

Strahlenschutz

Physikalische und biologische Aspekte

Dr. med. Dr. rer. nat. R. Rödel

1. Strahlenarten
2. Dosisbegriffe
3. Natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition
4. Biologische Strahlenwirkung

1.

Strahlenarten

Strahlung

ist Ausbreitung von Energie durch den Raum



Radioaktivität:

Strahlung, die beim Kernzerfall oder bei der Kernumwandlung entsteht

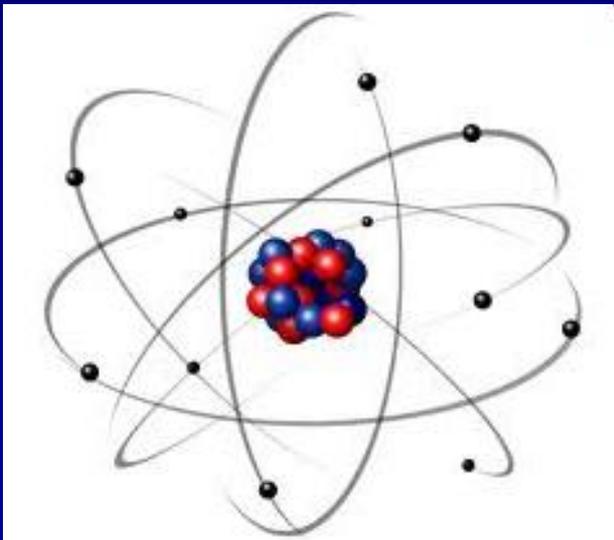
Radionuklide sind Kerne radioaktiver Atome, es sind nicht abschaltbare Strahlenquellen

Röntgenstrahlung:

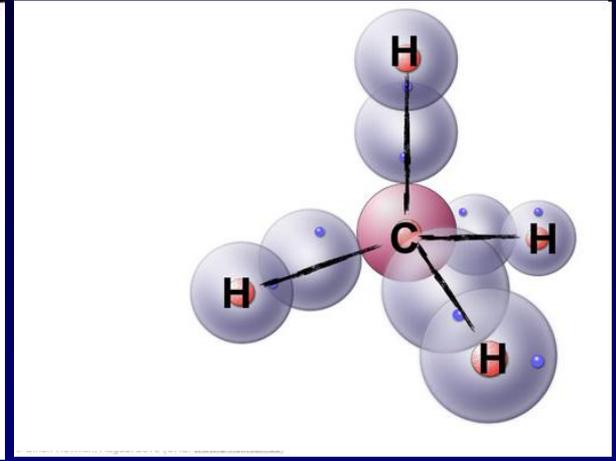
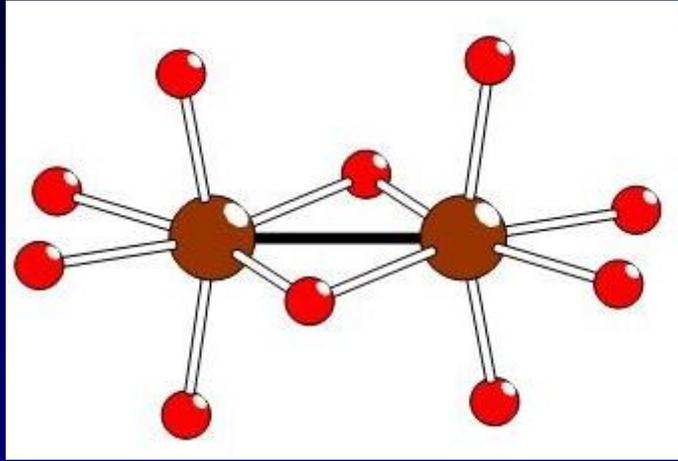
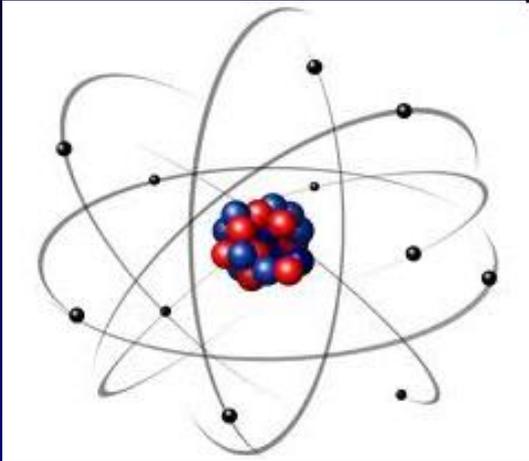
entsteht durch Beschleunigung von Elektronen in Röntgeneinrichtungen, es sind abschaltbare Strahlenquellen

Unser Organismus

besteht aus eine geordnete
Ansammlung von 7×10^{27} Atomen,
die miteinander zu Molekülen
verbunden sind.

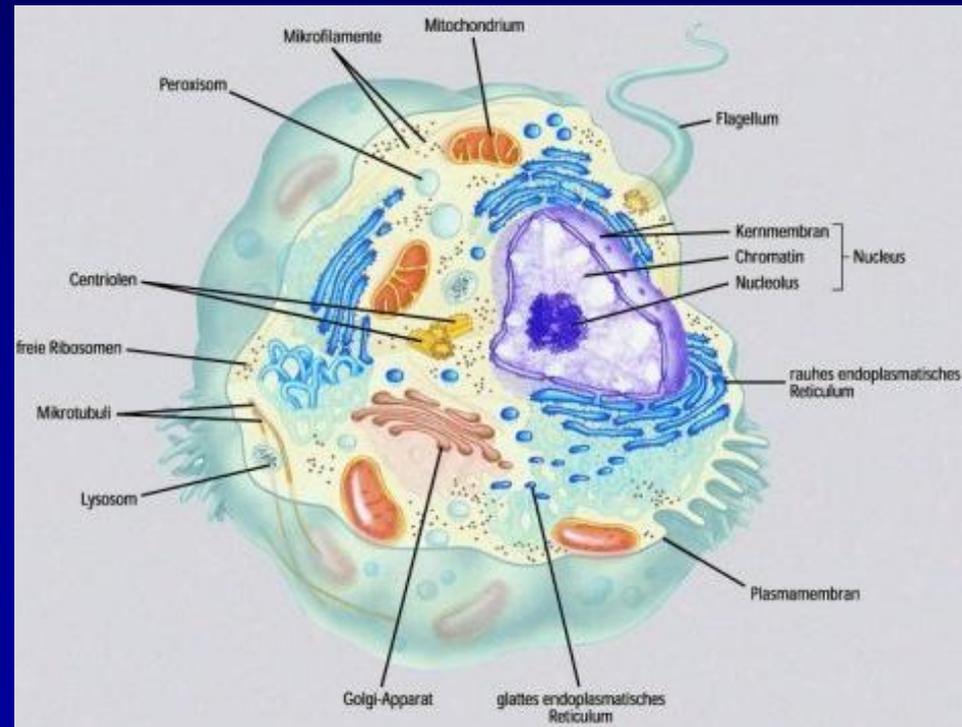


Unser Organismus



Unser Organismus

bildet aus den Molekülen 10^{14} Zellen,
die einige 100 verschiedene Gewe-
bestrukturen ergeben

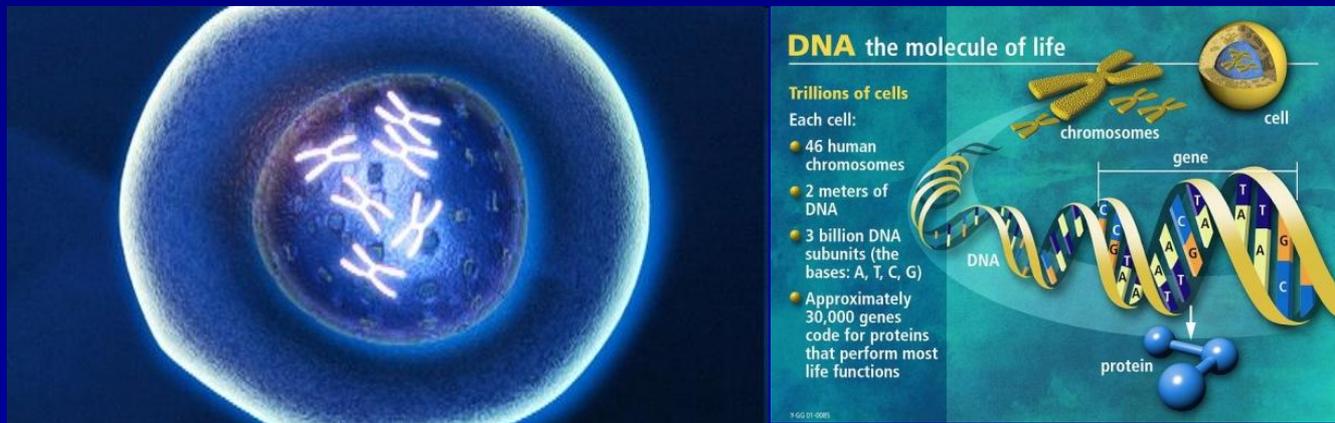


Unser Organismus

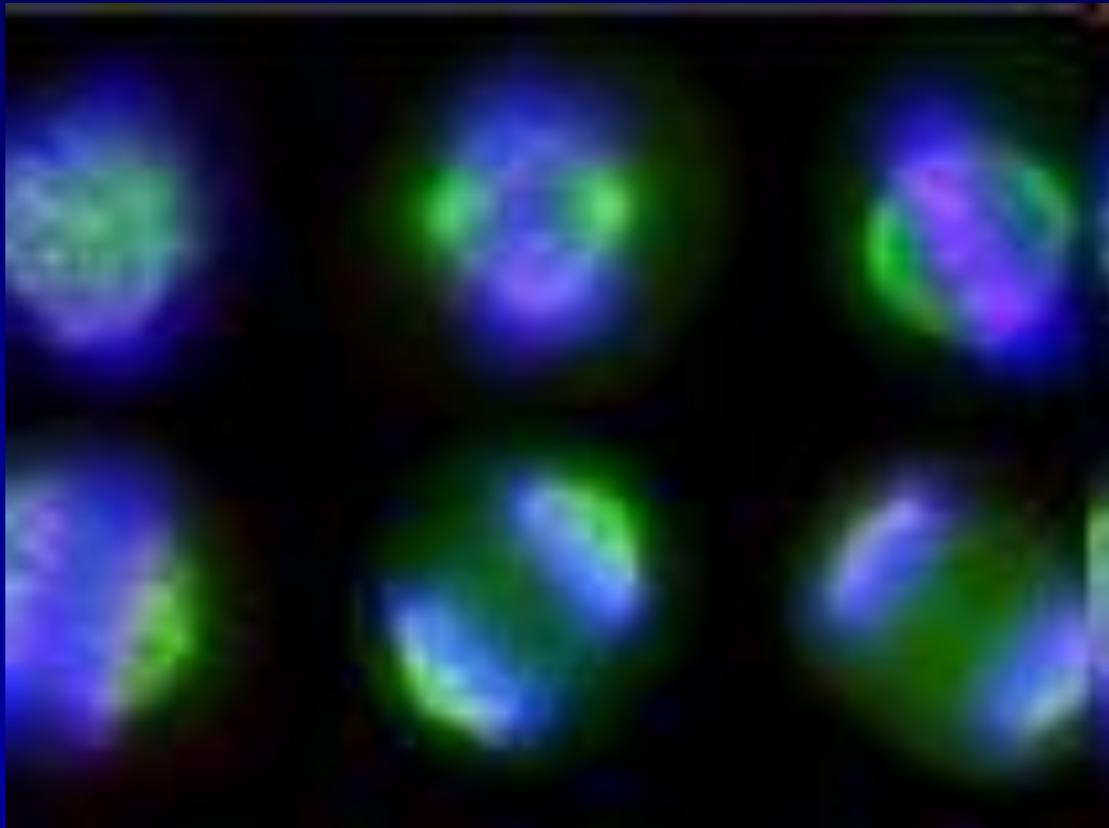
ist einer ständigen Erneuerung unterworfen,
es sterben in jeder Sekunde rund 50 Millionen
Zellen ab,

es werden in jeder Sekunde auch beinahe
genauso viele Zellen neu gebildet.

Der Bauplan ist in der DNA kodiert.

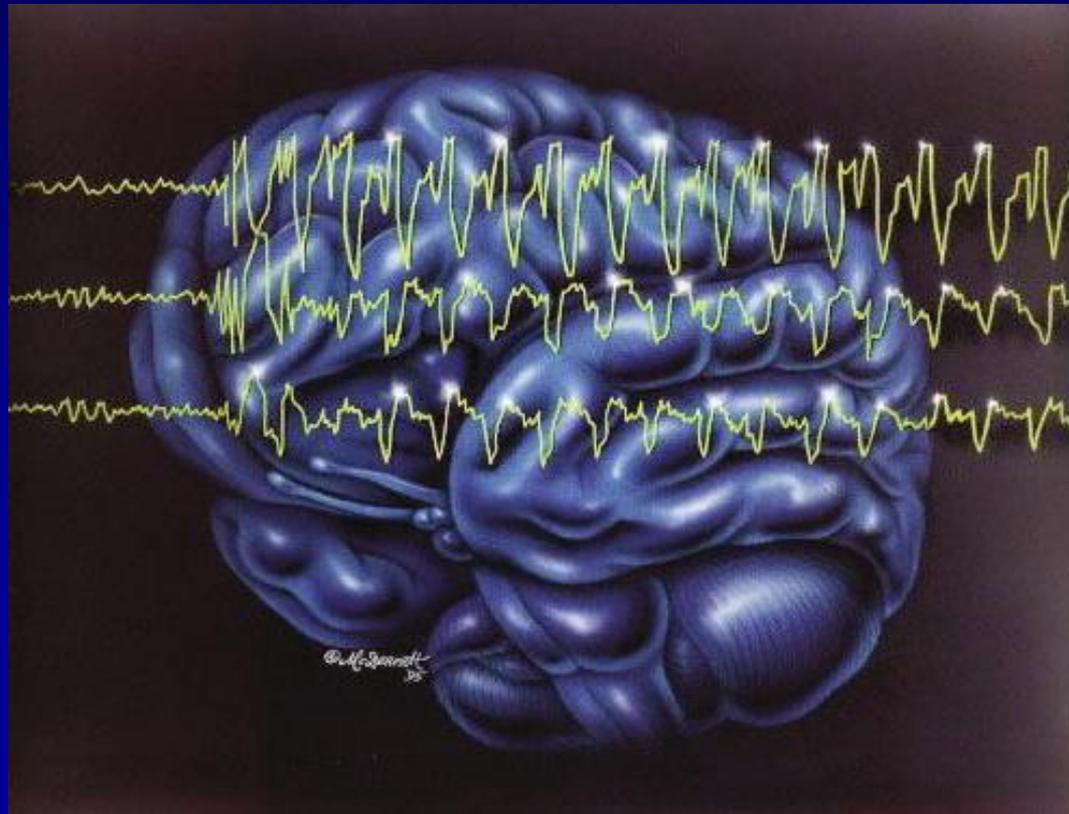


Bei jeder einzelnen Teilung müssen 3,3 Milliarden DNA-Bausteine von einem Replikationsapparat kopiert und anschließend fehlerfrei auf die entstehenden Tochterzellen aufgeteilt werden.



