



# Dosimetrie der ionisierenden Strahlungen

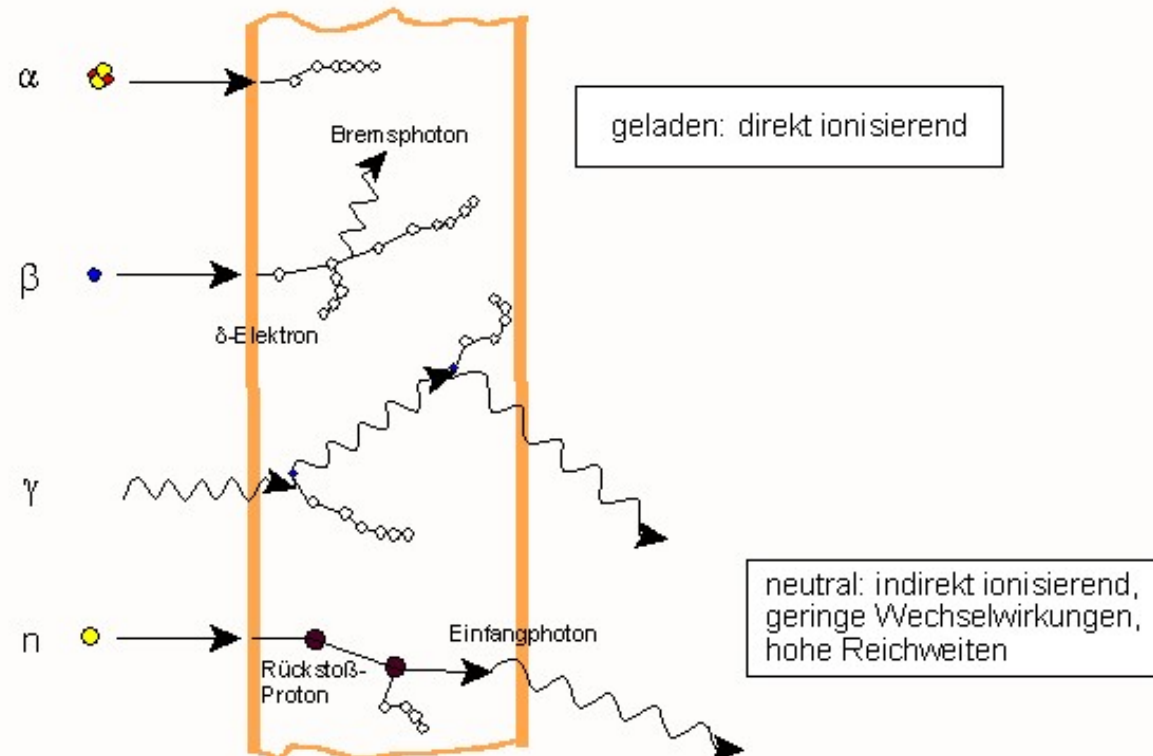
## Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit der Materie

