



Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät

Wolfgang Regenstein

## **Strahlenschutzphysik in Stichpunkten**



Wolfgang Regenstein

# Strahlenschutzphysik in Stichpunkten

Universität Potsdam

**Universität Potsdam 2021**

Das Manuskript ist urheberrechtlich geschützt.

Online veröffentlicht auf dem

Publikationsserver der Universität Potsdam:

<https://doi.org/10.25932/publishup-51340>

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:517-opus4-513405>

Publikationsdatum: 30.07.2021

## **Einleitung**

Ausgelöst durch den Unfall im Kernkraftwerk Fukushima und der damit verbundene Beschluss zur Abschaltung der letzten Kernkraftwerke in Deutschland bis zum Jahr 2022 sind Diskussionen über die Gefährdung durch radioaktive Strahlung wieder in das Bewusstsein der Bevölkerung gerückt. Dabei werden durch unsachliche Berichterstattung in den Medien Ängste geschürt, die durch die erneute Suche nach einem Endlager für radioaktiven Abfall zusätzlich intensiviert werden.

Deshalb ist es besonders wichtig, dass die Lehrer der Naturwissenschaften, vor allem der Physik, über ausreichende Fachkenntnisse über die Eigenschaften und Gefährdung durch radioaktive Strahlung verfügen. Leider trägt auch die Ausbildung an den Hochschulen, insbesondere die Lehrerausbildung, diesen Anforderungen nur ungenügend Rechnung.

Dabei kommt Radioaktivität überall mit unterschiedlicher Intensität in unserer Umwelt (Luft, Erde, Nahrung) vor. Das Bundesamt für Strahlenschutz veröffentlicht regelmäßig Messwerte von z. B. Radon in der Luft, in Lebensmitteln, Baustoffen ([www.bfs.de](http://www.bfs.de)) im Strahlenschutzregister, die für jeden einsehbar sind.

Die vorliegende Broschüre dient zur Unterstützung der Vorbereitung auf die Prüfung zum Fachkundenachweis für Lehrkräfte. Gleichzeitig ist sie eine Wiederholung des Hochschulstoffes zur Kernphysik und sollte vor allem für Lehrer der gymnasialen Oberstufe hilfreich sein. Der kompliziert zu lesende, weil vor allem nach juristischen Gesichtspunkten verfasste Text der Strahlenschutzverordnung wird nur soweit zitiert bzw. sinngemäß wiedergegeben, wie er für den Fachkundenachweis der Lehrkräfte notwendig ist.

In den ersten zwei Kapiteln dieser Broschüre werden die wichtigsten Grundlagen und Eigenschaften der verschiedenen Strahlen, die für eine allgemeine Gefährdung in Frage kommen, zusammengefasst und ihr mögliches Vorkommen in der Umwelt angegeben. Kurz wird der Einfluss der Radioaktivität auf belebte Materie dargestellt und für die Schule wichtige Begriffe und Grenzwerte des Strahlenschutzes angeführt.

Eine Aufgabensammlung dient zur Illustration und Übung.

# Inhalt

Seite

	<b>Einleitung</b>	
<b>1</b>	<b>Physikalische Grundlagen des Strahlenschutzes</b>	1
1.1	Atomkern	1
1.2	Kernumwandlungen	3
1.2.1	Umwandlungsgesetz	3
1.2.2	Statistische Beschreibung radioaktiver Umwandlungen	4
1.2.3	Umwandlungsarten und Wechselwirkungen der Strahlungsarten mit Materialien	7
1.2.3.1	Alpha-Strahlung	7
1.2.3.2	Beta-Strahlung	9
1.2.3.3	Gamma-Strahlung	12
1.2.3.4	Neutronen	14
<b>2</b>	<b>RÖNTGENstrahlung</b>	15
<b>3</b>	<b>Strahlenschutz-Messtechnik</b>	17
3.1	Kernstrahlungsdetektoren	17
3.1.1	Ionisationsdetektoren	17
3.1.2	Anregungsdetektoren	20
3.2	Strahlungsmessgeräte	21
<b>4</b>	<b>Dosimetrie und Strahlenschutz</b>	21
4.1	Größen und Einheiten	21
4.2	Dosisgrößen im Strahlenschutz	23
4.3	Dosismessungen	26
<b>5</b>	<b>Grundlagen der Strahlenbiologie</b>	27
5.1	Wirkungen ionisierender Strahlung	27
5.2	Strahlenbelastungen	28
5.3	Strahlenschäden	28
5.4	Grenzwerte	28
<b>6</b>	<b>Strahlenbelastung des Menschen</b>	29
6.1	Natürliche Strahlenbelastung	29
6.2	Zivilisatorische Strahlenbelastung	
	<b>Zusammenfassung</b>	32
	<b>Aufgaben mit Lösungen zum Strahlenschutz</b>	33
	<b>Literatur</b>	36

# 1 Physikalische Grundlagen des Strahlenschutzes

## 1.1 Atomkern

- Klassifizierung der Kerne (Nuklide) nach
  - Massenzahl  $A$
  - Protonenzahl  $Z$   ${}^A_Z Nu$
  - Neutronenzahl  $N$
  
- Nomenklatur
  - Isobare: Kerne gleicher Massenzahl  $A$
  - Isotope: Kerne gleicher Protonenzahl  $Z$   
 $A = Z + N$
  - Isotone: Kerne gleicher Neutronenzahl  $N$
  - Isodiaphere: Kerne mit gleichem Neutronenüberschuß  
 $N - Z = A - 2Z$ , da  $N = A - Z$
  - Isomere: Kerne im angeregten Zustand
  
- Stabilität
  - heute etwa 267 stabile Kerne bekannt (Erdkruste)
  - 1985 über 200 "künstlich" erzeugte Kerne  
insgesamt 3000 Nuklide

Die Erdkruste besteht zu 99,3 Massenanteil aus folgenden Elementen(s. Tab. 1):

**Tabelle 1:**

${}^8\text{O}$	${}^{14}\text{Si}$	${}^{13}\text{Al}$	${}^{26}\text{Fe}$	${}^{20}\text{Ca}$	${}^{11}\text{Na}$	${}^{19}\text{K}$	${}^{21}\text{Mg}$	${}^1\text{H}$	${}^{15}\text{P}$	${}^{25}\text{Mn}$
46,6	27,7	8,1	5,0	3,6	2,8	2,6	2,1	0,14	0,12	0,10

bei Einbeziehung des Kosmos sind  ${}^1\text{H}$  und  ${}^2\text{He}$  häufigste Elemente, ab  $Z = 20$  kein Unterschied zwischen Erde und Kosmos.

- Kernladung
  - Bestimmung nach MOSELEY:  
$$\nu_{K_\alpha} = \frac{3}{4} R(Z - 1)^2$$
  - RUTHERFORD-Streuung
  
- Kernmasse
  - Bestimmung z. B. mit Massenspektrograf  
Bezugswert  $m({}^{12}_6\text{C}) = 12$  Masseneinheiten  $u$   
 $1 u = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
  - Nichtganzzahligkeit durch Isotopie
  
- Kernbausteine (Nukleonen)  
 $Nu = Z$  (Protonen) +  $(A - Z)$  (Neutronen)
  
- Kernradius  
$$r_k \approx 1,3 \sqrt[3]{A} 10^{-15} \text{ m}$$

- **Kernmodelle**

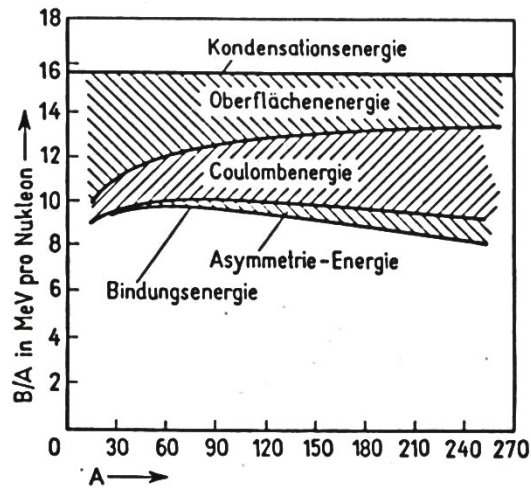
· **Tröpfchenmodell:**

Berechnung der Bindungsenergie in Masseneinheiten

$$m(Z, A) = Zm_p + Nm_n - \frac{B}{c^2}$$

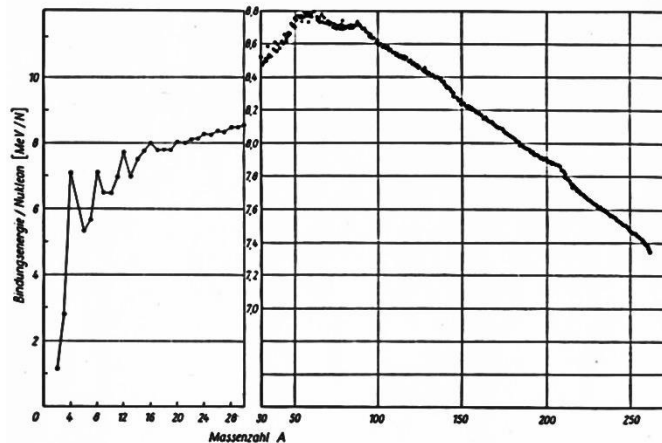
mit  $B = B_i(A)$  nach WEIZSÄCKER

B: mittlere Bindungsenergie



**Abb. 1:** Beitrag der einzelnen Terme der Massenformel zur mittleren Bindungsenergie pro Nukleon (Mayer- Kuckuk 02)

Funktion  $\frac{B}{A} = f(m)$  liefert Voraussage für Kernspaltung und Kernfusion.