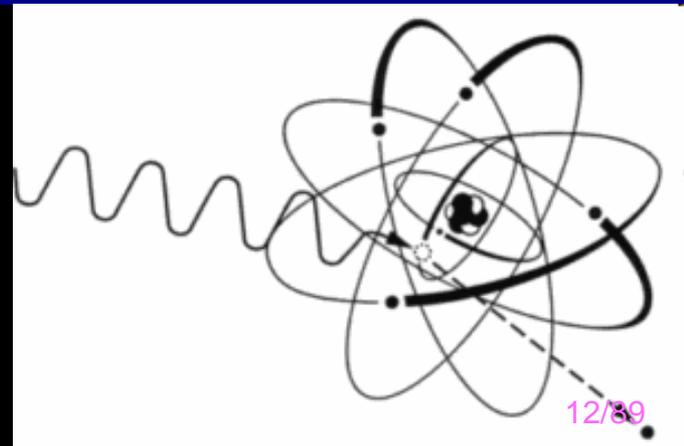
Unser Organismus

unterscheidet sich von toter Materie
durch eine Lebensfunktion



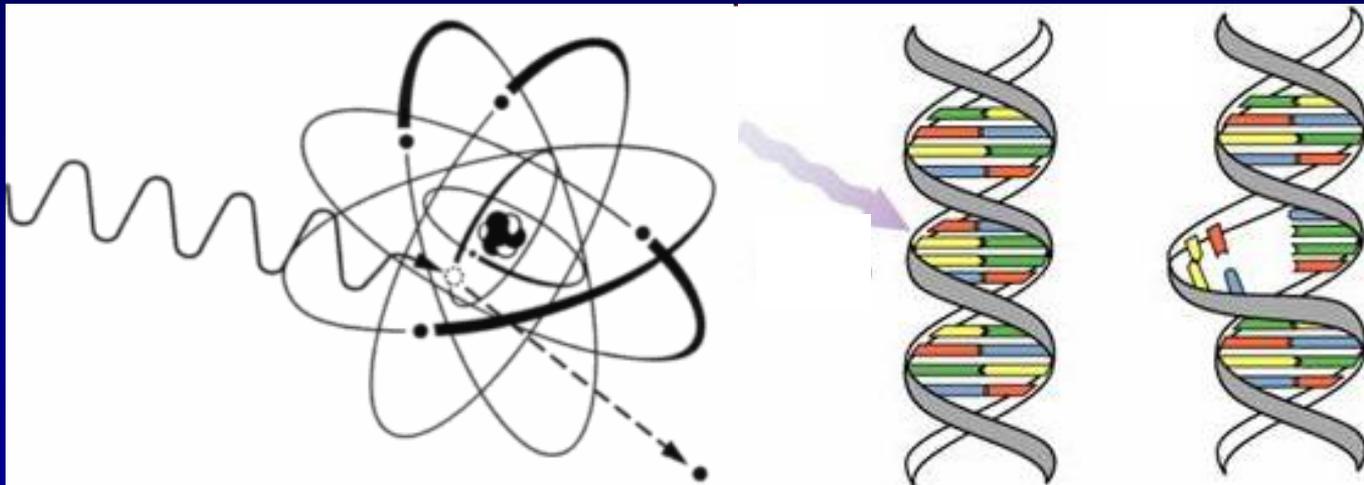
Strahlung

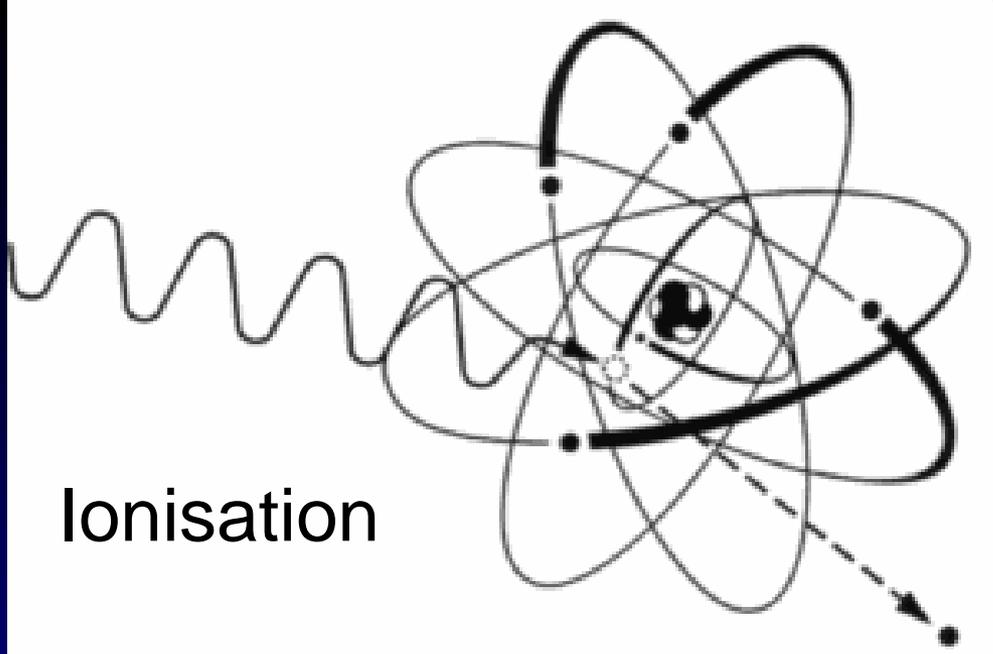
kann im Organismus Ionisation bewirken



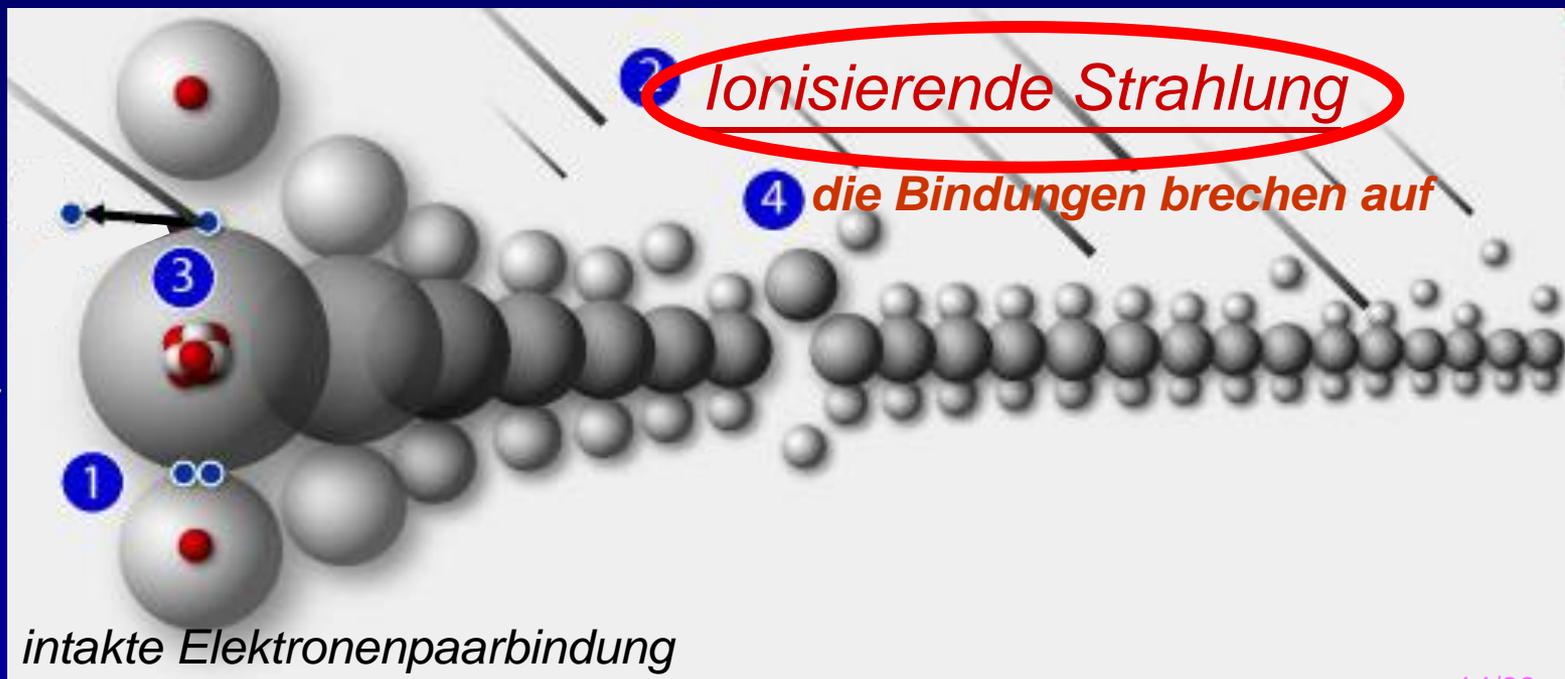
Ionisation:

Abtrennen eines Elektrons aus dem
Atom oder Molekül





Ionisation: ein Elektron wird herausgelöst, das Molekül wird beschädigt



Es gibt verschiedene Strahlenarten, die ionisieren können

Zwei Sorten von ionisierender Strahlung:

direkt ionisierend: α -, β -Strahlung

Korpuskel, Reichweite aufgrund Ladung begrenzt,
Energieabgabe auf kurzem Weg

indirekt ionisierend: γ -, Röntgenstrahlung,

elektromagnetische Wellen, Reichweite energieabhängig,
Energieabgabe auf langem Weg, ungeladen

Neutronen

Energieabgabe an Materie, Körpergewebe:

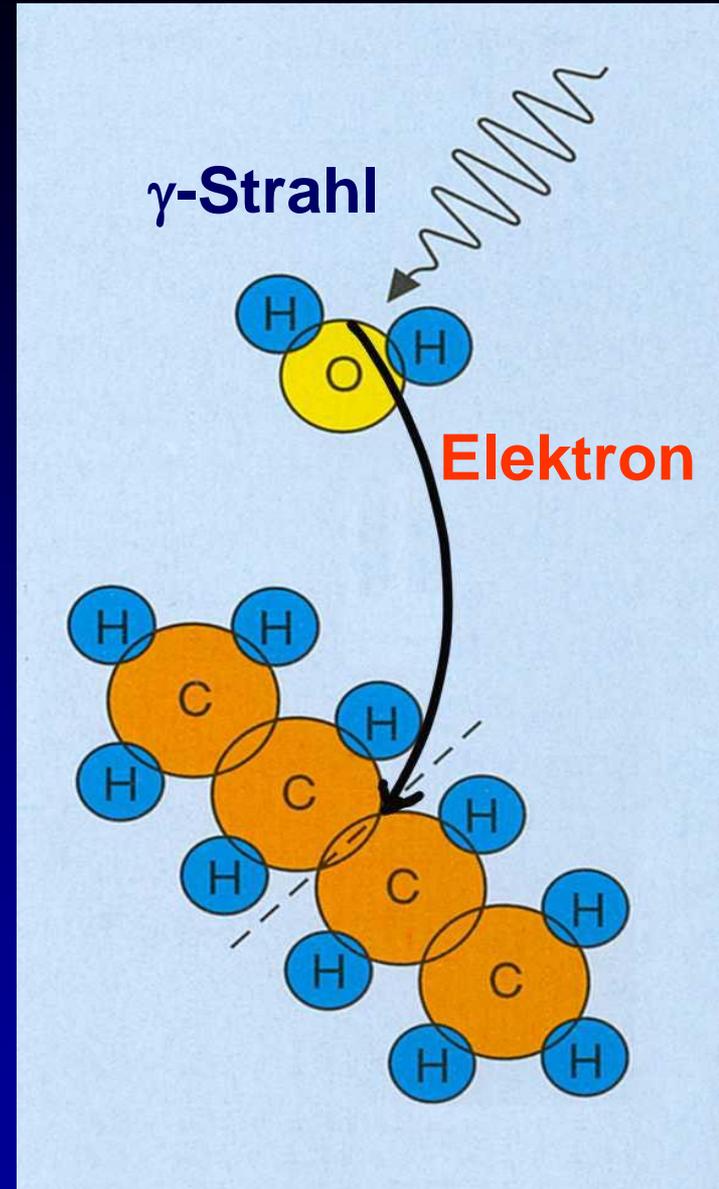
physikalische Primärreaktion:

Ionisation

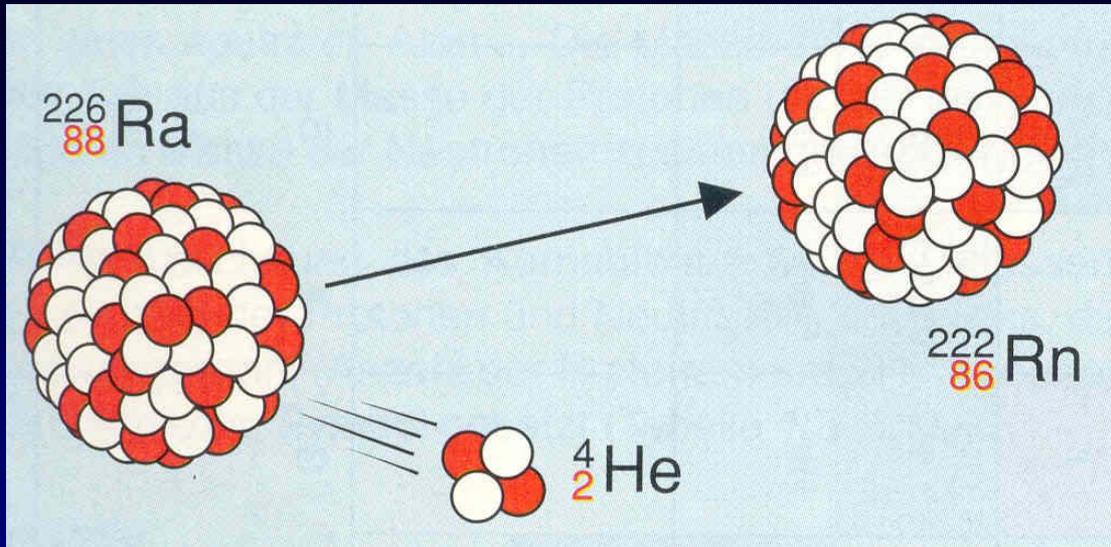
→ geladenen Teilchen (Ionen),
freie Radikale, Molekülbruch-
stücke,

biologische Sekundärreaktion:

→ Änderung von Aufbau der Mo-
lekülverbände und Strukturen

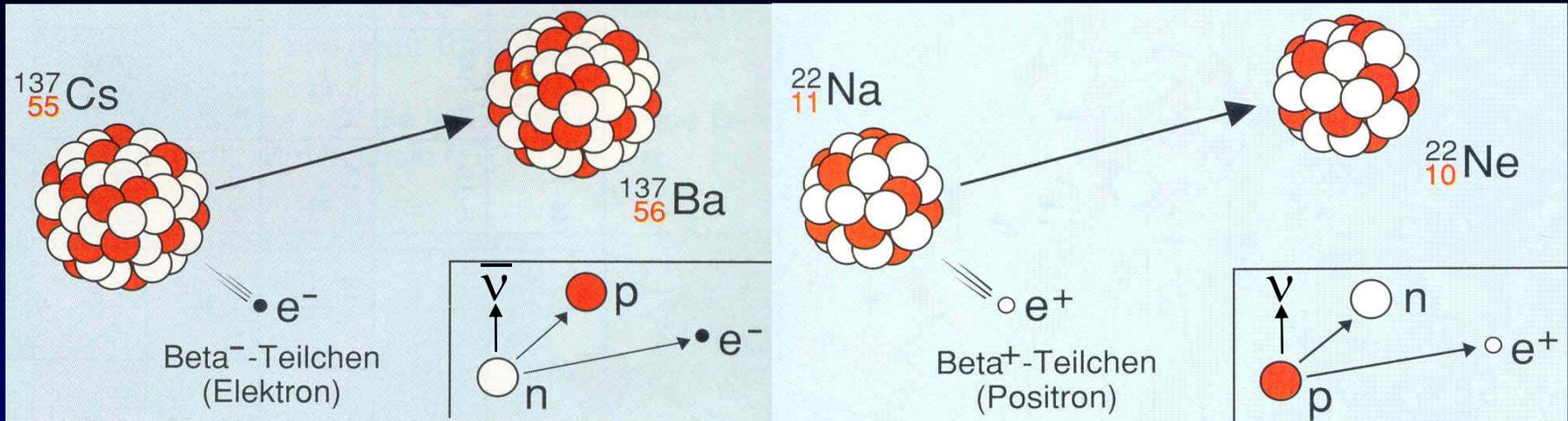


Alpha-Strahlung

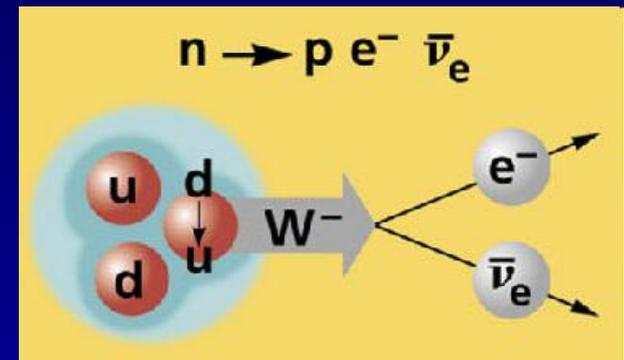


- besteht aus Heliumkernen (2 p und 2n)
- zweifach positiv geladen
- hohe Masse (relativ zu β -Strahlung, 4 x 2000 : 1)
- **kurze Reichweite im Gewebe < 100 μm**
- hohe Strahlenbelastung
- monoenergetisch (Linienspektrum), Energie: ca. 4 - 9 MeV
- es entsteht chemisch ein neues Element

Beta-Strahlung



- besteht aus Elektronen oder Positronen
- einfach negativ oder positiv geladen
- geringe Masse (relativ zu α -Strahlung)
- **Reichweite im Gewebe im mm-Bereich**
- niedrigere Strahlenbelastung im Vergleich zur α -Strahlung
- kontinuierliches Energiespektrum, da gleichzeitig ein (Anti)-Neutrino ($\bar{\nu}$, ν) abgestrahlt wird mit definierter Maximalenergie E_{max} : ca. 1 - 10 MeV
- es entsteht chemisch ein neues Element



Ionenbildung entlang der Wegstrecke für α - und β -Strahlung in komprimierter Darstellung

α -Strahlung (1 MeV):

400 Ionenpaare / μm , Abstand 2,5 nm (Periodizität der Doppelhelix)

Reichweite 23 μm (Zellgröße)

β -Strahlung (0,6 MeV):

9 Ionenpaare / μm , Abstand 0,1 μm

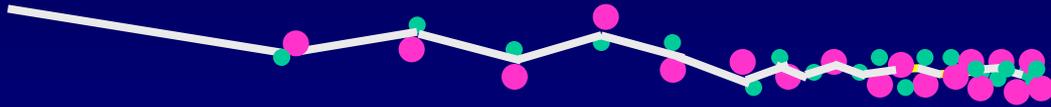
Reichweite 2,1 mm

Ionenbildung entlang der Wegstrecke für α - und β -Strahlung in komprimierter Darstellung

α -Strahlung (1 MeV):

400 Ionenpaare / μm , Abstand 2,5 nm (Periodizität der Doppelhelix)

Reichweite 23 μm (Zellgröße)



β -Strahlung (0,6 MeV):