### Teilchenstrahlungen

$\alpha$ ,  $p$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$   
 $n$

### EMS

$\gamma$ ,  $X$





## ***Physikalische Strahlendosimetrie:***

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

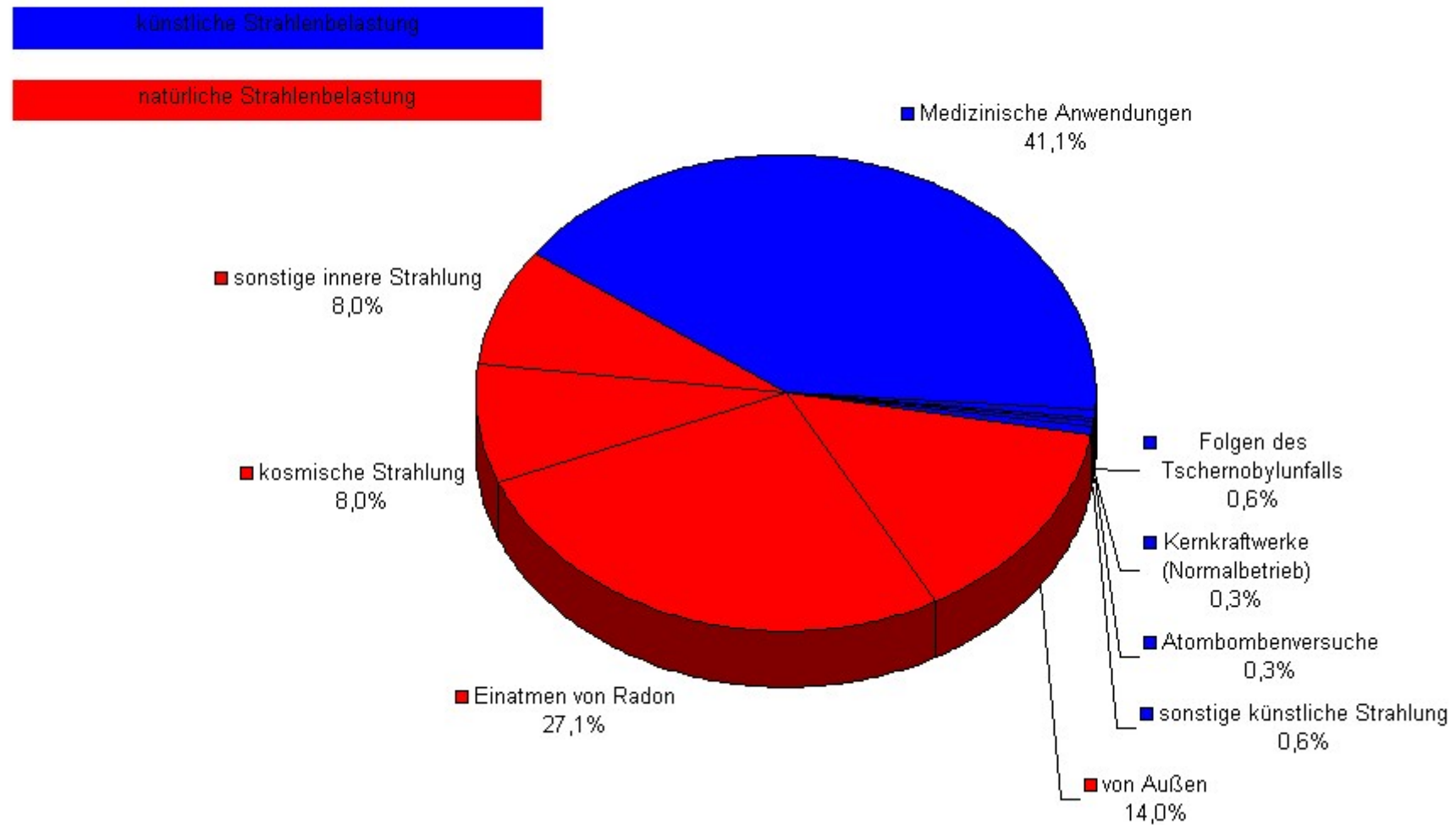
Aus dem Aspekt der biologischen Wirkung ist die Kenntnis der absorbierten Energie zwar von elementarerer Bedeutung, *aber nicht ausreichend*.

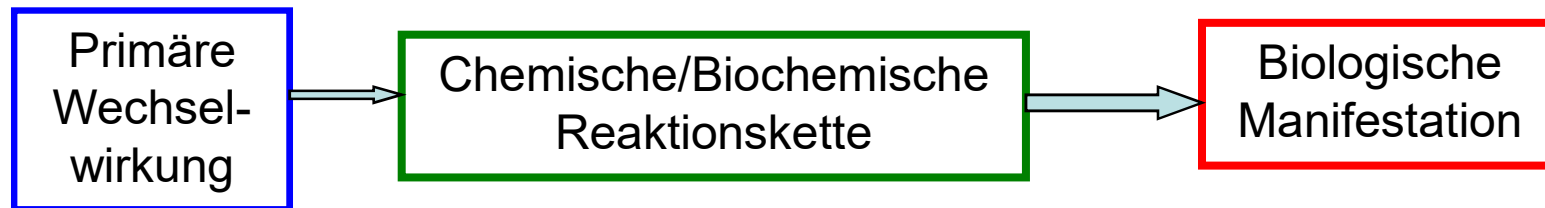
## ***Biologische Strahlendosimetrie:***

