



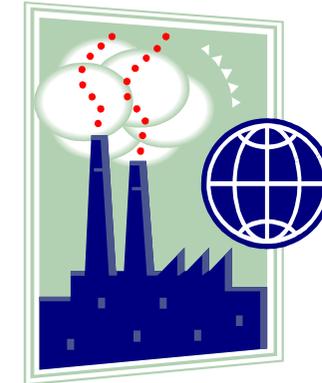
# Dosimetrie der ionisierenden Strahlungen



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.



Zeitskala: ~ps

~ ns – μs

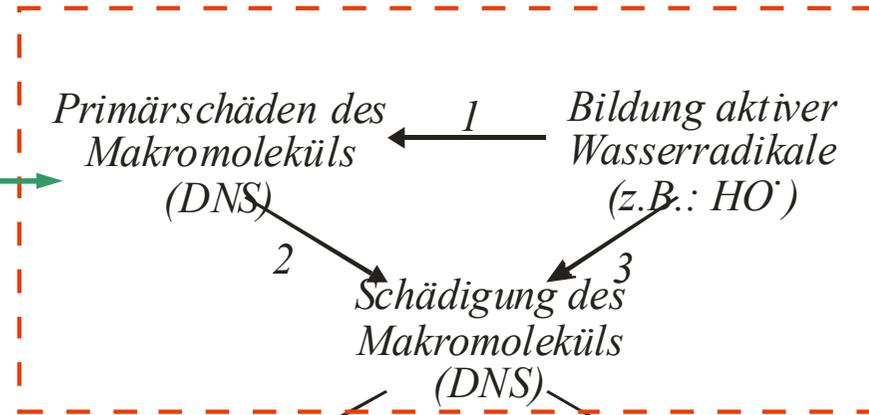
Stunden/.../Jahren