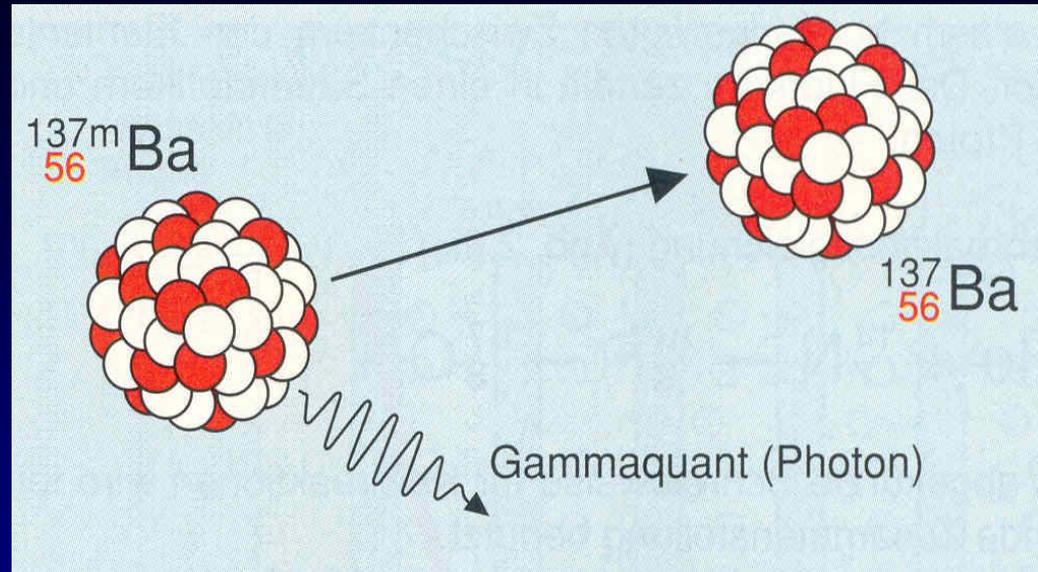
9 Ionenpaare / μm , Abstand 0,1 μm

Reichweite 2,1 mm



Gamma-Strahlung

- besteht aus elektromagnetischen Wellen (γ -Quanten, Photonen)
- ungeladen
- (keine) Masse
- Emission aus Atomkern häufig unter α - und β -Zerfall, wenn Kern überschüssige Energie besitzt



- Reichweite energieabhängig, kann Gewebe vollständig durchdringen
- Strahlenbelastung energieabhängig, biologische Wirksamkeit wie bei β -Strahlung
- diskretes Energiespektrum (häufig in Begleitung von α - und β -Zerfall), Energie bis zu 10^7 mal höher als Lichtquanten
- es entsteht chemisch **kein neues Element**

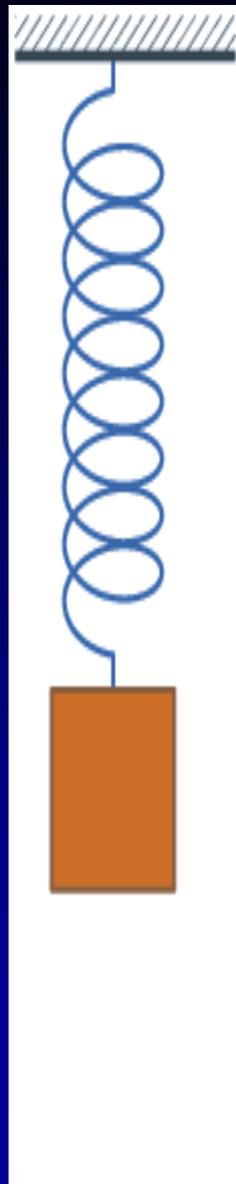
Wellen sind in Raum und Zeit periodische Vorgänge

Wellenlänge λ : Abstand zwischen zwei gleichen Zuständen

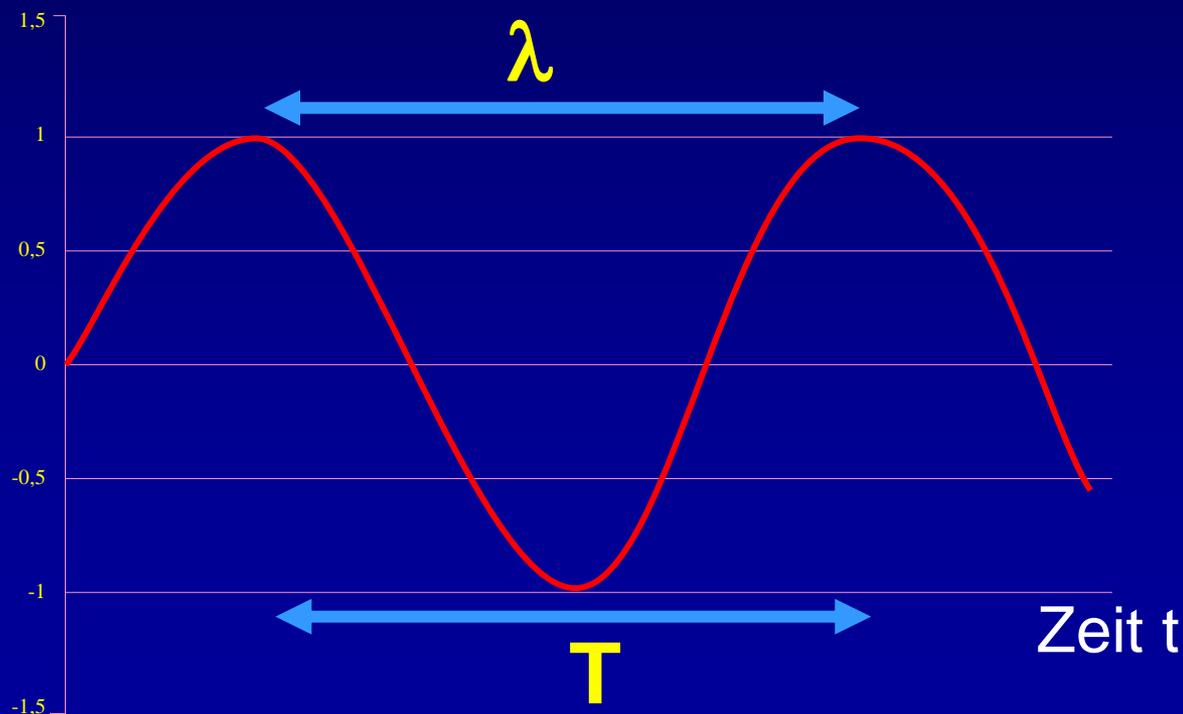
Frequenz ν : Anzahl der Schwingungen pro Sekunde $f = 1 / T$

$$c = \lambda \cdot \nu = 300\,000 \text{ km/s}$$

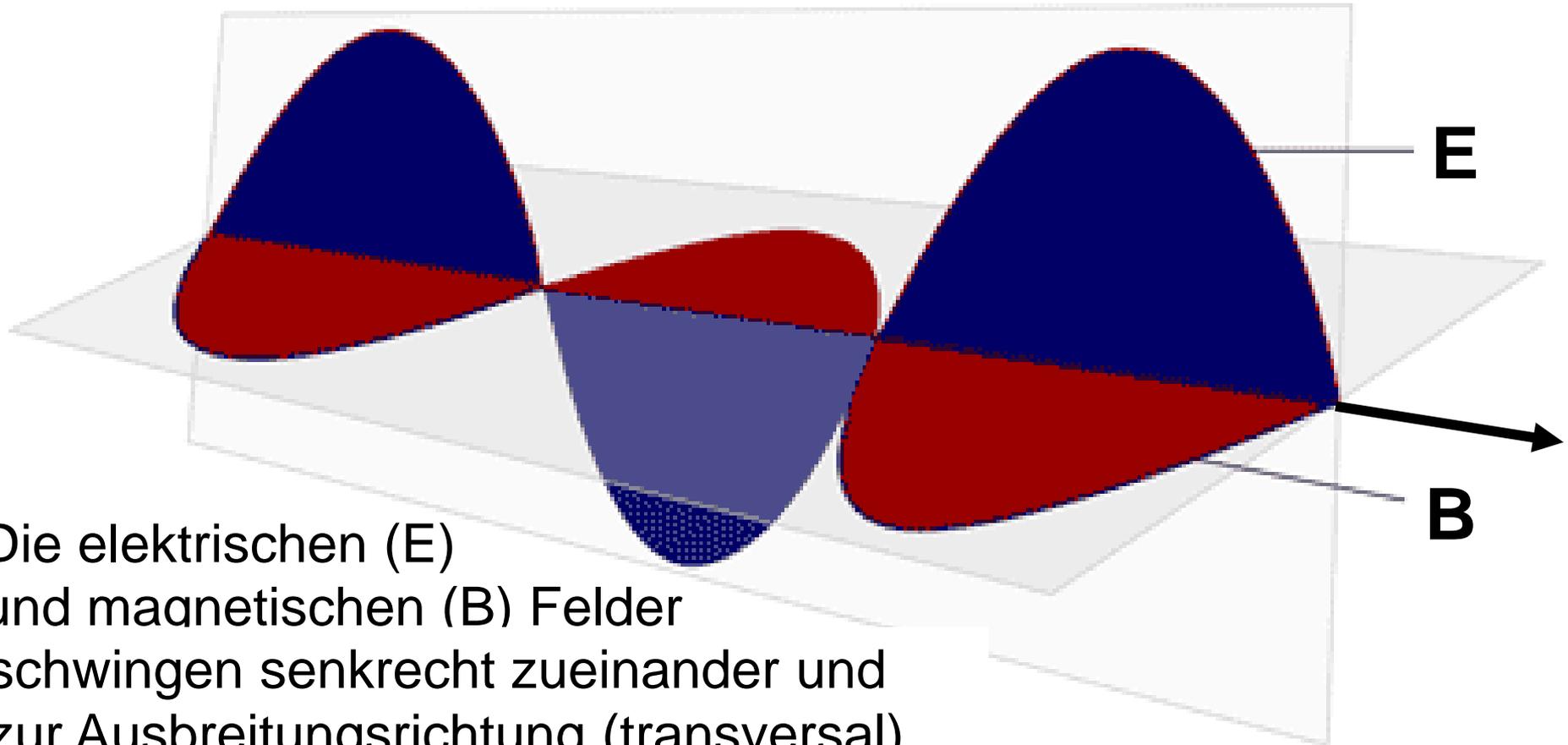
C = Ausbreitungsgeschwindigkeit für elektromagnetische Wellen im Vakuum



Auslenkung



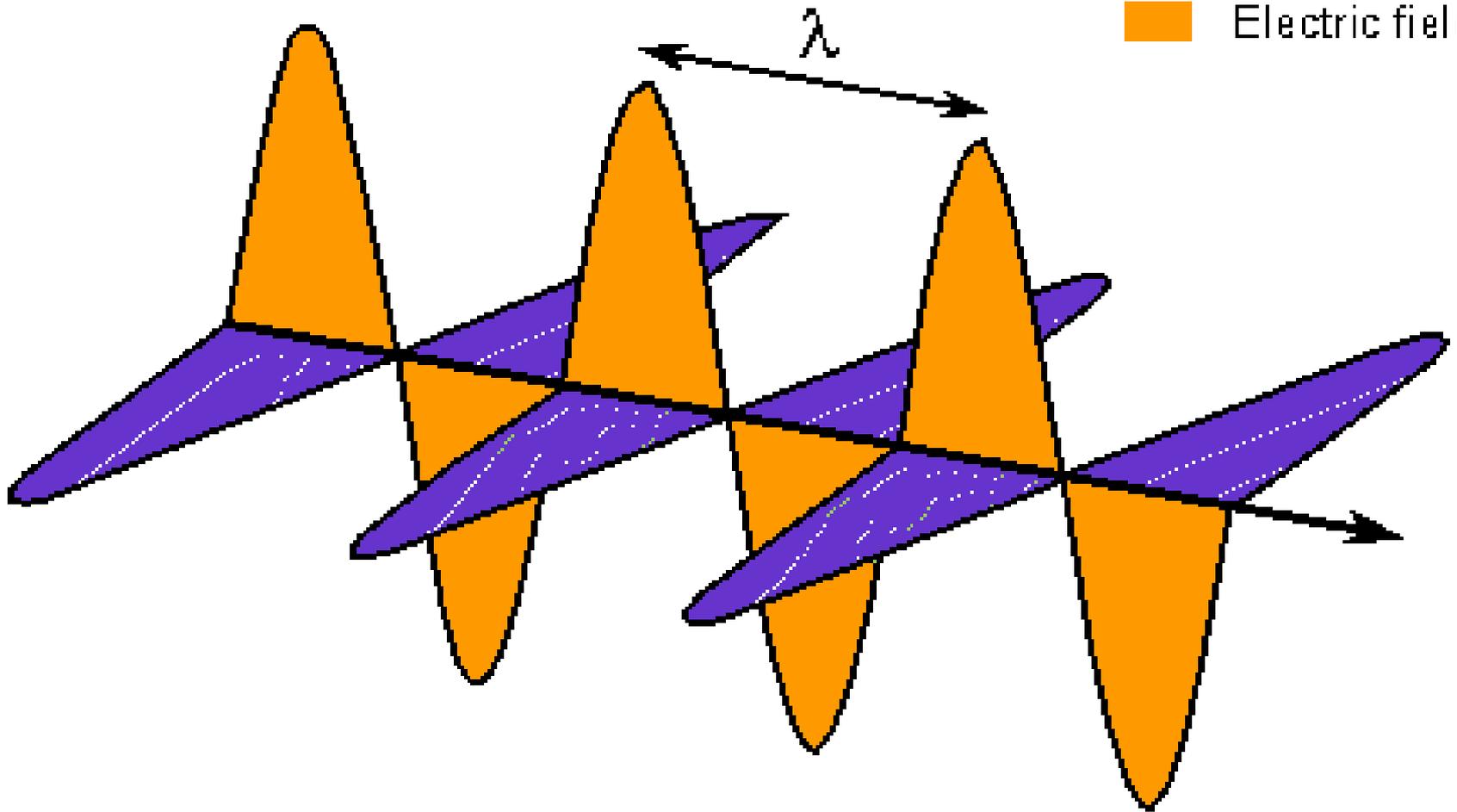
Elektromagnetische Welle



Die elektrischen (E) und magnetischen (B) Felder schwingen senkrecht zueinander und zur Ausbreitungsrichtung (transversal)

Electromagnetic Wave

-  Magnetic field
-  Electric field



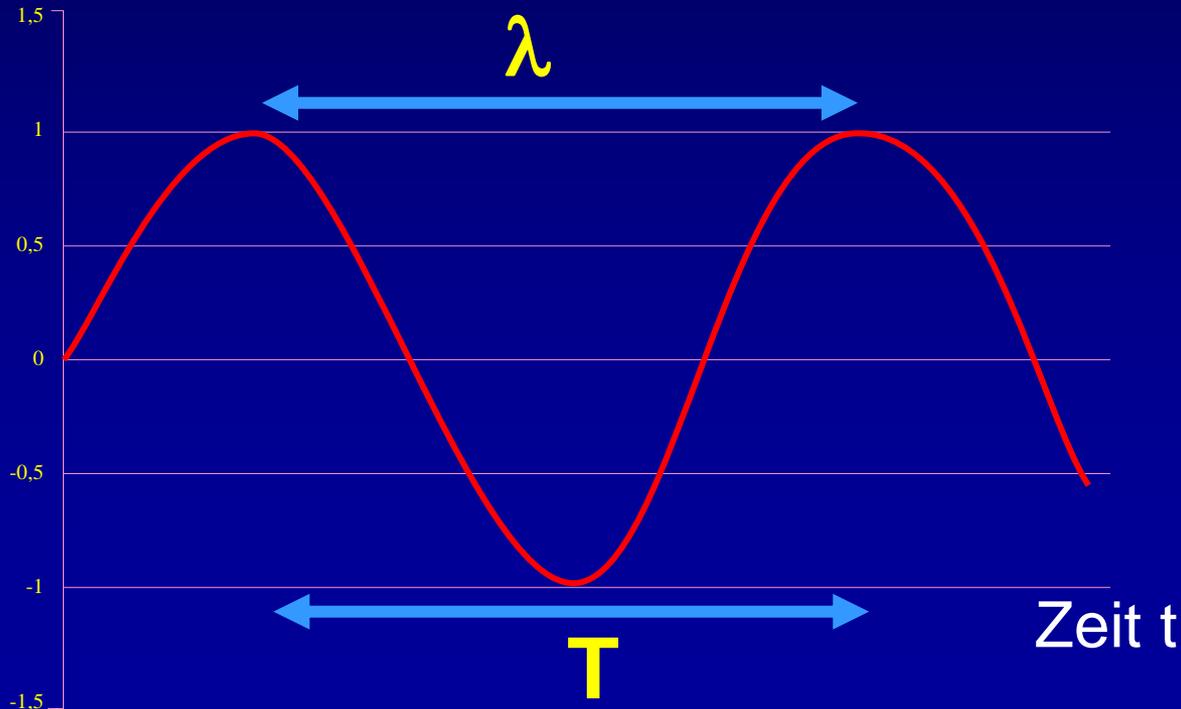
Energie E_ν einer elektromagnetischen Welle:

$$E_\nu = h \cdot \nu$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$c = \lambda \cdot \nu = 300\,000 \text{ km/s}$$

Auslenkung



Energieeinheit Elektronenvolt (eV)

1 eV ist die Bewegungsenergie, die ein einfach elektrisch geladenes Teilchen (Elektron) beim Durchlaufen einer elektrischen Spannung von 1 Volt im Vakuum aufnimmt.