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

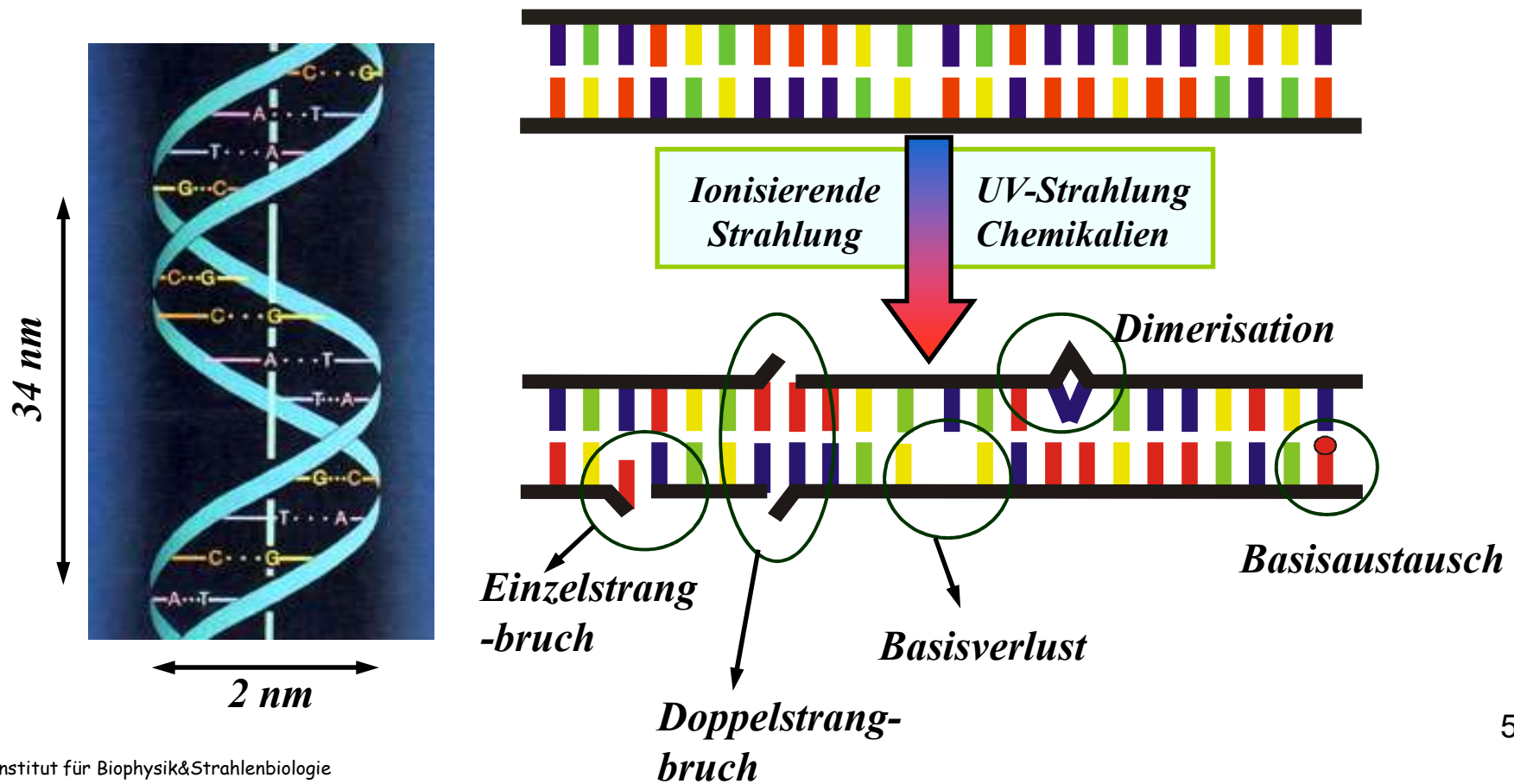




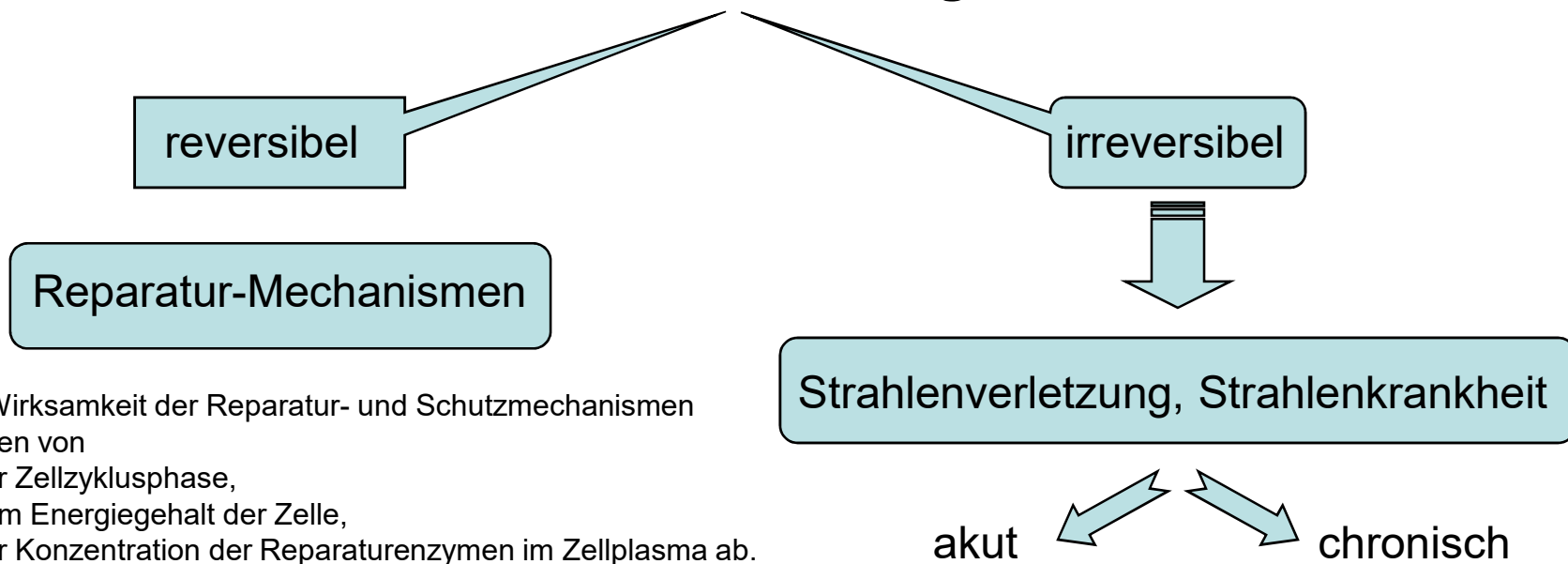
Zeitskala: ~ps

~ ns –  $\mu$ s

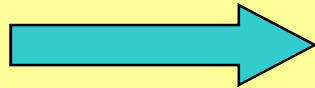
Stunden/.../Jahren



# Strahlenwirkung



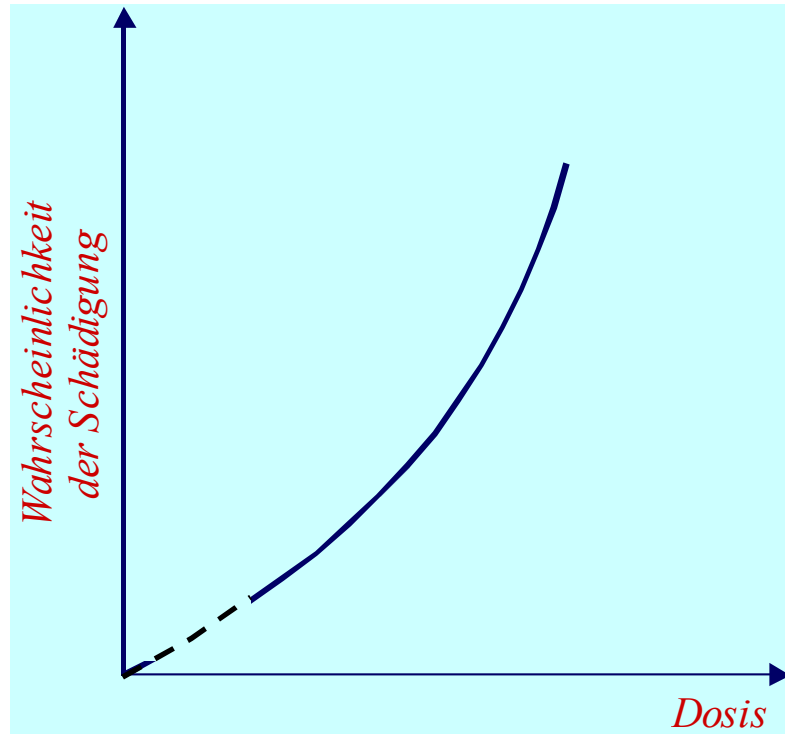
