

Strahlungsdetektoren, Dosimeter Dosimetrie

Strahlenschutz

Strahlungsdetektor – Dosimeter

1.) Strahlungsdetektor:
Nachweis der Strahlungen

2.) Dosimeter:
Messung der Strahlendosis

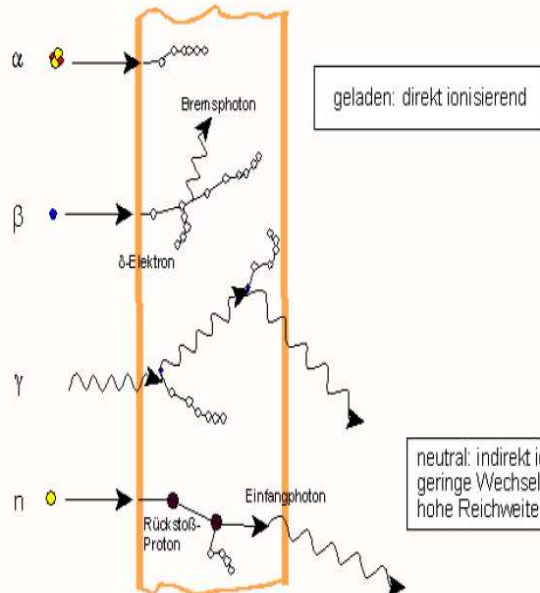
$$\text{Messsignal} = f(\text{Strahlendosis})$$



Wechselwirkung ionisierender Strahlung mit der Materie

Teilchenstrahlungen

α , β^- , β^+
 n



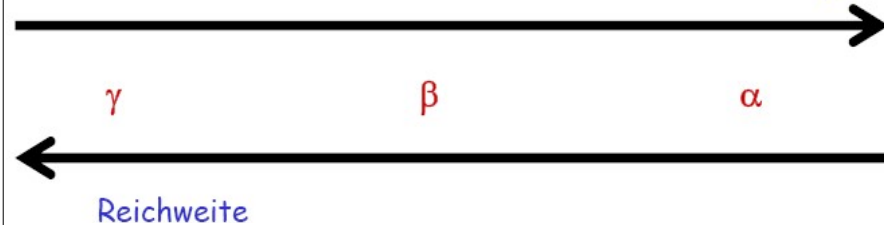
EMS

γ , X

Wechselwirkung ionisierender Strahlungen mit der Materie

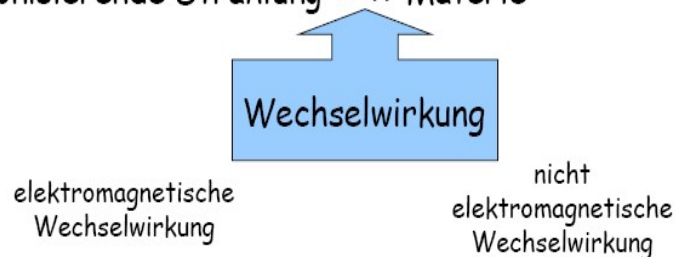
IONISIERENDE STRAHLUNGEN			
DIREKTE IONISATION (durch Teilchen mit Ladung)		INDIREKTE IONISATION (durch Photoeffekt, Compton-Streuung, Paarbildung)	
α (Alphastrahlen)	(Heliumkern)	γ (Gammastrahlen)	$E = h \cdot f$ (100 keV-10 MeV)
β (Betastrahlen)	(Elektron, Positron)	Röntgenstrahlen	$E = h \cdot f$ (10 eV-1 MeV)
p (Protonenstrahlen)		n (Neutronenstrahlen)	

Ionisationsvermögen



Strahlungsdetektoren

ionisierende Strahlung $\leftrightarrow$ Materie



Die Basis aller Messungen (auch Beobachtungen) ist die **Wechselwirkung** mit dem zu messenden System. Ohne Wechselwirkung ist es **NICHT** möglich, Information zu gewinnen.

Strahlungsdetektoren

Nachweis über elektromagnetische Wechselwirkung mit Materie

- 1.) ☹ Szintillationsdetektoren:
Szintillationszähler NaI(Tl)
- 2.) ☹ Gasionisationsdetektoren
Ionisationskammer, Proportionalzählrohr, Geiger-Müller Zählrohr...
- 3.) ☹ Halbleiterdetektoren:
Halbleiter-Sperrschicht Detektor
- 4.) ☹ Spurdetektoren:
Nebelkammer, Blaskammer, Funkenkammer...
- 5.) ☹ ... usw.

Szintillationsdetektor

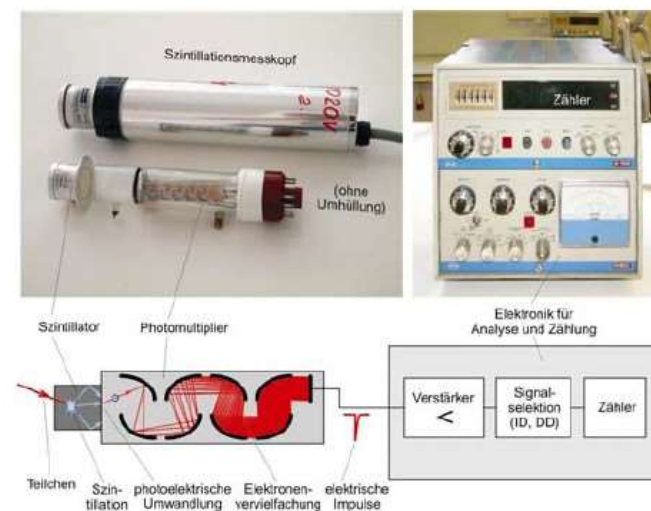
Feste Szintillatoren: Cu- und Mg-haltiges ZnS
Tl-haltiges NaI

Flüssige Szintillatoren: Anthracen, Stilben, Naphtalen ...