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

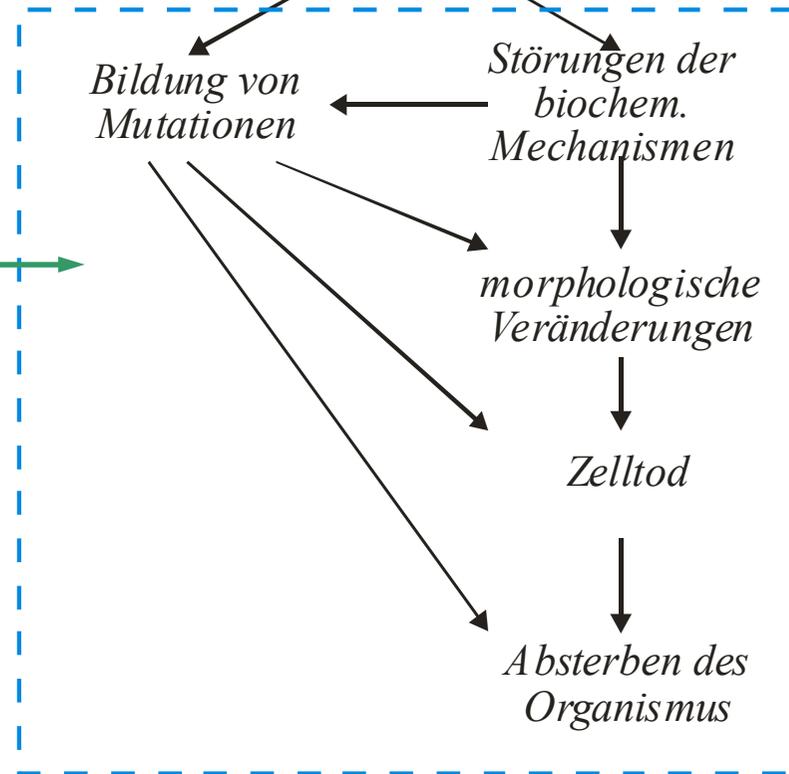


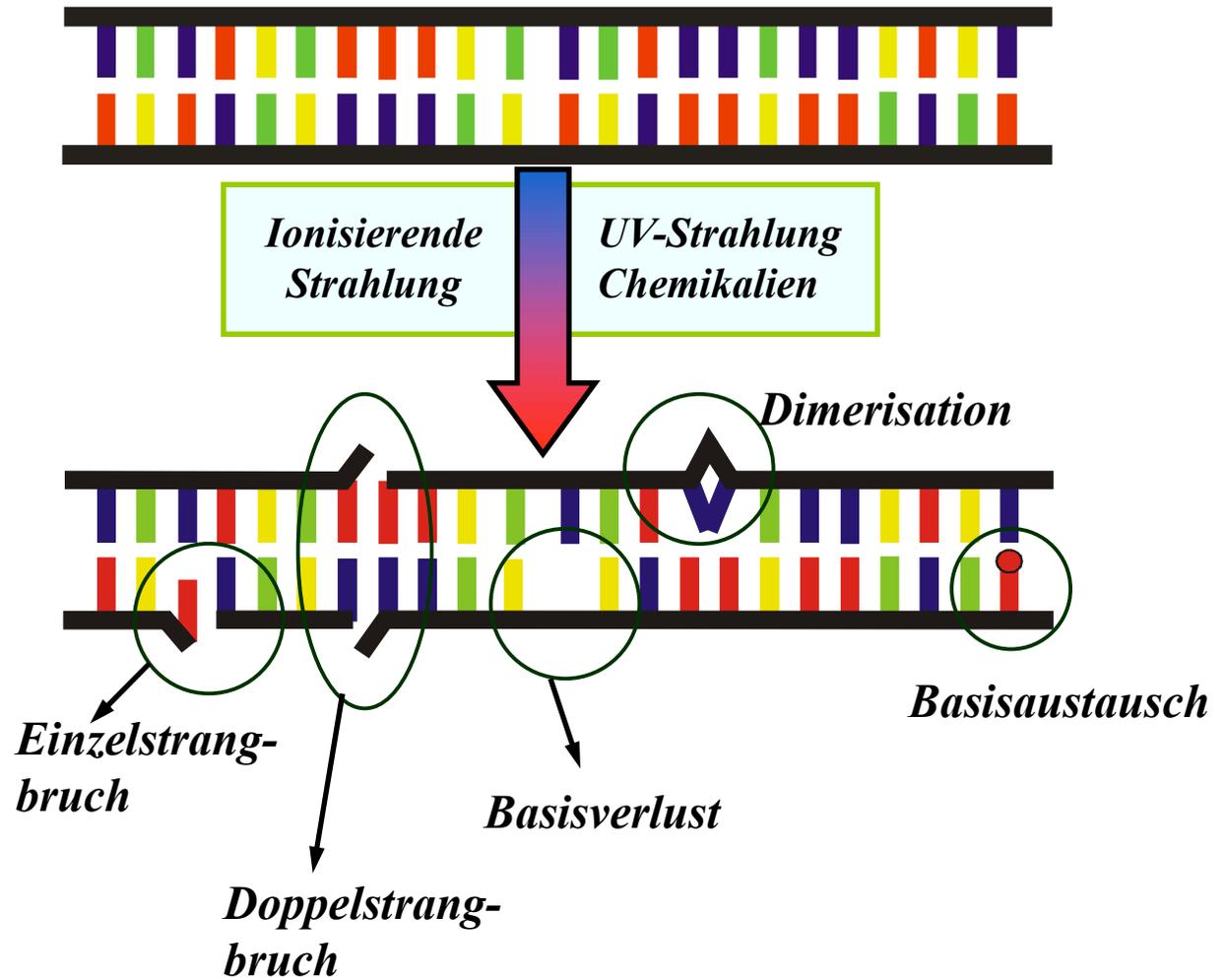
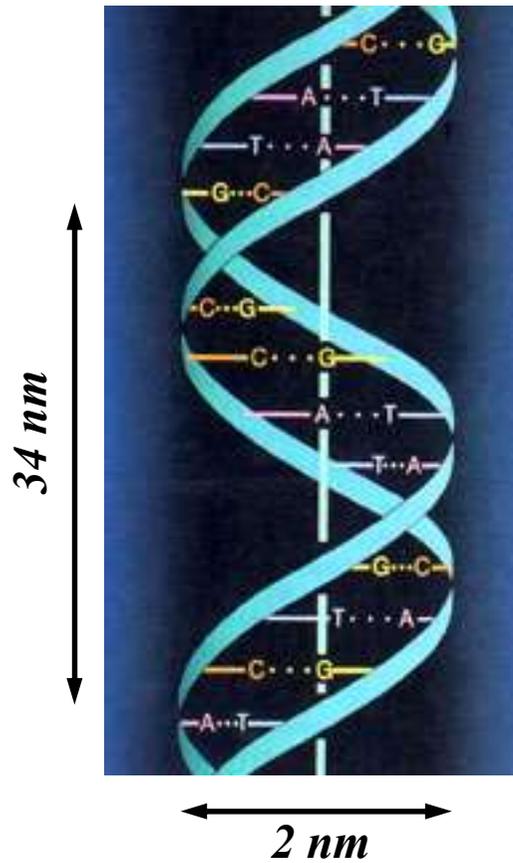
# Der Mechanismus der Strahlenwirkung