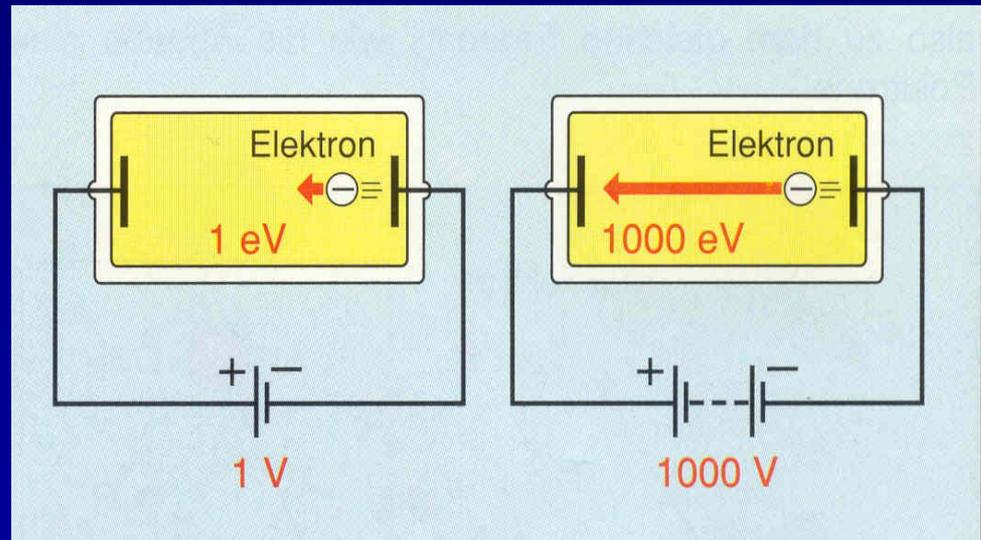
$E = e \cdot U$; $e = \text{Ladung}$, $U = \text{Spannung}$

$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$

keV Kiloelektronenvolt 10^3

MeV Mega 10^6

GeV Giga 10^9



Gamma-, Röntgenstrahlung

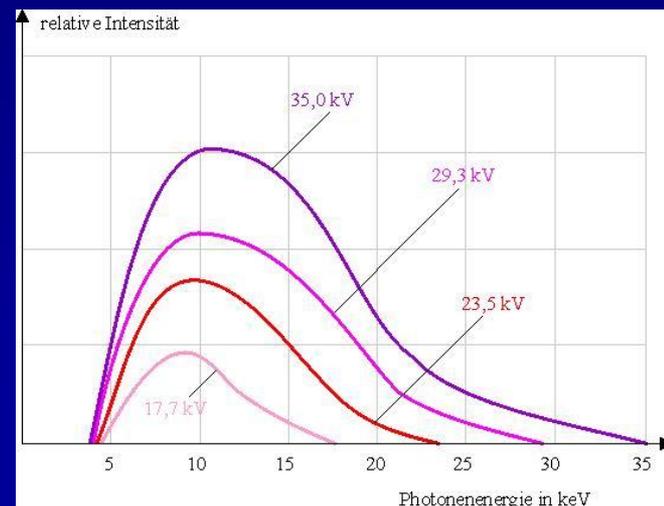
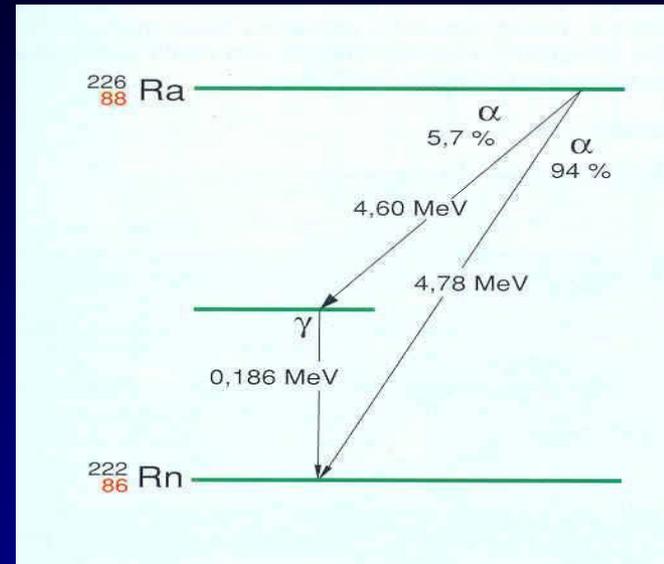
Ausbreitungsgeschwindigkeit $c \approx 300\,000\text{ km/s}$ im Vakuum,
unabhängig von Energie

Gammastrahlung:

diskrete Energielinien, Emission aus Atomkern in mehreren Stufen erfolgen, jede Stufe hat spezielle Energie

Röntgenstrahlung:

kontinuierliches Spektrum der Röntgen-Photonen



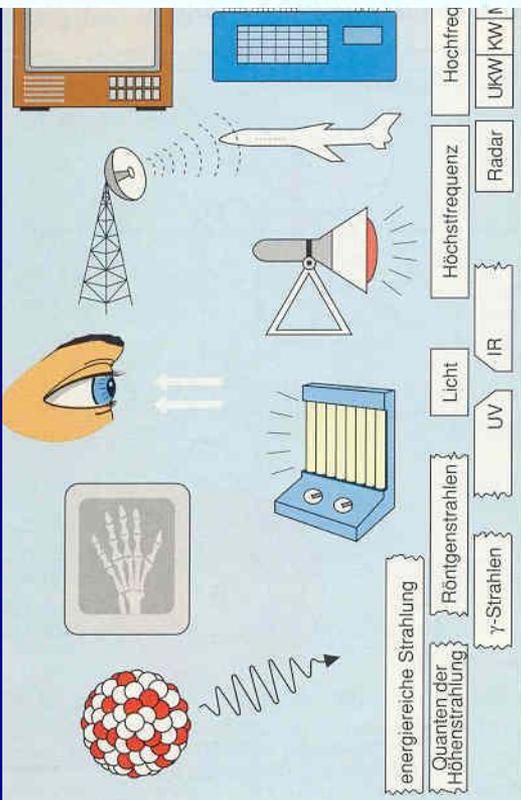
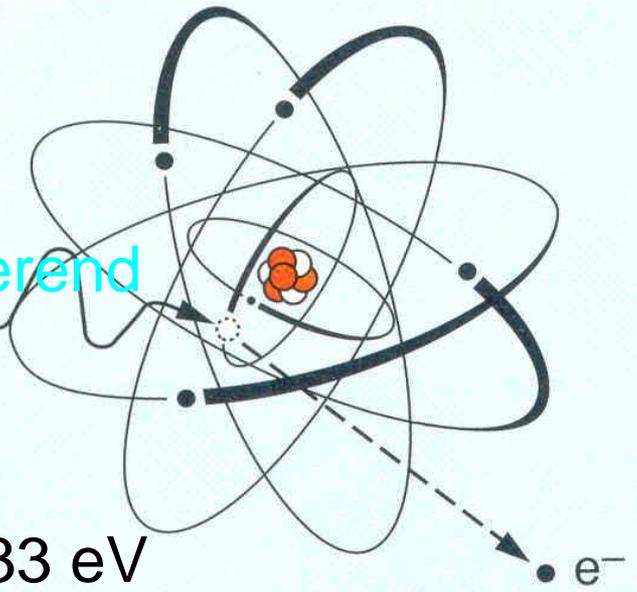
nicht ionisierend

einfallendes
Gammaquant

mindestens 33 eV



ionisierend



$$\nu \cdot \lambda = c$$

$$E = h \cdot \nu$$

	Frequenz in s ⁻¹	Wellenlänge in m	Energie	
			in eV	in J
Hz	3 · 10 ⁰	10 ⁸	1,24 · 10 ⁻¹⁴	1,99 · 10 ⁻³³
	3 · 10 ¹	10 ⁷	1,24 · 10 ⁻¹³	1,99 · 10 ⁻³²
	3 · 10 ²	10 ⁶	1,24 · 10 ⁻¹²	1,99 · 10 ⁻³¹
kHz	3 · 10 ³	10 ⁵	1,24 · 10 ⁻¹¹	1,99 · 10 ⁻³⁰
	3 · 10 ⁴	10 ⁴	1,24 · 10 ⁻¹⁰	1,99 · 10 ⁻²⁹
MHz	3 · 10 ⁵	10 ³	1,24 · 10 ⁻⁹	1,99 · 10 ⁻²⁸
	3 · 10 ⁶	10 ²	1,24 · 10 ⁻⁸	1,99 · 10 ⁻²⁷
GHz	3 · 10 ⁷	10	1,24 · 10 ⁻⁷	1,99 · 10 ⁻²⁶
	3 · 10 ⁸	1	1,24 · 10 ⁻⁶	1,99 · 10 ⁻²⁵
THz	3 · 10 ⁹	10 ⁻¹	1,24 · 10 ⁻⁵	1,99 · 10 ⁻²⁴
	3 · 10 ¹⁰	10 ⁻²	1,24 · 10 ⁻⁴	1,99 · 10 ⁻²³
	3 · 10 ¹¹	10 ⁻³	1,24 · 10 ⁻³	1,99 · 10 ⁻²²
	3 · 10 ¹²	10 ⁻⁴	1,24 · 10 ⁻²	1,99 · 10 ⁻²¹
	3 · 10 ¹³	10 ⁻⁵	1,24 · 10 ⁻¹	1,99 · 10 ⁻²⁰
	3 · 10 ¹⁴	10 ⁻⁶	1,24 · 10 ⁰	1,99 · 10 ⁻¹⁹
	3 · 10 ¹⁵	10 ⁻⁷	1,24 · 10 ¹	1,99 · 10 ⁻¹⁸
	3 · 10 ¹⁶	10 ⁻⁸	1,24 · 10 ²	1,99 · 10 ⁻¹⁷
	3 · 10 ¹⁷	10 ⁻⁹	1,24 · 10 ³	1,99 · 10 ⁻¹⁶
	3 · 10 ¹⁸	10 ⁻¹⁰	1,24 · 10 ⁴	1,99 · 10 ⁻¹⁵
	3 · 10 ¹⁹	10 ⁻¹¹	1,24 · 10 ⁵	1,99 · 10 ⁻¹⁴
	3 · 10 ²⁰	10 ⁻¹²	1,24 · 10 ⁶	1,99 · 10 ⁻¹³
	3 · 10 ²¹	10 ⁻¹³	1,24 · 10 ⁷	1,99 · 10 ⁻¹²
	3 · 10 ²²	10 ⁻¹⁴	1,24 · 10 ⁸	1,99 · 10 ⁻¹¹
	3 · 10 ²³	10 ⁻¹⁵	1,24 · 10 ⁹	1,99 · 10 ⁻¹⁰
	3 · 10 ²⁴	10 ⁻¹⁶	1,24 · 10 ¹⁰	1,99 · 10 ⁻⁹

- Gammastrahlung
- Röntgenstrahlung
- Vernichtungsstrahlung
- UV-Strahlung
- Höhenstrahlung
- Licht
- Radar
- Infrarotstrahlung
- UKW, MW usw.

sind Photonen mit unterschiedlicher Energie
aber gleicher Ausbreitungsgeschwindigkeit mit
 $c \approx 300\,000 \text{ km / s}$

2.

Dosisbegriffe

ICRP

International Commission on Radiological Protection

Internationale, private (nicht staatliche) Gesellschaft

formuliert **Empfehlungen**, an denen sich

Strahlenschutzrichtlinien orientieren

ICRU

International Commission on Radiation Units and Measurement

ICRU-Kugel: Phantom zur Nachbildung des Menschen hinsichtlich der Energieaufnahme durch ionisierende Strahlung, gewebeäquivalente Kugel von 30 cm Durchmesser, Dichte 1 g/cm^3 , Massenzusammensetzung von 76,2 % Sauerstoff, 11,1 % Kohlenstoff, 10,1 % Wasserstoff, 2,6 % Stickstoff, dient der Standardisierung von Dosisbegriffen.

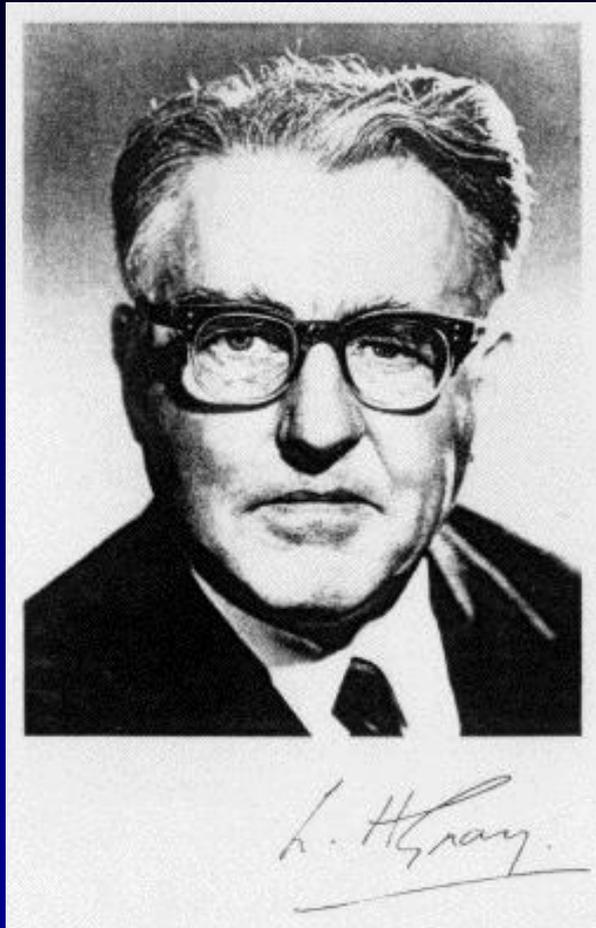
Ionendosis

Ionisation: Abtrennen von Elektronen aus der Atomhülle
es entstehen **geladene Teilchen (Ionen)**

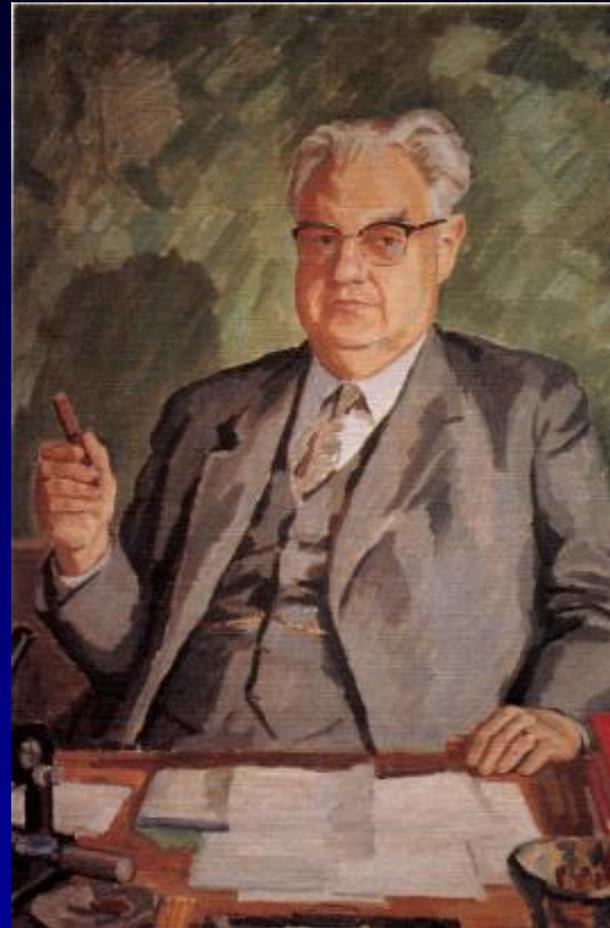
- Die bei Bestrahlung eines Luftvolumens mit ionisierender Strahlung erzeugte elektrische Ladung geteilt durch die Masse der bestrahlten Luft ($dm = \rho \cdot dV$) heißt

Ionendosis $J = dQ / dm$ Maßeinheit: C / kg (früher R)

- gibt die Menge der erzeugten Ladung (Ionenpaare) an, gilt nur für Luft und für γ -, Röntgenstrahlung. Für die Bildung eines Ionenpaares in Luft (1 C / kg) wird die Energie von 34 eV benötigt.