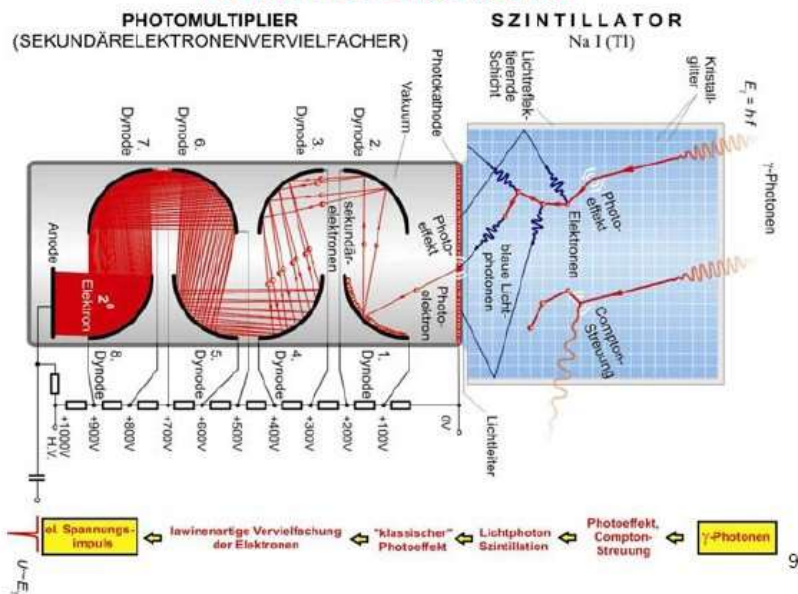
Die Größe des Lichtimpulses $\sim$ Energie, welche die Ionisation auslöst

Die Zahl der Impulse $\sim$ Aktivität des Präparates

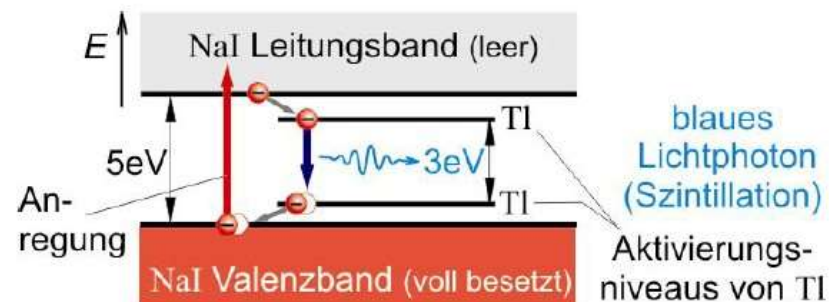
Szintillationsdetektor



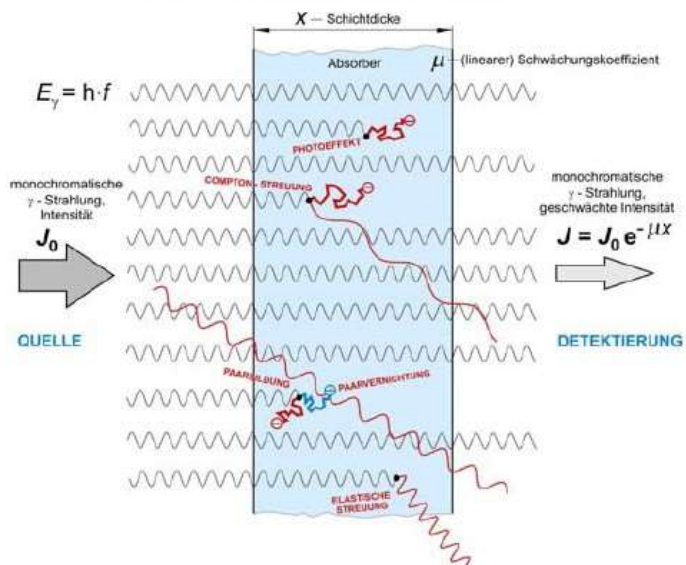
Szintillationsdetektor



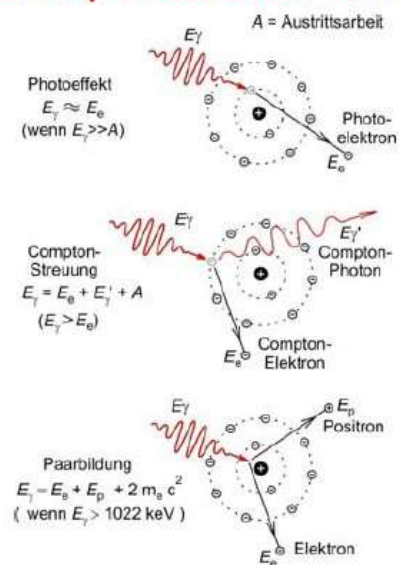
Szintillationsdetektor



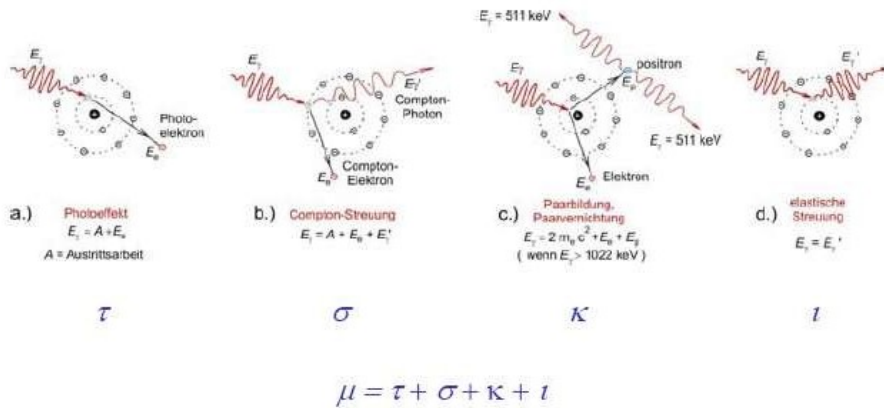
Szintillationsdetektor



Elementarprozesse der Schwächung



Elementarprozesse der Schwächung



Physikalische Größen, die den μ beeinflussen

- ✓ ρ Dichte des Mediums/Absorbents
- ✓ Q Qualität des Absorbents
- ✓ Strahlungsart: EMW, Teilchenstrahlung. ($\alpha, \beta, p, n, \dots$)

$$\mu = \mu(\rho, Q, \text{Strahlungsart, Energie, } \dots)$$

Massenschwächungskoeffizient: $\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$

μ_m ist von der Dichte unabhängig geworden!