**Dosis der erlittenen  
Strahlenbelastung**



**Biologische Wirkung der Strahlung  
(Strahlenschäden)**

- *Stochastische Wirkung*
- *Deterministische Wirkung*

# Stochastische Wirkung



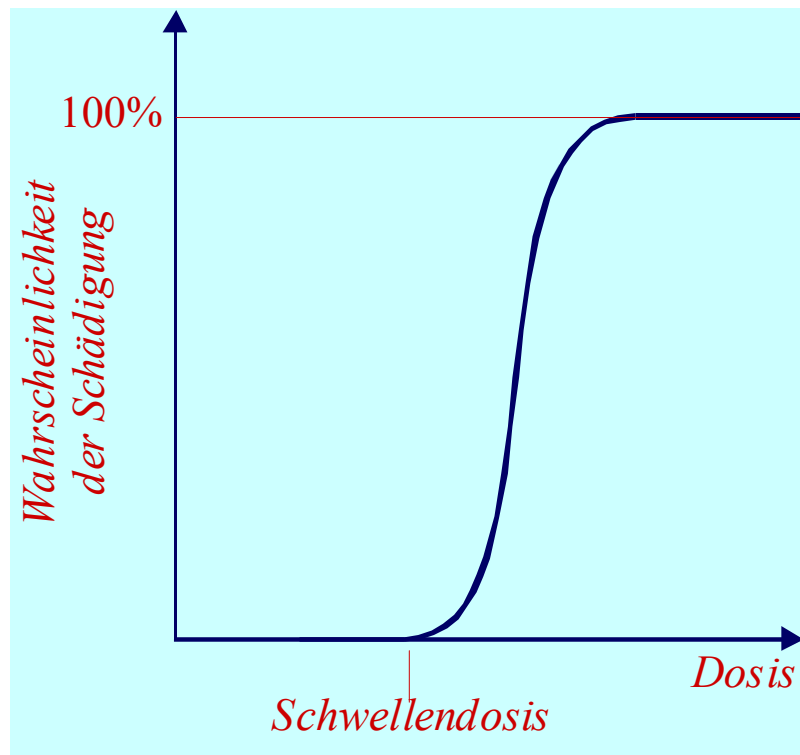
- auf Molekül- oder Zellebene jeder Strahlenschädigung

