



# Dosimetrie der ionisierenden Strahlungen

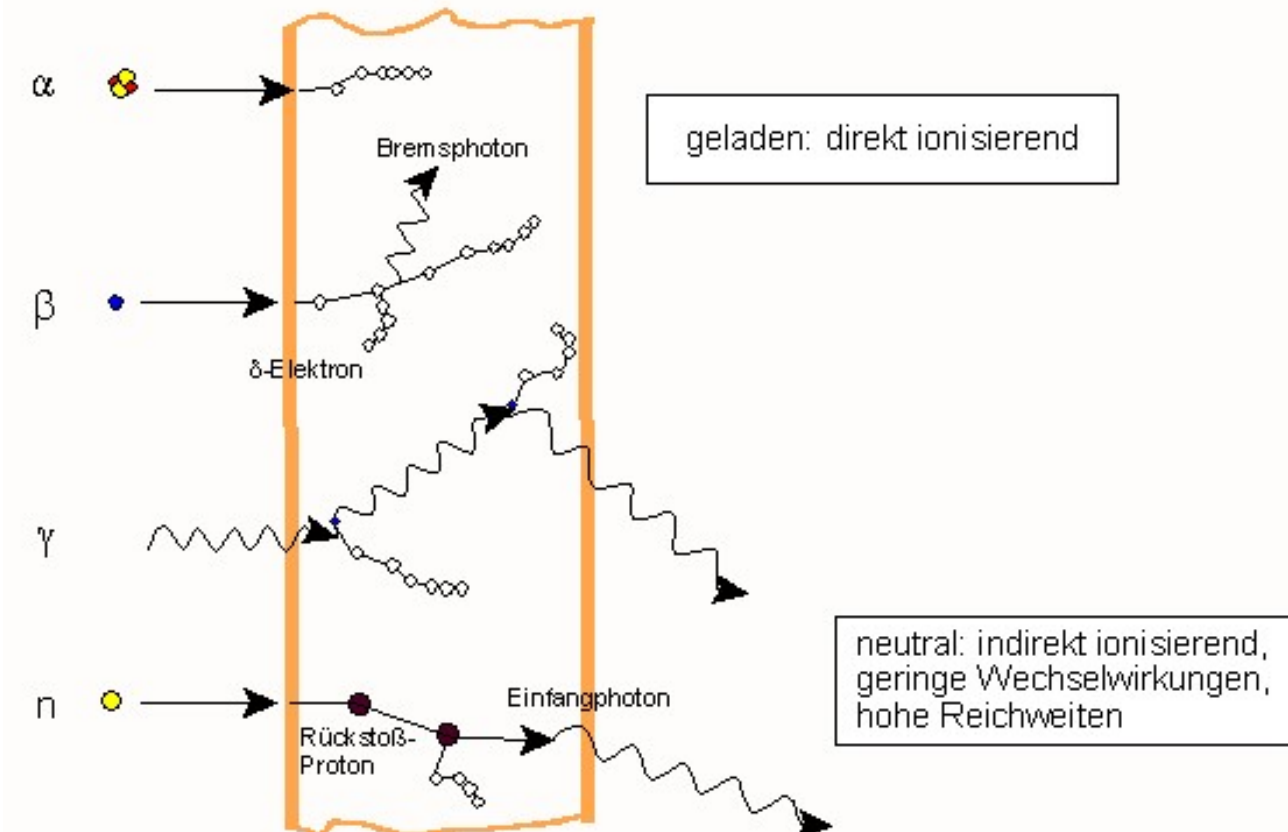
# Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit der Materie

## Teilchenstrahlungen

$\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$   
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 elementarer Bedeutung, *aber nicht ausreichend*.