Einheit: $\frac{\text{cm}^{-1}}{\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}} = \frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$

Vorteil:

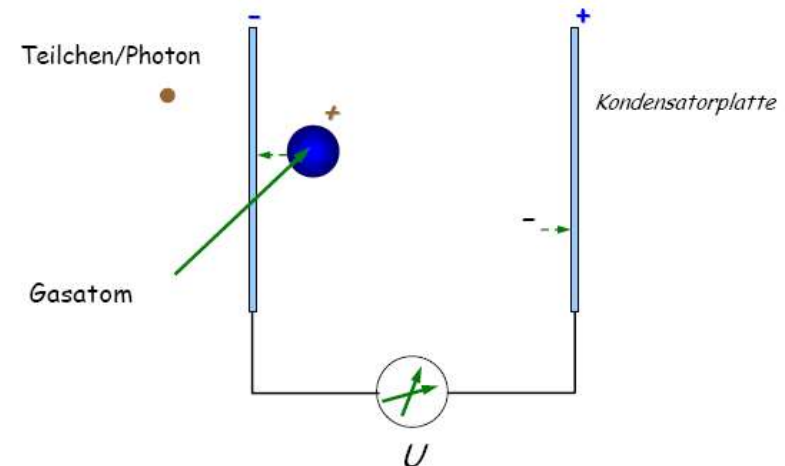
- Szintillationszähler besitzen eine hohe Nachweeffektivität für γ -Strahlung;

Nachteil:

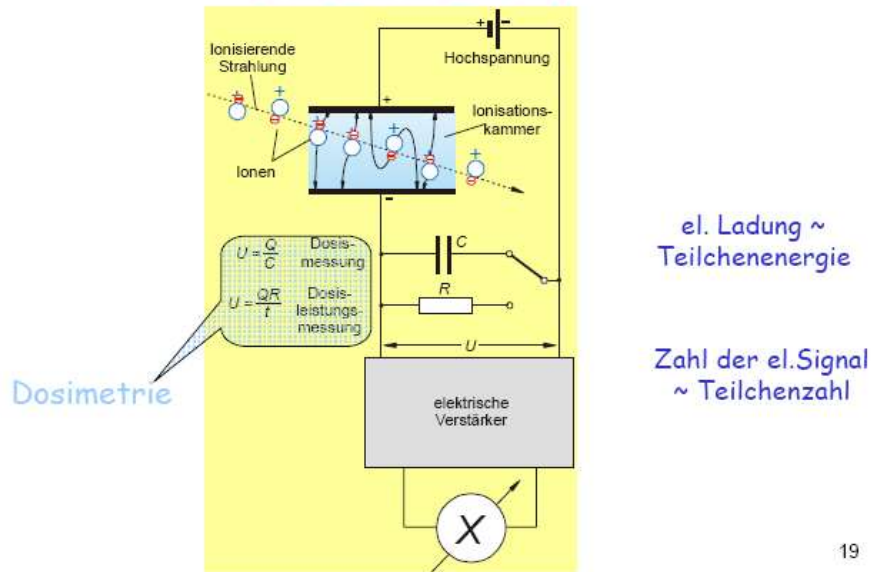
- Ihr Nachteil besteht in der relativ geringen Energieauflösung $\Delta E/E$ von ca. 10%.

Gasionisationsdetektoren

Messprinzip: die Gasionisation liefert elektrisches Signal



Ionisationskammer



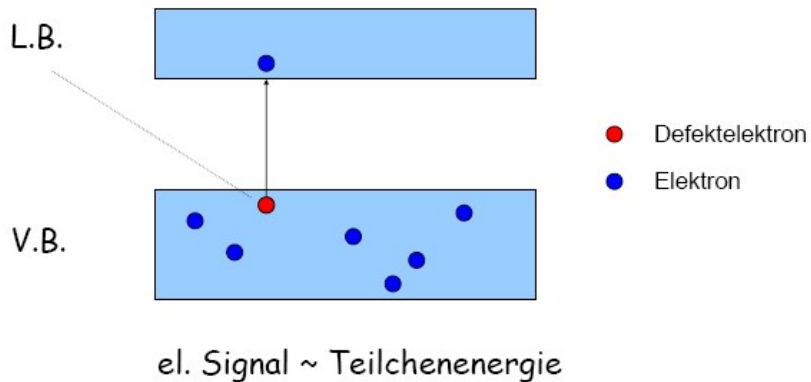
19

Vorteile:

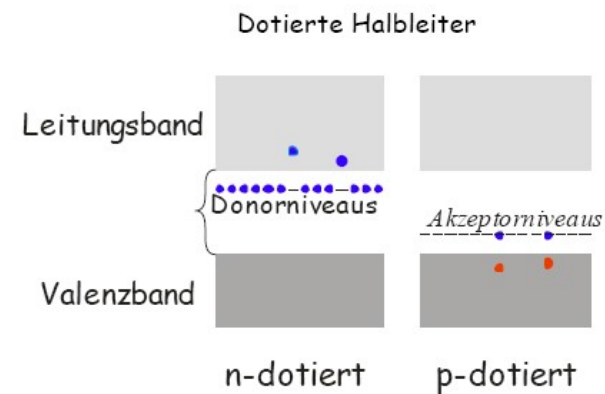
- seit mehr als 100 Jahren sind die Ionisationsvorgänge untersucht – ausführliche theoretische und praktische Kenntnisse;
- Messvolumen von mm^3 – Liter;
- ermöglicht absolute Messung – Kalibrationsmessungen der anderen Detektoren/Dosimeter;
- Messung der sehr großen Dosiswerten;
- **Schließen zur Energiedosis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