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.:

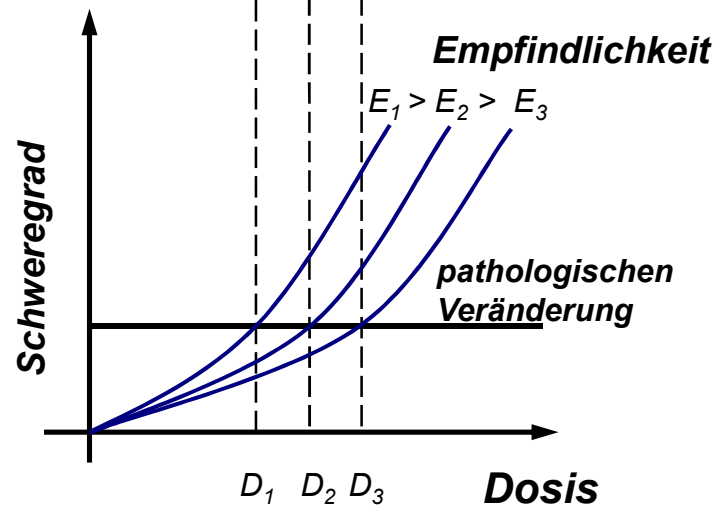
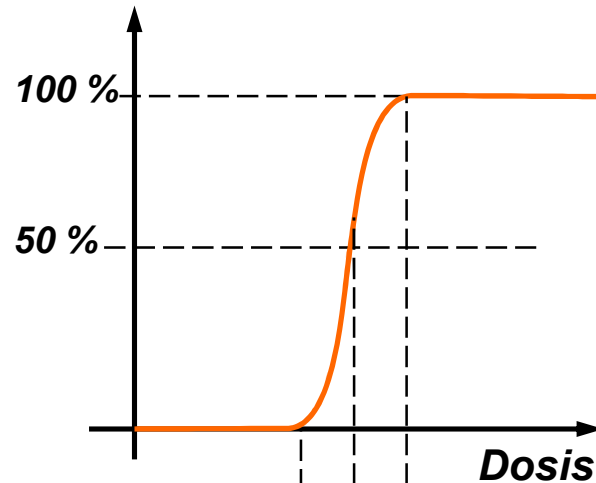
- Strahlenschädigung des roten Knochenmarks,
- Abnahme der Leukozyten,
- Erythem

Erhöhung der Dosis erhöht den Grad der Schädigung





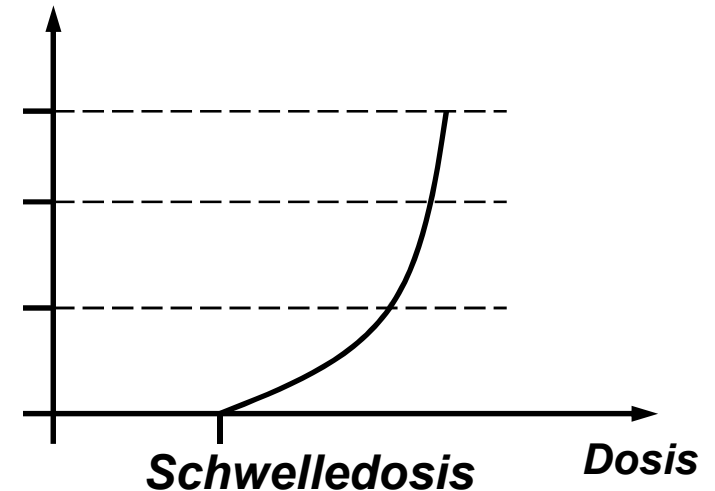
**Wahrscheinlichkeit  
der Schädigung**



**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

Median (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 ( $\sim 34$  eV)

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

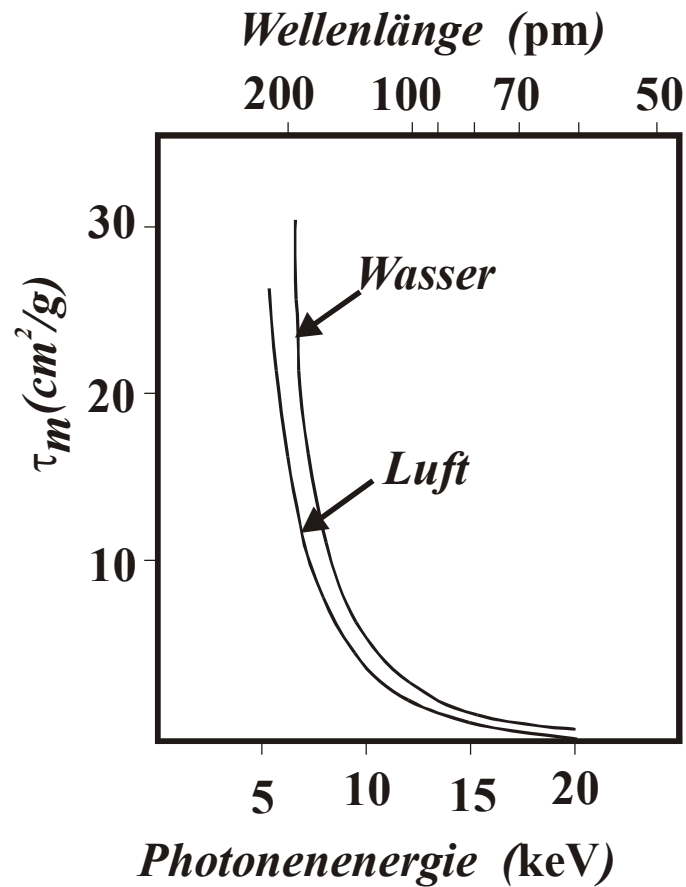
$f_0$ : Energie/Ionenpaare  
 $X$  = Ionenpaare/Masse