## ***Biologische Strahlendosimetrie:***

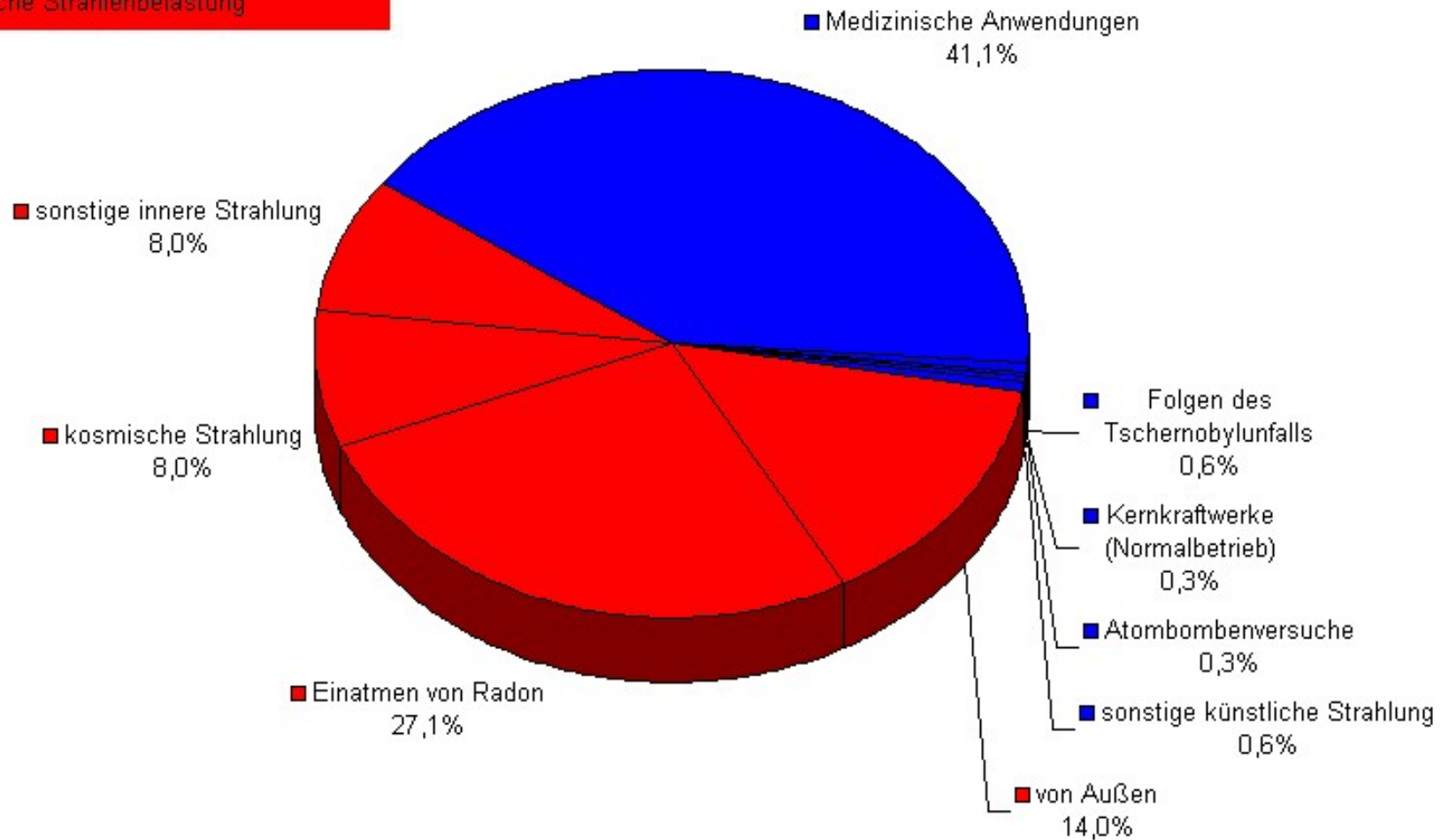
sie soll auf eine erlittene Dosis von unbekannter Größe anhand von gut meßbaren, statistisch auswertbaren biologischen Änderungen geschlossen werden.