Halbleiter-Detektor

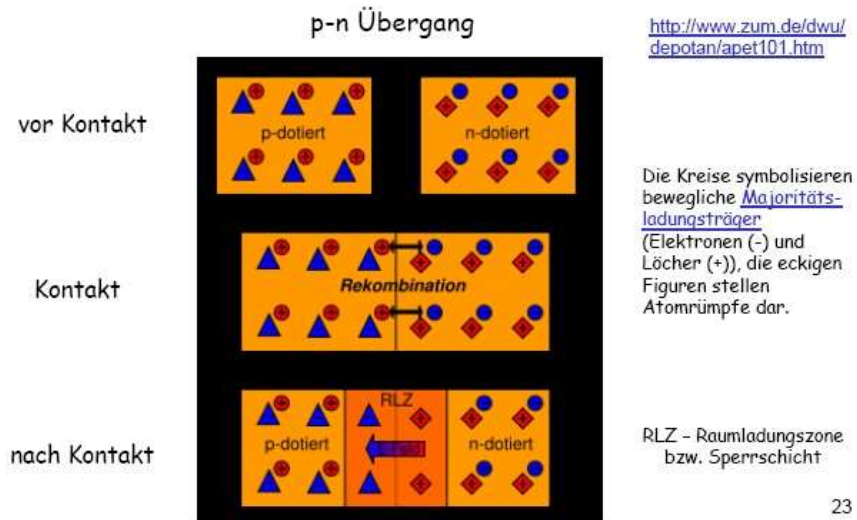
Halbleiter (Si, Ge)



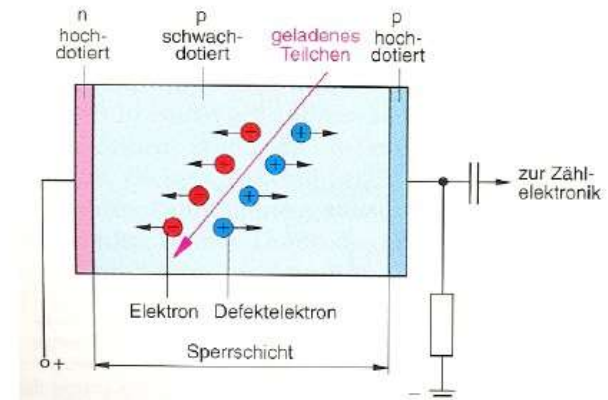
Halbleiter-Detektor



Halbleiter-Sperrschicht Detektor



Halbleiter-Sperrschicht Detektor

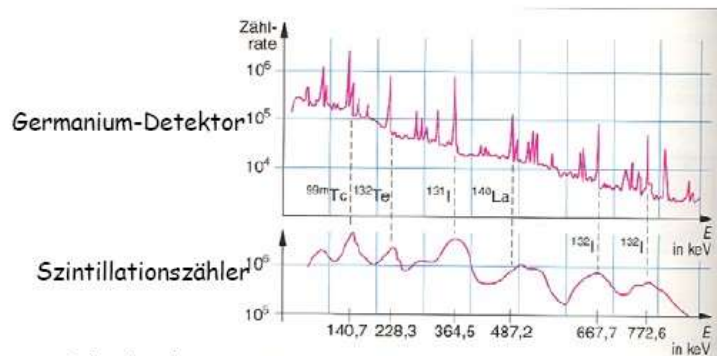


Wird der n-Bereich mit dem + Pol und der p-Bereich mit dem - Pol einer Spannungsquelle verbunden, so verbreitet sich die Sperrschicht. Ein el. Ladung tragendes Teilchen erzeugt in dieser Sperrschicht Elektronen und Defektelektronen. → Es kommt zu einem kurzzeitigem Strom.

Halbleiter-Sperrschicht Detektor

Vorteile:

- Im Halbleiter können auch Teilchen höherer Energie vollständig abgebremst werden. (wegen der höheren Dichte)
- Sie besitzen eine gute **Energieauflösung** $\Delta E/E$ von weniger als 1%.



Nachteil:

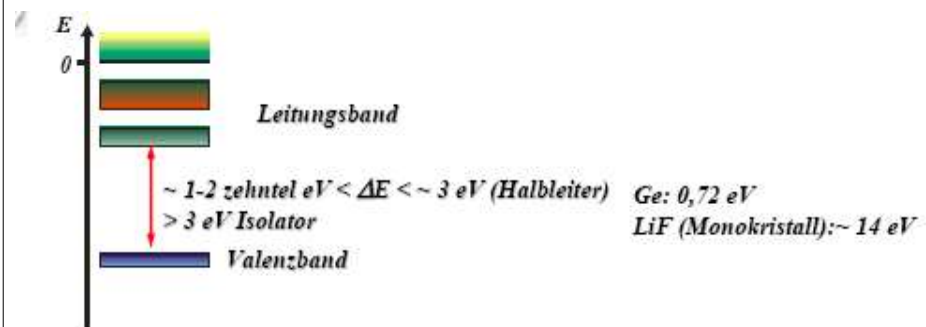
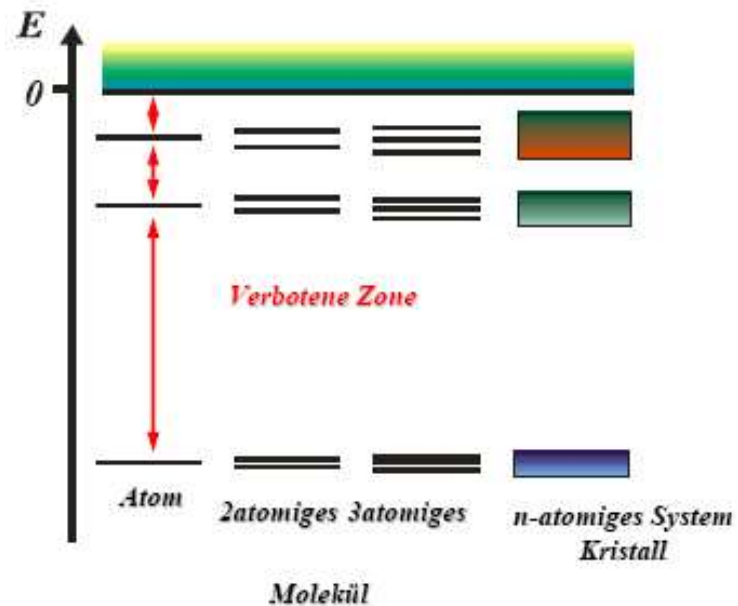
- Sie sind sehr temperaturempfindlich.