Primäre Prozesse



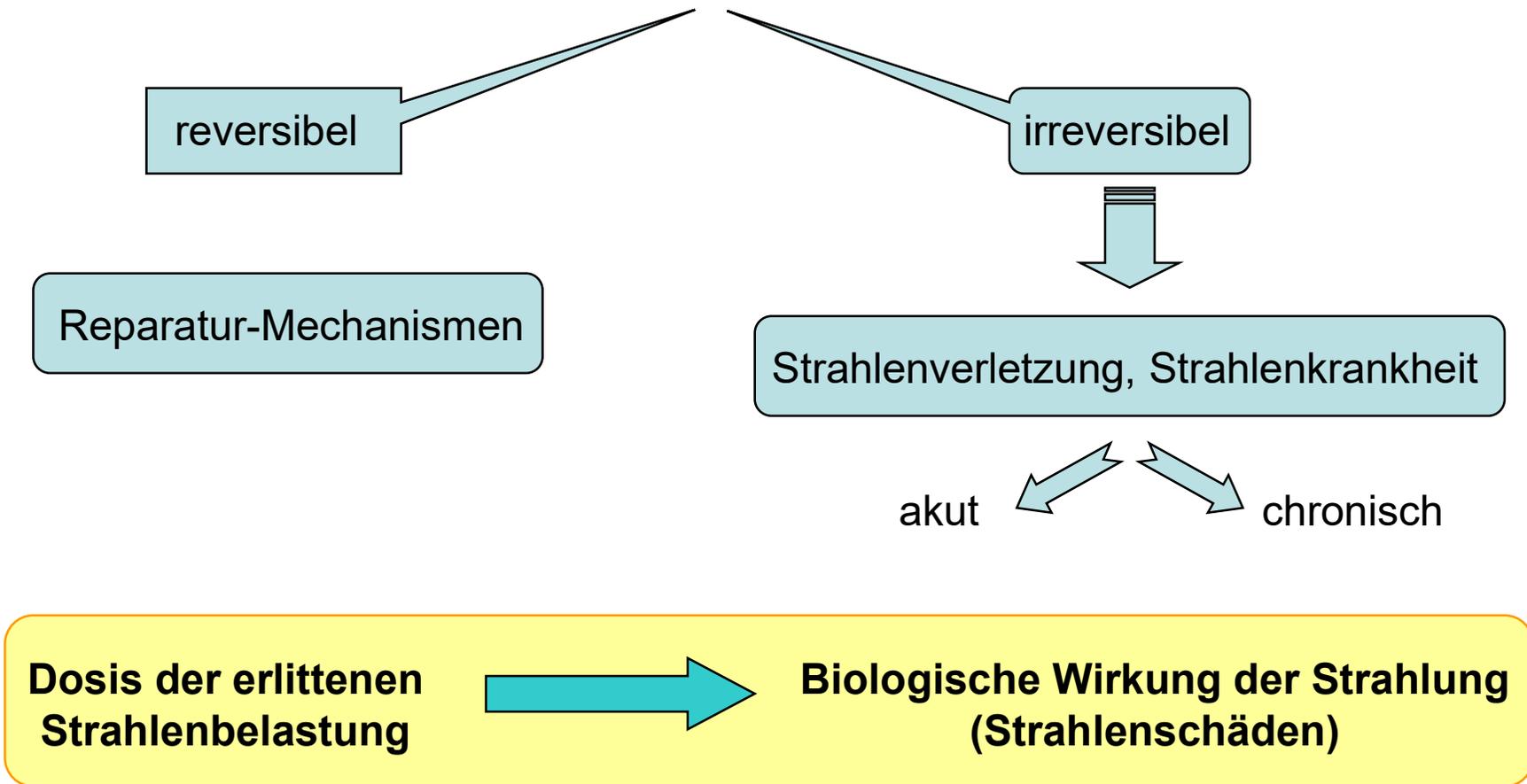
Sekundäre Prozesse





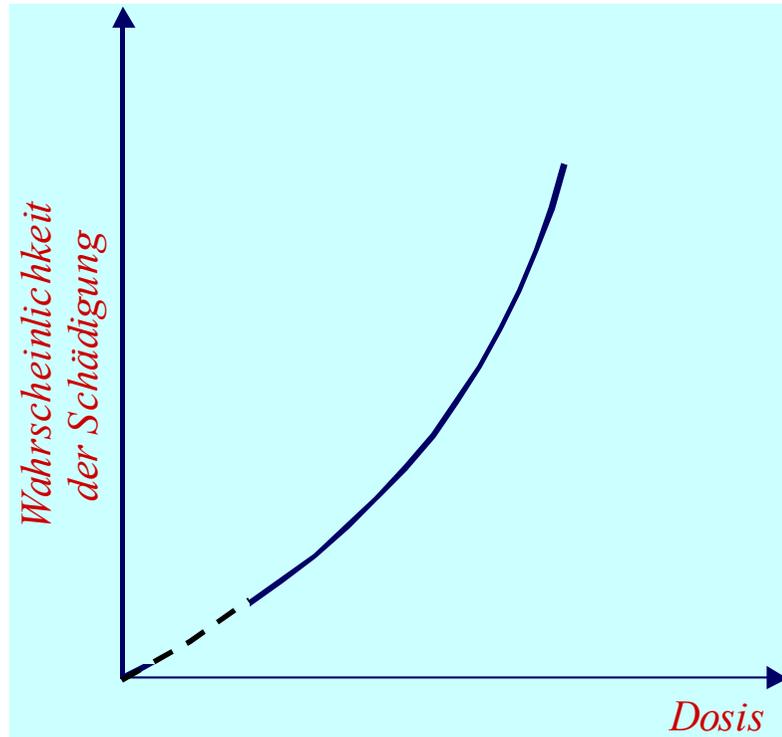


# Strahlenwirkung



- *Stochastische Wirkung*
- *Deterministische Wirkung*

# Stochastische Wirkung



- auf Molekül- oder Zellebene jeder Strahlenschädigung

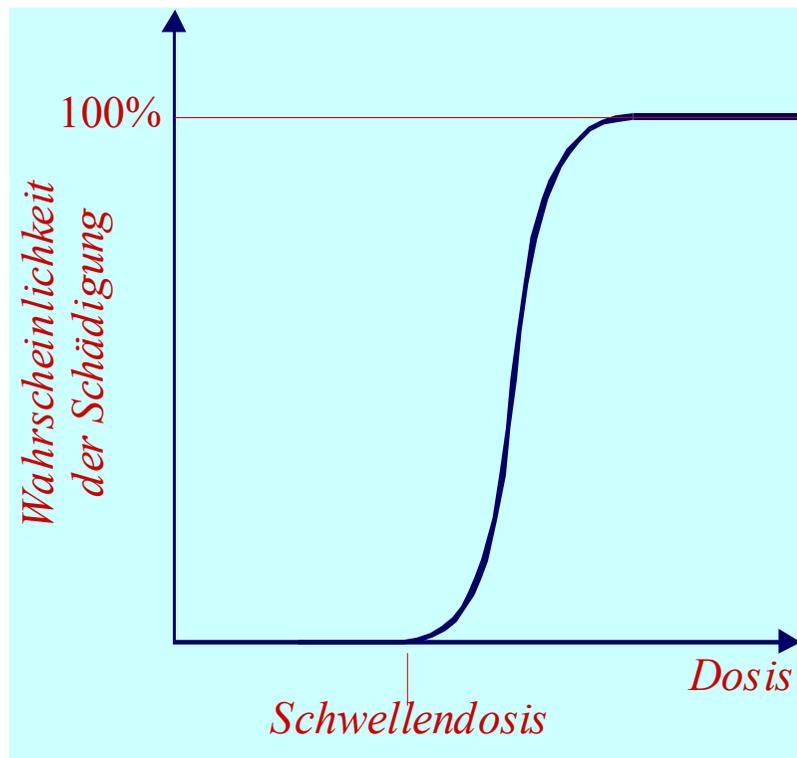
Erhöhung der Dosis erhöht “nur” die Wahrscheinlichkeit der Geschwulstentstehung, aber nicht den Schweregrad der Krankheit.