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

## Alltägliche Strahlenbelastung

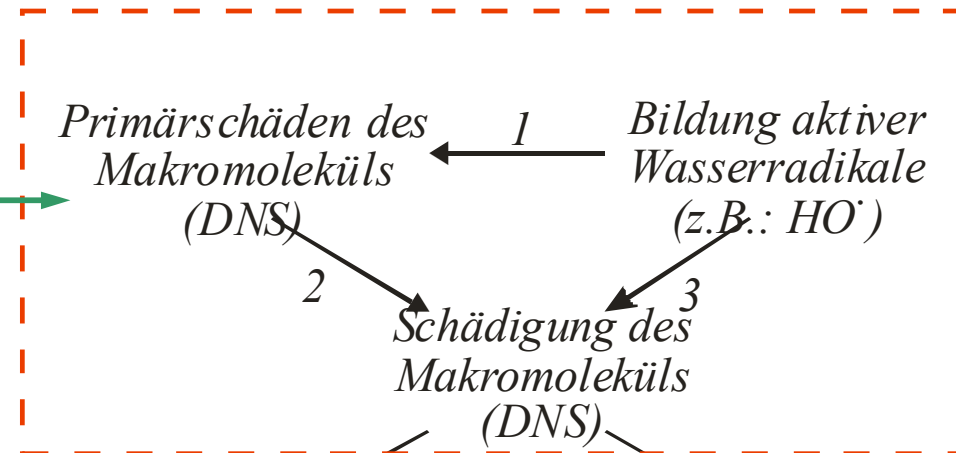
künstliche Strahlenbelastung

natürliche Strahlenbelastung

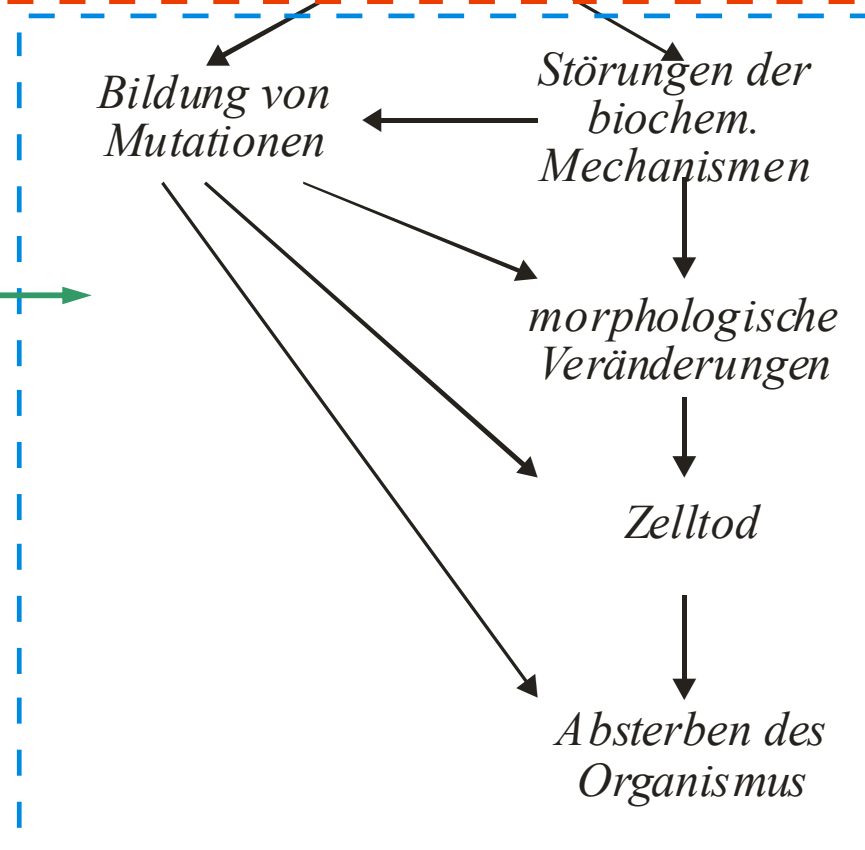


# Der Mechanismus der Strahlenwirkung

Primäre Prozesse



Sekundäre Prozesse





## 1. Die physikalische Phase:

primäre Ww. der Strahlungsquanten mit Atomen und Molekülen

⇒ Ionisierte und angeregte Atome/Moleküle

Biomoleküle: DNA/RNA, Aminosäure, Proteine, Enzyme oder H<sub>2</sub>O in Zellplasma) am Ort der phys. Ww.  
(Zeitdauer ~ 0,1 ps-0,1 fs)

## 2. Die physikalisch-chemische Phase:

Verteilung der absorbierten Energie in die nähere Umgebung des Wwortes.

intramolekulare Energiewanderung (innerhalb eines Biomoleküls)

intermolekulare                    -"-                    (Stöße, findet vorwiegend durch die Ausbildung und die  
Diffusion von Wasserradikalen statt),

(Zeitdauer 0,1 ps- 0,1 ms)

⇒ Molekulare Veränderungen der Biomoleküle

## 3. Die biologische Phase:

=> Beeinflussung der Zellstoffwechsels/der Proteinsynthese, zu Modifikationen der Erbsubstanz der Zelle

⇒ Sichtbare Schäden: Zerstörungen der Kern/Zellmembran oder Chromosomenbrüche und  
Ringchromosomenbildungen

⇒ Unsichtbare ...: Mutationen an der Erbsubstanz und Denaturierung von Proteinen

In die biologische Phase fallen die Strahlenschadensreparaturen. Nicht reparierte Strahlenschäden können zu folgenden Reaktionen führen:

Erzeugung von Mutationen

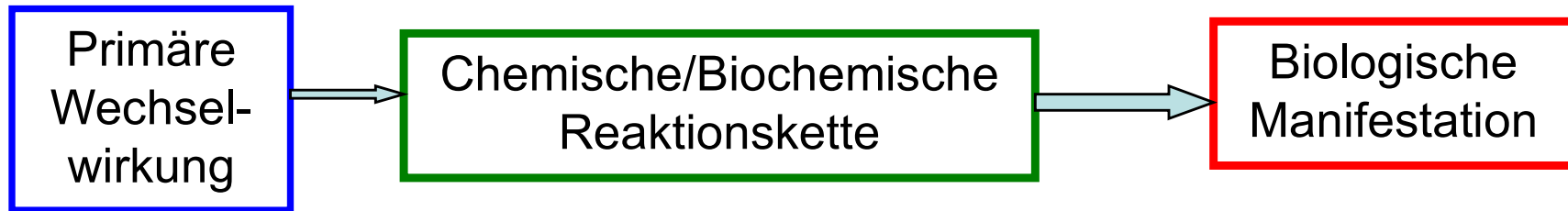
Chromosomenaberrationen

Zellteilungshemmungen

Stoffwechselveränderungen in der Zelle

Zerstörung oder Veränderung von Membranen oder Zellorganellen

Zelltod.