**Abb. 2:** Bindungsenergie je Nukleon der Nuklide längs der Stabilitätslinie (Lösche 88)



· **Nukleares Schalenmodell** (GOEPPERT-MAYER und JENSEN)

- magische Zahlen
  - N = Z: 2, 8, 20, 28, 50, 82
  - Z: 114
  - N: 126, 152, 184, 196
- magische Kerne
  - hohe Bindungsenergien
  - größere Häufigkeiten
  - Quadrupolmoment null
  - Analogie zu abgeschlossenen Schalen der Atome
  - Besetzung der Zustände nach PAULI-Prinzip
  - keine Wechselwirkung der Teilchen untereinander
  - Potential kein Zentralkraftfeld
- Erklärung der Kernumwandlungsarten
  - Vielzahl weiterer Modelle zur Erklärung einzelner Phänomene

## 1.2 Kernumwandlungen

### 1.2.1 Umwandlungsgesetz

- instabile Kerne: - Kerne im Grundzustand senden Teilchen aus
  - angeregte Kerne gehen unter Abgabe von Gammastrahlung in den Grundzustand über
- Termschema: - Angabe der Energien, Umwandlungsarten, Häufigkeiten (bei Konkurrenz) und Lebensdauern
- nicht durch "äußere" Einflüsse (T, B, p) veränderbar - spontan
- Ensemble N instabiler Kerne mit Umwandlungswahrscheinlichkeit  $\lambda$

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad \text{A: Aktivität}$$

$$\text{Integration: } N = N_0 e^{-\lambda t} \text{ mit } N = N_0 \text{ bei } t = 0$$

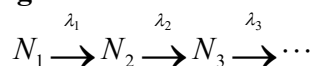
**Aktivität:**  $A = A_0 e^{-\lambda t}$

**Maßeinheit:**  $1 \text{ Becquerel} = 1 \text{ s}^{-1} = 1 \text{ Bq}$   
 $(1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq})$

**Halbwertszeit:** T bei  $N = N_0 / 2$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

**Umwandlungsreihen:**



**Tabelle 2: Drei Umwandlungsreihen für natürliche Nuklide:**

Reihe	Ausgangskern	$T_{1/2} / a$	Endkern (stabil)
Uran-Radium	${}^{238}_{92}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$	${}^{206}_{82}\text{Pb}$
Thorium	${}^{232}_{90}\text{Th}$	$1,4 \cdot 10^{10}$	${}^{208}_{82}\text{Pb}$
Uran-Actinium	${}^{235}_{92}\text{U}$	$7,1 \cdot 10^8$	${}^{207}_{82}\text{Pb}$

### 1.2.2 Statistische Beschreibung radioaktiver Umwandlungen

$p$  : Wahrscheinlichkeit dafür, daß sich Kern umwandelt

$1-p=q$  : Wahrscheinlichkeit dafür, daß sich Kern **nicht** umwandelt

Wahrscheinlichkeitsverteilung  $P_n(N_K)$ :

von  $n$  vorhandenen Kernen wandeln sich  $N_K$  in der Zeit  $t$  um.

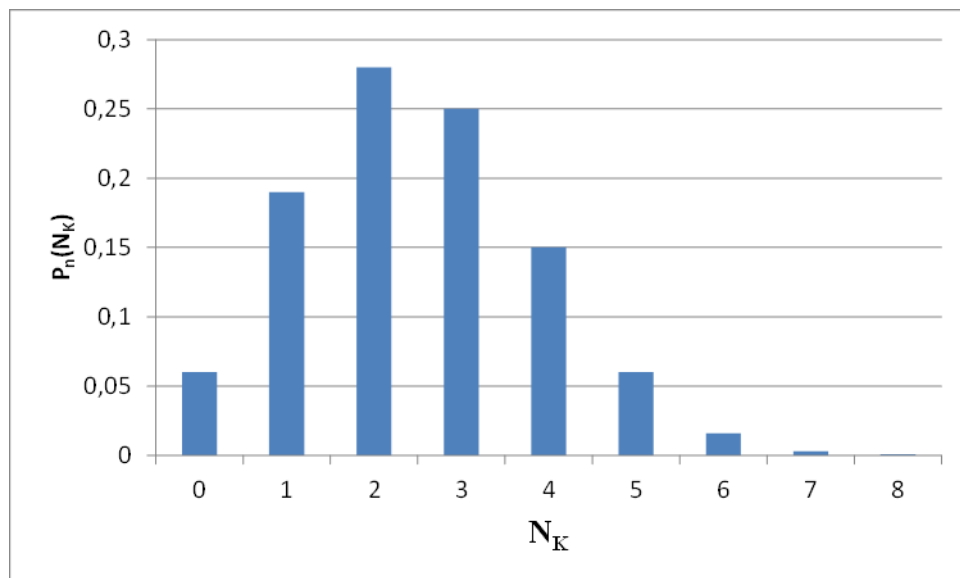
**Binomialverteilung:**

$$P_n(N_K) = \frac{n!}{(n-N_K)!N_K!} p^{N_K} (1-p)^{n-N_K}$$

für  $N_K = 0, 1, 2, \dots n$ .

Erwartungs- oder Mittelwert

$$\mu = \sum_{N_K=0}^n N_K P_n(N_K) = np$$



**Abb. 3:** Binomialverteilung:  $P_{10}(N_K) = \binom{10}{N_K} p^{N_K} (1-p)^{n-N_K}$  mit  $p = 0,25$

**Tabelle 3:**

$N_K$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_K(N_K)$	0,06	0,19	0,28	0,25	0,15	0,06	0,016	0,003	0,001

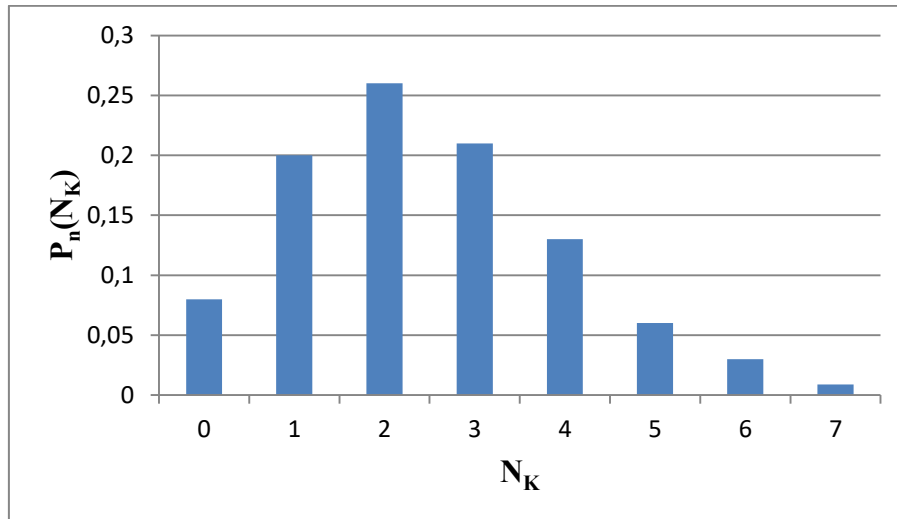
Näherungen:

Beobachtungszeit ist kürzer als Halbwertszeit:

$$\lambda t \ll 1, \quad n \gg 1, \quad N_k \ll n.$$

**POISSONverteilung:**

$$P_n(N_k) \approx \frac{\mu^{N_k}}{N_k!} e^{-\mu}$$



**Abb. 4:** POISSONverteilung:  $P_{10}(N_k) \approx \frac{\mu^{N_k}}{N_k!} e^{-\mu}$  mit  $\mu = p n = 2,5$  und  $p = 0,25$

**Tabelle 4:**

N <sub>k</sub>	0	1	2	3	4	5	6	7
P <sub>n</sub> (N <sub>k</sub> )	0,08	0,20	0,26	0,21	0,13	0,06	0,03	0,009

