlenschädigung des roten Knochenmarks,
- Abnahme der Leukozyten,
- Erythem

Erhöhung der Dosis erhöht den Grad der Schädigung



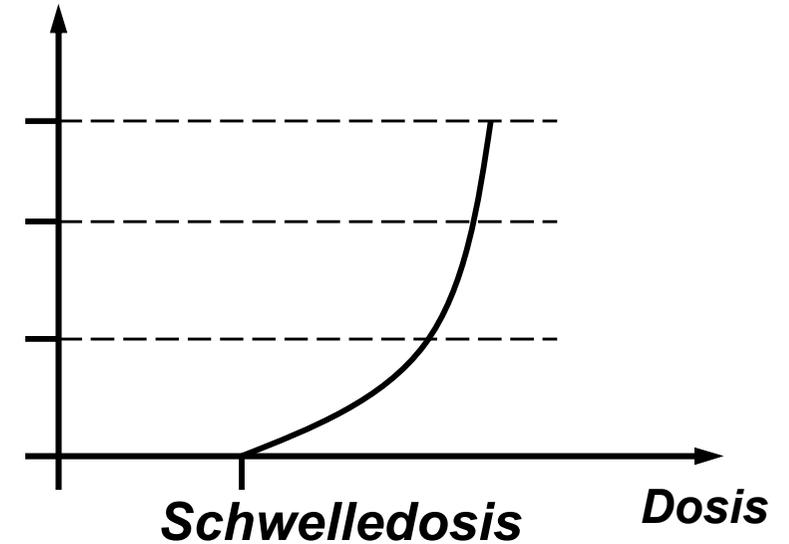
Wahrscheinlichkeit der Schädigung



Schwelldosis der pathologischen Veränderung

Schweregrad

Schwere Veränderung (zB. Gewebenekrosis)
mittlere Veränderung
leichte Veränderung (zB. Erythema)



Generell gilt für die Strahlenkrankheit:
 Je höher die Dosis,
 desto schwerwiegender sind die Auswirkungen,
 desto schneller treten die Symptome auf,
 desto länger dauert die Erholungsphase,
 desto länger bleibt die Krankheit bestehen und
 desto geringer werden die Überlebenschancen.

Dosisbegriffe

A. Energiedosis

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

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} = \frac{\Delta E}{\rho \cdot \Delta V} \quad [D] = \frac{J}{kg} = Gy \text{ (Gray)}$$

Gültigkeit:

- für sämtliche Strahlungen
- keine Beschränkung auf Energie oder Materie



Louis Harold Gray

(* 10. November 1905 in London, † 9. Juli 1965 in Northwood)

war ein britischer Physiker und Radiologe sowie Begründer der Radiobiologie.



Strahlenbelastung und Dosisniveaus

letale Dosis (LD_{100}):

Diejenige Dosis, die innerhalb 30 Tagen beim 100 % der bestrahlten Personen zum Tod führt:

$D > 6 \text{ Gy}$ bei Ganzkörperbestrahlung

halbletale Dosis (LD_{50}):

Diejenige Dosis, die innerhalb 30 Tagen beim 50 % der bestrahlten Personen zum Tod führt:

$D > 3-4 \text{ Gy}$ bei Ganzkörperbestrahlung

Gebräuchliche Dosen in der Medizin bei normaler Fraktionierung 5 x 2 Gy/Woche	
Strahlensensible Tumoren	20 - 40 Gy
Mittelmäßig empfindliche Tumoren	40 - 60 Gy
Strahlenresistente Tumoren	über 60 Gy



B. Ionendosis

$$\text{Ionendosis} = \frac{\text{elektrische Ladung eines Vorzeichens}}{\text{Luftmasse}}$$

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m_{\text{Luft}}} = \frac{\Delta Q}{\rho_{\text{Luft}} \cdot \Delta V} \quad [X] = \frac{\text{C}}{\text{kg}}$$

Gültigkeit:

- ✓ für Röntgen und Gamma-Strahlung
- ✓ in der Luft
- ✓ Photonenenergie < 3 MeV





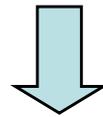
Zusammenhang zwischen Ionendosis (X) und der Energiedosis (D) in einem Gewebe

Bezeichne f_0 die mittlere Energie zur Erzeugung eines Ionenpaares in Luft (~ 34 eV)

$$f_0 = 34 \text{ J/C}$$

f_0 : Energie/Ionenpaare
 X = Ionenpaare/Masse

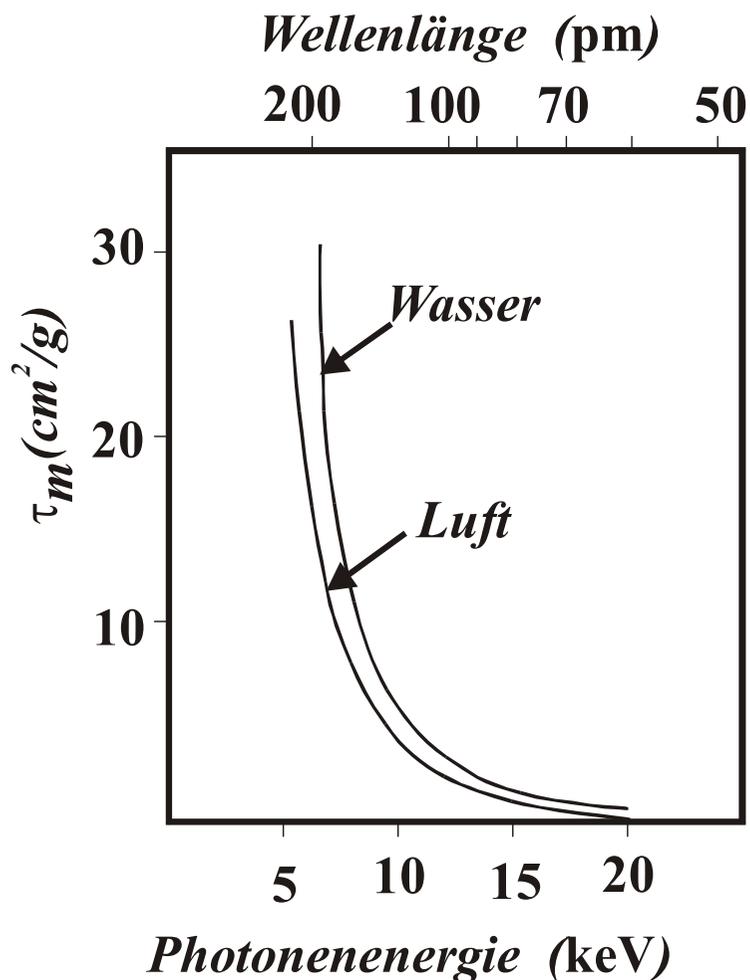
D = absorbierte Energie/Masse



$$D_{Luft} = f_0 \cdot X \quad X \text{ ist in Luft gemessen!}$$

Wie kann man aus der Dosis in Luft die Dosis im Gewebe errechnen?

Beim Elektronengleichgewicht ist die Menge der Sekundärelektronen proportional zur Absorption der Photonen, welche mit dem Massenschwächungskoeffizient des Absorbents verbunden ist.



$$\frac{D_{\text{Gewebe}}}{D_{\text{Luft}}} = \frac{\mu_{m,\text{Gewebe}}}{\mu_{m,\text{Luft}}}$$

$$D_{\text{Gewebe}} = D_{\text{Luft}} \cdot \frac{\mu_{m,\text{Gewebe}}}{\mu_{m,\text{Luft}}}$$

$$D_{\text{Gewebe}} = f_o X \cdot \frac{\mu_{m,\text{Gewebe}}}{\mu_{m,\text{Luft}}}$$



C. Äquivalentdosis

Zielsetzung: Charakterisierung der biologischen Wirkung einer Bestrahlung am Organ-Niveau

Ideen:

- a.) die Wirkungen — es handelt sich jetzt um hauptsächlich biologische Wirkungen — hängen wegen der unterschiedlichen Ionisationsfähigkeiten von der Strahlungsart ab.
- b.) Bei Bestrahlungen ist die Dosis im Körper nicht homogen verteilt: auf die Organe wirkt unterschiedliche Dosis ein.