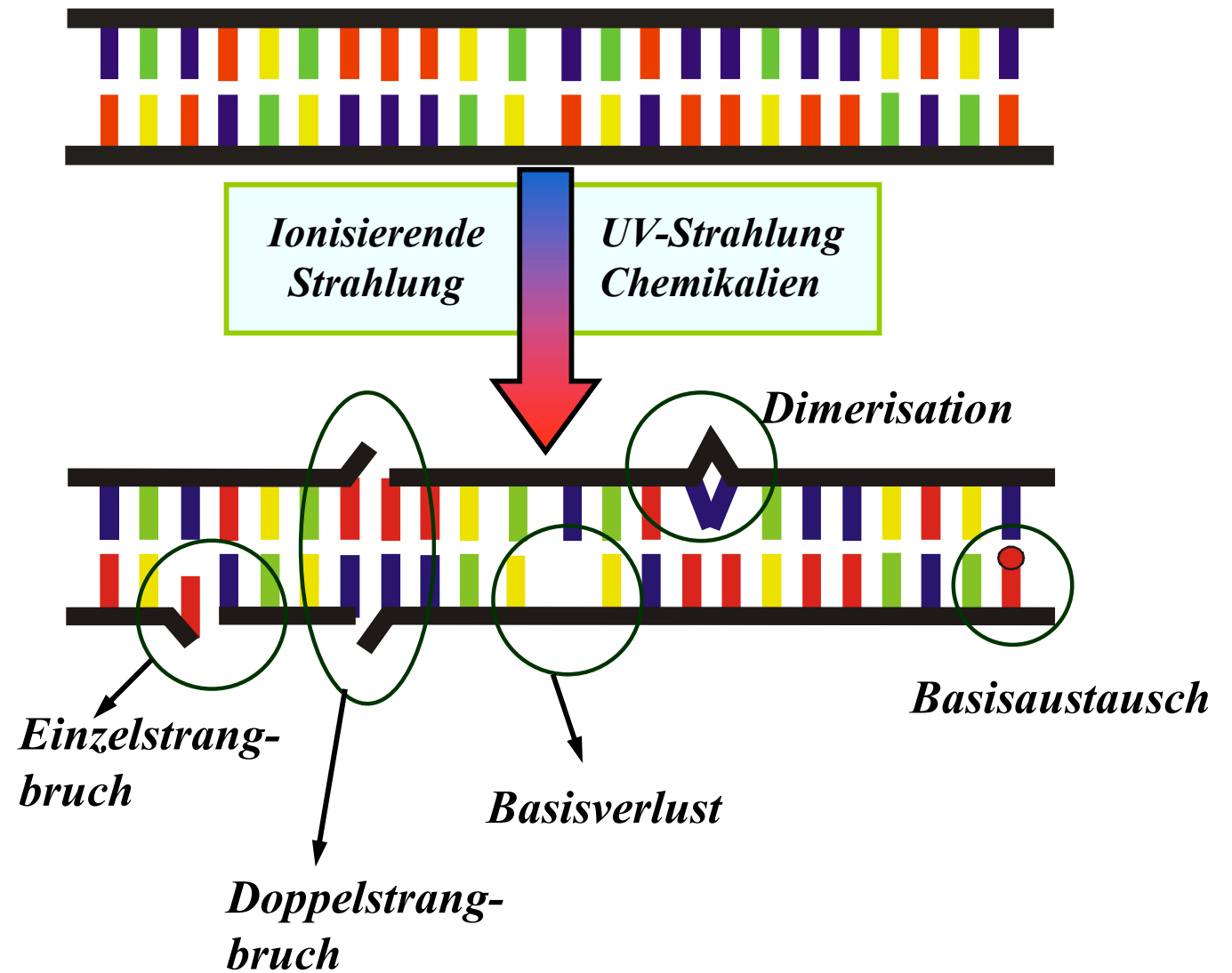
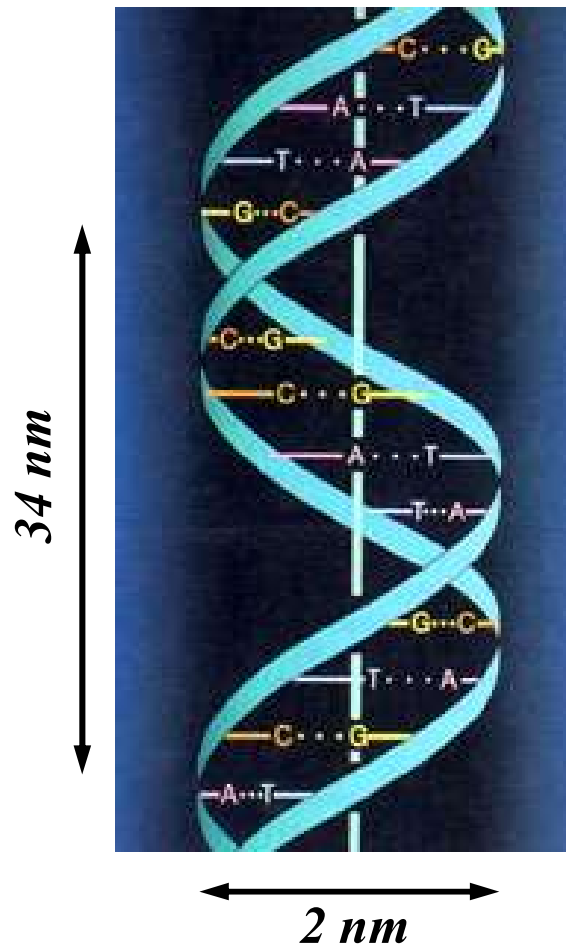