Es gibt keine Schwellendosis!

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



# Deterministische Wirkung



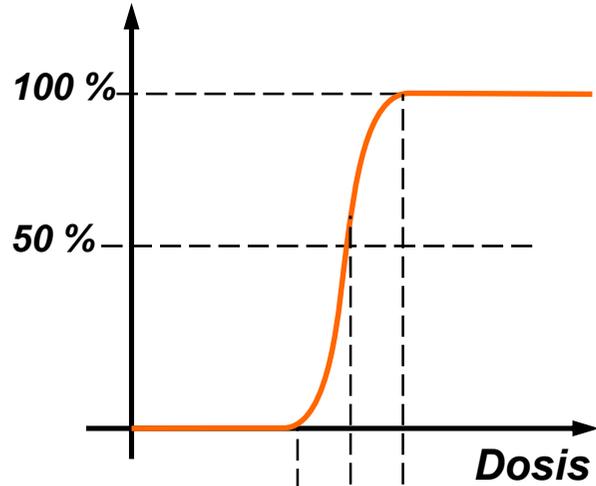
z.B.:

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

Erhöhung der Dosis erhöht den Grad der Schädigung

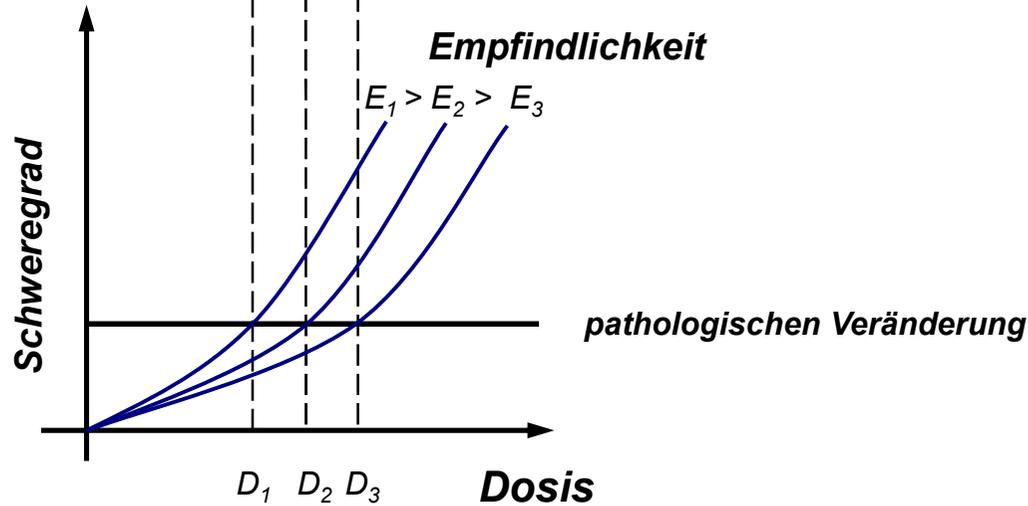
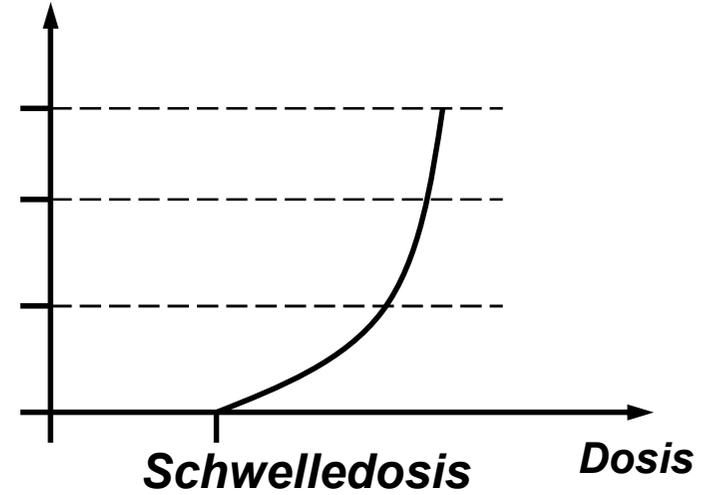