Sei: $D_{T,R}$: Energiedosis der untersuchten Strahlung (R) in einem Organ (T)



H_T : Äquivalentdosis

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

Strahlungsart

Strahlungswichtungsfaktor

w_R

Photonen, alle Energien

1

Elektronen, Myonen, alle Energien

1

Protonen und geladene Pionen

2

Alphateilchen, Spaltfragmente,
schwere Ionen

20

Neutronen

Eine kontinuierliche Funktion der
Neutronenenergie

Der Strahlungswichtungsfaktor drückt aus, um wieviel die Wirksamkeit der gegebenen Strahlung bei der Auslösung der stochastischen Wirkung größer ist, als die der X bzw. γ -Strahlung.

Wenn unterschiedliche Strahlungsarten gleichzeitig wirken, ist die Äquivalentdosis:

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$



$$[H_T] = Sv \text{ (Sievert)}$$

Rolf Maximilian Sievert (* 6. Mai 1896 in Stockholm; † 3. Oktober 1966 in Stockholm) war ein schwedischer Physiker, der sich um die Einführung und die Weiterentwicklung des Strahlenschutzes verdient gemacht hat. Nach ihm wurde die Maßeinheit der Äquivalentdosis Sievert (Einheitenzeichen: Sv) benannt.

1 Sv ist diejenige Dosis einer ionisierenden Strahlung, die einen biologischen Effekt desselbes Maßes wie eine Röntgen oder Gamma-Strahlung mit einer Energiedosis von 1 Gy verursacht.



D. Effektivdosis

Idee: Organe sind unterschiedlich empfindlich

$$H_E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

$$[H_E] = Sv(\text{Sievert})$$

Gewebe	Gewebewichtungs- faktor w_T	Σw_T
Knochenmark (rot), Dickdarm, Lunge, Magen, Brust, Restgewebe *	0,12	0,72
Gonaden	0,08	0,08
Blase, Speiseröhre, Leber, Schilddrüse	0,04	0,16
Knochenoberfläche, Gehirn, Speicheldrüsen, Haut	0,01	0,04
	Gesamt	1,00

* Restgewebe:
Nebennieren, extrathorakalen (ET) Region,
Gallenblase, Herz, Nieren, Lymphknoten, Muskel,
Mundschleimhaut, Bauchspeicheldrüse, Prostata
(♂), Dünndarm, Milz, Thymus,
Uterus / Zervix (♀)

w_T drückt die Wahrscheinlichkeit der relativen stochastischen Schädigung des bestrahlten Gewebes oder Organs T aus



Dosisleistung (Dosisrate):

$$P_D = \frac{\Delta D}{\Delta t}$$

$$[P_D] = \frac{mGy}{h}, \frac{\mu Gy}{h}$$

Für **punktförmige γ -Strahlungsquellen in Luft**:

$$P_D = K_\gamma \frac{A}{r^2} \Rightarrow D = K_\gamma \frac{A \cdot t}{r^2}$$

Quelle	$K_\gamma \frac{\mu Gy_{Luft} \cdot m^2}{GBq \cdot h}$
^{60}Co	305
^{131}I	54
^{137}Cs	80