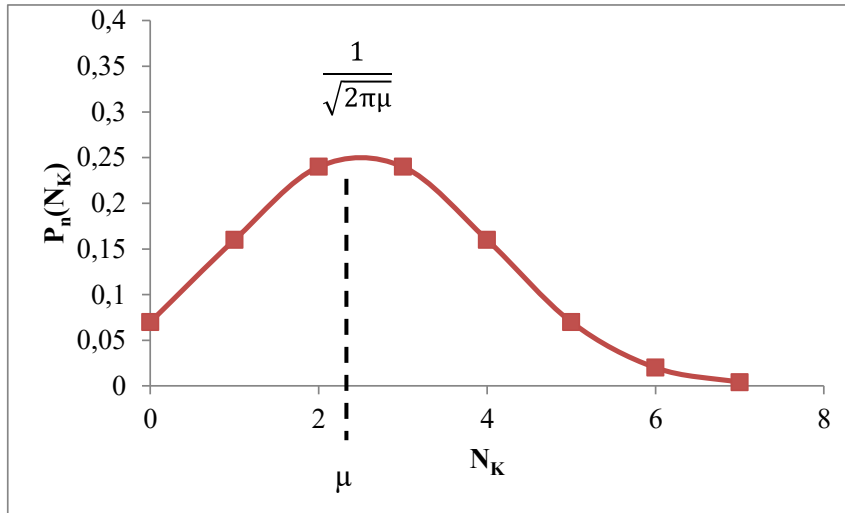
Für große N<sub>k</sub> und μ und der Näherung

$$N_k! \approx \sqrt{2\pi N_k} N_k^{N_k} e^{-N_k}$$

gilt für die Verteilung der Abweichungen vom Erwartungswert μ:

**GAUßverteilung:**

$$P_n(N_k - \mu) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi\mu}} e^{-\frac{(N_k - \mu)^2}{2\mu}}$$



**Abb. 5:** GAUßverteilung:  $P_{10}(N_K - \mu) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi\mu}} e^{-\frac{(N_K - \mu)^2}{2\mu}}$  mit  $\mu = 2,5$  und  $p = 0,25$

**Tabelle 5:**

$N_K$	0	1	2	3	4	5	6	7
$P_n(N_K)$	0,07	0,16	0,27	0,27	0,16	0,07	0,0	0,004

Standardabweichung:

$$\sigma = \sqrt{\mu}$$

$\Rightarrow$  68,26 % aller Umwandlungen liegen im Bereich  $\mu \pm \sigma$ ,

bzw. 95,5 % im Bereich  $\mu \pm 2\sigma$ .

Anwendungen auf Messungen:

- Erfahrung: Genauigkeit hängt von der Zahl der registrierten Ereignisse ab.  
 $\Rightarrow$  Verwendung großer Aktivitäten und/oder langer Meßzeiten.
- Messungen mit vorgegebener Genauigkeit:  
 z.B. 1 % und 1 $\sigma$ -Regel (68,3 %):

$$\text{Zählrate: } z_i = \frac{N_i}{t}$$

mit  $N_i$  = Anzahl der Ereignisse (Impulse) der i-ten Messung,

t = Zeit

$\bar{N}$  = Mittelwert

$$\frac{\sqrt{\bar{N}}}{\bar{N}} = 0,01 \Rightarrow \bar{N} = 10^4$$

$\Rightarrow$  immer gleiche Teilchenzahl messen!

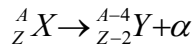
Näherung für  $\sigma$ : mittlere quadratische Abweichung s für

$$i \rightarrow \infty: \bar{N} \rightarrow \mu, s \rightarrow \sigma.$$

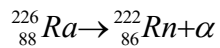
### 1.2.3 Umwandlungsarten und Wechselwirkungen der Strahlungsarten mit Materialien

#### 1.2.3.1 $\alpha$ - Strahlung:

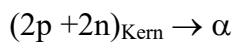
- Reaktionsgleichung:



Beispiel:



- Schalenmodell:



quantenmechanische Beschreibung mit GAMOW-Theorie

GEIGER-NUTTALLsche Regel:

$$\lg T_{1/2} \approx \frac{1}{\sqrt{E_\alpha}}$$

- Spektrum: Linienspektrum

energetische Bedingung für spontane Umwandlung über Massenbilanz:

$$E = E_B({}^{A-4}_{Z-2} Y) + E_B({}^4_2 He) - E_B({}^A_Z X)$$

BRAGG-Kurve:

spezifische Ionisation als Funktion der Energie- bzw. Reichweite

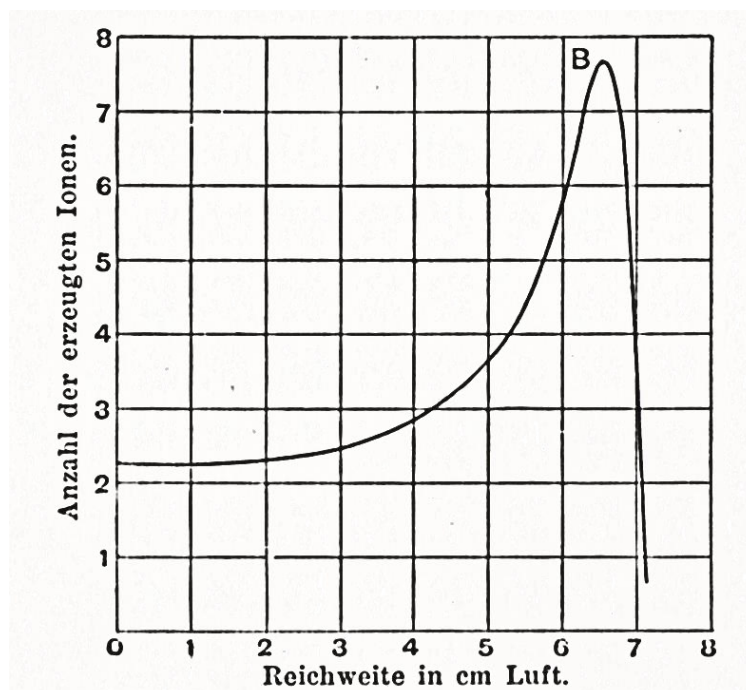


Abb. 6: BRAGG-Kurve für Alphateilchen  
(Bragg 13)

- **Absorptionskurve:**

Summe von Exponentialfunktionen

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} \sum_{z=0}^{n-1} \frac{(\mu x)^z}{z!}$$

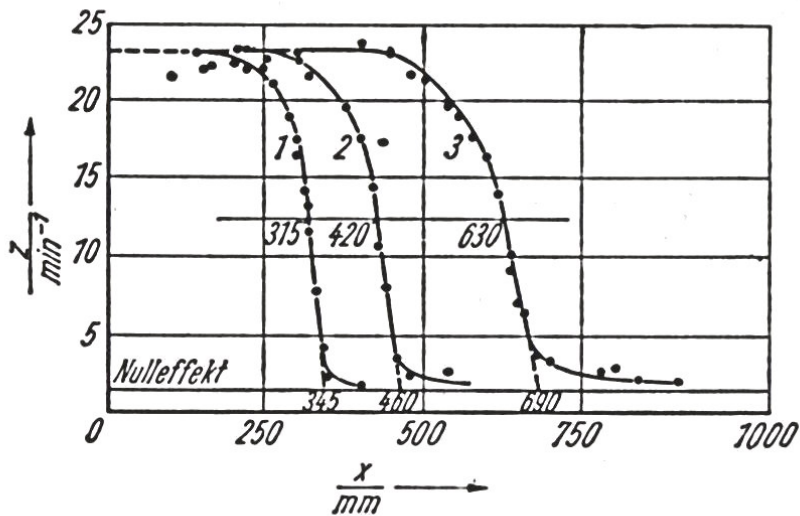
für ganzzahlige n Verallgemeinerung:

$$\frac{I}{I_0} = 1 - \frac{\Gamma(z;n)}{\Gamma(n)}$$

mit  $\Gamma(n) = \int_0^\infty e^{-t} t^{n-1} dt$  = vollständige Gammafunktion

und  $\Gamma(\bar{z}; \bar{n}) = \int_0^{\bar{z}} e^{-t} t^{\bar{n}-1} dt$  = unvollständige Gammafunktion

gute Näherung: integrale GAUß-Funktion



**Abb. 7:** Transmissionskurven für Alphateilchen des  $^{210}_{84}\text{Po}$  bei 80 Torr (1), 60 Torr (2) und 40 Torr (3); Temperatur 23 °C. Abszisse x: Abstand zwischen Alpha-Strahler und Szintillator (Melcher 70)

- **Energie-Reichweite** in Luft:

GEIGERsches Reichweitengesetz (Zahlenwertgleichung)

$$\frac{\bar{E}_\alpha}{\text{MeV}} = 2,12 \left( \frac{\bar{R}}{\text{cm}} \right)^{2/3}$$

Abhängigkeit der Reichweite von Luftdruck p und Temperatur T:

$$R_{T,p} = R_0 \frac{T}{T_0} \cdot \frac{p_0}{p} ; \quad R_0 \text{ bei } p_0 = 101,3 \text{ kPa und } T_0 = 288 \text{ K}$$

- Ablenkung im Magnetfeld: schwierig

### 1.2.3.2 $\beta^-$ - Strahlung

Probleme:

- Elektronen aus Kern
- Spektrum kontinuierlich
- Erhaltungssätze
- -Energie
- -Impuls
- -Drehimpuls (Spin)

Lösung:

W. PAULI ( 1930 ):Neutrinohypothese

-Elektron und Neutrino ( Antineutrino ) teilen sich Energie und Impuls

-Spin  $\frac{1}{2}$

-Ruhmasse null ( ? )

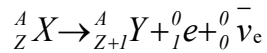
-keine Ladung

-geringe Wechselwirkung Nachweis schwierig

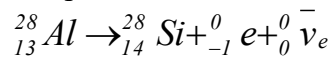
COWAN und REINES ( 1956 ) experimentelle Bestätigung

#### - $\beta^-$ - Umwandlung

. Reaktionsgleichungen



Beispiel:



im Kern: Umwandlung eines Neutrons in ein Proton

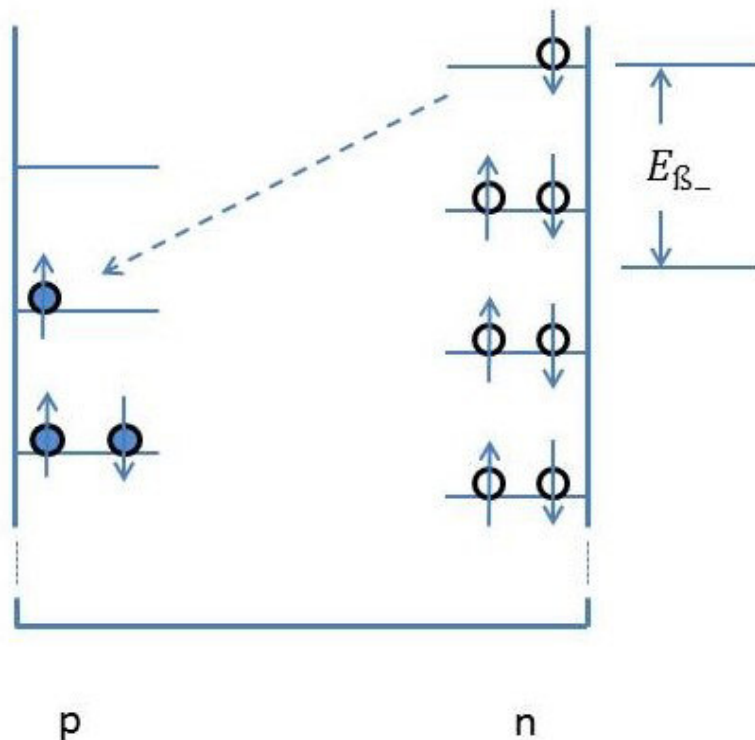
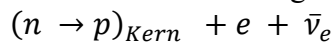


Abb. 8:  $\beta^-$  - Umwandlung im Schalenmodell

### Spektrum:

kontinuierliche Energieverteilung bis  $E_{\max}$

energetische Bedingung:

$$m_a({}^A_Z X) > m_a({}^A_{Z+1} Y)$$

$m_a$ : Massen der neutralen Atome

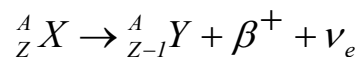
$$m_a = m_K + Z m_e$$

$m_K$ : Masse des Kerns

$m_e$ : Elektronenmasse

### - $\beta^+$ - Umwandlung

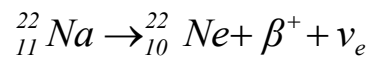
tritt in der Natur nicht auf



$$\beta^+ = {}^0_{+1} e$$

Positron: 1933 durch ANDERSON in der Höhenstrahlung entdeckt

Beispiel:



im Kern: Umwandlung eines Protons in ein Neutron

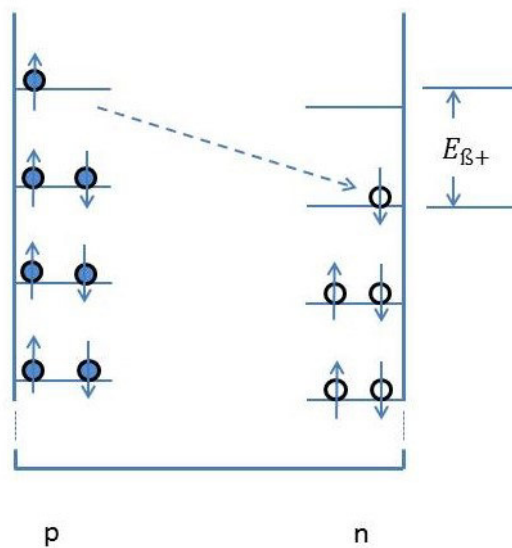
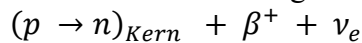


Abb. 9:  $\beta^+$ -Umwandlung im Schalenmodell

### Spektrum:

Kontinuierliche Energieverteilung bis zu  $E_{\max}$

im Vergleich zu  $\beta^-$ -Spektrum geringere Intensitäten bei niedrigen Energien

energetische Bedingung:

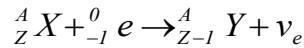
$$m_a({}^A_Z X) > m_a({}^A_{Z-1} Y) + 2 m_e$$

$\Rightarrow \beta^+$ -Umwandlung nur möglich, wenn Ausgangskern Energieüberschuß von mindestens  $2m_e c^2 = 1,022 \text{ MeV}$  besitzt

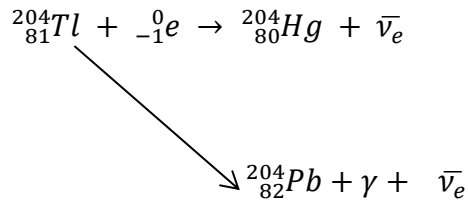


- **E-(K-) Einfang**

Elektron der K-Schale wird eingefangen, meist in Konkurrenz zu  $\beta^+$ -Umwandlung



Beispiel:



energetische Bedingung:

$$m_a({}^A_Z X) > m_a({}^A_{Z-1} Y)$$

- **Spektrum:**

charakteristische RÖNTGENstrahlung des Folgekerns

quantenmechanische Erklärung:

FERMI-Theorie:

- Erklärung des Spektrums
- erlaubte und verbotene Übergänge
- $\lambda = f(E_{\max})$ : SARGENT-Diagramm

(Analogie zu GEIGER-NUTTALL)

- **Absorptionsgesetz:**

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)d}, \quad I = I_0 e^{-\mu x}$$

$$\rho = \frac{m}{A \cdot x} = \frac{d}{x} \quad d = \text{Flächenmasse}$$

$$d = \rho \cdot x, \quad \left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \mu^* \quad \mu^* = \text{Massenschwächungskoeffizient}$$

$$\mu = \text{linearer Schwächungskoeffizient}$$

- **Selbstabsorption:**

$$I = I_0 f \frac{1 - e^{-\mu^* d}}{\mu^* d}$$

- **Rückstreuung:**

$$p_r = aZ^b \quad \text{mit} \quad p_r = \frac{Z_{\text{mit}} - Z_0}{Z_{\text{ohne}} - Z_0}$$

Z = Ordnungszahl des Rückstreumaterials

Z<sub>mit</sub>, Z<sub>ohne</sub>: Zählraten mit und ohne Rückstreumaterial

Z<sub>0</sub>: Nulleffekt

- **Ablenkung im Magnetfeld**

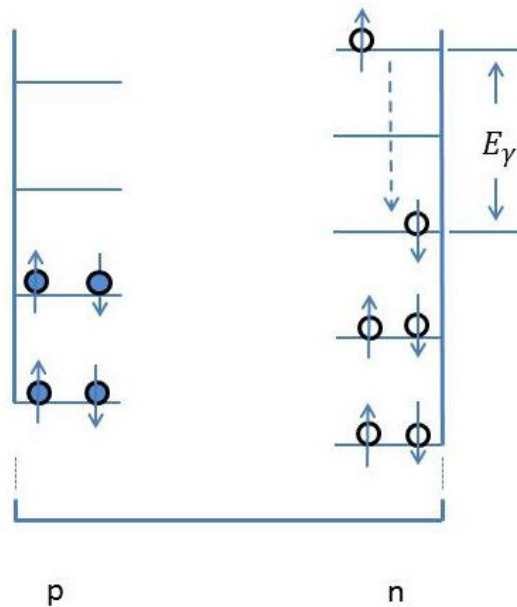
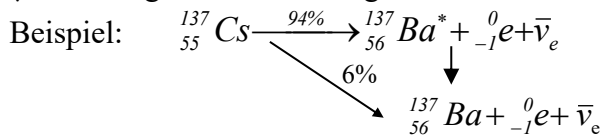
**- Energie-Reichweite: empirische Beziehung**

z. B. FLAMMERSFELD für  $0 \leq E_{\max} < 3\text{MeV}$

$$\frac{E_{\max}}{\text{MeV}} = 1,92 \sqrt{\left(\frac{d_{\max}}{\text{g cm}^{-2}}\right)^2 + 0,22 \frac{d_{\max}}{\text{g cm}^{-2}}}$$

**1.2.3.3  $\gamma$ -Strahlung**

- angeregter Kern: Isomer unterscheidet sich durch Kernspin  $\rightarrow$  elektr. und magnetisches Moment
- $\gamma$ -Strahlung: Linienstrahlung