$D$  = absorbierte Energie/Masse



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

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



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

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

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



## 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.  $\gamma$ -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 $w_T$	$\Sigma w_T$
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 (♀)		

$W_T$  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  $\gamma$ -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

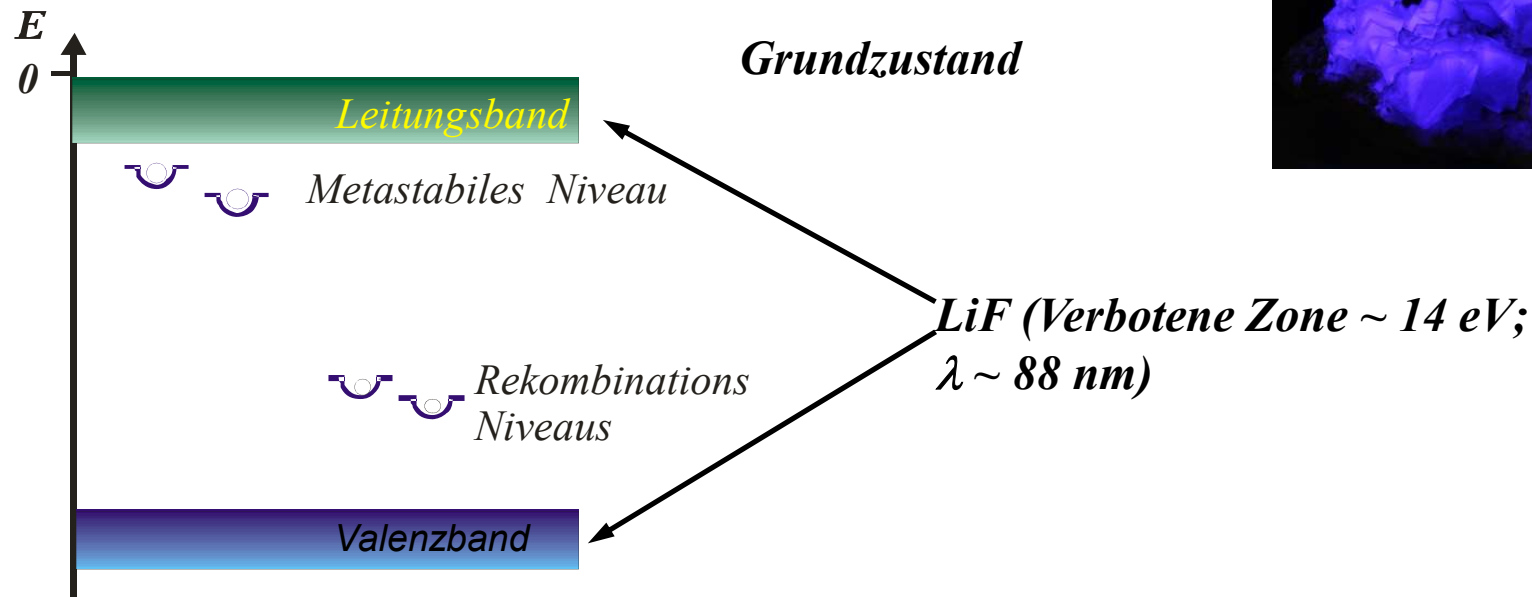
2.) Dosimeter:  
Messung der Strahlendosis