Siehe Praktikum:
Dosimetrie

Bedeutung: Strahlenschutz



Strahlungsdetektor — Dosimeter

1.) Strahlungsdetektor:
Nachweis der Strahlungen

2.) Dosimeter:
Messung der Strahlendosis

Messsignal = $f(\text{Strahlendosis})$

Thermolumineszenzdosimeter

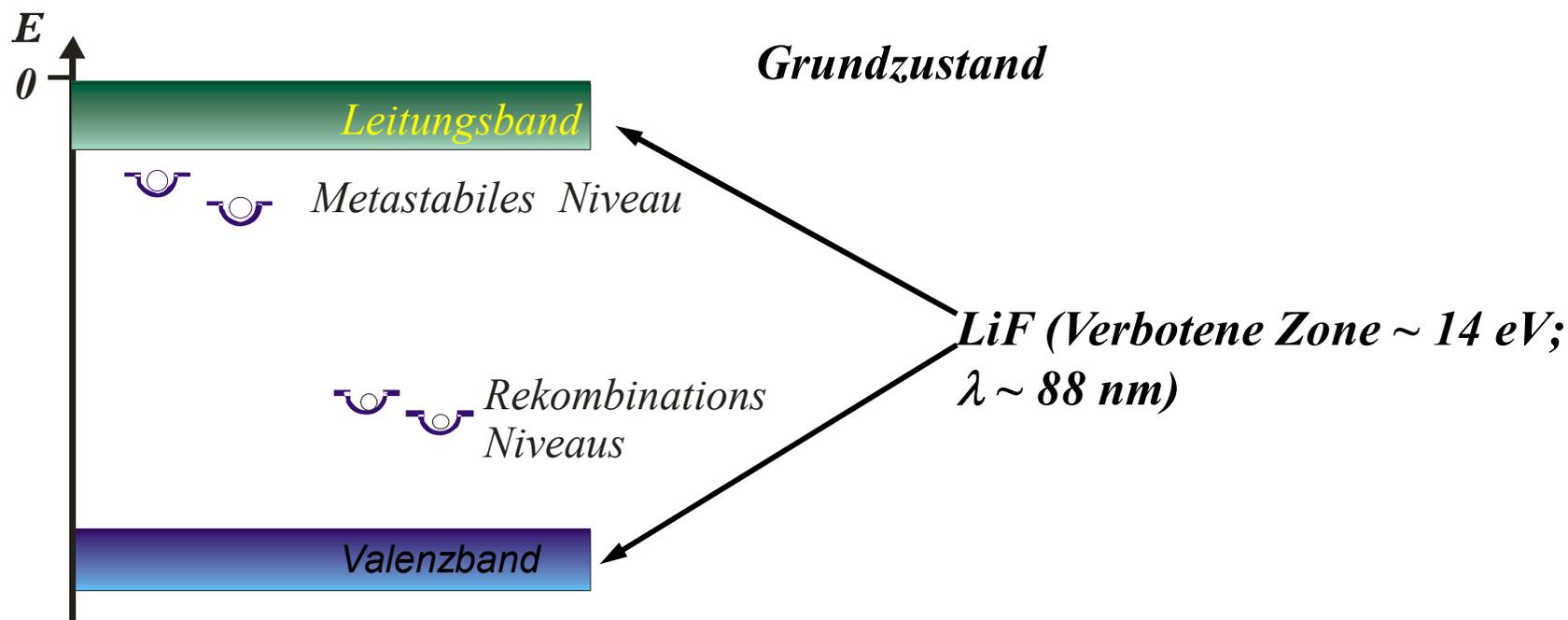




Am häufigsten angewandten TL Kristalle:

LiF(Mg,Ti); CaF₂(Dy); CaF₂(Mn);

