

Dosimetrie der ionisierenden Strahlungen

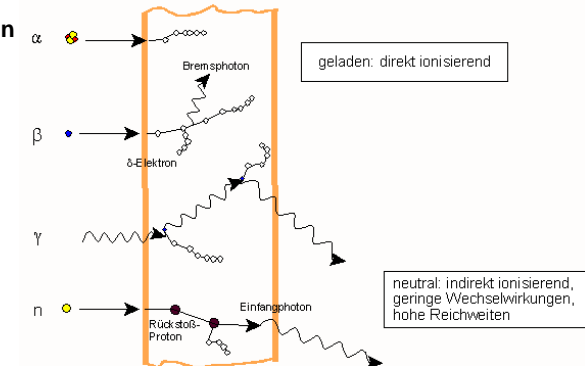
Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit der Materie

Teilchenstrahlungen

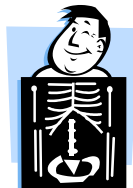
α , β^- , β^+
 n

EMS

γ , X



Entdeckung
(Röntgenstrahlung,
Radioaktivität usw.)



Anwendung
(Vorteile, positive
Wirkungen)



Dosimetrie
(schädliche Folgen)



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

Physikalische Strahlendosimetrie:

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

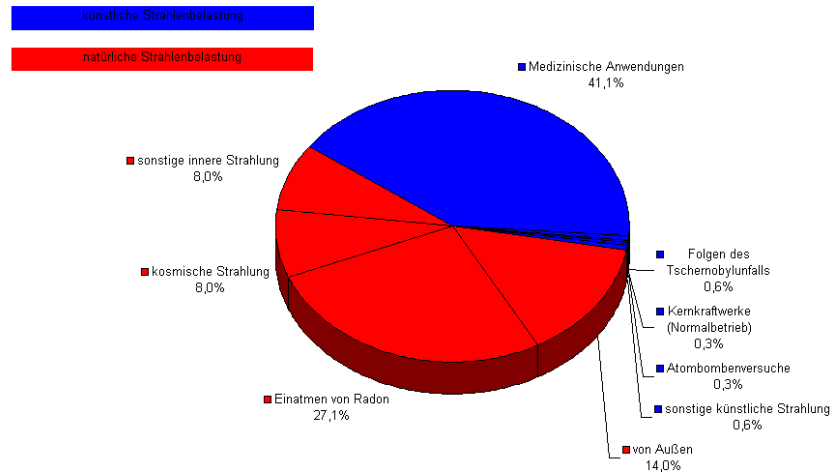
Aus dem Aspekt der biologischen Wirkung ist die
Kenntnis der absorbierten Energie zwar von elementarer
Bedeutung, aber nicht ausreichend.

Biologische Strahlendosimetrie:

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



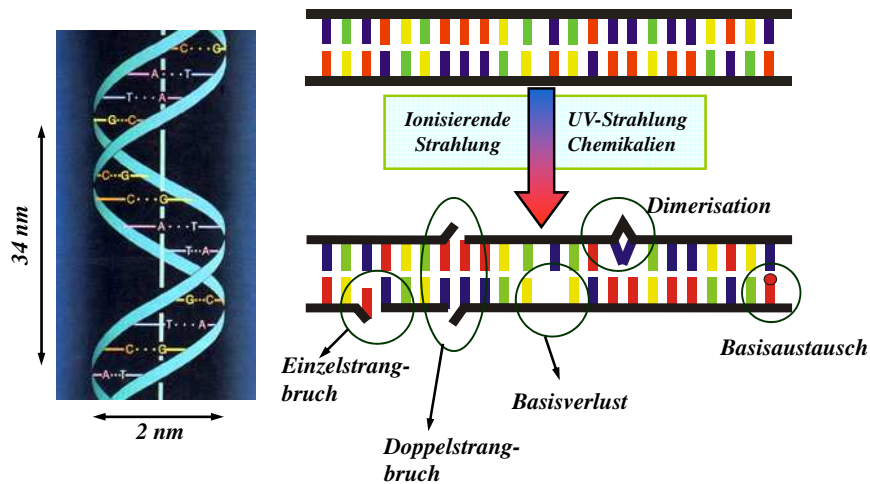
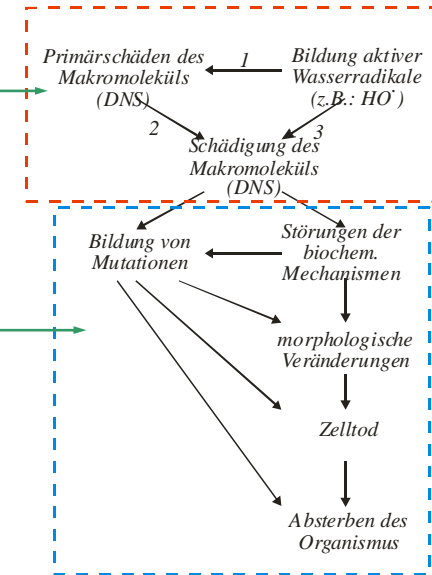
Alltägliche Strahlenbelastung