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

# Thermolumineszenzdosimeter

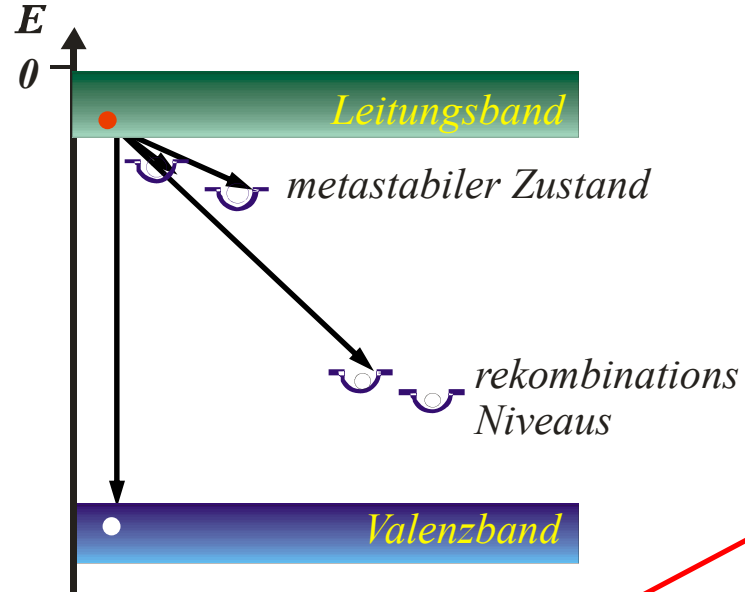
*Am häufigsten angewandten TL Kristalle:*

*$\text{LiF}(\text{Mg}, \text{Ti})$ ;  $\text{CaF}_2(\text{Dy})$ ;  $\text{CaF}_2(\text{Mn})$ ;  
 $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ ;  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Mn})$*