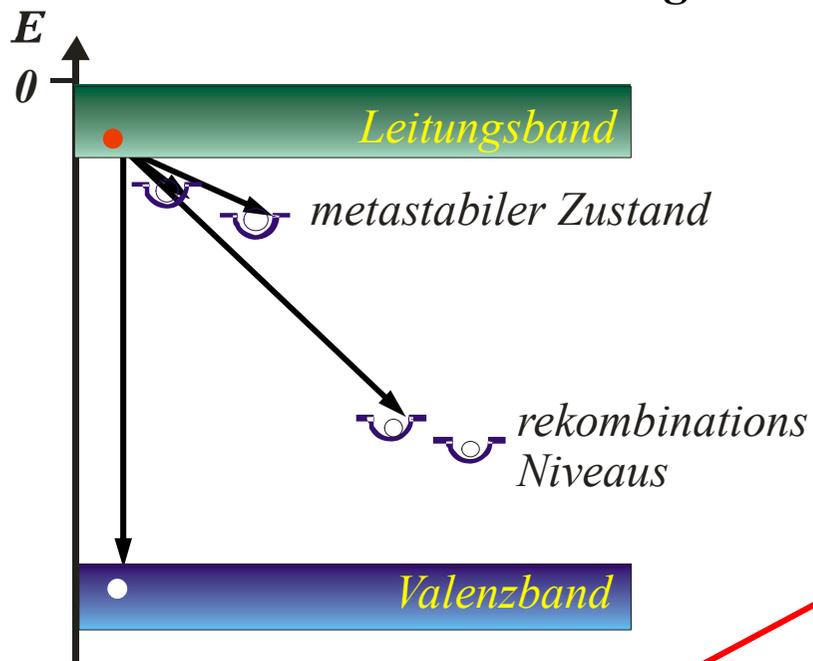
CaSO₄(Dy); Li₂B₄O₇(Mn)



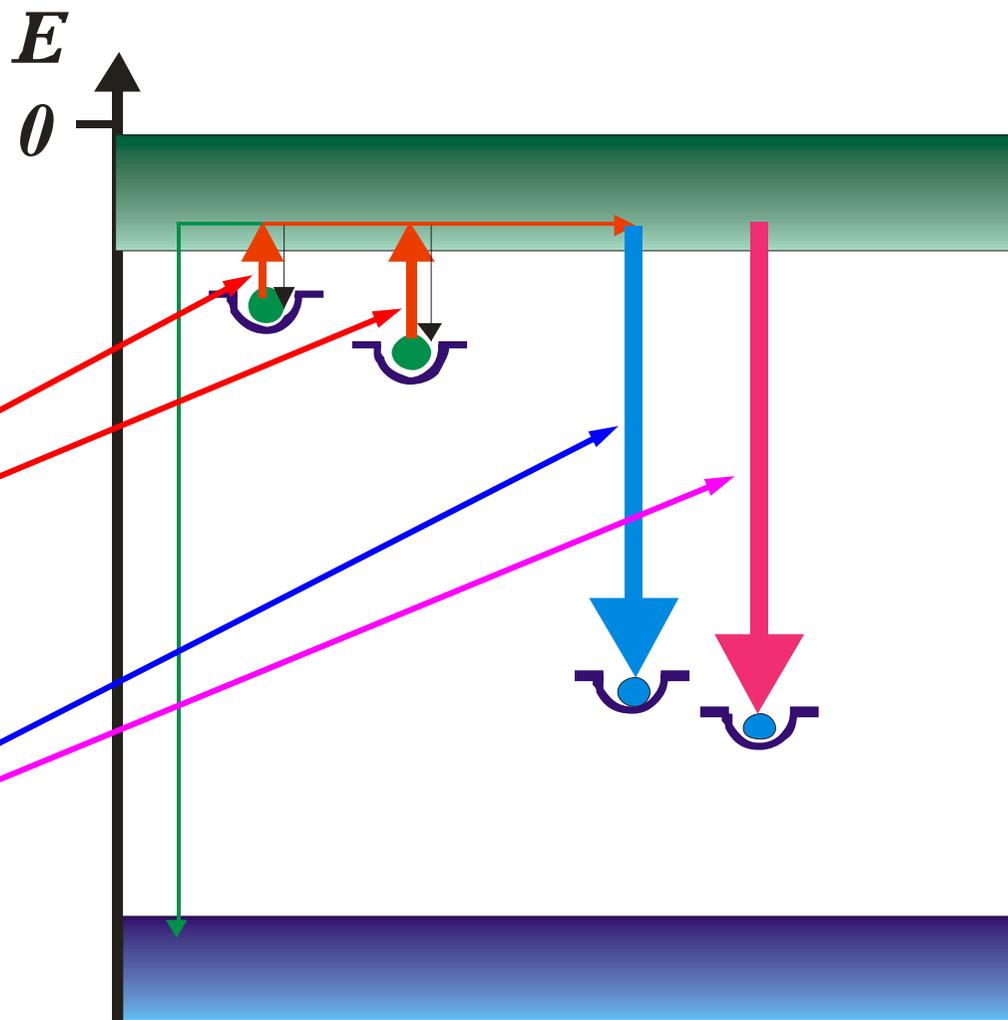
$$\Delta E_{m-LB}: \sim 30\text{--}\sim 60 \text{ meV}$$