**Wahrscheinlichkeit  
der Schädigung**



**Schweregrad**

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



**Schwelledosis der  
pathologischen Veränderung**



# 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 (***LD*<sub>50</sub>**):

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

***D* > 3-4 Gy** bei Ganzkörperbestrahlung

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



## B. Ionendosis

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

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

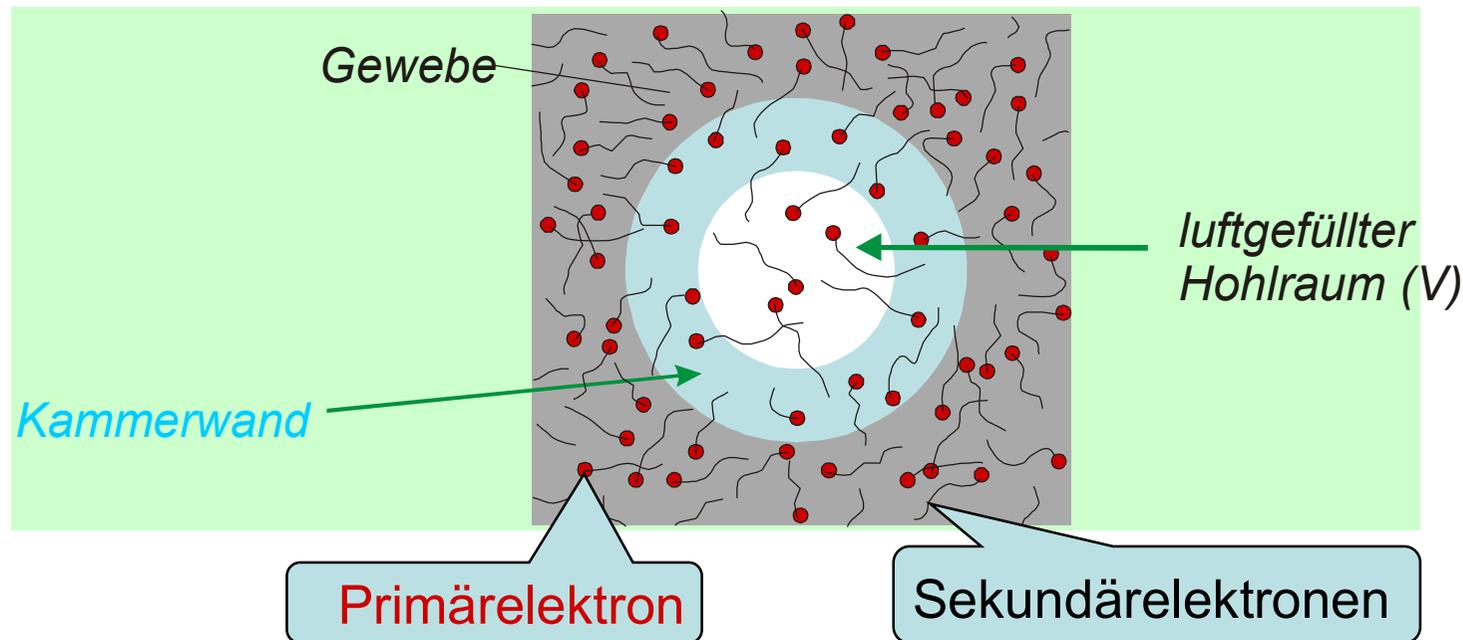
### Gültigkeit:

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

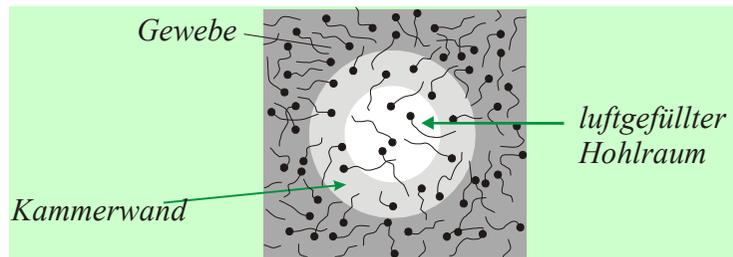


# Das Elektronengleichgewicht

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.



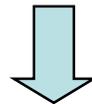
## Zusammenhang zwischen Ionendosis ( $X$ ) und der Energiedosis ( $D$ ) in einem Gewebe

Bezeichne  $f_0$  die mittlere Energie zur Erzeugung eines Ionenpaares in Luft ( $\sim 34$  eV)

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

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

$D$  = absorbierte Energie/Masse

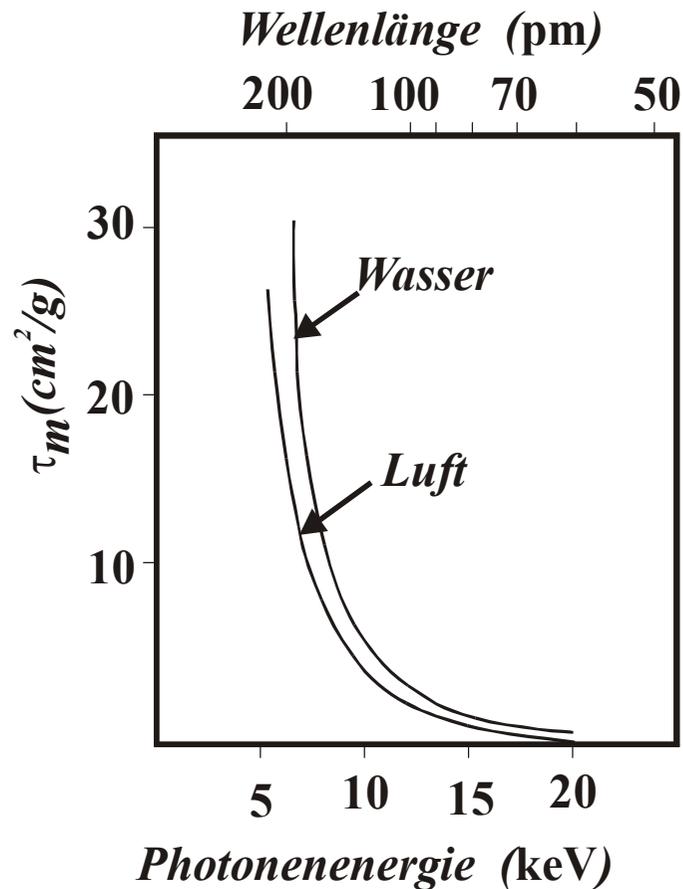


$$D_{Luft} = f_0 \cdot X \quad X \text{ ist in Luft gemessen!}$$

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

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

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

### Strahlungsart

Photonen, alle Energien

Elektronen, Myonen, alle Energien

Protonen und geladene Pionen

Alphateilchen, Spaltfragmente, schwere Ionen

Neutronen

### Strahlungswichtungsfaktor

$w_R$

1

1

2

20

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:



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

**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

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

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

Gewebe	Gewebewichtung s-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



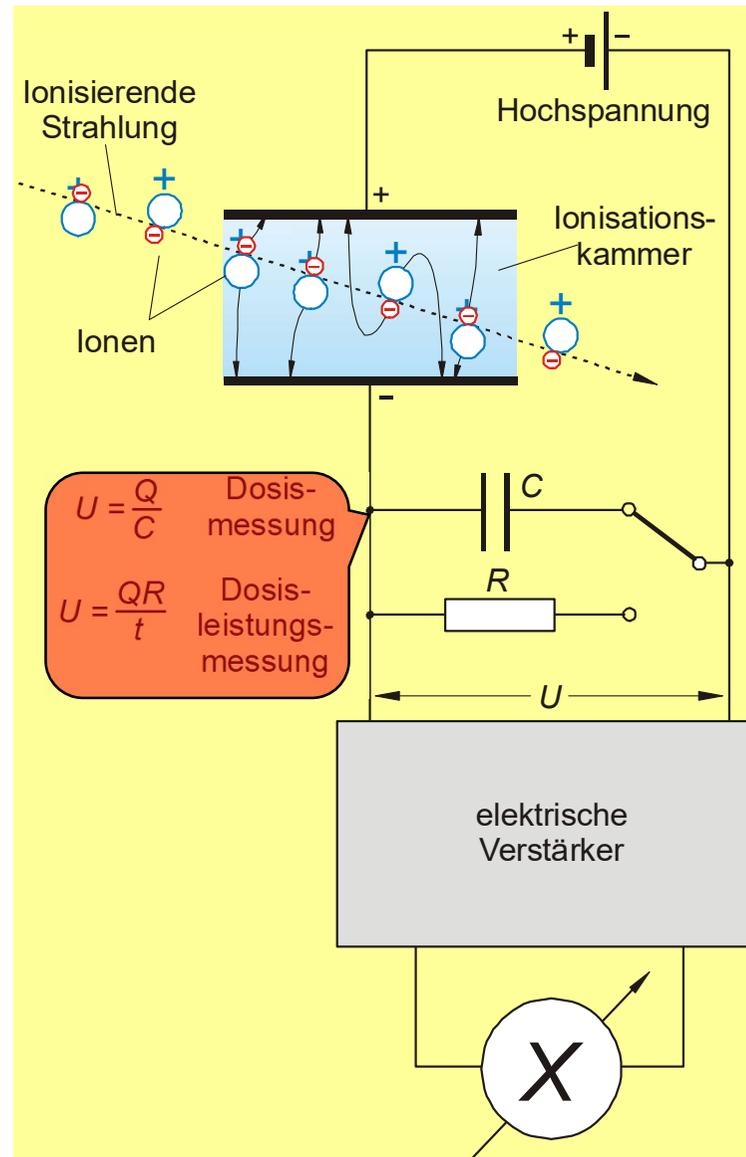
# *Strahlungsdetektor – Dosimeter*

1.) Strahlungsdetektor:  
Nachweis der Strahlungen

2.) Dosimeter:  
Messung der Strahlendosis

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

# Ionisationskammer



el. Ladung ~  
Teilchenenergie

Zahl der el.Signal  
~ Teilchenzahl



## **Vorteile:**

- *seit mehr als 100 Jahren sind die Ionisationsvorgänge untersucht — ausführliche theoretische und praktische Kenntnisse;*
- *Messvolumen von mm<sup>3</sup> - Liter;*
- *ermöglicht absolute Messung — Kalibrationsmessungen der anderen Detektoren/Dosimeter;*
- *Messung der sehr großen Dosiswerten;*
- *Schließen zur Energiedosis in Geweben.*
- *Echzeitmessung bei der Strahlentherapie!!*