Zeitskala: ~ps

~ ns –  $\mu$ 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

Die Wirksamkeit der Reparatur- und Schutzmechanismen hängen von

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

Strahlenverletzung, Strahlenkrankheit

akut

chronisch

**Dosis der erlittenen  
Strahlenbelastung**

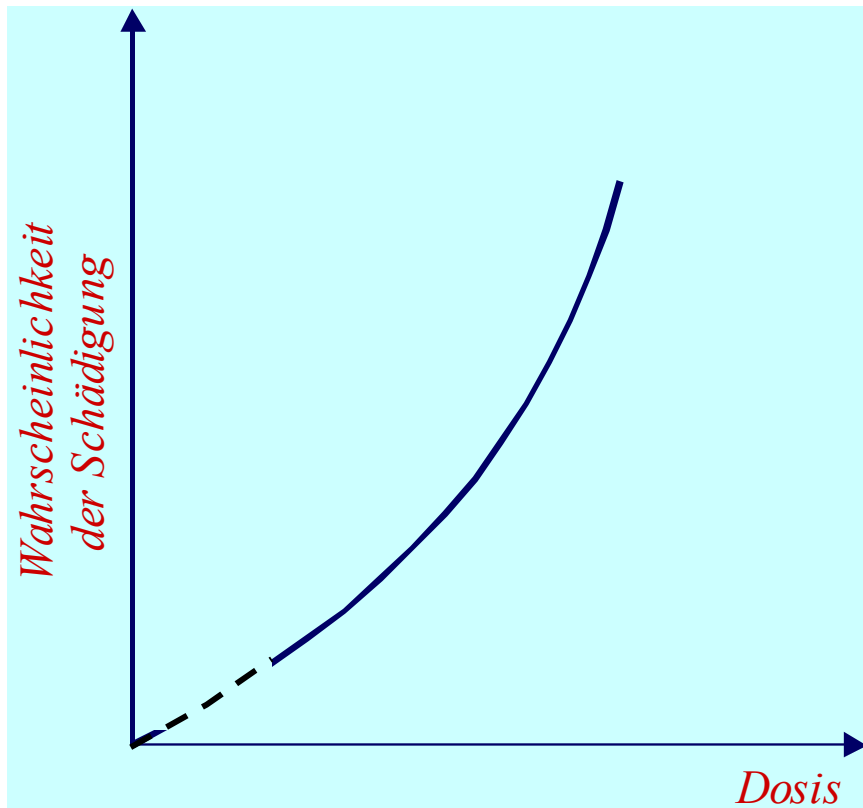