Gleich nach der Bestrahlung



Thermolumineszenz



Aktivierungsenergien

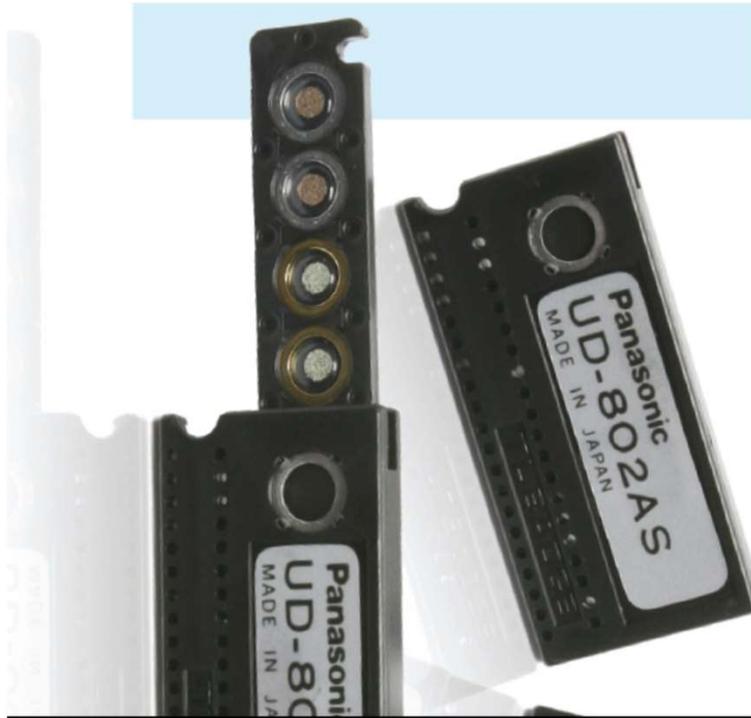
**verschiedene Wellenlänge/Energie
(zB.LiF(Mg):**

UV : 5,42, 4,42 und 3,57 eV

VIS: 3,07, 2,65 und 2,22 eV

UV: 228, 280, 347 nm;

VIS: 403, 467, 557 nm



Vorteile:

- **kleines Detektorvolumen: $\sim \text{mm}^3$**
 - gute räumliche Auflösung;
 - Strahlentherapie: Messung *in vivo* („in dem Patient“);
- **Messbereich: $\sim 10^{-5}$ — 10^3 Gy;**
- **Auswertung getrennt von dem Bestrahlungsort**



Strahlenschutz

ICRP — International Commission on Radiological Protection

Grundprinzipien:

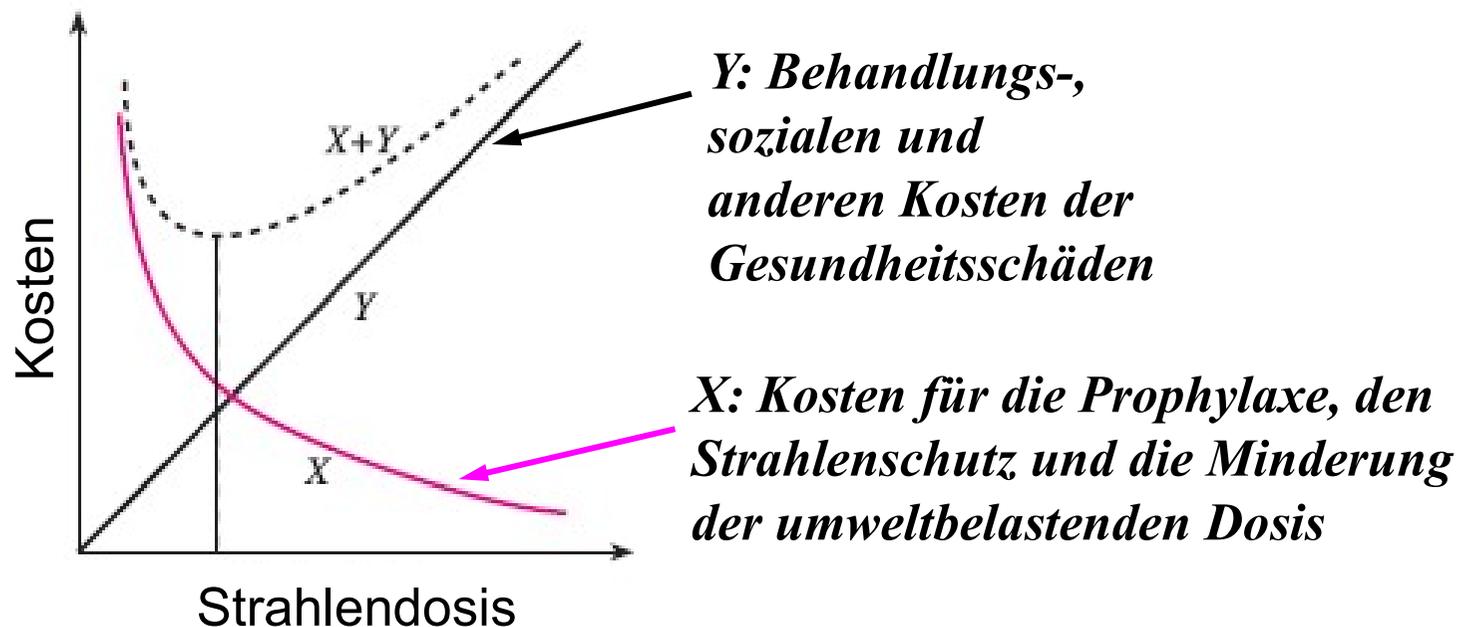
- a. *Rechtfertigung einer Tätigkeit*
- b. *Optimierung des Schutzes*
- c. *Individuelle Dosisbeschränkung*

*ad. a.: Der zu erwartende medizinische Nutzen > das Risiko von Schädigung
cost - benefit*

ad. b.:

- *Kosten des Strahlenschutzes ↔ Gesundheitsrisiko*
- *ALARA-Prinzip*

ALARA-Prinzip (As Low As Reasonable Achievable)



ALARA-Prinzip: Die Dosis soll während einer gegebenen strahlenexponierten Tätigkeit so gering sein, wie es sich vernünftig verwirklichen lässt. Dabei ist auch die wirtschaftliche und soziale Lage des betreffenden Landes zu berücksichtigen.



ad.c. Individuelle Dosisbeschränkung

Zielsetzung: Personen und ihre Nachkommen darf nicht einer Strahlenbelastung mit indiskutabler Wahrscheinlichkeit von Schädigungen ausgesetzt werden

	Berufliche Strahlenexposition (mSv/Jahr)	Bevölkerung (mSv/Jahr)
Effective Dosis	20*	1
Äquivalentdosis (Augenlinse)	150	15
Extremitäten /Haut	500	50

- *Unter deterministischen Schwellendosis bleiben*
- *Das Risiko der stochastischen Schäden durch die berufliche Belastung \leq das allgemeine Risiko von Berufsunfällen (10^{-4} Todesfälle/Jahr), (in der Bevölkerung 10^{-5} Todesfälle/Jahr)*

***aber max. 50 mSv/Jahr**