Thermolumineszenzdosimeter



Thermolumineszenzdosimeter



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

$$k = 1,380 \cdot 10^{-23} \text{ [J/K]} = 8,63 \cdot 10^{-5} \text{ [eV/K]}$$

$$E = kT$$

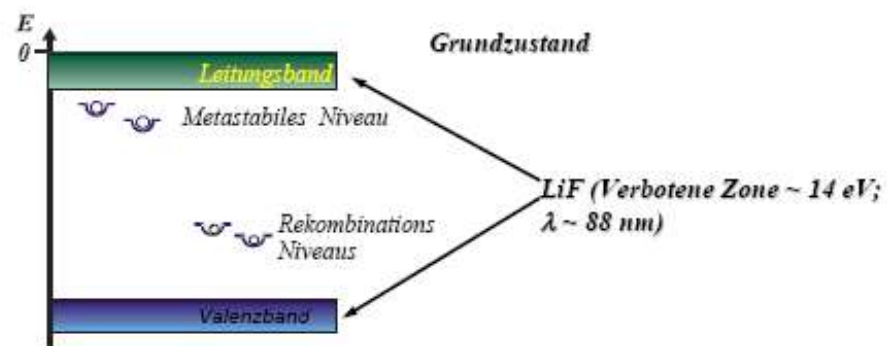
$\vartheta(^{\circ}\text{C})$	$T(\text{K})$	$kT(\text{meV})$	$\Delta kT(\text{meV})$
0	273	23,6	-
150	423	36,5	12,9
250	523	45,1	8,6
350	623	53,7	8,6

6

Am häufigsten angewandten TL Kristalle:

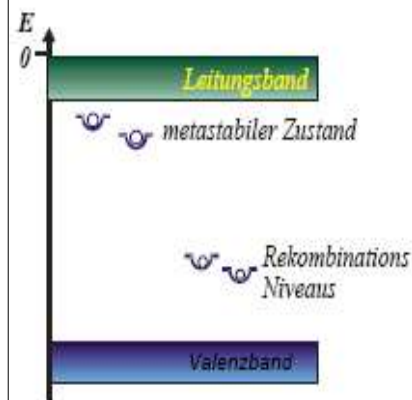
$\text{LiF}(\text{Mg, Ti}); \text{CaF}_2(\text{Dy}); \text{CaF}_2(\text{Mn});$

$\text{CaSO}_4(\text{Dy}); \text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{Mn})$

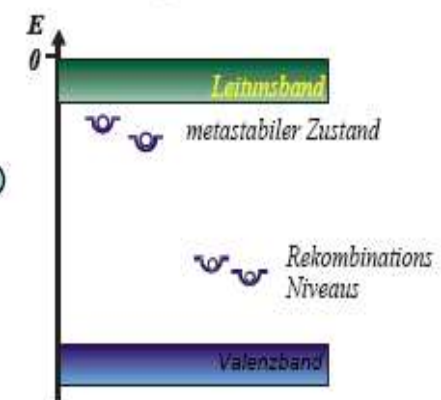


$$\Delta E_{m-LB}: \sim 30 \sim 60 \text{ meV}$$

Grundzustand



Wirkung der ionisierende Strahlung



Vorteile:

- **kleines Detektorvolumen:** $\sim \text{mm}^3$ — gute räumliche Auflösung;
➤ **Strahlentherapie:** Messung *in vivo* („in dem Patient“);
- **Linearität bis ein-paar Gy;**
- **Messbereich:** $\sim 10^{-5} — 10^3 \text{ Gy}$;
- **In breitem Bereich unabhängig von der Dosisleistung;**
- **Auswertung getrennt von dem Bestrahlungsort**

Dosimetrie der ionisierenden Strahlungen

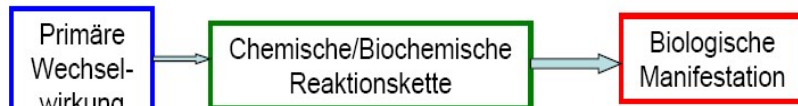
Physikalische Strahlendosimetrie:

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.