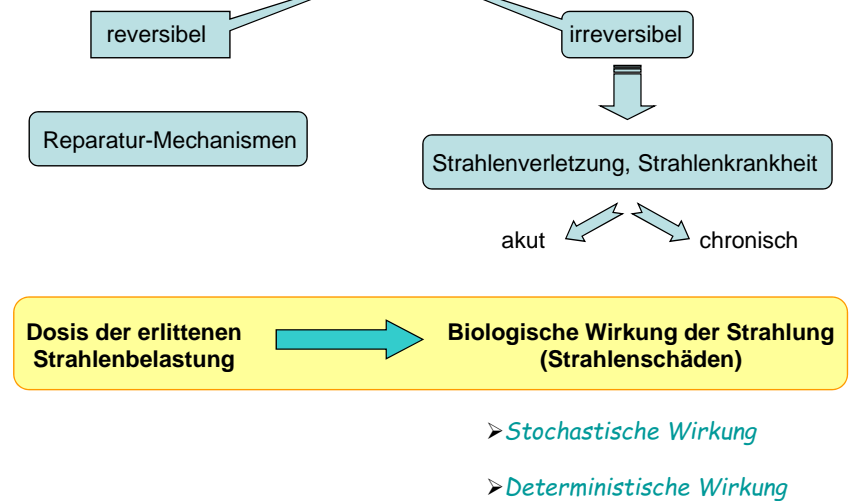
Der Mechanismus der Strahlenwirkung

Primäre Prozesse

Sekundäre Prozesse

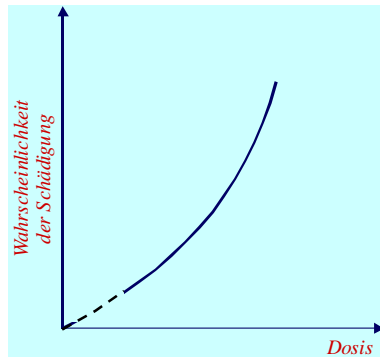


Strahlenwirkung





Stochastische Wirkung



- auf Molekül- oder Zellebene jeder Strahlenschädigung

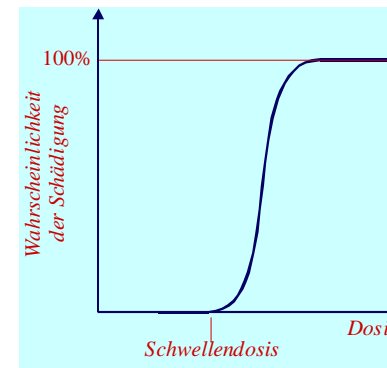
Erhöhung der Dosis erhöht "nur" die Wahrscheinlichkeit der Geschwulstentstehung, aber nicht den Schweregrad der Krankheit.

Es gibt keine Schwellendosis!

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



Deterministische Wirkung



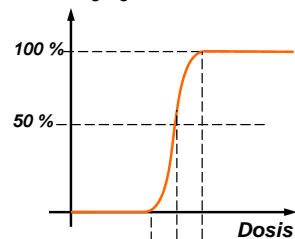
z.B.:

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

Erhöhung der Dosis erhöht den Grad der Schädigung

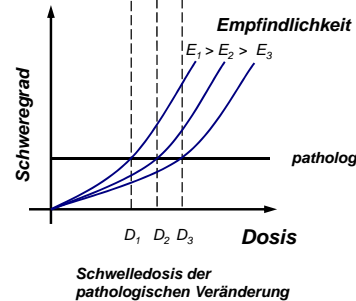
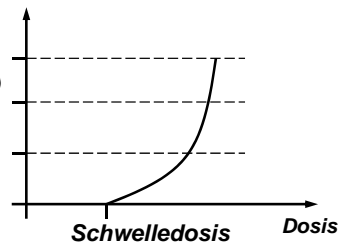


Wahrscheinlichkeit der Schädigung



Schweregrad

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



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**):

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

D > 6 Gy bei Ganzkörperbestrahlung

halbletale Dosis (**LD₅₀**):

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

D > 3-4 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

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

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

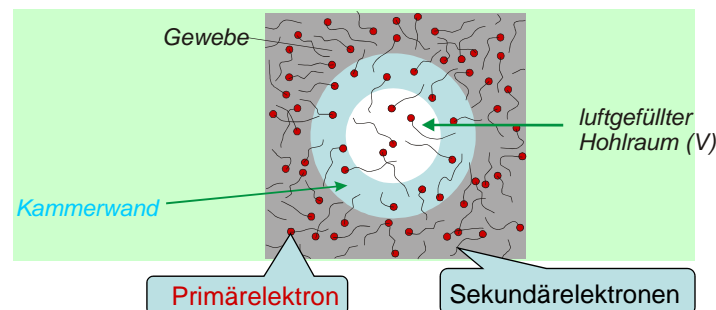
Gültigkeit:

- ✓ für Röntgen und Gamma-Strahlung
- ✓ in Luft
- ✓ bis ~ 3 MeV
- ✓ beim Elektronengleichgewicht!