Louis Harold Gray
(1905 - 1965), „Vater
der Radiobiologie“



Rolf Sievert
(1896-1966), „Vater
des Strahlenschutzes“

Energiedosis

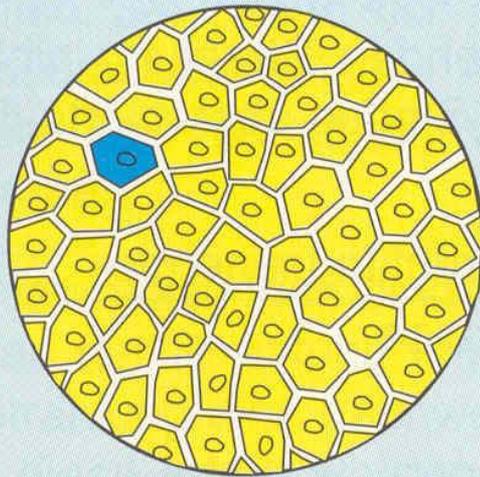
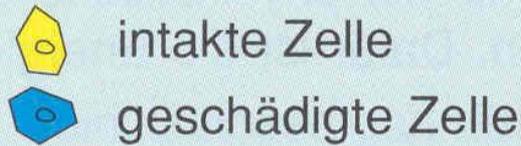


die von einem Körper absorbierte Energie
geteilt durch die bestrahlte Masse

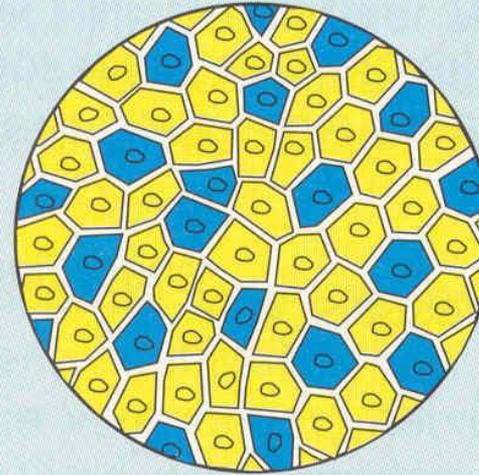
Energiedosis $D = E / m$

Maßeinheit: $J / kg = 1 \text{ Gy}$ (Gray), früher rad
ist unabhängig von der Strahlungsart und
Ionisationsdichte

1 Gy verursacht im Wasser eine Temperaturerhöhung um $0,24 \cdot 10^{-3} \text{ °C/kg}$,
jedoch 4.000 – 5.000 DNA-Schädigungen in jeder bestrahlten Zelle



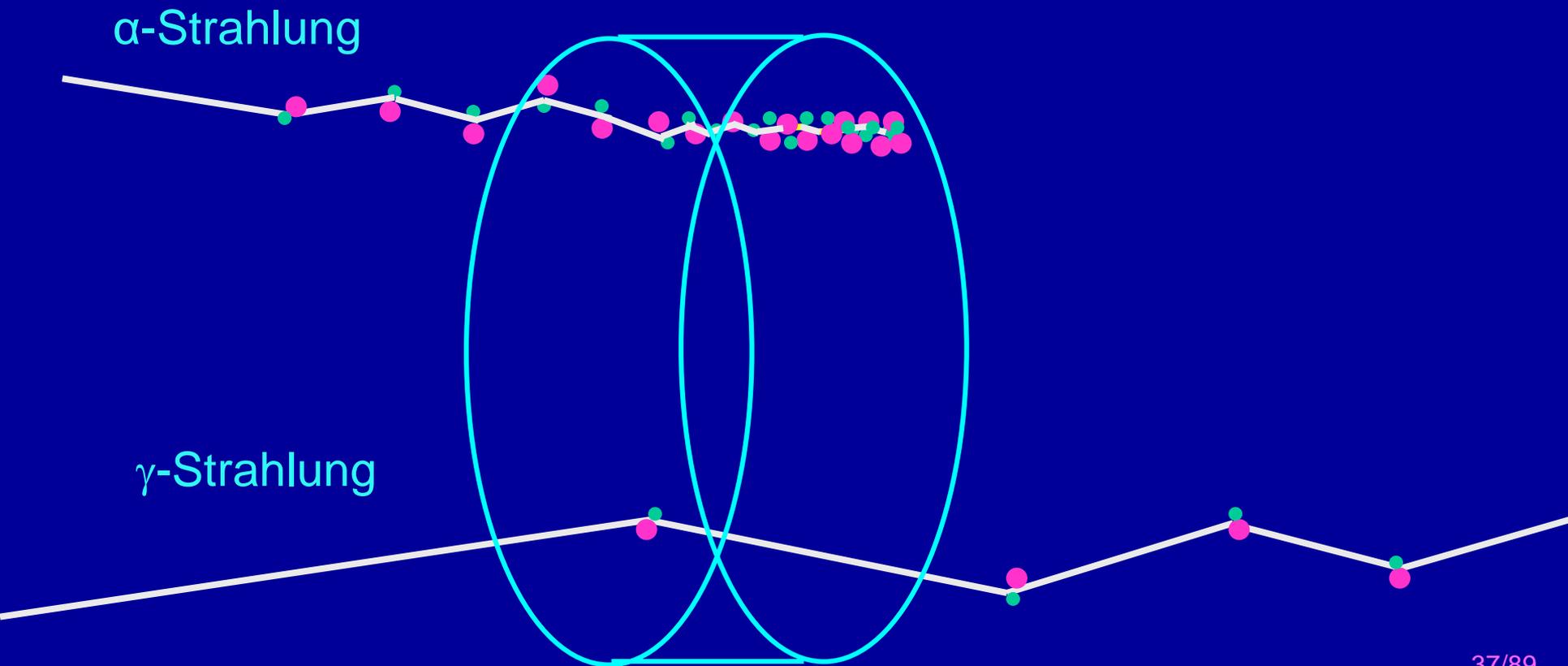
Bestrahlung mit
Röntgen- oder γ -
Strahlen, 1 Gy



Bestrahlung mit
 α -Strahlen, 1 Gy

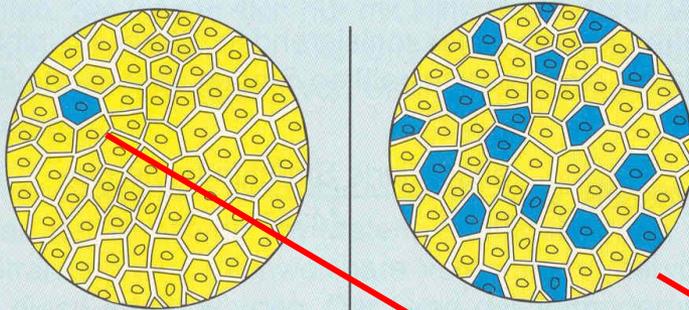
Verschiedene Strahlenarten bei gleicher Energie: unterschiedliche Effekte

Ionenbildung entlang der Wegstrecke für α - und β -Strahlung



Energiedosis $D = E / m$ [Gy]

intakte Zelle
geschädigte Zelle



Verschiedene Strahlenarten: unterschiedliche biologische Auswirkungen

$$w_r = 1$$

$$w_r = 20$$

Äquivalentdosis $H = D \cdot w_R$ Maßeinheit: Sv (Sievert)
„Gleichwertigkeitsdosis“ früher rem

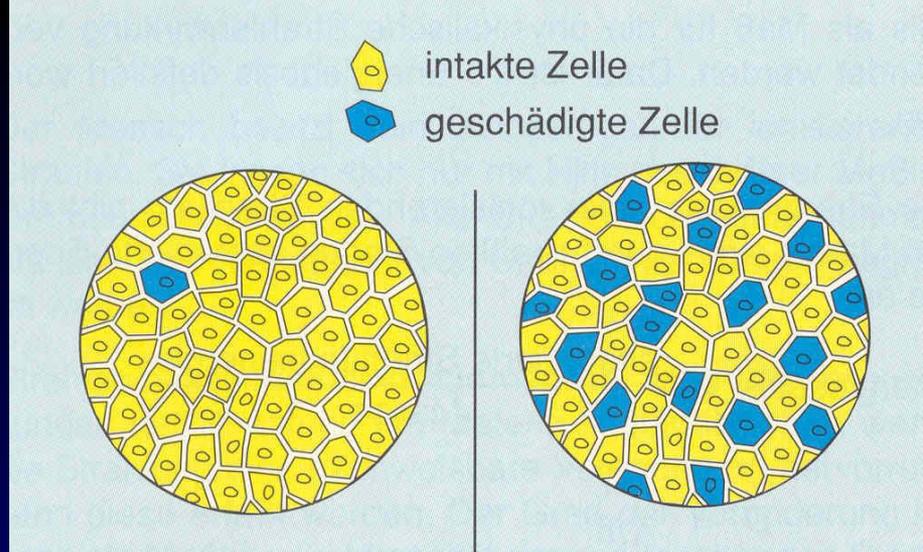
⇒ Strahlungs-Wichtungsfaktor w_R (weight radiation)

gleiche SI-Einheit wie Energiedosis (w_R dimensionslos)

Äquivalentdosis $H = D \cdot w_R$ [Sv]

Strahlenart	w_R
<u>Photonen</u> (alle Energien)	1
Elektronen, Myonen, alle Energien	1
Protonen (alle Energien)	5
Neutronen, energieabhängig	5 - 20
α -Strahlung, schwere Kerne	20
Fluoreszenzstrahlung	2 - 4

(w_R hieß früher auch q-Faktor)



Strahlenempfindlichkeit verschiedener Organe und Gewebe nicht einheitlich

Abschätzungen von eventuellen Strahlenspät Schäden müssen organbezogen erfolgen

→ das führt zur Einführung von ...

Energiedosis $D = E / m$ [Gray]

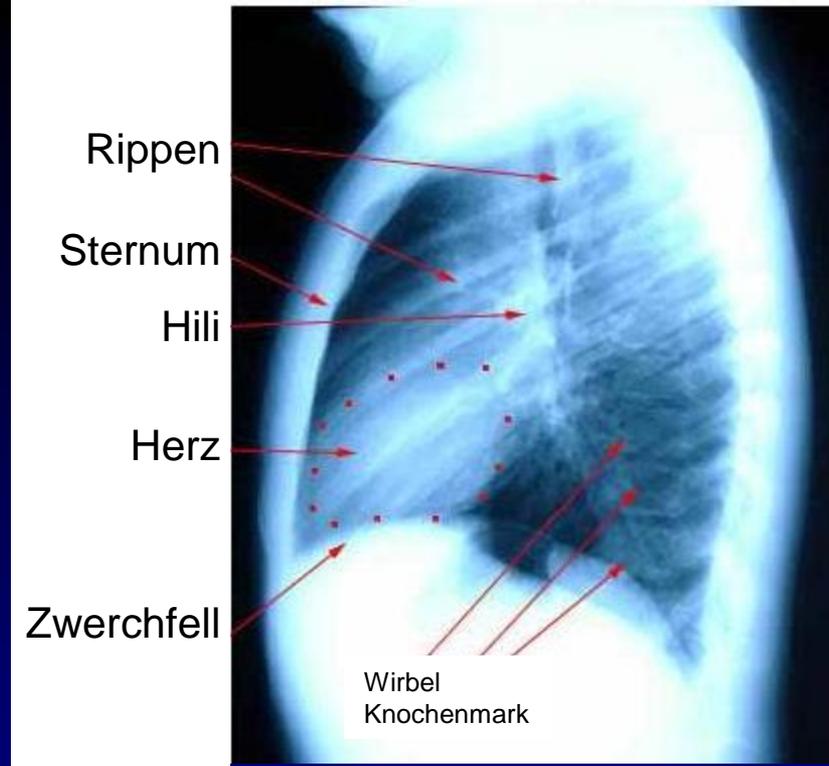
Äquivalentdosis $H = D \cdot w_T$ [Sievert]



Effektive Dosis H_E :

$$H_E = 0,02 \cdot H_{\text{Haut}} + 0,05 \cdot H_{\text{Rippen}} + 0,01 \cdot H_{\text{Knorpel}} + 0,05 \cdot H_{\text{Herz}} + 0,12 \cdot H_{\text{Knochenmark}}$$

$$H_E = \sum_{i=1}^n w_{T,i} \cdot H_{T,i} \text{ [Sievert]}$$



H_T = Organdosis für Organ T_i „Tissue“

$w_{T,i}$ = Wichtungsfaktor für Organ i

- $w_T = 0,2$ für Keimdrüsen
- 0,12 für rotes Knochenmark
- 0,05 für Leber, Niere, Schilddrüse
- 0,01 für Haut, Knochen

Effektive Dosis:

Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Körperschadens

Effektive Äquivalentdosis:

- wurde gezielt für Strahlenschutz entwickelt
- berücksichtigt keine hohen Strahlendosen (wie z. B. in Tumorthherapie)

Risiko für das Auftreten eines strahleninduzierten Krebs ist dosisabhängig:

Erhöhung der Wahrscheinlichkeit um 5 % (pro 1 Sv) für zusätzliche Krebsfälle nach Strahlenexposition

Risikokoeffizient ist ein Mittelwert über:

- Geschlecht
- Alter bei Bestrahlung
(deutlich höheres Risiko bei Exposition von Kindern)

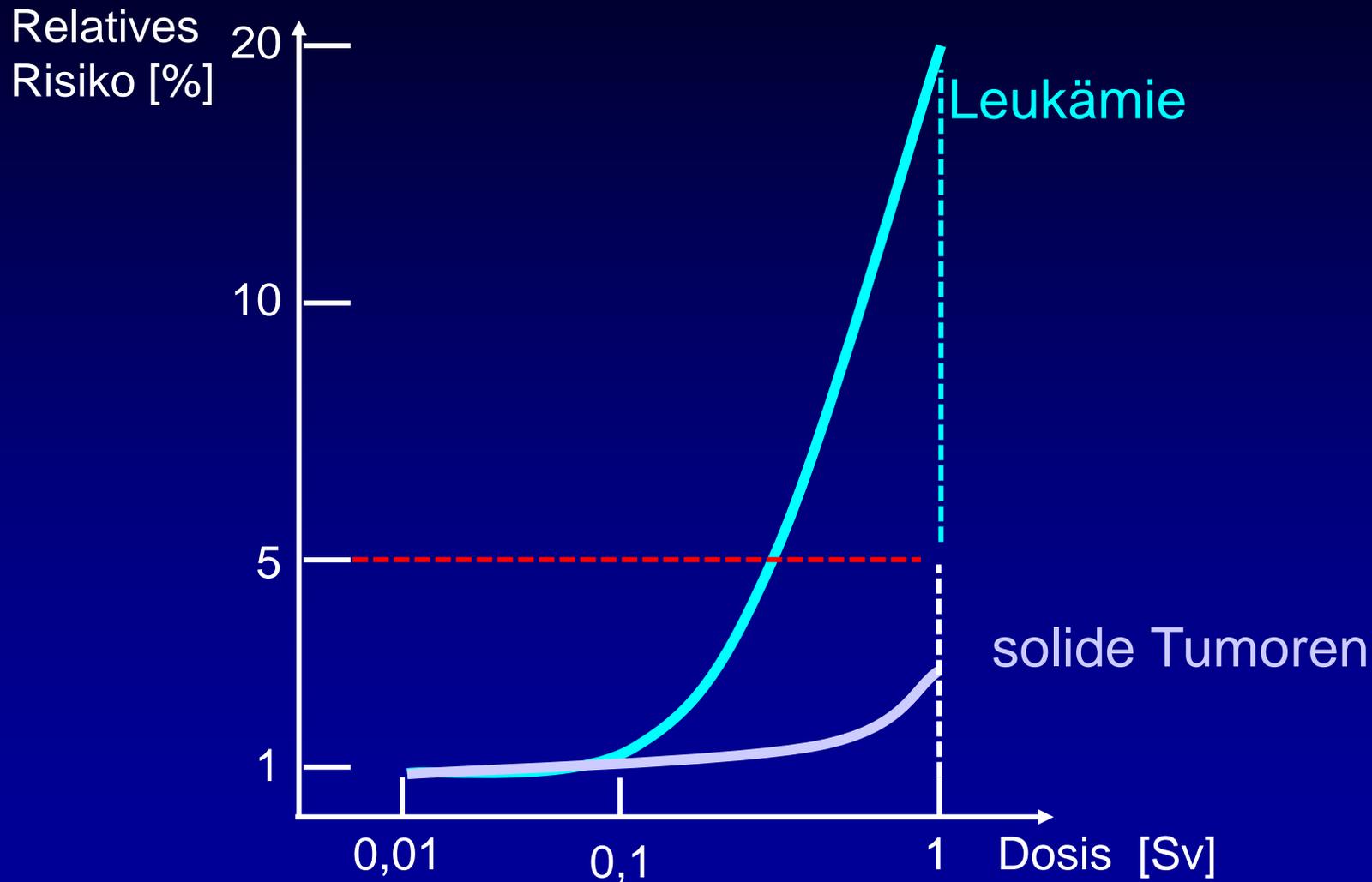
Wahrscheinlichkeit für Tod durch bösartige Neubildung:

5 % pro Sv oder

0,005 % pro mSv

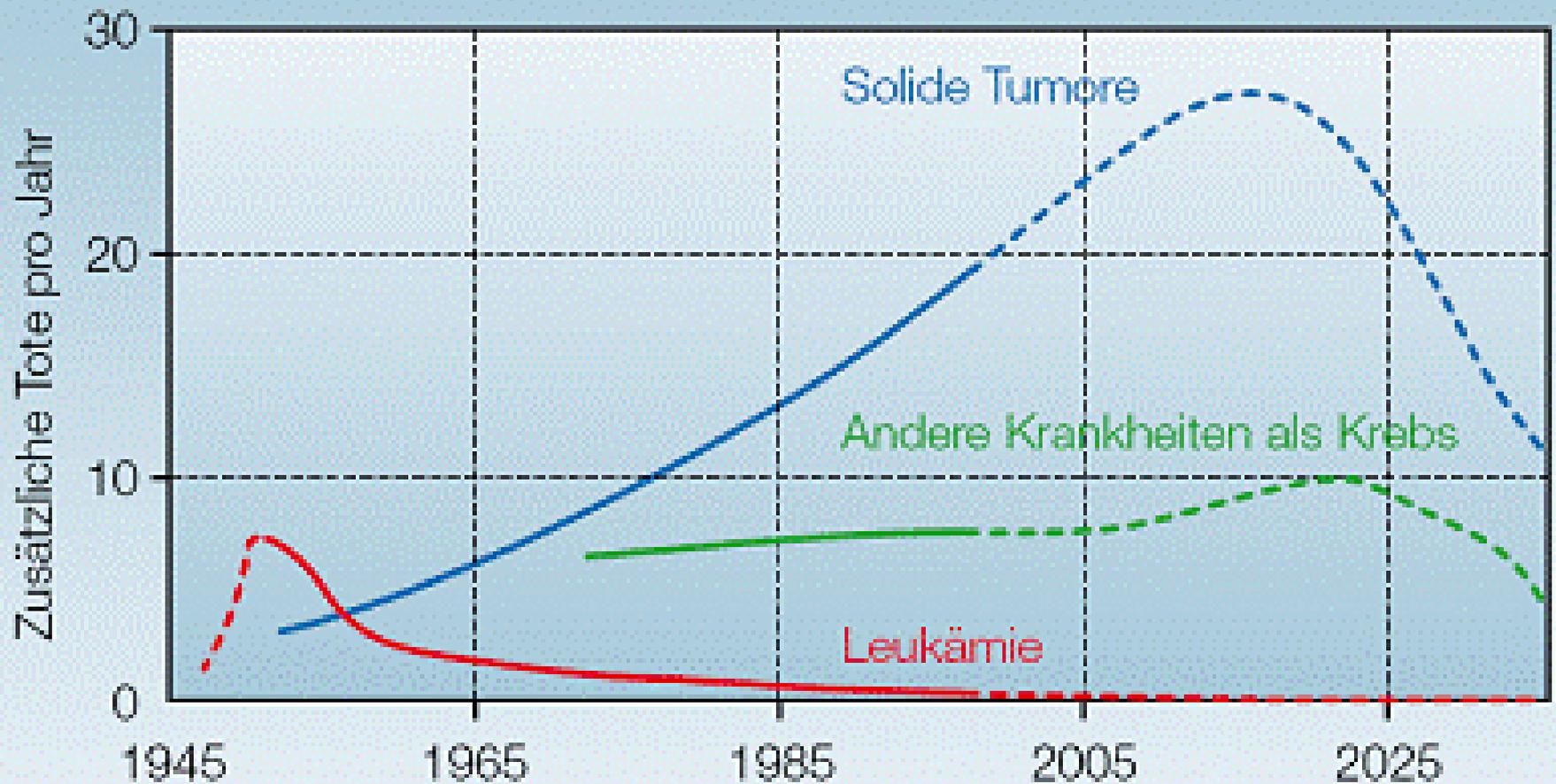
erhalten 100 000 Personen eine effektive Dosis von 1 mSv, so werden statistisch gesehen dadurch 5 Personen an Krebs erkranken und daran sterben

Erwartetes relatives Krebsrisiko in Abhängigkeit der Dosis



Strahlungsbedingte Todesfälle in Japan.

Anzahl strahlungsbedingter Todesfälle pro Jahr unter den etwa 120 000 untersuchten Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki



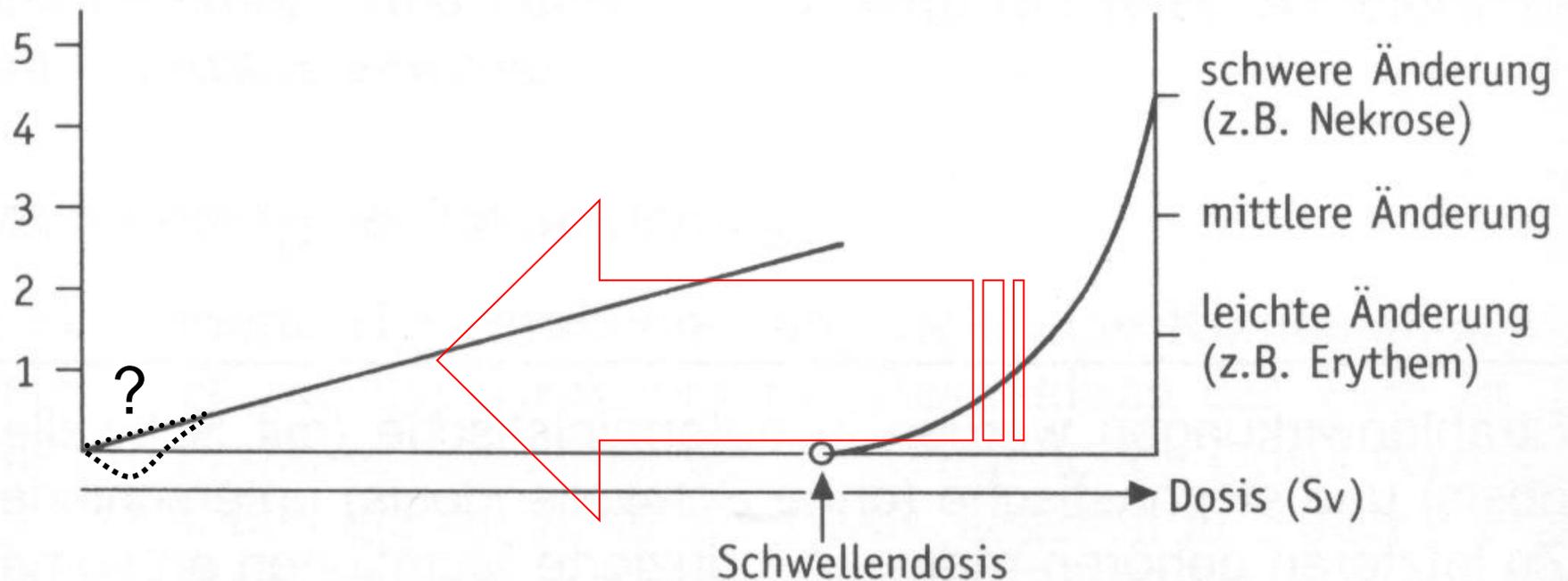
Dosis-Wirkung-Beziehungen

Stochastische Wirkung

Anzahl Krebsfälle
Mutationen

Deterministische Wirkung

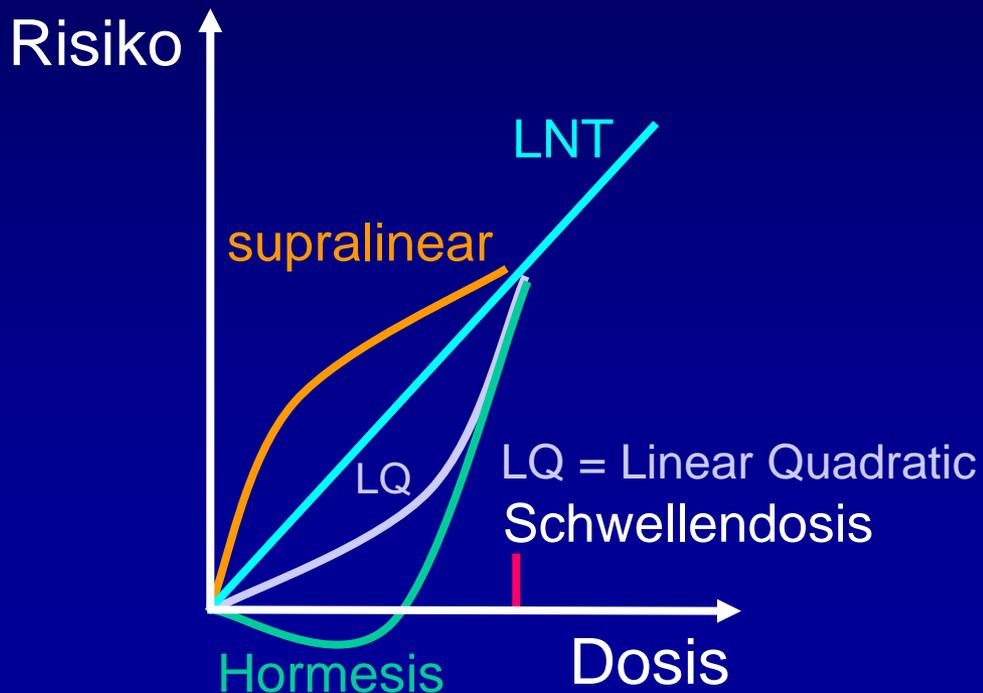
Pathologische Änderungen



aus: T. Herrmann, M. Baumann: Klinische Strahlenbiologie, Gustav Fischer 1997

Extrapolation zum Bereich kleiner Dosen

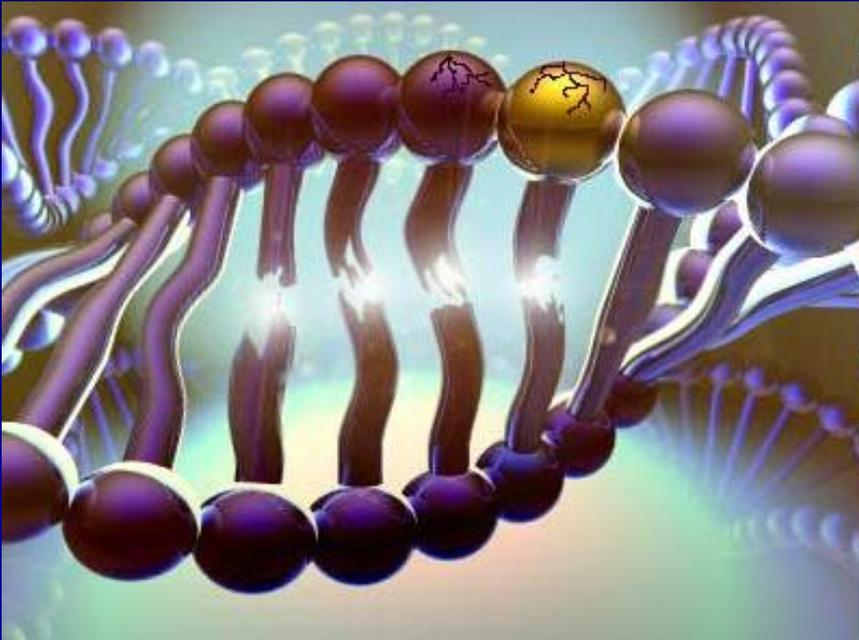
LNT-Hypothese (Linear No Threshold): Langzeitrisiko (Krebs) nimmt linear mit der Dosis ab, halbe Dosis gleich halbes Risiko, kein Schwellenwert (No Threshold). Auch die kleinste Dosis bedingt ein (kleinstes) Risiko.



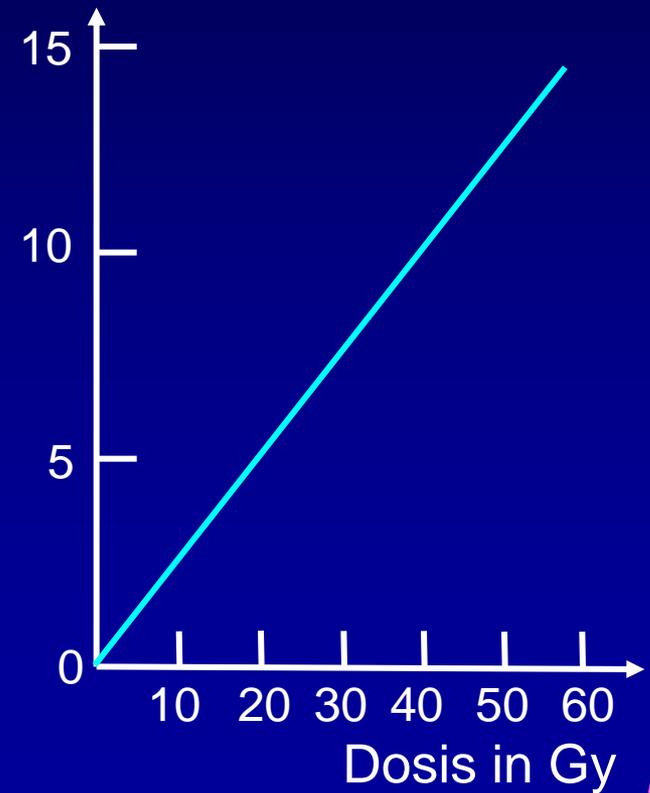
Nicht beweisbar bei Dosen mit einigen % der tödlichen Dosis. Die Wirkungen sind so klein und selten, dass sie von anderen Todesursachen) überdeckt werden.

Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von schweren Erbschäden:

1 % pro Sv oder 0,001 % pro mSv



Mutationshäufigkeit in %



Vergleich Energie-, Äquivalent- und effektive Dosis

Physik:

Energiedosis (absorbierte Energie pro Masse)

$$D = E_{\text{abs}} / m \quad [\text{Gy}]$$

Biologische Auswirkung:

Äquivalentdosis

$$H = D \cdot w_R \quad [\text{Sv}]$$

$$w_R = 1 \quad \text{für } \gamma\text{- und } \beta\text{-Strahlung} \\ = 20 \quad \text{für } \alpha\text{-Strahlung}$$

Spätschäden:

Effektive Äquivalentdosis (synonym: effektive Dosis)

$$H_E = \sum H_{T,i} \cdot w_{T,i} \quad [\text{Sv}]$$

H_T = Organdosis für Organ T_i „Tissue“

$w_{T,i}$ = Wichtungsfaktor für Organ i

ab 1. August 2011 neue Dosisgrößen

Personendosis

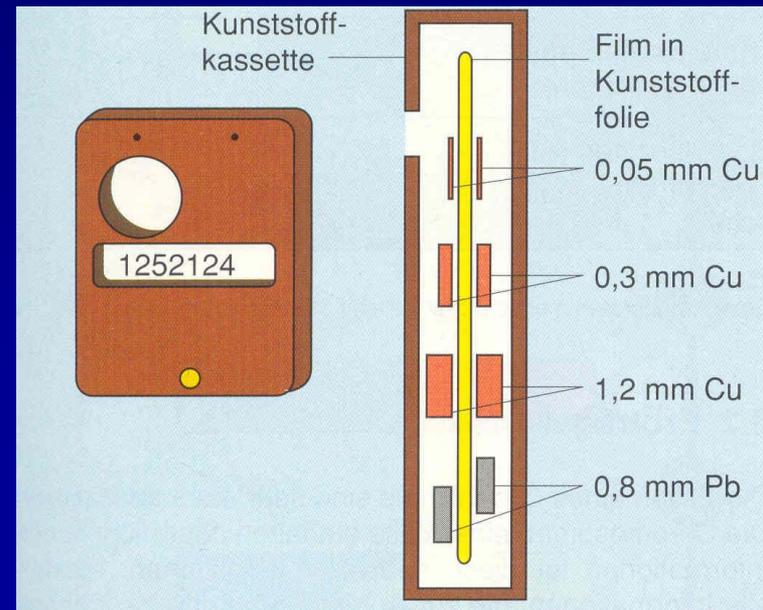
- Tiefen-Personendosis $H_p(10)$
- Oberflächen-Personendosis $H_p(0,07)$

Ortsdosis

- Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$
- Richtungs-Äquivalentdosis $H'(0,07, \vec{\Omega})$

Personendosis

- Maß für die tatsächlich während der Tätigkeit erfolgte Strahlenexposition
- Messung unmittelbar an strahlenexponierter Person
- Erfassung im tatsächlichen Strahlenfeld
- bei gleichem Strahlenfeld individuell verschieden aufgrund individueller Einflüsse des Körpers durch Absorption und Streuung



Personendosis

Tiefen-Personendosis $H_p(10)$

- bei durchdringender Strahlung (> 15 keV)
- Äquivalentdosis in 10 mm Tiefe unter der Tragestelle des Dosimeters
- Schätzwert für effektive Dosis

Oberflächen-Personendosis $H_p(0,07)$

- bei geringer Eindringtiefe
- Äquivalentdosis in 0,07 mm Tiefe unter der Tragestelle des Dosimeters
- Schätzwert für lokale Hautdosis

Körperdosis:

Sammelbegriff für Organdosis und effektive Dosis

Ortsdosis

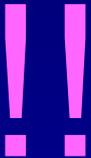
- dient zur konservativen Abschätzung der Körperdosis, wenn eine Person sich an dem Messort aufhalten würde
- Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$
- Richtungs-Äquivalentdosis $H'(0,07, \vec{\Omega})$



Ortsdosis

Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$

- Äquivalentdosis an einem bestimmten Ort, die in 10 mm Tiefe einer ICRU-Kugel erzeugt würde bei durchdringender Strahlung
- Unabhängig von Orientierung des einfallenden Strahlung (*)
- Unterschied zur einfachen Äquivalentdosis: geometrische Anordnung, Streustrahlung Kalibriervorschrift, kann bis zu 50% differieren
- liefert konservative Abschätzung der effektiven Dosis