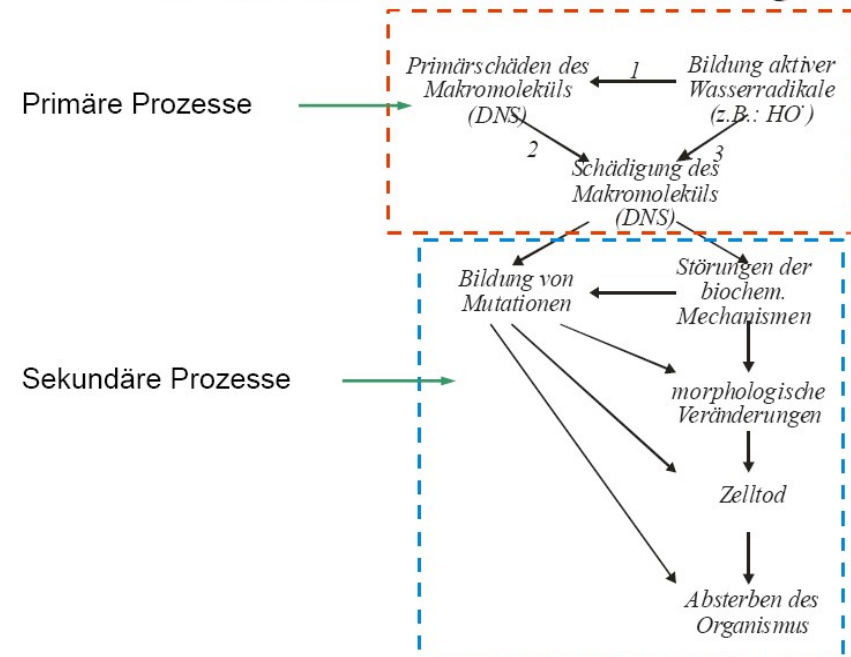
Zeitskala: $\sim \text{ps}$

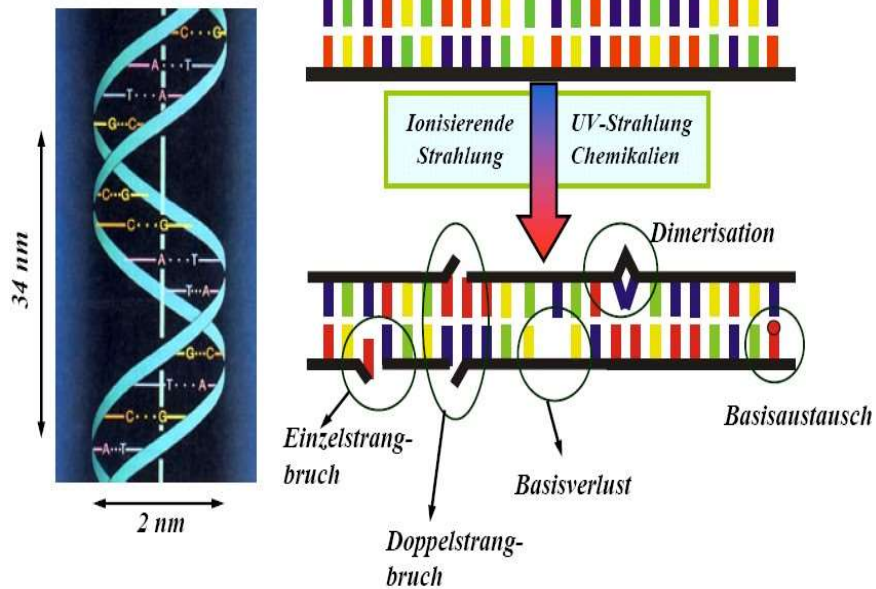
$\sim \text{ns} — \mu\text{s}$

Stunden/.../Jahren

Ereignis	Zeitskala
Physikalische Wechselwirkung	$< 10^{-14} \text{ s}$
Chemisch-physikalische Vorgänge	$10^{-12} — 10^{-8} \text{ s}$
(photo)chemische/biochemische Vorgänge	$\sim 10^{-7} \text{ s} — \text{Stunden}$
Schädigungen der biologischen Makromoleküle/Moleküle	$10^{-3} \text{ s} — \text{Stunden}$
Frühschäden (Zelltod, Absterben des Organismus infolge der strukturellen Schaden)	Stunden — Wochen
Spätschädigungen (Tumoren, Mutationen...)	Jahren — Jahrzehnten

Der Mechanismus der Strahlenwirkung





Strahlenwirkung

reversibel

irreversibel

Reparatur-Mechanismen

Strahlenverletzung, Strahlenkrankheit

akut

chronisch

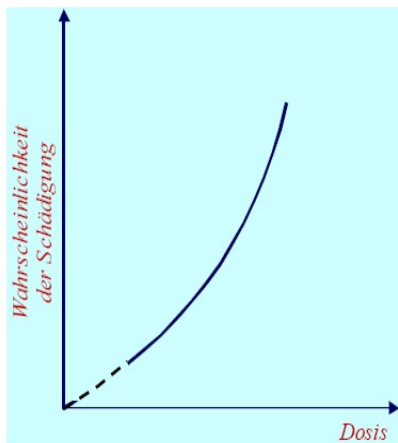
Dosis der erlittenen Strahlenbelastung

Biologische Wirkung der Strahlung (Strahlenschäden)

➤ Stochastische Wirkung

➤ Deterministische Wirkung

Stochastische Wirkung



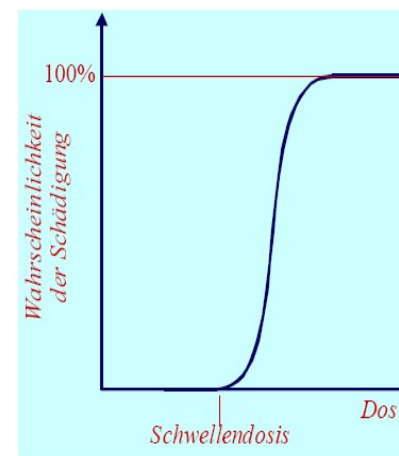
- auf Molekül- oder Zellebene jeder Strahlenschädigung

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

100 mSv

Dosisbegriffe

- Physikalische Dosisbegriffe
Charakterisierung der physikalischen Wirkung
- Biologische Dosisbegriffe
biologische Effekte werden berücksichtigt

Physikalische Dosisbegriffe

Das grundlegende Ziel ist es die mit der biologischen Wirkung zusammenhängenden physikalischen Größen zu definieren und mit messbaren Größen in Beziehung zu setzen.

A. Energiedosis

$$\text{Energiedosis} = \frac{\text{absorbierte Strahlungsenergie}}{\text{Masse}}$$

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} = \frac{\Delta E}{\rho \cdot \Delta V} \quad [D] = \frac{J}{kg} = \text{Gy (Gray)}$$

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.

14

Strahlenbelastung und Dosisniveaus

letale Dosis (**LD**):

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

$D > 8 \text{ Gy}$ bei Ganzkörperbestrahlung

halbletale Dosis (**LD₅₀**):

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

$D > 5-8 \text{ Gy}$ bei Ganzkörperbestrahlung

Eine alte Einheit:

CGS system und kein SI

$1 \text{ rad} = 0.01 \text{ Gy} = 0.01 \text{ J/kg}$

Eine merkwürdige Bemerkung für letale Strahlungsbelastung

Eine Rechenaufgabe: für ein 70 kg Mensch die lethale
Ganzkörperbestrahlung bedeutet $70 \cdot 10 = 700$ Joule Energie
Übertrag ΔE

Wie gross ist 700 J? Viel oder wenig?

Es ist wenig... Termische Energie ein warmes Esslöffel Tee

$\Delta E = c \cdot m \cdot \Delta T$ wo $c = 4200 \text{ J/(kgK)}$ spezifische Wärme

$\Delta T \sim 15 \text{ K} = (35\text{K} - 20\text{K})$

$700 = 4200 \cdot m \cdot 15$ gibt $m = 0.016 \text{ kg} = 16 \text{ g}$



Organ/	Bildgebung/Test	Aktivität(MBq)
Skelett	Knochen/Knochenmark	600/400
Herz	Perfusion/Vitalität/Ventrikuläre Funktion	800/75/600
Schilddrüse	Speicherungskurve und Scan	3-50
Hirn	Blutfluß	500
	Benzodiazepin-Rezeptoren	185
	Dopamin-Rezeptoren	185
Nieren	unterschiedliche Methoden	30-150
Lunge	Perfusion	100
	Ventilation	1000

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 Luft
- ✓ bis ~ 3 MeV
- ✓ beim Elektronengleichgewicht!