# *Thermolumineszenzdosimeter*

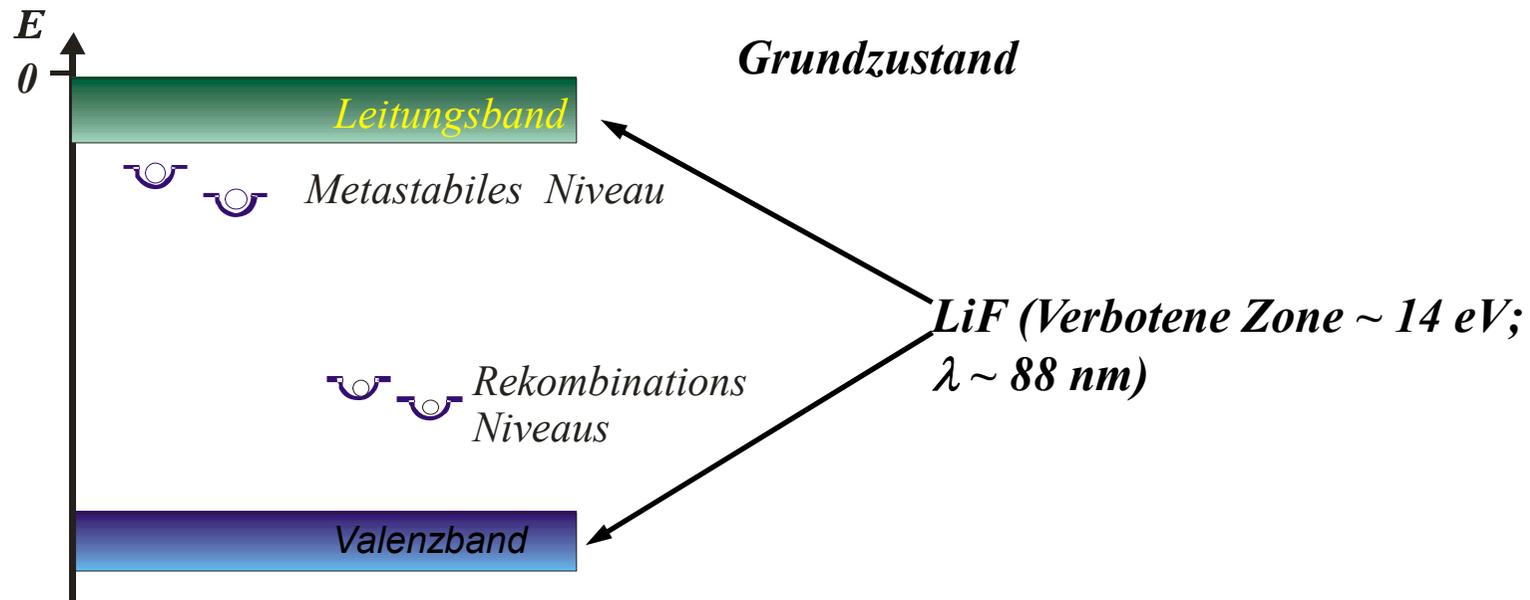




*Am häufigsten angewandten TL Kristalle:*

*LiF(Mg,Ti); CaF<sub>2</sub>(Dy); CaF<sub>2</sub>(Mn);*

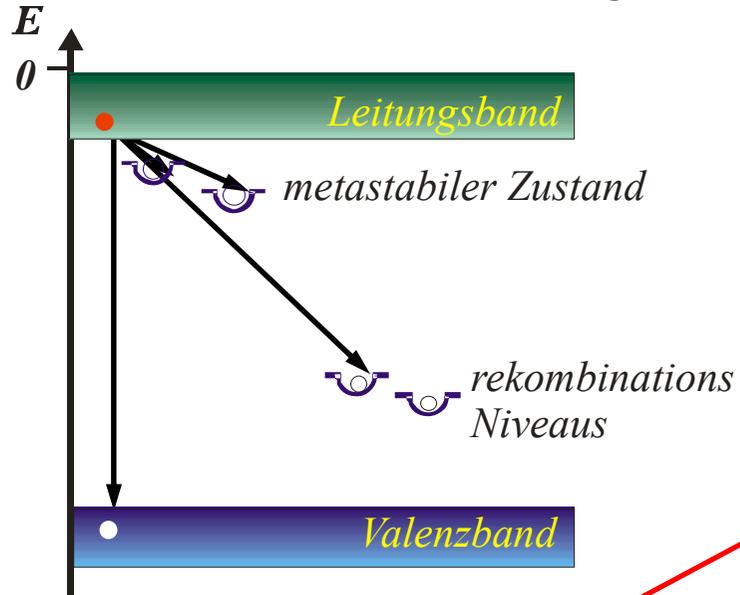
*CaSO<sub>4</sub>(Dy); Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>(Mn)*



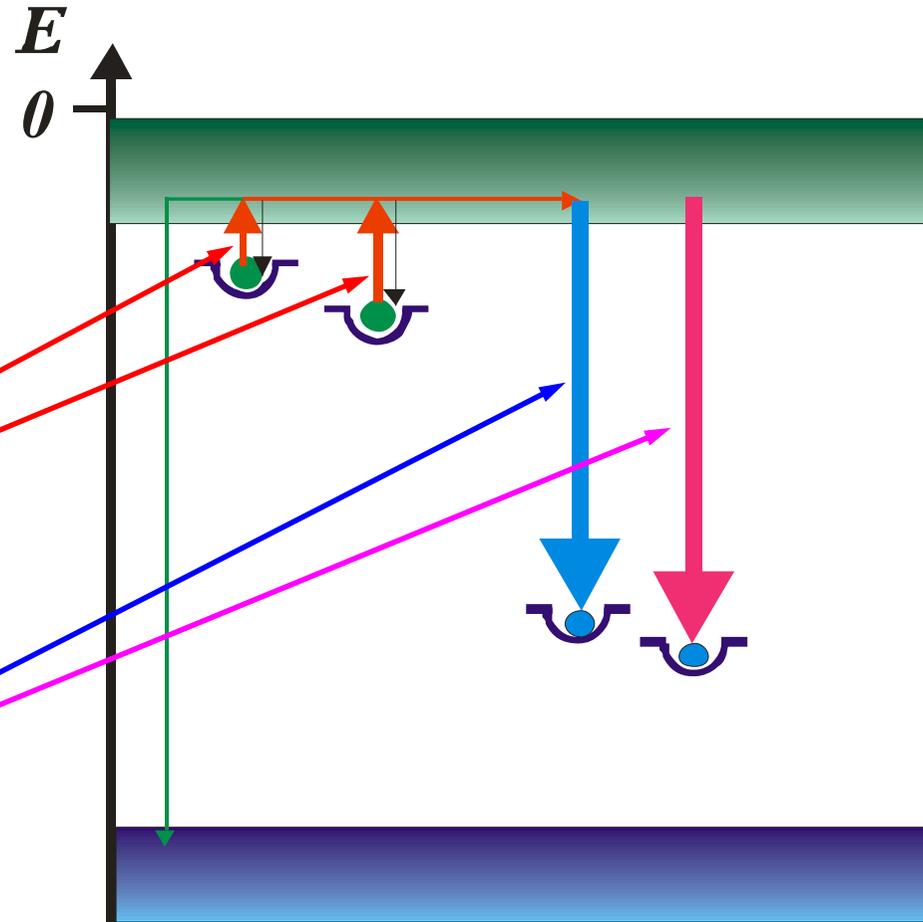
$$\Delta E_{m-LB}: \sim 30 \sim 60 \text{ meV}$$