**Biologische Wirkung der Strahlung  
(Strahlenschäden)**

➤ *Stochastische Wirkung*

➤ *Deterministische Wirkung*

# Stochastische Wirkung



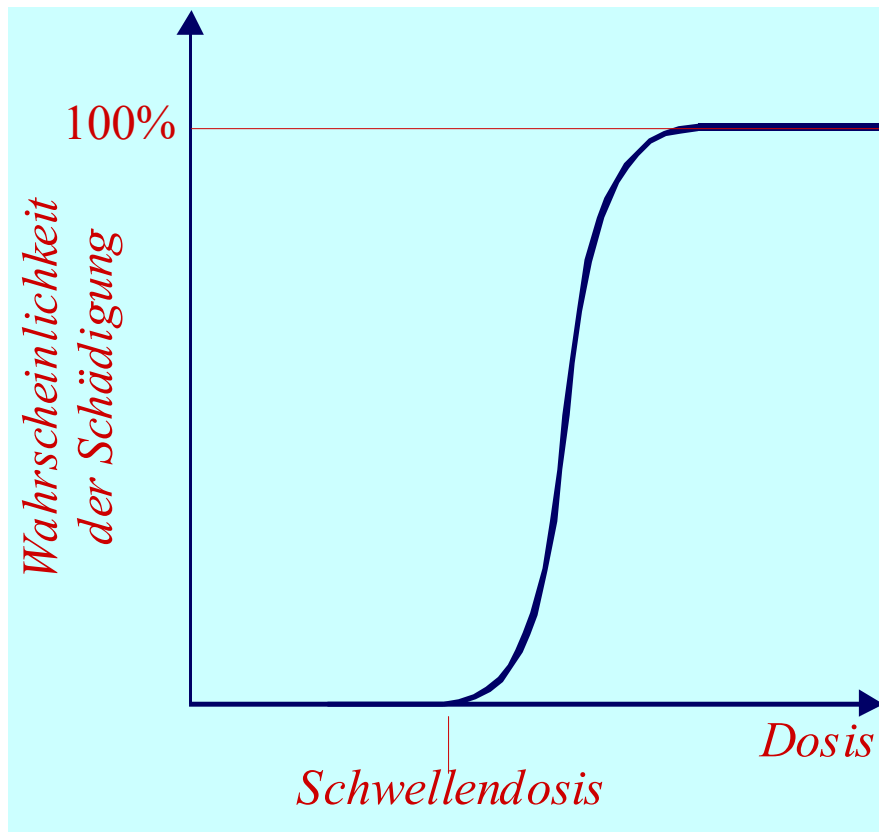
- auf Molekül- oder Zellebene jeder Strahlenschädigung

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

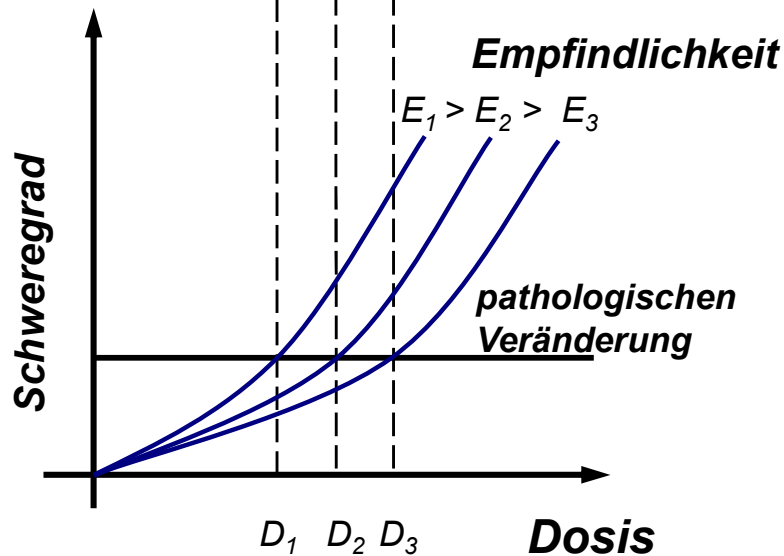
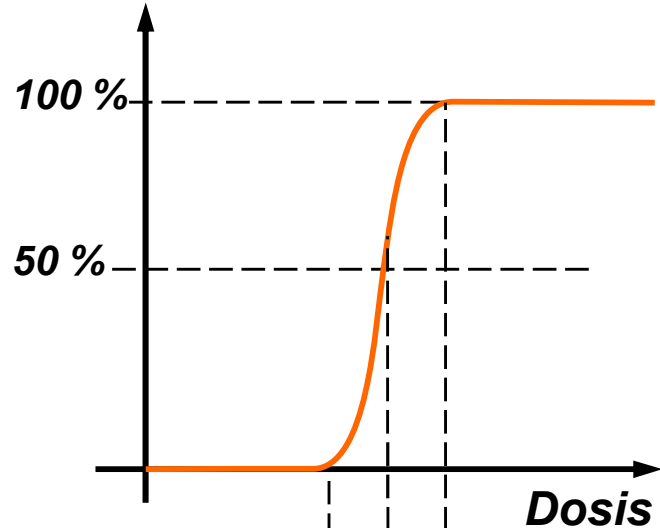


z.B.:

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

Erhöhung der Dosis erhöht den Grad der Schädigung

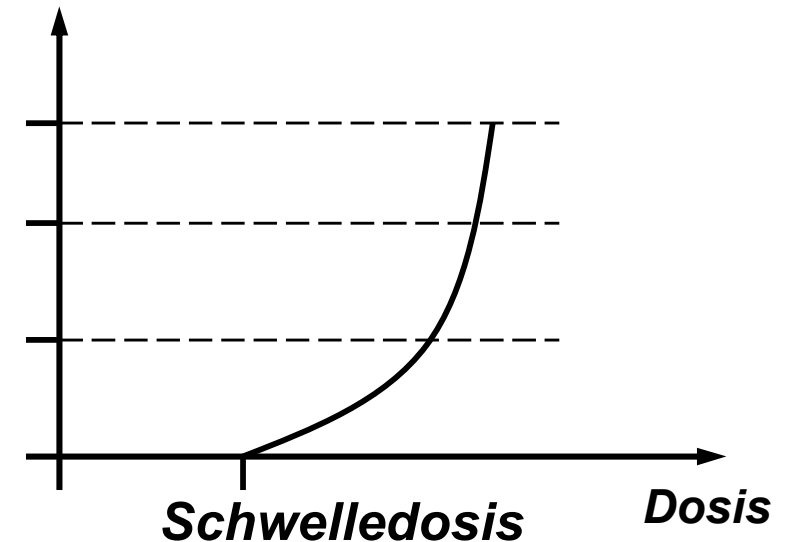
## Wahrscheinlichkeit der Schädigung



**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.



## Pathologie

Der Verlauf der Strahlenkrankheit hängt stark von der empfangenen Strahlendosis ab.

Sie kann nur geringe Langzeitschäden, aber auch den Tod innerhalb von Minuten bedeuten.

Bei mittleren Dosen zeigen sich Symptome innerhalb von Stunden und Tagen, darunter Hautschäden, innere Blutungen sowie Veränderungen des Blutbildes.

### *Dermatologische Symptome:*

- Erythema (juckende Hautrötungen)

- Purpura

- Bullae (Blasen)

- Geschwüre

- Haarausfall (bei starken Dosen z. T. dauerhaft)

- Nekrosen

- sonstige Hautschäden

### *Gastrointestinale Symptome:*

- Übelkeit

- Erbrechen

- Diarrhoe (Durchfall)

- Appetitlosigkeit

### *Hämatopoetische Symptome (Myelosuppression):*

- erhöhtes Infektionsrisiko aufgrund weniger weißer Blutkörperchen (Leukopenie)

- verstärkte Blutungen aufgrund weniger Blutplättchen

- Blutarmut aufgrund weniger roter Blutkörperchen

- Arterielle Hypotonie

### *Neurologische Symptome:*

- Schwindel

- Kopfschmerzen

- Benommenheit

- Störungen des Zentralnervensystems (Krampfanfälle, Tremor, Ataxie)

### *Sonstige Symptome:*

- Fieber

- Müdigkeit

- Unfruchtbarkeit

# 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 (median) Dosis ( **$LD_{50}$** ):

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

**$D > 3\text{-}4 \text{ Gy}$**  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

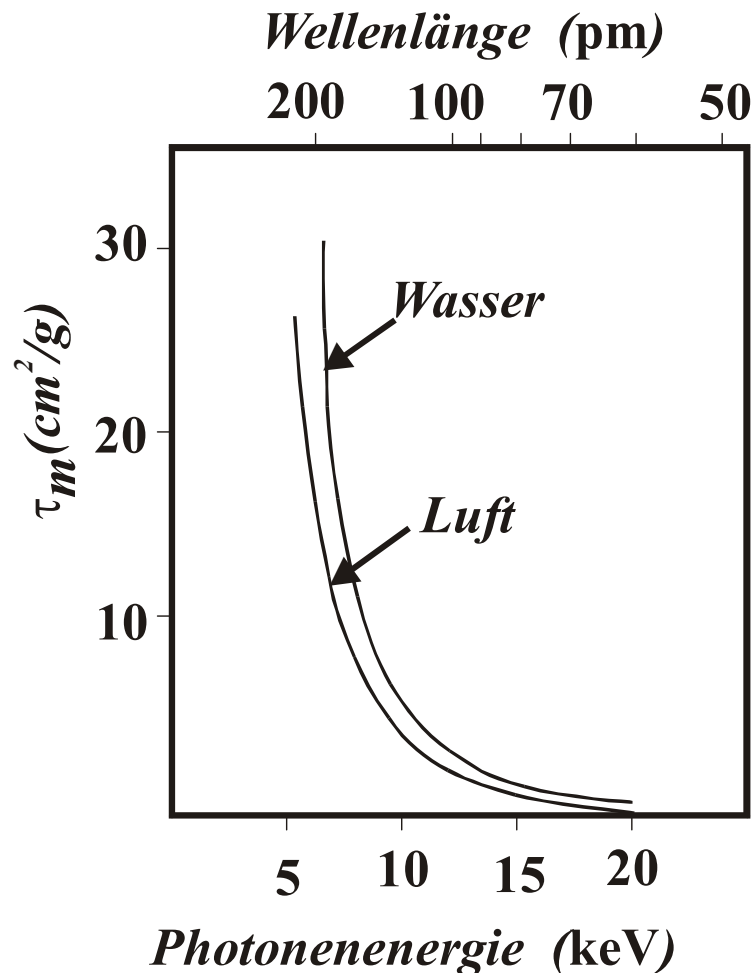
$D$  = absorbierte Energie/Masse



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

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.  $\gamma$ -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