Eine messbare Grösse,

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

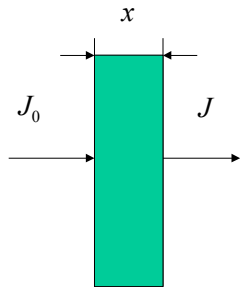


$$D_{\text{Luft}} = f_0 \cdot X \quad X \text{ ist in Luft gemessen!}$$

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

das Schwächungsgesetz gilt für Strahlungen

$$J = J(x) = J_0 e^{-\mu x}$$



J_0 : die eintretende Intensität

J : die austretende Intensität

μ : der (lineare) Schwächungskoeffizient
(Schwächungsfaktor, Absorptionskoeffizient),
Einheit: 1/m, 1/cm

Wichtige Zusammenhänge zwischen Schwächungskoeffizienten und Absorbierten Dosen im Luft und Gewebe

$$D_{\text{Gewebe}} / D_{\text{Luft}} = \mu_{\text{Gewebe}} / \mu_{\text{Luft}} = \text{Ioniendichte im Gewebe} / \text{Ioniendichte in Luft}$$

rechenbar / messbar = messbar / messbar

Biologische Dosisbegriffe

Reichen die physikalischen Überlegungen und Beziehungen in jedem Fall aus, um aus der absorbierten Energie auf das Risiko der biologischen Schädigung zu schließen?

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	Strahlungs-Wichtungsfaktoren w_R (ICRP60)	
Photonen	pauschal	1
Elektronen (incl. β)	alle $e^- + \mu$	1
Neutronen	$E < 10 \text{ keV}$	5
	$10 - 100 \text{ keV}$	10
	$0.1 - 2 \text{ MeV}$	20
	$2 - 20 \text{ MeV}$	10
	$E > 20 \text{ MeV}$	5
Protonen	$E > 2 \text{ MeV}$	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.

Wenn unterschiedliche Strahlungsarten gleichzeitig wirken, ist die Äquivalentdosis:

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

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



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.

Abgeleitete Dosisbegriffe

Kollektivdosis

Die Kollektivdosis ist die summierte Strahlendosis einer Population bekannter Größe, die in gegebener Zeitdauer aus einer gegebenen Strahlung auf den ganzen Körper (kollektive Effektivdosis)

$$S = \sum_i N_i \cdot E_i$$

oder auf einzelne Organe (kollektive Äquivalentdosis) einwirkt.

$$S_T = \sum_i N_i \cdot H_{T,i}$$

D. Effektivdosis

Idee: **Organe sind unterschiedlich empfindlich**

Die körporgewebeabhängige 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

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

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

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

Dosisleistung (Dosisrate):

$$P_D = \frac{\Delta D}{\Delta t}$$

$$[P_D] = \frac{\text{mGy}}{\text{h}}, \frac{\mu\text{Gy}}{\text{h}}$$

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	$K_\gamma \frac{\mu\text{Gy}_{\text{Luft}} \cdot \text{m}^2}{\text{GBq} \cdot \text{h}}$
^{60}Co	305
^{131}I	54
^{137}Cs	80

Bedeutung: Strahlenschutz

Strahlenschutz

ICRP — International Commission on Radiological Protection

Grundprinzipien:

- Rechtfertigung einer Tätigkeit
- Optimierung des Schutzes
- Individuelle Dosisbeschränkung

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

ad. b.:

- Kosten des Strahlenschutzes $\leftrightarrow$ Gesundheitsrisiko
- ALARA-Prinzip

ad. c. Individuelle Dosisbeschränkung

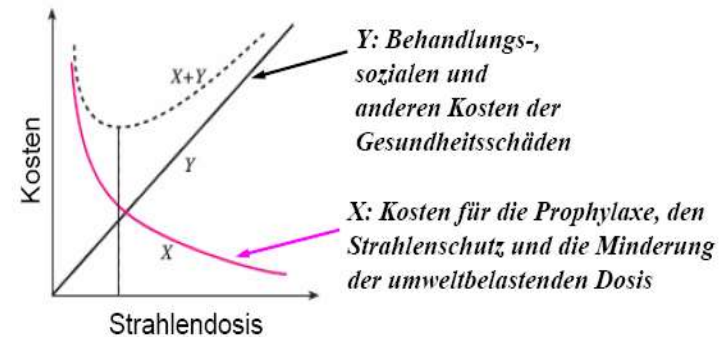
Zielsetzung: Personen und ihre Nachkommen darf nicht einer Strahlenbelastung mit indiskutabler Wahrscheinlichkeit von Schädigungen ausgesetzt werden

	Berufliche Strahlenexposition (mSv/Jahr)	Bevölkerung (mSv/Jahr)
Effective Dosis	20*	1
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)

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

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.

Die Strahlungsquellen

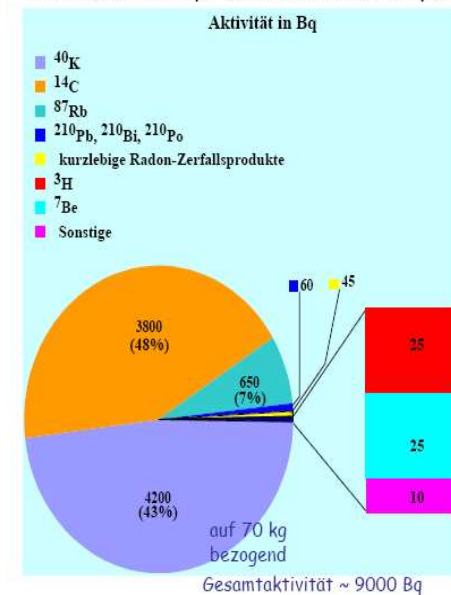
A. Natürliche Umwelt

Mittlere Jahreswerte der Strahlenbelastung durch einige natürliche Strahlungsquellen der Umwelt

Strahlungsquelle	H (mSv)
Kosmische Strahlung	~0,4
Umwelt	1–4
Ra (inkorporiert)	0,1–0,5
Rn (inkorporiert)	0,3–2,5

Die gemeinsame und mittlere Strahlungsleistung dieser Quellen beträgt rund 2–2,5 mSv/Jahr.