**Abb. 10:**  $\gamma$ -Umwandlung im Schalenmodell

- ganzzahlige Drehimpulsänderung  
 $l = 1$  Dipolstrahlung  
 $l = 2$  Quadrupolstrahlung  
 allgemein Multipolstrahlung
- Ungleichung für Kernspins von Anfangs- und Endzustand:  
 $(I_a - I_e) \leq l \leq I_a + I_e$
- außerdem Erhaltung der Parität  
 $P_a \cdot P = P_e$
- $l$ : Multiplettordnung  $2^l$
- Parität  $(-1)^{l+1}$ : magnetische Strahlung  
 $(-1)^l$ : elektrische Strahlung

## - Eigenschaften der $\gamma$ -Strahlung

Nachweis über Sekundärelektronen

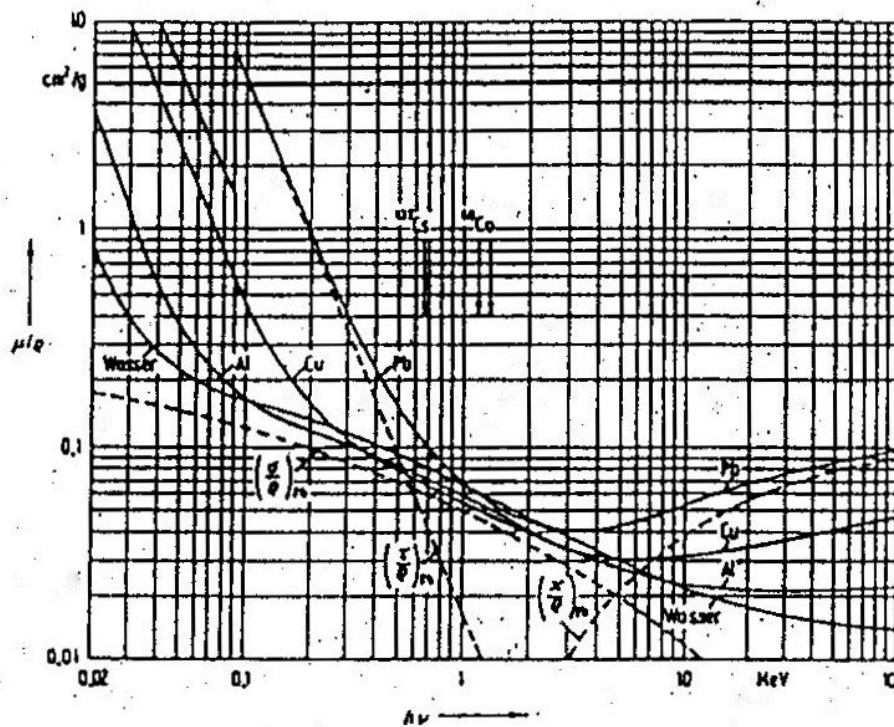
- Fotoeffekt
- COMPTONeffekt
- Paarbildung

### Absorptionsgesetz

$$I = I_0 e^{-\mu^* d}, I = I_0 e^{-\mu x}$$

$$\mu^* = \tau + \delta + \kappa$$

$$\mu^* = f(E_\gamma)$$



**Abb. 11:** Massen-Schwächungskoeffizienten  $\mu/\rho$  von Wasser, Al, Cu und Pb für Photonen mit Energien von 0,02 bis 100 MeV  
gestrichelt: einige Teilkoeffizienten für Pb (nach Siemens AG, Medizinische Technik, Daten, Formeln, Fakten, (1988))

## - MÖBBAUER-Effekt

Kern erhält durch emittiertes Gammaquant Rückstoß

→ Quant hat geringere Energie

→ kann nicht vom gleichen Kern absorbiert werden.

Resonanzabsorption: durch mechanisches Bewegen der Quelle Energiezufuhr

Anwendungen: Messung geringster Energiedifferenzen

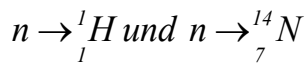
Beispiele: - Hubarbeit der Photonen im Gravitationsfeld

- Isomerieverschiebung (Einfluß chem. Bindung)

- Hyperfeinstrukturaufspaltung durch lokale elektrische und magnetische Felder in Kernnähe

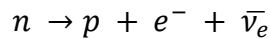
### 1.2.3.4 Neutronen

- 1932 CHADWICK: Entdeckung mit Nebelkammerversuchen:  
Impuls- und Energiesatz auf Stöße anwenden



$$\Rightarrow m_n = 1,15 m_p$$

- Lebensdauer:



$$\Rightarrow T_{1/2} = (880,1 \pm 1,1) \text{ s gemessen an ultrakalten Neutronen (2012)}$$

- **Einteilung der Neutronen**

schnelle Neutronen: 0,5 - 10 MeV

langsame Neutronen: < 1 keV

- thermische Neutronen: 0,02 eV

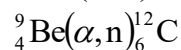
- kalte Neutronen: < 10 meV

- ultrakalte Neutronen:  $v < 160 \text{ m/s} = 0,1 \text{ meV}$

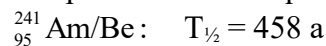
- **Erzeugung von Neutronen:**

- \* **Neutronenquellen**

z. B. ( $\alpha, n$ )-Prozeß



Beispiel: Americiumquelle



Neutronenflußdichte:  $\varnothing \approx 10^{10} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

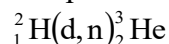
Spektrum: kontinuierlich bis  $\approx 11 \text{ MeV}$

- \* **Neutronengenerator:**

Deuteronen im Zyklotron beschleunigt und auf Target geschossen

→ Abspaltung von Neutronen, Protonen bleiben im Beschleuniger

Beispiel:



Neutronen sind monoenergetisch,  $E_n \approx 2,5 \text{ MeV}$

- \* **Kernreaktor:**

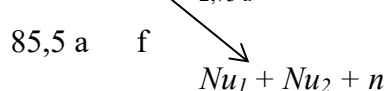
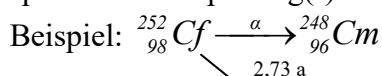
Entstehung bei Kettenreaktion, Gemisch aus primären Spaltungsneutronen und gebremsten Neutronen

Forschungsreaktoren:

$$\varnothing \approx 10^{17} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Bestrahlungskanäle für Aktivierungsreaktionen

spontane Kernspaltung(f):

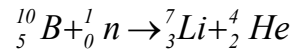


- **Eigenschaften der Neutronen:**

Nachweisprinzipien:

- elastische und unelastische Streuung
- Kernumwandlungen verbunden mit
  - Emission geladener Teilchen
  - Aktivierung von Nukliden

Zählung: (1) BF<sub>3</sub>-Zählrohr für thermische Neutronen



(2) HORNYAK-Zähler: Szintillationszähler

Szintillator: ZnS für Rückstoßprotonen + Plexiglas

Energiemessung: für schnelle Neutronen

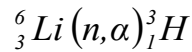
(1) Rückstoßprotonenspektrometer  $E_p = E_0 \cos^2\varphi$

Detektoren: - wasserstoffhaltige Zählgase in Proportionalzählrohren

- org. Szintillatoren in Szintillationszählern

- Kunststofffolien auf HL-Detektoren

(2) Kernreaktion



${}^6_3LiF$  – Folien auf HL – Detektoren

- **Absorption:**

$$I = I_0 e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

$\lambda$  = Relaxationsdicke

ultrakalte Neutronen: äußere Totalreflexion: langsame Neutronen stärker gebeugt als schnelle

⇒ „Aufbewahren“ - Speichern in Fallen

## 2 RÖNTGEN-Strahlung

- **Erzeugung:** Aufprall beschleunigter Elektronen auf Metalloberflächen

$$eU = \frac{1}{2}mv^2$$

- **Bremsstrahlung:** kontinuierliches Spektrum

$$h\nu = \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_2^2)$$

kurzwellige Grenze:

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{hc}{\lambda_{\text{grenz}}} = eU$$

$$\lambda_{\text{grenz}} = \frac{hc}{eU}$$

⇒ DUANE-HUNT'sches Gesetz:

$$U\lambda_{\text{grenz}} = \frac{hc}{e}$$

Je höher die Beschleunigung, desto kürzer die Wellenlänge, desto höher die Energie

- **Charakteristische RÖNTGENstrahlung:**  
abhängig vom Bremsmaterial  
WW von beschleunigten Elektronen und Hüllenelektronen  
des Bremsmaterials  
⇒ Herauslösen von Elektronen von oberen Schalen und  
Abgabe charakteristischer Linienstrahlung

MOSELEY-Gesetz:

$$\frac{1}{\lambda} = C_1(Z - C_2)^2$$

$$C_1 = R_\infty \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

$R_\infty$ : RYDBERGFrequenz

$C_2$ : Abschirmkonstante: innere Elektronen schirmen Kern  
von äußeren Elektronen ab