Ortsdosis

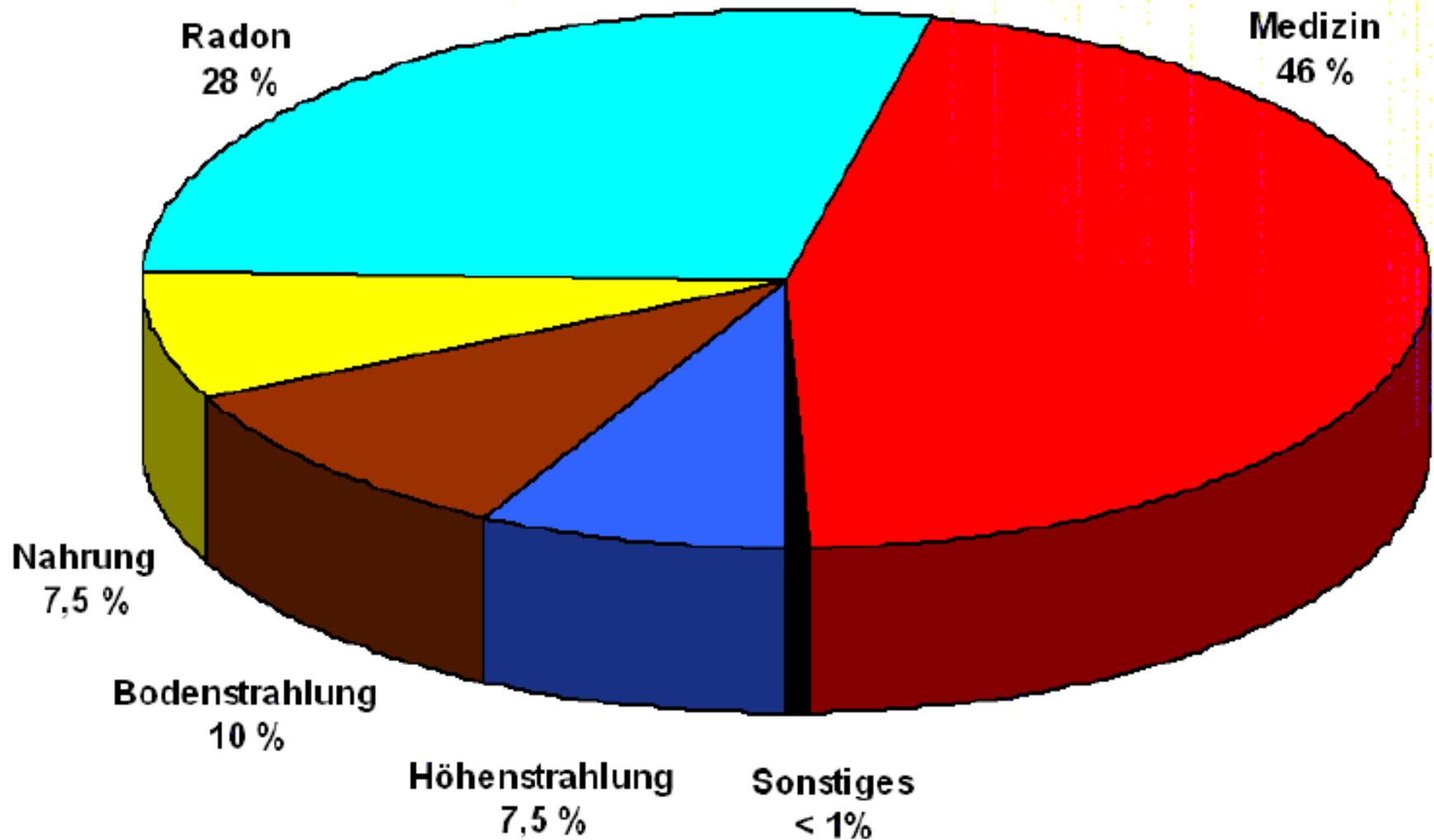
Richtungs-Äquivalentdosis $H'(0,07, \vec{\Omega})$

- Äquivalentdosis an einem bestimmten Ort, die in 0,07 mm Tiefe unter bestimmten Einfallswinkel einer ICRU-Kugel erzeugt würde bei geringer Eindringtiefe
- abhängig von Orientierung des einfallenden Strahlung ($\vec{\Omega}$)
- liefert Schätzwert für die lokale Hautdosis

3.

Natürliche und zivilisatorische Strahlenexposition

Strahlenexposition



Dosisübersicht Strahlenbelastung

Natürliche Quellen

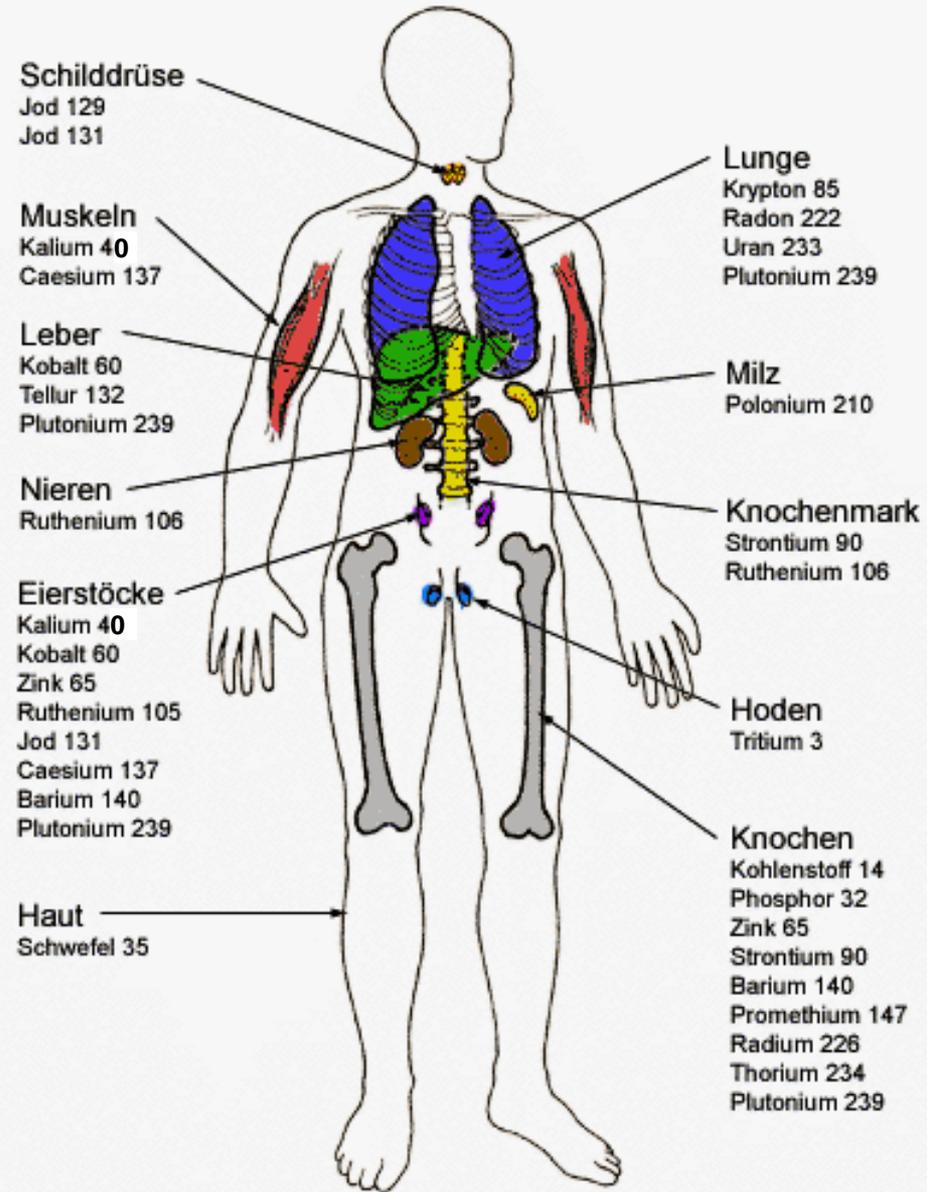
äußere Strahlung	mSv/a	
kosmisch	0,3	} 1/3
terrestrisch	0,5	
innere Strahlung		
Inhalation (Radon)	1,3	} 2/3
Ingestion (Kalium)	0,3	
Summe	2,4 mSv/a	

Zivilisator. Quellen: 1,9 mSv/a

Insgesamt: ca. 4 mSv/a

Interne Strahlenexposition

Radionuklid [Bq]	Aktivität
K-40	4500
C-14	3800
Rb-87	650
Pb-210, Bi-210, Po-210	60
Rn-220 ...	30
H-3	25
Be-7	25
Rn-222 ...	15
sonstige	7
Summe	9112



Innere jährliche Strahlenexposition (ICRP 30)

Nuklid	Organ	Dosis [mSv]
K-40	Ganzkörper	0,17
C-14	Ganzkörper	0,015
U, Th, ...	Knochen, Niere	0,075
Rn,	Lunge	1,0
Summe		1,3 mSv

Effektive Dosis durch Höhenstrahlung auf ausgewählten Flugrouten

Abflug	Ankunft	Dosisbereich* [μSv]
Frankfurt	Gran Canaria	10 - 18
Frankfurt	Johannesburg	18 - 30
Frankfurt	New York	32 - 75
Frankfurt	Rio de Janeiro	17 - 28
Frankfurt	Rom	3 - 6
Frankfurt	San Francisco	45 - 110
Frankfurt	Singapur	28 - 50

*Die Schwankungsbreite geht hauptsächlich auf die Einflüsse von Sonnenzyklus und Flughöhe zurück.

Flugpersonal:

0,2 – 7 mSv/a, im Mittel 2,4 mSv/a (2004 bis 2009)

36.000 Beschäftigte (10 % aller beruflich strahlenschutzüberwachten Personen)

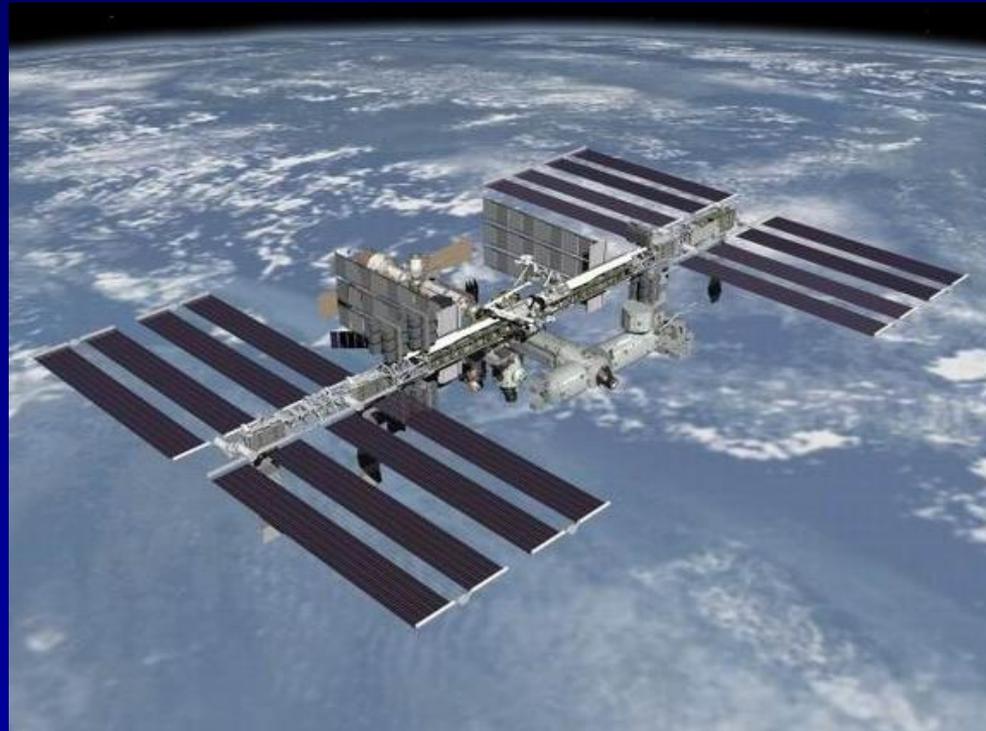
Strahlenexposition (Deutschland)

- Radium-226 (Knochendosis) im Trinkwasser: 0,25 mSv / Jahr
Tschernobyl-Niederschlag: 0,1 mSv / Jahr
Höhenstrahlung (2 Wochen Hochgebirge, 2000 m): 0,02 mSv
nat. Blei-210, **Polonium-210** (Tabakrauch):
1 Schachtel pro Tag: 9 mSv / Jahr, max. Lungendosis: 100 mSv / Jahr

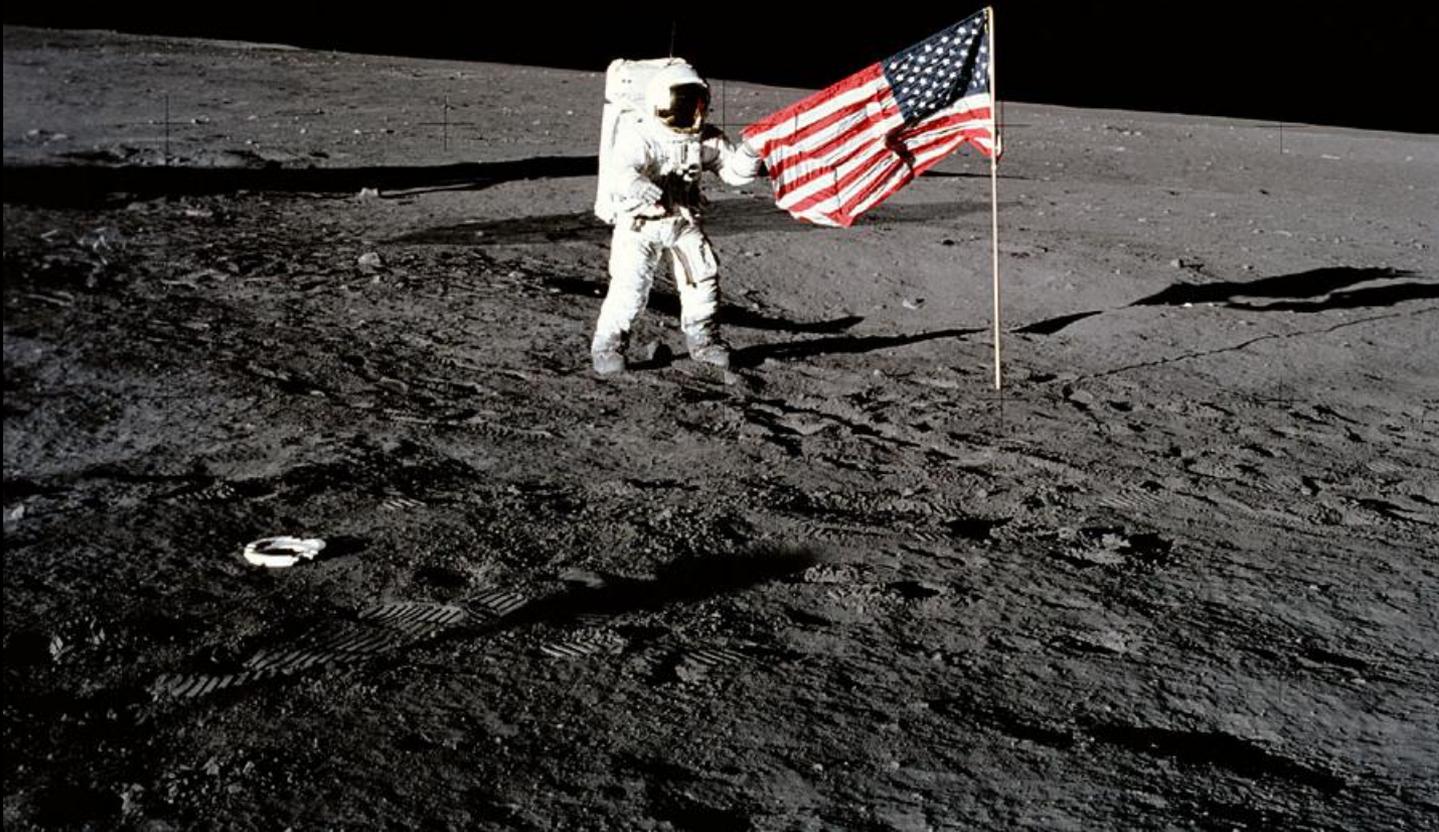


Höhe über dem Erdboden	Effektive Dosis im Jahr
300 km außerhalb des Space Shuttle)	400 - 500 mSv (bei ruhiger Sonne)
300 km innerhalb des Space Shuttle)	100 - 200 mSv (bei ruhiger Sonne)
10 km (im Flugzeug)	30 mSv
3800 m	1,8 mSv
3000 m	1 mSv
2000 m	0,6 mSv kosmisch + ca. 1 mSv terrestrisch
0 m	0,3 mSv kosmisch + 0,5 – 1,5 mSv terrestrisch

Mission		Dauer [h]	eff. Dosis [mSv]
Erdumkreisung	Apollo VII	260	3,6
Erdumkreisung	Saljut 6/IV	4200	55
Erdumkreisung	ISS/innen	24	0,5
	ISS/außen	24	1,3



Mission		Dauer [h]	eff. Dosis [mSv]
Mondumkreisung	Apollo VIII	147	5,7
Mondlandung	Apollo XI	195	6,0
Mondlandung	Apollo XIV	209	15,0



Geschätzte Strahlenexposition im Weltall:

Aufenthaltort im All	Effektive Dosis im Jahr
Interstellar	300 - 700 mSv
interplanetar	ca. 200 mSv (bei ruhiger Sonne)
Mond	ca. 100 mSv (bei ruhiger Sonne)