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

$$[H_E] = Sv(Sievert)$$

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**

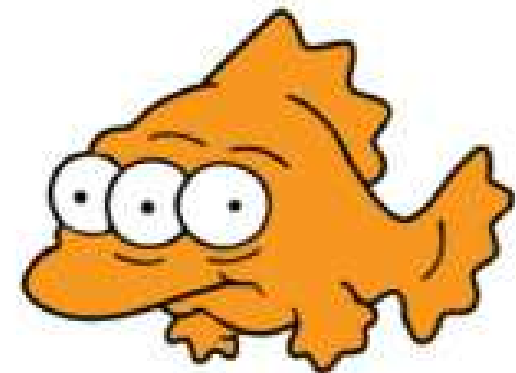
# SIMPSON'S GUIDE TO RADIATION



**Bequerel [Bq]**  
How brightly your  
Cesium glows



**Gray [Gy]**  
How brightly  
Cesium will make  
you glow



**Sieverts [Sv]**  
How many extra  
eyes will you have  
after glowing?





# Strahlenschutz

ICRP — International Commission on Radiological Protection

## Grundprinzipien:

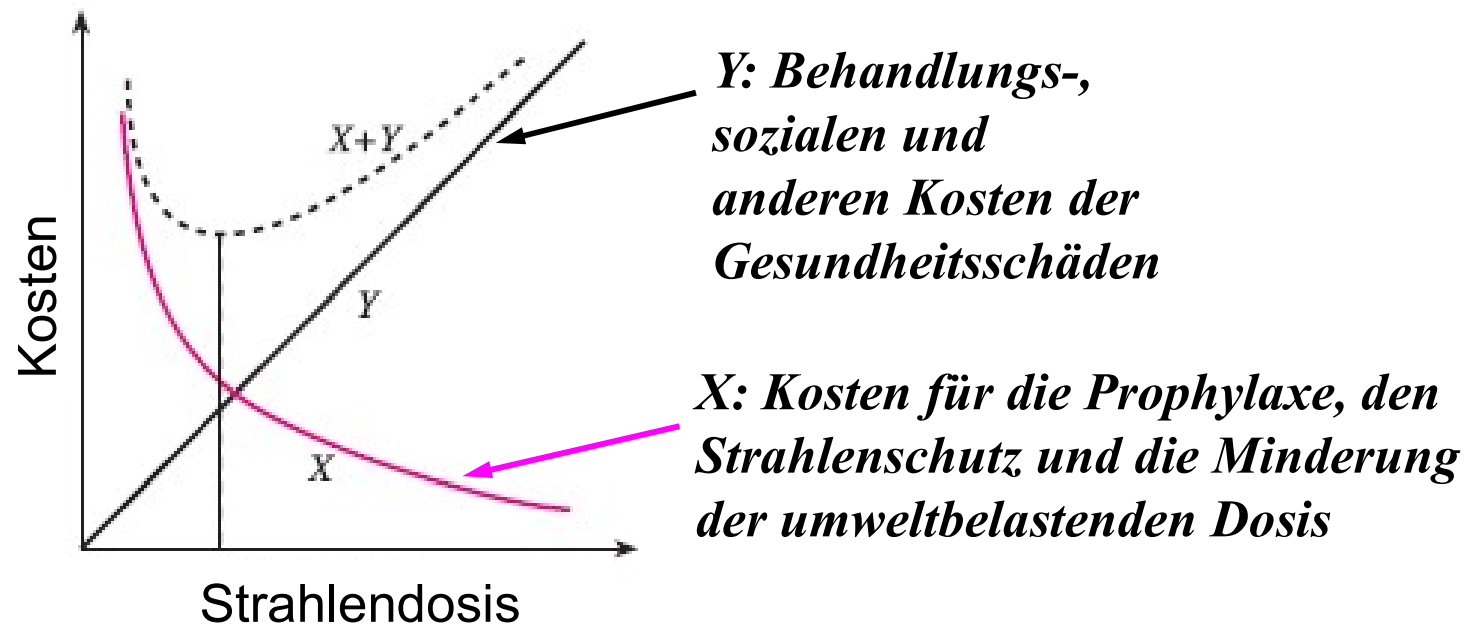
- a. Rechtfertigung einer Tätigkeit*
- b. Optimierung des Schutzes*
- c. Individuelle Dosisbeschränkung*

*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 Strahlen- exposition (mSv/Jahr)	Bevölke- rung (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)*

\*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)