- Feinstruktur: neben Hauptquantenzahl noch Nebenquantenzahl  $l$   
und Spinquantenzahl  $s$   
Auswahlregeln:  $\Delta n = \pm 1, \pm 2, \dots$   
 $\Delta l = \pm 1$   
 $\Delta s = 0, \pm 1$
- Sekundärstrahlung:  
Erzeugung charakteristischer RÖNTGENstrahlung sekundär durch  
RÖNTGENstrahlung

## - RÖNTGEN-Einrichtungen

RÖNTGEN-Strahler:

Vakuumpipeline mit

- Katode und Heizung
- Fokussierungselektrode
- Anode (Antikatode): Wolfram bzw. -Legierungen,  
Molybdän

Hochspannung beträgt für  
medizinische Diagnostik: 20 - 150 keV  
Materialprüfung: - 400 keV

-Typen:

- Drehanodenröntgenröhre: Herabsetzen der thermischen Belastung
- Festanodenröhre: Abführen der Wärme durch Öl oder Wasser

- Änderung der spektralen Verteilung durch Filter:

Al  
Cu  
Erbium

- Richtungsverteilung:  
Abhängigkeit von der Energie
  - dicke Targets und  $E < 100 \text{ keV}$ : fast Isotropie
  - bei hohen Energien starke Vorwärtsstreuung
  - dicke schräge Targets: seitliche Emission
  
- Schwächung der RÖNTGENstrahlen analog  $\gamma$ -Strahlung durch  
Streuung  $\delta_a$  an Atomen  
Absorption  $\tau_a$   
 $\Rightarrow$  atomarer Wirkungsquerschnitt  
 $\mu_a = \delta_a + \tau_a$  mit  $\delta_a \ll \tau_a$   
 Ordnungszahlabhängigkeit der Absorption:  
 $\tau_a = c \lambda^3 Z^4$   
 Absorptionskanten: K-L-, ...  
 Absorption führt zur Ionisierung der Atome

### 3 Strahlenschutz-Messtechnik

#### 3.1 Kernstrahlungsdetektoren

##### 3.1.1 Ionisationsdetektoren

###### (1) Gasionisationsdetektoren

- Wirkungsweise  
ionisierende Teilchen erzeugen Elektronen-Ionenpaare  
primär erzeugte Ladung  

$$Q_p = e \frac{E_{abs}}{\bar{E}_i}$$
 $E_{abs}$ : im Detektormedium absorbierte Energie  
 $\bar{E}_i$  mittlere Bindungsenergie eines Ladungsträgerpaares  
 unter Einfluß des elektrischen Feldes wandern Ladungsträger zu den Elektroden  
 $\Rightarrow$  Signalladung  $Q$   

$$Q_p^\alpha > Q_p^\beta$$
- Ionisationskammern  
Füllgas: - Luft
  - $\text{H}_2$
  - $\text{N}_2$
  - Ar
  - $^3\text{He}$
  - $\text{BF}_3$

$Q = Q_p$ : Sättigungsbereich

###### Einteilung nach

###### 1. elektrischer Funktion:

- Stromkammer: mittlerer Ionisationsstrom durch kontinuierliches Absaugen der gebildeten Ladungsträger, Messung mit Schwingkondensatorelektrometer

- Integrationskammer: über bestimmte Zeit gesammelte Ladung, Auflade- oder Entlademethode
- Impulskammer: Einzelimpulse

## 2. Bauform:

- Plattenkammer
  - Zylinderkammer
  - 4  $\pi$ -Kammer: Quellen ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) im Kammerinneren  
Messung der RÖNTGEN- und Gammastrahlung: über Sekundärelektronen der Kammerwände  
Messung von Neutronen:
    - Gasfüllung  $\text{BF}_3$
    - Wände mit Bor belegt
- Anwendung:  
Dosimetrie und Strahlenschutz

## - Zählrohre:

### 1. Proportionalzählrohre

. **Prinzip:** Proportionalitätsbereich

$Q > Q_p$  durch Stoßionisation

$Q = A_g Q_p$  und  $n\gamma < 1$

$$A_g = \frac{n}{1 - n\gamma} \quad \text{Gasverstärkung}$$

$\gamma$  : Wahrscheinlichkeit für Erzeugung eines Fotoelektrons je Elektron

$n$ : Anzahl der Elektronen

### **Kennlinie:**

abhängig von

- Strahlungsart
- Verstärkung des Linearverstärkers
- Diskriminatorpegel

**Arbeitspunkt:** im Plateau, je nach Strahlenart

⇒ Möglichkeit der Unterscheidung verschiedener Strahlenarten

### **Anwendung:**

- Spektrometrie: Impulshöhe ist proportional der Energie  
RÖNTGENfluoreszenz  
MÖßBAUER-Spektrometrie
- Neutronennachweis

### 2. Auslösezählrohre

Auslösebereich:

$Q(U) \gg Q_p$  unabhängig von  $Q_p$

$10^6 < A_g < 10^8$

Lawinenbildung entlang der Anode

Totzeit: positive Raumladungswolke verringert Feldstärke

⇒ Lawinenbildung erlischt



$$\tau \approx 100 \mu\text{s}$$

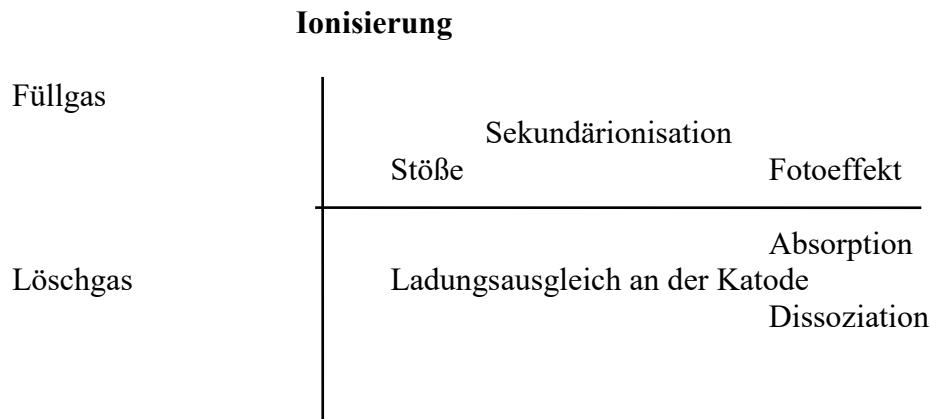
$$z_w = \frac{z}{1 - \tau_A}$$

$\tau_A$  = Auflösungszeit ;  $z_w$  = wahre Zählrate;  $z$  = gemessene Zählrate

selbstlöschende Zählrohre: TROST 1937

Füllgas: Argon

Löschgas: Alkohol oder Halogene



Kennlinie: Arbeitspunkt im Plateau

$$U_A = U_E + 100 \text{ V}$$

$U_E$ : Einsatzspannung

Plateauanstieg:

$$S = \frac{z(U_A + 50V) - z(U_A - 50V)}{z(U_A)}$$

$$S < \frac{10\%}{100V}$$

Nachweiseffektivität:

$\alpha$ -Strahlung:  $f_{\text{eff}} = 1$

$\beta$ -Strahlung:  $f_{\text{eff}} = 1$

$\gamma$ -Strahlung:  $f_{\text{eff}} \approx 0,01$

weiche RÖNTGENstrahlung:  $f_{\text{eff}} \approx 0,5$

Einteilung:

Löschgas: organisch gelöscht:  $U_A \approx 1000 \text{ V}$ ,  $U_{\text{imp}} \approx 1 \text{ mV}$

halogen gelöscht:  $U_A \approx 500 \text{ V}$ ,  $U_{\text{imp}} \approx 100 \text{ mV}$

Bauform:

Zylinderzählrohr:  $\beta$ -,  $\gamma$ -Strahlung

Fensterzählrohr:  $\alpha$ -,  $\beta$ -Strahlung

## (2) Festkörperionisationsdetektoren

Erzeugung von Elektronen - Defektelektronenpaaren

Beispiel: Halbleiterdetektor

**Prinzip:** radioaktives Teilchen gibt Energie in der Sperrschicht

(Raumladungszone) ab; Stromimpuls hängt von Anzahl der Elektronen-Loch-Paare ab.