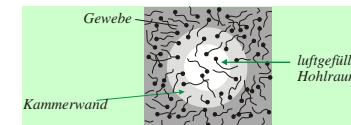


Das Elektronengleichgewicht

Elektronengleichgewicht: die Zahl der aus dem Volumen *V* austretenden Elektronen mit der Zahl der *eintretenden* Elektronen übereinstimmt



Sekundärelektronen werden gemessen; sie tragen hauptsächlich zur Ionendosis bei.



Die Kammerwand

- hat aus Sicht der Ionisation ähnliche Eigenschaften wie die Luft
- ausreichend dick, deshalb gelangen die in den Geweben entstandenen Elektronen nicht in die Kammer

Jede Substanz, die ähnlich wie Luft absorbiert und streut, ist als **luftäquivalent** bezeichnet.



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

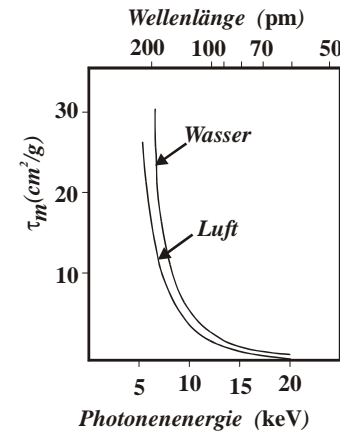


$$D_{\text{Luft}} = f_0 \cdot X \quad X \text{ ist in Luft gemessen!}$$

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.



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

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

$$D_{\text{Gewebe}} = f_0 X \cdot \frac{\mu_{m,\text{Gewebe}}}{\mu_{m,\text{Luft}}}$$



C. Äquivalentdosis

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

Ideen:

- die Wirkungen — es handelt sich jetzt um hauptsächlich biologische Wirkungen — hängen wegen der unterschiedlichen Ionisationsfähigkeiten von der Strahlungsart ab.
- 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	Strahlungs-Wichtungsfaktoren w_R (ICRP60)	
Photonen	pauschal	1
Elektronen (incl. β)	alle $e^- + \mu$	1
Neutronen	E < 10keV	5
	10-100keV	10
	0.1 - 2 MeV	20
	2-20MeV	10
	E > 20MeV	5
Protonen	E > 2MeV	5
α , Schwerionen, Spaltfragmente		20

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.



ICRP Publ. 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection

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

$$w_R = \begin{cases} 2.5 + 18.2e^{-[\ln(E_n)]^2/6}, & E_n < 1 \text{ MeV} \\ 5.0 + 17.0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}, & 1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV} \\ 2.5 + 3.25e^{-[\ln(0.04E_n)]^2/6}, & E_n > 50 \text{ MeV} \end{cases}$$

21



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.

22



D. Effektivdosis

Idee: Organe sind unterschiedlich empfindlich

Die körpertgewebeabhängige Wichtungsfaktoren

Organ/Gewebe	Wichtungsfaktor w_T
Gonaden	0.20
rotes Knochenmark	0.12
Lunge	0.12
Magen	0.12
Brust	0.05
Schilddrüse	0.05
Leber	0.05
Blase	0.05
Knochenoberfläche	0.01
Haut	0.01
Übrige	0.22
Summe	1.00

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

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

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

23



ICRP Publ. 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection

Gewebe	Gewebewichtungsfaktor w_T	$\sum w_T$
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 (♀)

24



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(Strahlendosis)



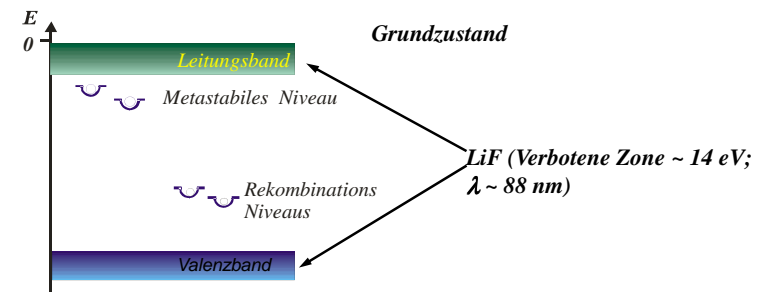
Thermolumineszenzdosimeter



Am häufigsten angewandten TL Kristalle:

$LiF(Mg,Ti)$; $CaF_2(Dy)$; $CaF_2(Mn)$;

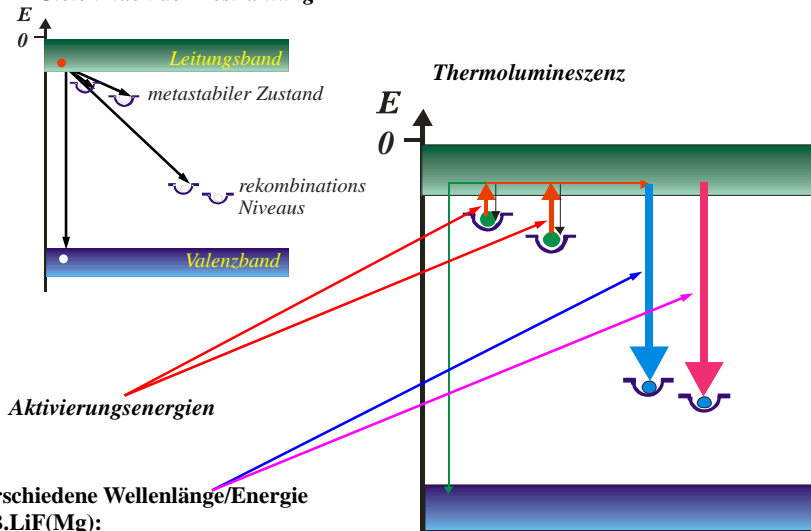
$CaSO_4(Dy)$; $Li_2B_4O_7(Mn)$



ΔE_{m-LB} : ~30~60 meV

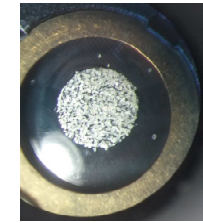


Gleich nach der Bestrahlung



Aktivierungsenergien

verschiedene Wellenlänge/Energie
 (zB.LiF(Mg):
 UV : 5,42, 4,42 und 3,57 eV UV: 228, 280, 347 nm;
 VIS: 3,07, 2,65 und 2,22 eV VIS: 403, 467, 557 nm

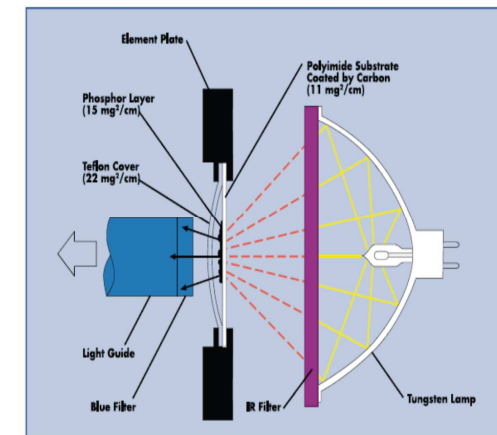


UD802AT [UD807ATN]

- 4 Filter/ 4 TL-Detektor:
 - 14 mg/cm² Kunststoff/ Li₂B₄O₇:Cu (β,γ)
 - 160 mg/cm² Kunststoff / / Li₂B₄O₇:Cu (β,γ)
 - 160 mg/cm² Kunststoff / CaSO₄:Tm (β,γ)
 - 700 mg/cm² Blei/ CaSO₄:Tm (γ)
- E_γ = 10 keV ... 10 MeV
- Messbereich = 10 μSv ... 10 Sv
- Nachweisgrenze = 1,6 μSv (Cs-137)
- Kalibrierung = 1...5 mSv
- Nutzungsdauer > 1000 (7000) Auswertung
- Fading = 5% / Jahr



UD-710 TLD Reader mit UD-734a Autoloader





Vorteile:

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



Strahlenschutz

ICRP — International Commission on Radiological Protection

Grundprinzipien:

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

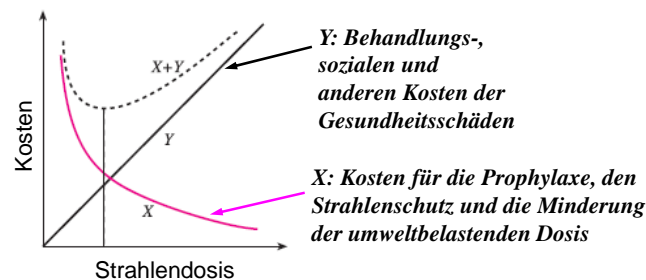
ad. a.: Der zu erwartende medizinische Nutzen > das Risiko von Schädigung

ad. b.:

- Kosten des Strahlenschutzes \leftrightarrow 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
Äquivalent-dosis (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)

***Im Durchschnitt von 5 Jahren, aber max. 50 mSv/Jahr**