## Gleich nach der Bestrahlung



## Thermolumineszenz



*Aktivierungsenergien*

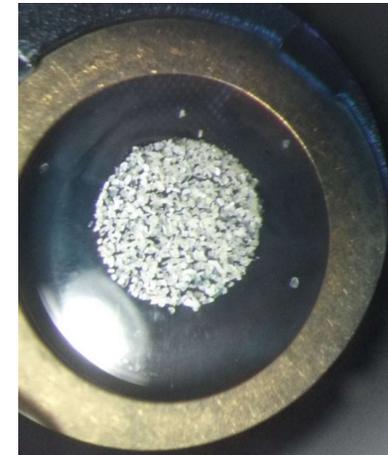
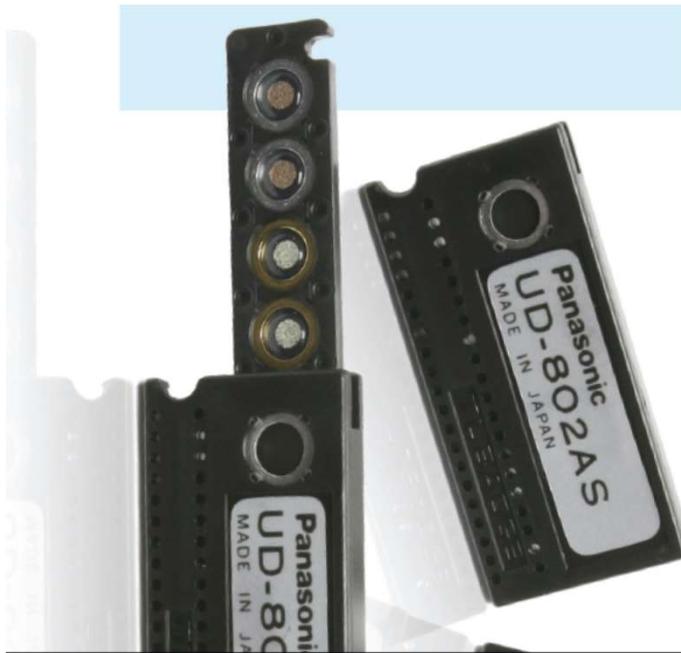
verschiedene Wellenlänge/Energie  
(zB.LiF(Mg):

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*

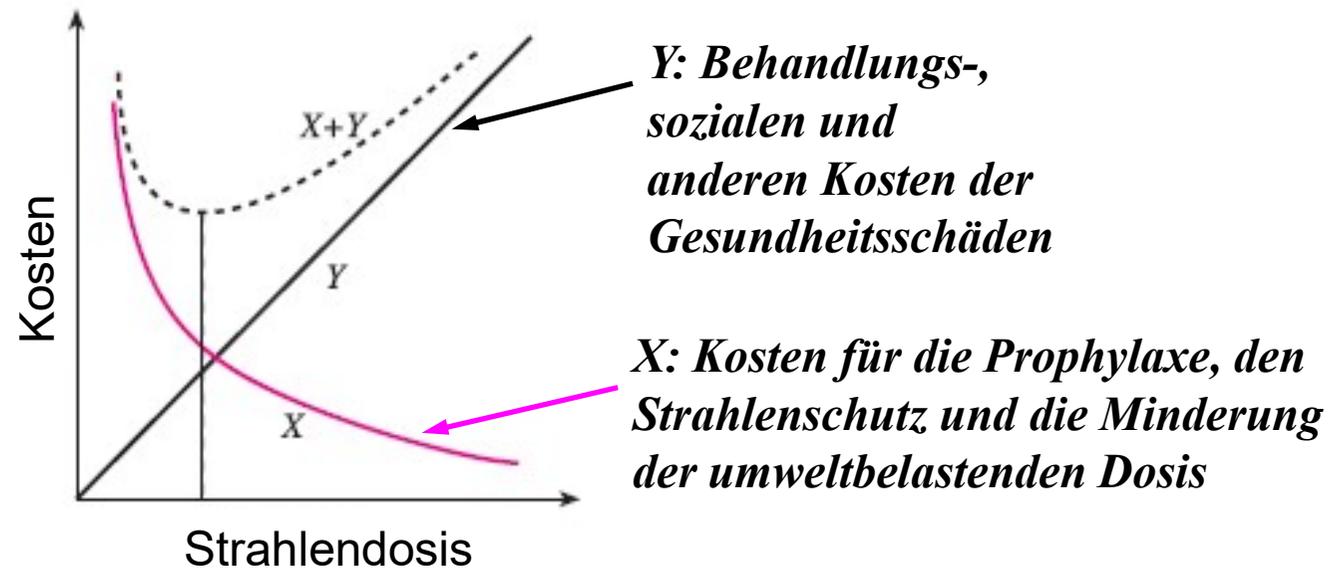
*ad. a.: Der zu erwartende medizinische Nutzen > das Risiko von Schädigung*

*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***

	<b>Berufliche Strahlenexposition (mSv/Jahr)</b>	<b>Bevölkerung (mSv/Jahr)</b>
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**