Radioaktive Isotope im menschlichen Körper



Bemerkung für ^{40}K



Es macht β Zerfall mit Reichweite von ~ 0.5 m

Die Strahlungsquellen

B.1. Ärztliche Tätigkeit (Strahlenbelastung der Patienten)

Mittlere Werte der Strahlenbelastung einiger Röntgenuntersuchungen

Untersuchte Körperregion	Konventionelle Aufnahme (mSv)	CT (mSv)
Brustkorb	0,4	7,8
Schädel	0,1	1,8
Bauch	1,2	7,6

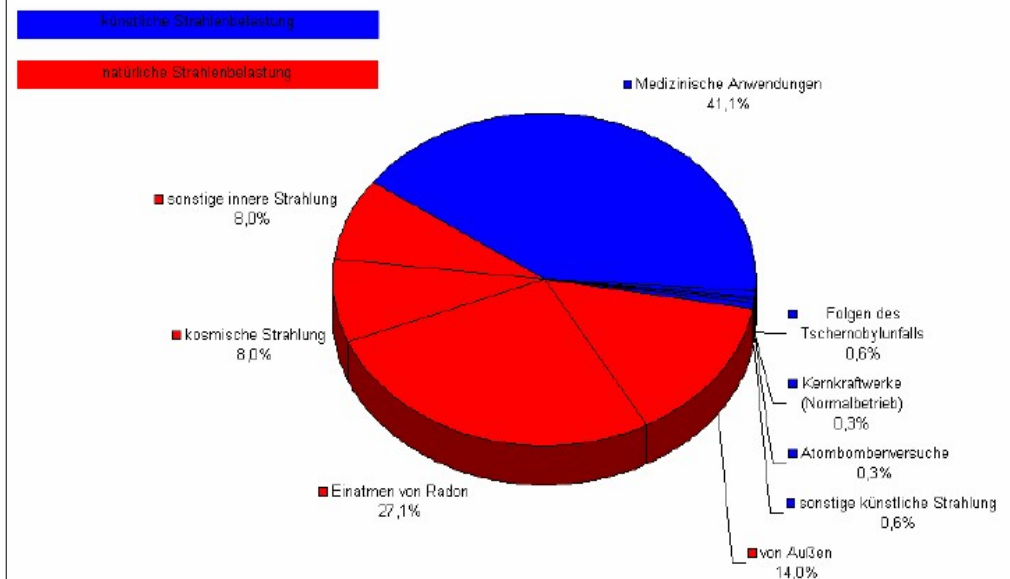
B.2. Therapeutische Dosiswerte

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

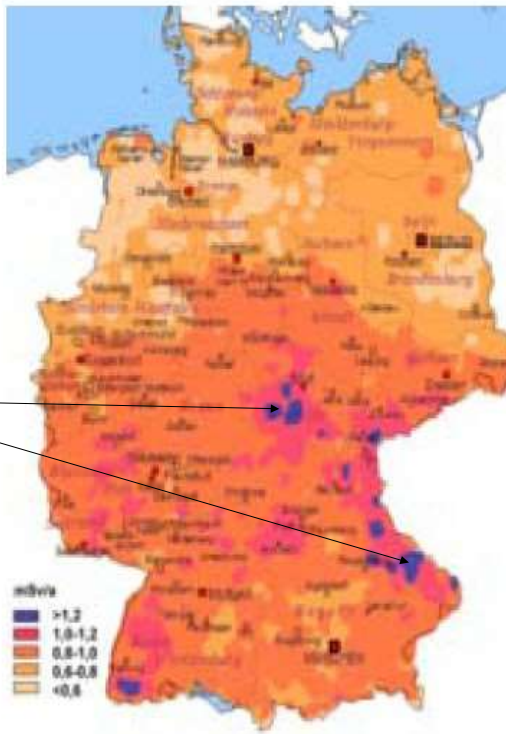
C. Nuklearindustrie, Nuklearunfälle, militärischer Einsatz

- Atomkraftanlagen
- Tschernobyl 1986
- Atombombenexplosion

Alltägliche Strahlenbelastung



Natürliche Strahlungs Belastung in Deutschland



Alte Bergen aus Granit produzieren Ra gas als Hintergrund

~ 130 nSv/h

mSv/a

>1.2
1.0 – 1.2
0.8 – 1.0
0.6 – 0.8
< 0.6

Vielleicht die wichtigste Folie für heute... die Größenordnungen von Strahlungen (für Gammastrahlung Gray = Sievert)

RADIATION DOSES Millisieverts (mSv)

10,000	Acute radiation poisoning – death within weeks
6,000	Typical dose received by Chernobyl nuclear plant workers who died within one month of accident
3,000	Survival rate approximately 50 percent
2,200	Reading found near tanks used to store radioactive water at Fukushima plant, Sep 3, 2013
1,000	Causes radiation sickness and nausea, but not death. Likely to cause fatal cancer many years later in about 5 of every 100 persons exposed
700	Vomiting, hair loss within 2-3 weeks
500	Allowable short-term dose for emergency workers taking life-saving actions
400 per hour	Peak radiation level recorded inside Fukushima plant four days after accident
350 per lifetime	Exposure level used as criterion for relocating residents after Chernobyl accident
250	Allowable short-term dose for workers controlling 2011 Fukushima accident
100	Lowest level linked to increased cancer risk
20 per year	Average limit for nuclear industry workers
10	Full-body CT scan
2.4 per year	Person's typical exposure to background radiation
0.01	Dental x-ray

Sources: IAEA, World Nuclear Association

Sind viele- viele
Größenordnungen zwischen
Lethaldosis und Hintergrundstrahlung
Es ist schwer (nicht möglich) das
Dosis und die Dosisleistung vergelichen
Aber probieren

Sei die Lethale Dosisleistung
10 Sv/Sekunde

Hintergrund 1-2 mSv/Jahr = 130 nS/Stunde
= 130/3600 = 0.03 nSv = 30 piko Sv/Sekunde

1 piko = 10^{-12}

Also 10fache Hintergrund ist immer noch nichts...

New York Frankfurt Flugbahn 40 micro Sv
1.5 Packung Zigarette per Tag für 1Jahr 35 mSv
Alter Monitor benutzen für ein Jahr 1 micro Sv
Eine Banane essen 0.01 microSv

n Dank für ihre



erksamkeit

Fragen, Bemerkungen, Kommentare?...