Anwendung ionisierender Strahlen in der Medizin

ca. 1,7 Röntgenuntersuchungen pro Einwohner und Jahr

Radiologische Diagnostik und Therapie: 1,9 mSv/a

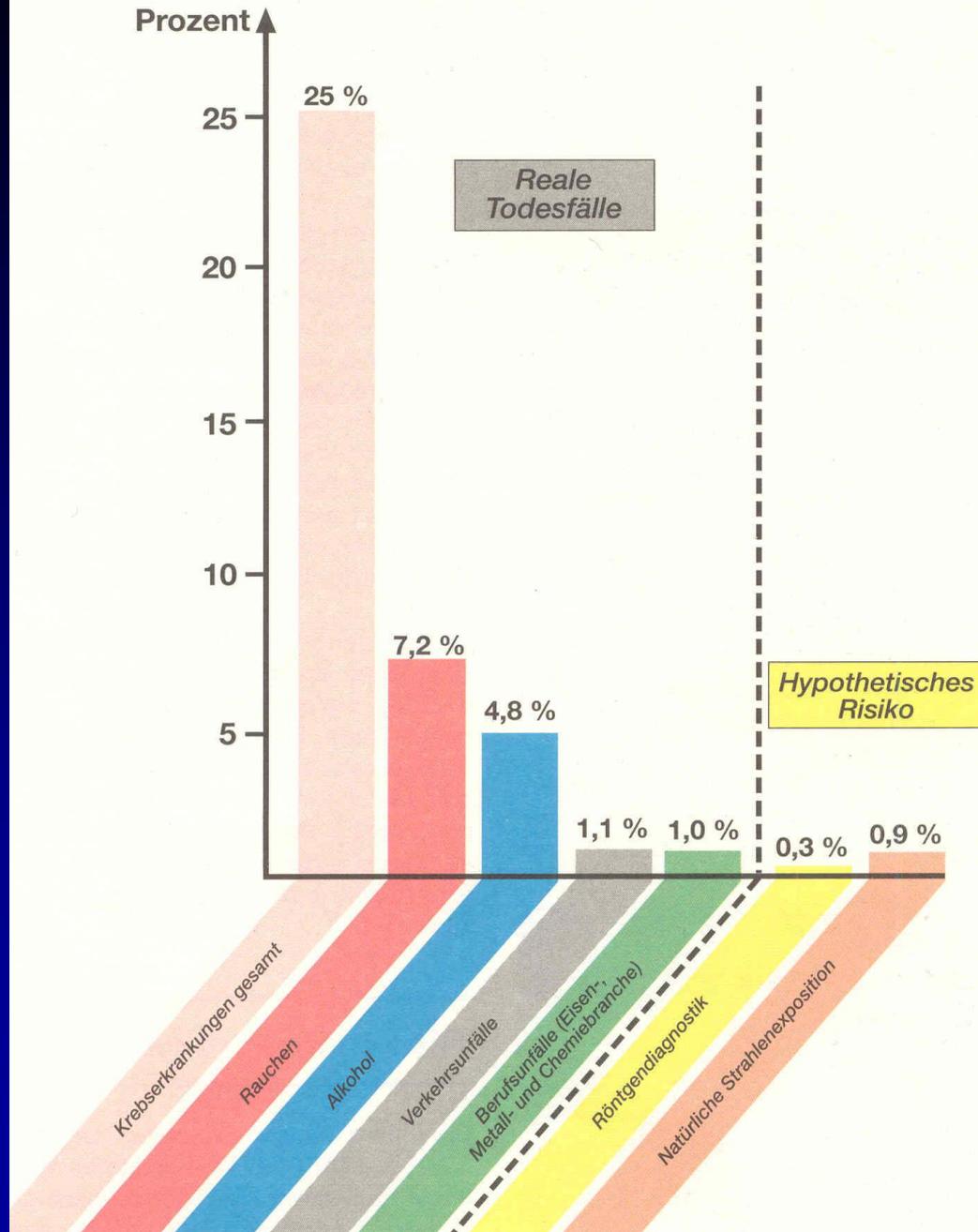
Strahlentherapie: 0,01 mSv (über Bevölkerung gemittelt)

Nuklearmedizin : 0,02 mSv/a

medizinisches Personal: 0,5 mSv/a

Untersuchung	Risiko	Vergleichbares Risiko
Röntgenuntersuchung - Hand - Zahn	1:10 Millionen	Innerhalb eines Monats vom Blitz erschlagen
- Ellenbogen - Knie	1:1 Million	Innerhalb eines Jahres vom Blitz erschlagen
- Lunge - Schädel	1:100 000	Innerhalb von 10 Jahren vom Blitz erschlagen
- Brustwirbelsäule - weibliche Brust	1:40 000	Innerhalb von 3 Monaten einen tödlichen Verkehrsunfall erleiden
Computertomographie - Kopf - Phlebografie - Urographie	1:10 000	Innerhalb eines Jahres einen tödlichen Verkehrsunfall erleiden
Magen (MDP) Dünndarm (Sellink) CT- Wirbelsäule	1:2000	Innerhalb von 5 Jahren einen tödlichen Verkehrsunfall erleiden
Dickdarm (Kolon KE) Angiographie CT- Thorax (Lunge)	1:1000	Innerhalb von 10 Jahren einen tödlichen Verkehrsunfall erleiden

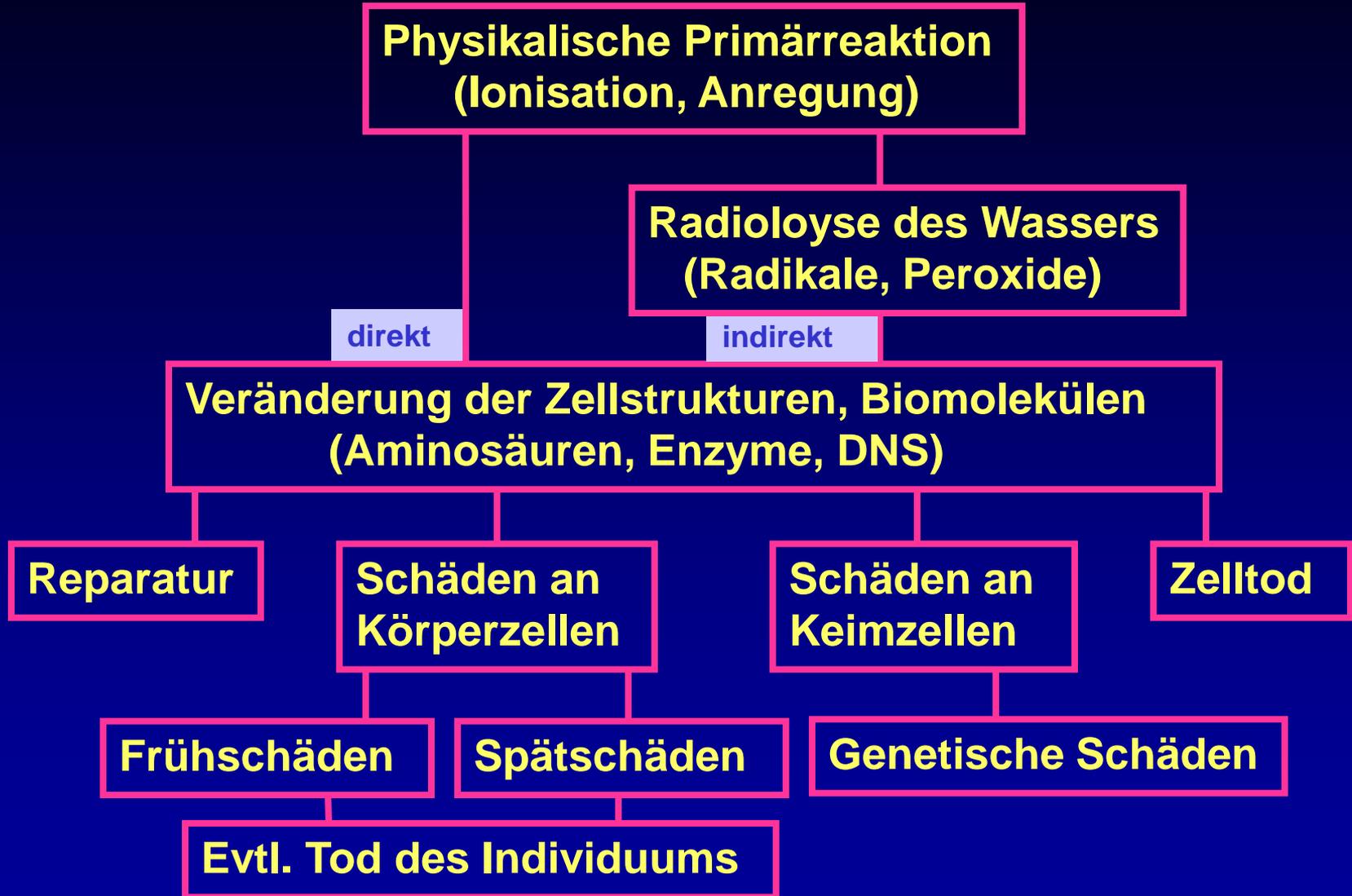
Wahrscheinlichkeit von Todesursachen im Vergleich



4.

Biologische Strahlenwirkung

Biologische Strahlenwirkung



Effekt der ionisierenden Strahlen:

Sekundärprozesse auf Molekularebene

(Bildung von **freien Radikalen**, Ionen) führen zu **Veränderungen von Biomolekülen**

Proteine (Denaturierung)

Zellstrukturen

DNA → Ausgleich durch Versuch von **Reparaturprozessen**

⇒ bleibende Änderungen des Chromosomenapparates, Zellwachstumsstörungen, Zelltod

⇒ **Funktionsfähigkeit der Organe gestört oder verloren**

Desoxyribonukleinsäure (DNA)

Zellkern (DNA) ist kritische subzelluläre Struktur („Target“) für Einwirkung von ionisierenden Strahlen

DNA-Moleküle enthalten

genetische Informationen für das Leben der Zelle, jede Zelle enthält

nur **einmal** genetische Informationen

⇒ Zerstörung der genetischen Information führt zu **letalen Folgen**



Programmierung durch DNA

- **Basenfolge** des einen Strangs legt anhand der Brücken die Basensequenz des anderen Strangs fest
- **Basensequenz** ist **Informationsträger** für Biosynthese der Zellproteine
- **3 Basen** (Triplett) kodieren in spezifischer Sequenz **eine Aminosäure** (Codon)
 - ⇒ bei 4 verschiedenen Basen $4^3 = 64$ Aminosäuren möglich (Spezies Mensch: nur 20 im Einsatz)

Gesamtlänge der menschlichen DNA: 92 cm

enthält 3×10^9 Basenpaare

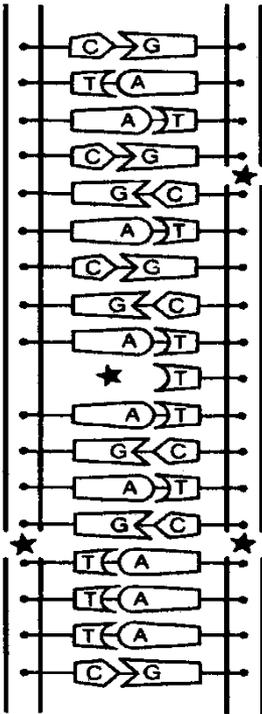
aufgeteilt auf **46 Chromosomen**

zur Kodierung eines Proteins ca. 1000 Paare notwendig

⇒ 10^5 verschiedene Proteine programmierbar

Schäden an der DNA durch Bestrahlung

Pro Gy und Zelle ca. 4000 - 5000 DNA-Schäden



Einzelstrangbrüche: ein Strang aufgebrochen
(ca. 1000 bei 1 Gy)

Basenschäden: Strukturveränderung einer Base
(ca. 3000 bei 1 Gy)

Doppelstrangbrüche: beide Stränge dicht beieinander
aufgebrochen (ca. 40 bei 1 Gy)

Kombinationen möglich

Folgen der DNA-Schäden

bleibende Veränderungen am Chromosomenapparat

⇒ veränderter Bauplan

⇒ veränderte Zellteilung bei

- Körperzellen:
Induktion von somatischen Mutationen
→ **gut- oder bösartige Neubildungen, Zelltod**
- Keimzellen:
Induktion von genetischen Mutationen → **Erbleiden**

DNA-Reparatur

- enzymatisch gesteuert
- Reparaturdauer wenige Stunden!
- wesentliche Mechanismen für Mutation, Zelltod durch nicht oder falsch reparierte **Doppelstrangbrüche**

Chromosomenaberration:

Verlust lebenswichtiger genetischer Informationen bei Mitose
⇒ **Zelltod**

Chromosomentranslokation:

Veränderte Position der Basen ⇒ **Entartung**

Strahlenempfindlichkeit

- hängt ab von
- **Zellteilungsaktivität**
 - Wachstumsgeschwindigkeit
 - Stoffwechselfunktion
 - Reifegrad

- hoch**
- Stammzellen (**Knochenmark**), **Lymphozyten**, **Erythroblasten**, **Myelozyten**
 - **Eizelle** (reifer Follikel), **Keimzellen**
 - Zellen der **Dünndarmkrypten**

- mittel:**
- Haut: Str. Germinativum, Haarbalgzellen
 - Gefäßendothel
 - Osteoblasten, Knorpelzellen

- gering:**
- Epithel der in-, exkretorischen Drüsen
 - Leberparenchymzellen, Tubulusepithelien
 - Gliazellen, Osteozyten, Muskelfaserzellen, Bindegewebe

Biologische Auswirkungen ionisierender Strahlen

Es gibt zwei grundsätzliche Wirkungen bzw. Effekte

- **deterministisch (nicht stochastisch)**

- **stochastisch**

Dosis-Wirkung-Beziehungen

deterministisch (nicht stochastisch)

- Effekt tritt oberhalb einer Schwellendosis auf
- **Ausmaß** des Schadens nimmt mit steigender **Dosis** zu.

z. B. **Sonnenbrand:**

Effekt: Erythem

Schwellendosis: Bestrahlungszeit

zunehmende Dosis: Blasenbildung

Tumorverkleinerung durch Bestrahlungstherapie

- Keine Zufallsabhängigkeit
- Beispiele: Hautrötung, -geschwür, Linsentrübung, Sterilisierung

Dosis-Wirkung-Beziehungen

stochastisch

- Auftreten des Schadens zufällig
- **keine Schwellendosis**, ein einziges γ -Quant kann theoretisch einen irreparablen Defekt an DNA erzeugen
- Schweregrad nicht von der Dosis abhängig
- Wahrscheinlichkeit des Auftretens nimmt mit steigender **Dosis** zu (nur bei Dosis „Null“ = keine Bestrahlung keine stochastische Strahlenwirkung)
- Beispiele: genetischer Defekt (Entwicklungsanomalien)
Mutations-, Krebsinduktion, Leukämien

Dosis-Wirkung-Beziehungen

deterministisch (nicht stochastisch)

- Effekt tritt oberhalb einer Schwellendosis auf
- **Ausmaß** des Schadens nimmt mit steigender **Dosis** zu.

z. B. **Sonnenbrand:**

Effekt: Erythem

Schwellendosis: Bestrahlungszeit

zunehmende Dosis: Blasenbildung

Tumorverkleinerung durch Bestrahlungstherapie

- Keine Zufallsabhängigkeit
- Beispiele: Hautrötung, Linsentrübung

Ziel des Strahlenschutzes:

- Vermeidung deterministischer Strahlenschäden
- Reduzierung stochastischer Effekte auf ein Minimum (akzeptables Maß)

Frühschäden:

- oberhalb **Schwellendosis 250 mSv**
 - Krankheitsbild **innerhalb der ersten 3 Monate** nach Strahlenexposition (dosisabhängig)
 - Auswirkung auf Organe, **Gewebe mit hoher Zellteilungsaktivität** (hämatopoetisches System, Schleimhaut, Keimdrüsen, Haarpapillen)
- ⇒ **verzögerte Zellneubildung**
- ⇒ **Abnahme** von
- **Zellzahl** (vorhandene Zellen sterben natürlicherweise)
 - **Zellteilungsfähigkeit** (Ausdifferenzierung der Stamm- zu Funktionszellen)

Spätschäden:

- **keine kritische Dosischwelle**
- **frühestens 3 Monate nach Strahlenexposition**
- **Auswirkungen:**
 - **bösartige Neubildungen** (Zusammenhang zwischen Malignomen und hohen Strahlendosen)
 - nicht bösartige Veränderungen
 - **genetische** Veränderungen

Dosisgrößen

Schwellendosis: (0,2 - 0,3 Sv)

erste klinisch faßbare Bestrahlungseffekte, **kurzzeitige** Blutbildveränderungen

Subletale Dosis: (1 Sv)

Vorübergehende Strahlenkrankheit (Unwohlsein, Leukozytenabfall, Haarausfall) mit meist **baldiger Erholung**

Mitteletale Dosis: (5 Sv)

Schwerste Strahlenkrankheit (Übelkeit, starker Leukozytenabfall, Blutungen) bei fehlender Therapie **50 % Todesfälle**

Letale Dosis: (7 Sv)

Tödliche Strahlenkrankheit (Übelkeit, Hämorrhagie, Fieber Kräfteverfall), **Mortalität 100 %**

LD 50/30:

Ganzkörperdosis, bei der 50 % der Individuen innerhalb von 30 Tagen an den Folgen der Strahlenexposition versterben

Lebewesen zeigen gegenüber ionisierenden Strahlen unterschiedliche Empfindlichkeit abhängig von Menge der DNA in Zellkernen

Dosisgrößen verschiedener Spezies:

Spezies	LD 50/30 [Sv]	Spezies	LD 50/30 [Sv]
Ziege	2,4	Goldfisch	8,5
Schwein	2,5	Forelle	15
Hund	2,6	E. Coli	40
Mensch	3,0 - 5,0	Fledermaus	50
Rhesusaffe	5,4	Schnecke	200
Maus	5,6	Wespe	1000
Kaninchen	7,0	Amöbe	1000
Ratte	8,0	Virus Tabak-Mos.	2000