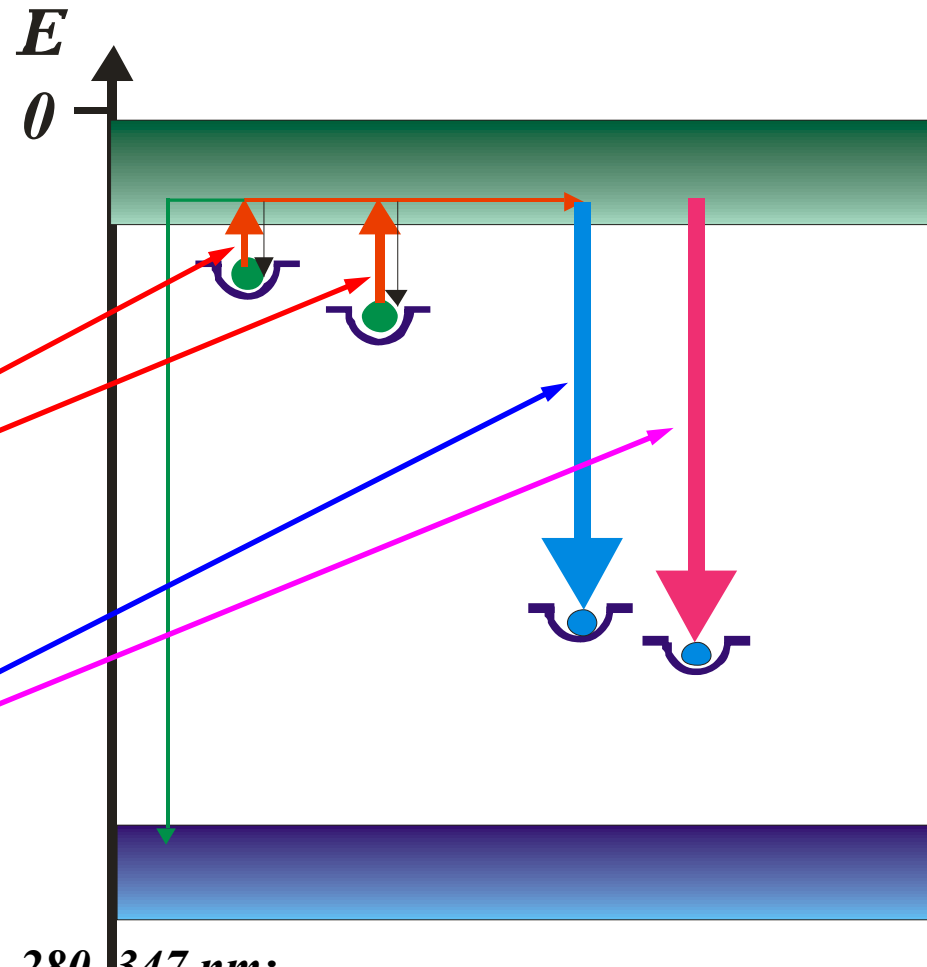


$$\Delta E_{m-LB}: \sim 30 \sim 60 \text{ meV}$$

## Gleich nach der Bestrahlung



## Thermolumineszenz



**Aktivierungsenergien**

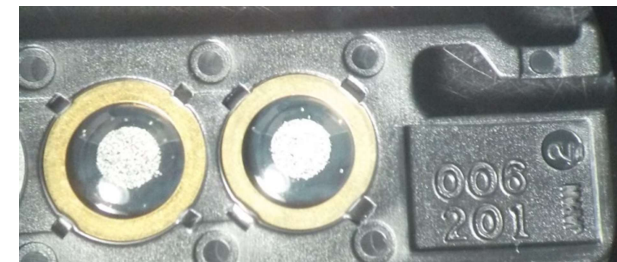
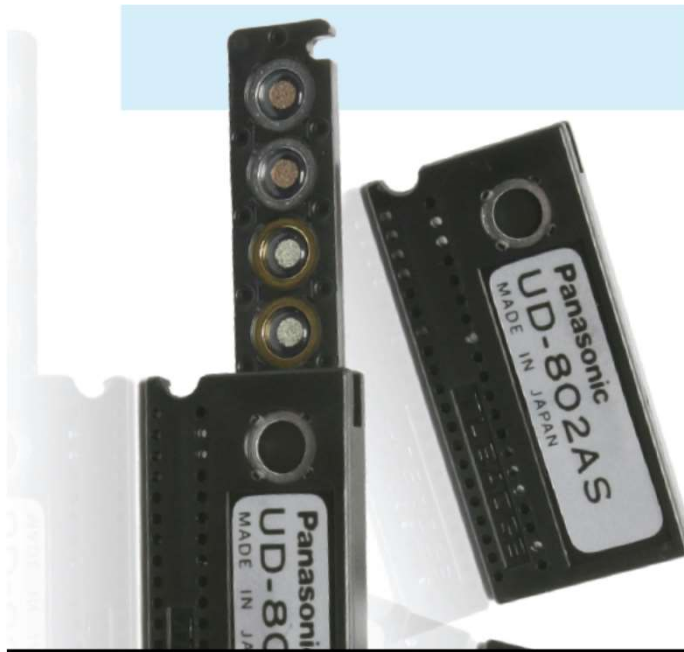
**verschiedene Wellenlänge/Energie  
(zB. LiF(Mg):**

**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:  $\sim 10^{-5} — 10^3 \text{ Gy}$ ;**
- **Auswertung getrennt von dem Bestrahlungsort**



# Strahlenschutz

ICRP — International Commission on Radiological Protection

## Grundprinzipien:

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

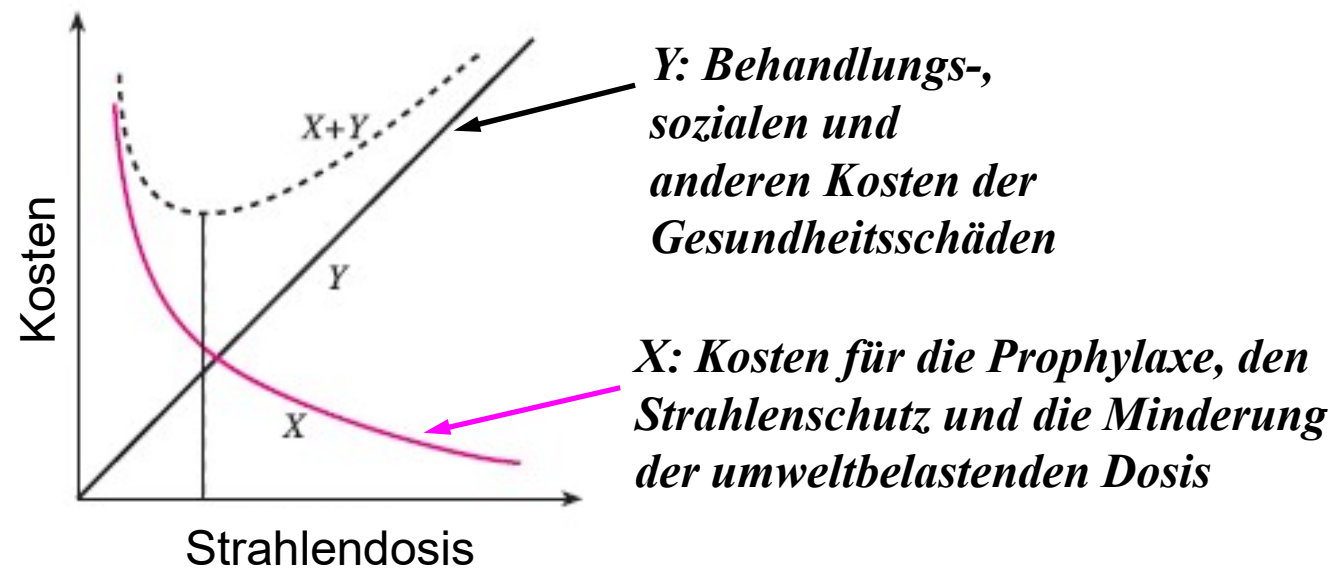
*ad. a.: Der zu erwartende medizinische Nutzen > das Risiko von Schädigung  
cost - benefit*

*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	<b>20*</b>	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

[https://www.clpgroup.com/NuclearEnergy/Eng/images/science/3\\_2\\_1a.jpg](https://www.clpgroup.com/NuclearEnergy/Eng/images/science/3_2_1a.jpg)