**Eigenschaften:**

- hohes energetisches Auflösungsvermögen
- hohe Zeitauflösung ( $10^{-9}$ s)
- Nachweiseffektivität für
  - $\alpha, d, p : f_{\text{eff}} = 1$
  - $\gamma : f_{\text{eff}} : 0,1 - 0,6$  , abhängig vom Messvolumen
- geringer Nulleffekt

**Beispiele:**

- Oberflächensperrschichtdetektoren:
  - n-Silicium, Oberfläche oxidiert (Akzeptoren), danach mit Gold bedampft
  - Spektrometrie schwerer Teilchen
- Lithiumdriftdetektoren:
  - für niederenergetische  $\gamma$ -Strahlung 1 keV - 100 keV
  - Si(Li)
  - Ge(Li) bei  $T = 77$  K
- HP Ge-Detektoren (high purity):
  - Kühlung bei 77 K nur während des Betriebes,
  - Spektrometrie von  $\gamma$ -Strahlung: 10 keV - 10 MeV

**Anwendungen:**

- hochauflösende Kernspektrometrie
- Nuklearmedizin

### 3.1.2 Anregungsdetektoren

**(1) Thermo-Lumineszenzdetektoren:**

Speicherung der Anregungsenergie - Abgabe unter Lumineszenz bei Temperierung (Glowkurve)

**(2) Szintillationsdetektoren:**

- Prinzip der Energiemessung
  - Teilchen gibt Energie im Szintillatorkristall ab (Ionisation - Rekombination - Foton)
  - Fotonen einer Wellenlänge entsprechen der Energie des Teilchens
  - an Kathode des FSEV werden Elektronen freigesetzt
  - Beschleunigung zu Dynoden
  - Vervielfachung  $S$ , bei  $n$  Dynoden  $S^n$
  - an Anode Stromimpuls ( $1 \text{ Foton} \leq 10^{-4} \text{ A} \cdot 10^{-5} \text{ s}$ )
  - Impulsfläche proportional der Energie
  - am Arbeitswiderstand in Spannungsimpuls gewandelt
- Variante: Mikrokanal - Multiplier mit hoher Zeitauflösung
- Szintillatoren
  - NaI : Tl
  - ZnS : Ag
  - Anthracen
- Vorteile: hohe Zeitauflösung  $10^{-9}$ s
  - Nachweisempfindlichkeit:
    - energiereiche RÖNTGEN- und Gammastrahlen:  $f_{\text{eff}} \approx 1,0$
    - energiearme RÖNTGEN- und Gammastrahlen:  $f_{\text{eff}} \approx 0,5$
- Nachteile: hoher thermischer „Nulleffekt“
  - schlechte Energieauflösung bei niedrigerenergetischer Fotonenstrahlung

### 3.2 Strahlungsmessgeräte

- **Diskriminator:** Trigger mit regelbarer Schwellspannung  $U_D$   
Anwendung: Unterdrückung von Rauschimpulsen
- **Einkanalanalysator:**  
Zwei in Antikoinzidenz geschaltete Diskriminatoren  
nur Impulse mit Amplituden zwischen  $U_D$  und  $U_D + \Delta U_D$  werden weitergeleitet  
 $\Delta U_D$ : Kanalbreite (Pegelbreite, Fenster) bestimmt energetisches Auflösungsvermögen  
Kanäle (Pegel) werden nacheinander einzeln abgefragt
- **Vielkanalanalysator (MCA)**  
Impulse werden entsprechend ihrer Höhe zeitgleich in verschiedene Kanäle sortiert  
Anzahl der Kanäle bestimmt energetische Auflösung (z. B. 512, ..., 8192)

## 4 Dosimetrie und Strahlenschutz

### 4.1. Größen und Einheiten

#### (1) Strahlungsfeldgrößen

- Strahlungsfeld: Raumgebiet, das von emittierten Teilchen einer Strahlungsquelle gebildet wird; Strahlungsfelder haben geladene und ungeladene Teilchen, zwischen denen ständig Energieaustausch stattfindet
- Teilchenflußdichte:

$$\varphi = \frac{d^2 N}{dA dt}$$

- Teilchenfluenz: Zeitintegral der Teilchenflußdichte

$$\Phi = \int_{t_1}^{t_2} \varphi dt = \frac{dN}{dA}$$

- analog für Energieflußdichte  $g$  und Energiefluenz  $G$  Einführung vektorieller Größen:

Energie durch gerichtetes Flächenelement

$$\text{vektorielle Energieflußdichte } \vec{g} = \frac{d^2 \vec{E}}{dA dt}$$

$$\text{vektorielle Energiefluenz } \vec{G} = \frac{d\vec{E}}{dA}$$

- Einführung von Hilfsgrößen:

Kerma (K): Kinetic energy released in matter

Kinetische Energie geladener Teilchen, die durch ungeladene freigesetzt werden

Bremsstrahlungsverlust (B):

Energie ungeladener Teilchen, die durch geladene entstehen

#### (2) Aktivität:

$$A = \frac{dN}{dt}$$

$$A = \lambda \cdot N$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

$$[A] = 1\text{Bq} = 1 \text{ Umwandlung s}^{-1}$$

$$(1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ s}^{-1})$$

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

$$t_1 = 7 T_{1/2}: \quad A < \frac{A_0}{100}$$

$$t_2 = 10 T_{1/2}: \quad A < \frac{A_0}{1000}$$

**(3) Spezifische Aktivität:**

$$A_{\text{spez}} = \frac{A}{m} = n \cdot \lambda [A_{\text{spez}}] = \frac{1\text{Bq}}{\text{kg}} \quad \text{mit } n = \frac{N_A}{M}$$

Beispiele: Ra  $\approx 3,7 \cdot 10^{10}$  Bq/g  
 $^{60}\text{Co} \approx 4,7 \cdot 10^{12}$  Bq/g

Co also 100 mal gefährlicher!

**(4) effektive Halbwertszeit:**

$$T_{1/2,\text{eff}} = \frac{T_{1/2,p} \cdot T_{1/2,b}}{T_{1/2,p} + T_{1/2,b}}$$

mit  $T_{1/2,p}$  physikalische und  $T_{1/2,b}$  biologische Halbwertszeit,  
berücksichtigt bei nuklearmedizinischen Untersuchungen die Abnahme durch  
Radioaktivität und biologische Ausscheidung

**(5) Physikalische Dosisgrößen**

**- Ionendosis:**

$$J = \frac{dQ}{dm_a} = \frac{dQ}{\rho_a dV} \quad [J] = 1\text{Ckg}^{-1}$$

$$(1R \triangleq 2,58 \cdot 10^{-4})\text{Ckg}^{-1}$$

$$R = \text{RÖNTGEN}$$

**- Energiedosis  $D_{\text{med}}$**

(med = Medium, von Absorber aufgenommene Energie)

$$D_{\text{med}} = \frac{dE_{\text{med}}}{dm_{\text{med}}} = \frac{1}{\rho_{\text{med}}} \frac{dE_{\text{tran}}}{dV}$$

$$[D_{\text{med}}] = 1\text{Gy} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$(1 \text{ rad} \triangleq 10^{-2} \text{ Gy})$$

L. H. Gray (1905-1965, ehem. Vizepräsident der ICRP)  
ICRP: International Commission on Radiological Protection

### - Kerma K

auf Medium übertragene Energie (Summe der Anfangsenergien der Strahlung)

$$K_{med} = \frac{dE_{trans}}{dm_{med}} = \frac{1}{\rho_{med}} \cdot \frac{dE_{trans}}{dV}$$

$$[K] = 1Gy$$

## 4.2 Dosisgrößen im Strahlenschutz

zwei Kategorien:

- Messgrößen für äußere Strahlung
- Berechnung der Körperdosis

### Messgrößen für äußere Strahlung

- Äquivalentdosis H:

$$H = QD$$

mit Qualitätsfaktor  $Q = f(\text{LET})$ , LET: linearer Energietransfer  
( genauere Informationen siehe Krieger 2002, S.222 ff.)

$[H] = 1Sv = 1J/kg$  ; nicht messbar, da Q bekannt sein muß, für Gamma- und RÖNTGENstrahlung nach Definition  $Q = 1$

R.M. Sievert (1896 – 1966; Präsident der ICRP von 1956 – 62 )  
( $1Sv \triangleq 100 rem$ )

### - Personendosis

*Tiefen- Personendosis  $H_p(10)$* : Äquivalentdosis in 10 mm Tiefe im Körper an der Tragestelle des zur Messung vorgesehenen Dosimeters

*Augenlinsen- Personendosis  $H_p(3)$* : Äquivalentdosis in 3 mm Tiefe im Körper an der Tragestelle des zur Messung vorgesehenen Dosimeters

*Oberflächen- Personendosis  $H_p(0,07)$* : Äquivalentdosis in 0,07 mm Tiefe im Körper an der Tragestelle des zur Messung vorgesehenen Dosimeters

### - Ortsdosis

*Umgebungs- Äquivalentdosis  $H^*(10)$* : Äquivalentdosis , die am interessierenden Punkt des tatsächlichen, ausgerichteten und aufgeweiteten Strahlungsfeldes in 10 mm Tiefe auf den senkrecht zur Einfallrichtung entgegengesetzt orientierten Radius der ICRP- Kugel erzeugt wird

*Richtungs- Äquivalentdosis  $H'(3, \Omega)$*  : Äquivalentdosis, die am interessierenden Punkt im tatsächlichen aufgeweiteten Strahlungsfeld in 0,07 mm Tiefe in Richtung  $\Omega$  orientierten Radius der ICRP- Kugel erzeugt wird

*Richtungs- Äquivalentdosis  $H'(0,07, \Omega)$*  : Äquivalentdosis, die am interessierenden Punkt im tatsächlichen aufgeweiteten Strahlungsfeld in 3 mm Tiefe in Richtung  $\Omega$  orientierten Radius der ICRP- Kugel erzeugt wird

Erläuterungen:

- *aufgeweitetes Strahlungsfeld*: idealisiertes Strahlungsfeld hat gleiche Werte von Teilchenflussdichte, Energie- und Richtungsverteilung der Strahlung an allen Punkten wie tatsächliches Strahlungsfeld
- *aufgeweitetes und ausgerichtetes Strahlungsfeld*: idealisiertes Strahlungsfeld, indem Strahlung aufgeweitet und in eine Richtung gerichtet
- *ICRP- Kugel*: kugelförmiges Phantom mit Durchmesser 30 cm aus ICRP- Weichteilgewebe ( gewebeäquivalentes Material  $\rho = 1g/cm^3$ , bestehend aus 76,2% O, 11,1%C, 10,1% H, 2,6% N )

### Berechnung der Körperdosis

- Berechnung der Organ- Äquivalentdosis  $H_T$

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R}$$

$H_{T,R}$  = Organ-Äquivalentdosis eines Organs T ( gemittelt )

$w_R$  = Strahlungswichtungsfaktor

$D_{T,R}$  = Organ- Energiedosis durch Strahlung R

- *gesamte Organ- Äquivalentdosis*

bei Vorliegen mehrerer Strahlungsarten oder –energien mit verschiedenen  $w_R$

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

Berechnungen erfolgen für idealisierte Personen ( Referenzperson ) nach Geschlecht getrennt:  $H_T^M$  Männer,  $H_T^F$  Frauen

**Tabelle 6: Strahlungs- Wichtungsfaktor**

Strahlungsart	Strahlungs-Wichtungsfaktor $w_R$
Fotonen	1
Elektronen und Myonen	1
Protonen und geladene Pionen	2
Alphateilchen, Spaltfragmente, Schwerionen	20
Neutronen, Energie $E_n < 1MeV$	$2,5 + 18,2 e^{-[\ln(E_n)]^2/6}$
Neutronen, $1MeV \leq$ Energie $E_n \leq 50 MeV$	$5,0 + 17,0 e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}$
Neutronen, Energie $E_n < 50 MeV$	$2,5 + 3,25 e^{-[\ln(0,4E_n)]^2/6}$

- *Folge- Organ- Äquivalentdosis  $H_T(\tau)$* :

Zeitintegral der Organ- Äquivalentdosis im Gewebe oder Organ T Inkorporation radioaktiver Stoffe zum Zeitpunkt  $t_0$ :

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T(t) dt$$

$\tau$  für Erwachsene ein Zeitraum von 50 Jahren  
für Kinder bis zum 70. Lebensjahr

## Berechnung der effektiven Dosis

berücksichtigt die unterschiedliche Strahlenempfindlichkeit verschiedener Organe und Gewebe mit Gewebe- Wichtungsfaktor  $w_T$ , Mittelung über männliche und weibliche Referenzpersonen

$$E = \sum_T \frac{w_T}{2} (H_T^M + H_T^F)$$

bei innerer Exposition wird die nach Bezugszeitpunkt verbleibende Exposition aufgrund des Verbleiben des Nuklids im Körper ( effektive Folgedosis ) ermittelt

$$E(T) = \sum_T w_T H_T(\tau)$$

der Zeitraum  $\tau$  der Integration ist für Erwachsene 50 Jahre, für Kinder bis zum 70. Lebensjahr,

**Tabelle 7: Gewebe- Wichtungsfaktor  $w_T$**

Gewebe oder Organe	Gewebe-Wichtungsfaktor $w_T$
1.Knochenmark (rot)	0,12
2.Dickdarm	0,12
3.Lunge	0,12
4.Magen	0,12
5.Brust	0,12
6.Keimdrüsen	0,08
7.Blase	0,04
8.Speiseröhre	0,04
9.Leber	0,04
10.Schilddrüse	0,04
11.Haut	0,01
12.Knochenoberfläche	0,01
13.Gehirn	0,01
14.Speicheldrüsen	0,01
15.Andere Organe oder Gewebe <sup>1)</sup>	0,12

1) Verfolgen der Äquivalentdosis in einem Organ oder Gewebe-Wichtungsfaktor für andere Organe oder Gewebe bezieht sich auf das arithmetische Mittel der Dosen der 13 Organe und Gewebe für jedes Geschlecht, die nachfolgend aufgelistet sind. Restliche Gewebe: Nebennieren, obere Atemwege, Gallenblase, Herz, Nieren, Lymphknoten, Muskelgewebe, Mundschleimhaut, Bauchspeicheldrüse, Prostata (Männer), Dünndarm, Milz, Thymus, Gebärmutter/Gebärmutterhals (Frauen).

### 4.3 Dosismessungen

#### (1) Prinzipien:

- Sondenmethode:

dosimetrische Sonde: Strahlungsdetektor, der dosis- bzw. dosisleistungsabhängigen Meßwert liefert

Problem: gleiches Verhalten von Sonde und Material gegenüber

Strahlung dazu notwendig

- Sekundärteilchengleichgewicht:

Summe der kinetischen Energien aller in ein Volumenelement eintretenden geladenen Sekundärteilchen ist gleich der Summe der kinetischen Energien aller aus diesem Volumenelement austretenden Sekundärteilchen

- BRAGG-GRAY-Prinzip:

Sonde ändert nicht Richtung und Energie der Teilchen

von indirekt ionisierenden Teilchen in der Sonde freigesetzte Sekundärteilchen verfälschen nicht das Meßergebnis

⇒ Sondenabmessungen klein gegen mittlere Reichweite der geladenen Teilchen

#### (2) Meßverfahren:

- *Kalorimetrie-Methode:*

Absorberkörper mit thermischer Isolation

Meßfühler zur Temperaturanzeige

$$D = c K \Delta T$$

mit c: spezifische Wärmekapazität des Absorbers

K: Korrekturfaktor

$\Delta T$ : Temperaturdifferenz

Beispiel:

1 kg Wasser mit  $D = 1$  Gy bestrahlt  $\Rightarrow \Delta T \approx 2 \cdot 10^{-4}$  K

- *Ionisationsdosimetrie:*

Vorteil: mittlere Bildungsenergie eines Ionenpaares  $\bar{E}_i$  weitgehend unabhängig vom Strahlungsfeld

Messung der Ladung meist in Luft

im amtlichen Verkehr nicht zugelassen, aber für Messverfahren wichtig

- *Chemische Dosimetrie:*

z.B. FRICKE- Eisensulfatdosimeter : Oxidation von  $Fe^{2+}$ - Ionen in sauerstoffhaltiger schwefelsaurer Lösung

- *Festkörperdosimetrie:*

z. B. Thermolumineszenzdosimeter: durch Radioaktivität angeregte Speicherphosphore senden bei Ausheizen Licht aus, Lichtmenge ist proportional der Energiedosis

#### Grundregel zur Verringerung der externen Strahlenexposition:

- Verminderung der **A**ufenthaltsdauer im Strahlungsfeld
- Vergrößerung des **A**bstandes zwischen Strahlungsfeld und exponierter Person
- Verminderung der Ortsdosisleistung durch **A**bschirmung des Strahlungsfeldes (drei **A** des praktischen Strahlenschutzes nach Krieger 2002)



oder als Gleichung

$$D = k_{\gamma} \cdot \frac{A \cdot t}{r^2} \cdot B \cdot e^{-\sum_i \mu_i x_i}$$

$k_{\gamma}$  = spez.  $\gamma$ -Strahlen-Konstante

Vergleich von  $\gamma$ -Strahlen unter Standardbedingungen

B = Aufbaufaktor;  $B \geq 1$ , Streustrahlungsvergrößerung

$\frac{1}{r^2}$  gilt nur für Punktstrahler

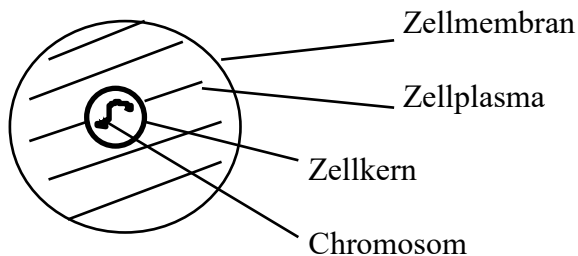
$\mu_i$  = linearer Schwächungskoeffizient

$x_i$  = Dicke der Abschirmung

## 5 Grundlagen der Strahlenbiologie

### 5.1 Wirkungen ionisierender Strahlung

- menschlicher Körper aus Zellen aufgebaut
- Schema einer Zelle



- große Zahl von Zellteilungen:  $10^{10}$  in 24 h  $\Rightarrow$  Auftreten von Fehlern
- Wirkung ionisierender Strahlung
  - direkt: Veränderung von Chromosomen (Erbgut)
  - indirekt: Zellgifte (freie Radikale, Peroxide)
- Reaktionskette: Mischung von physikalischen, chemischen und biologischen Vorgängen
- Vorgänge in Wasser von besonderer Bedeutung: Mensch besteht zu mehr als der Hälfte aus Wasser
- Strahlenwirkung bis zu bestimmten Dosen nicht negativ, da Reparatur-, Regenerations- und Erholungsvorgänge auf allen Stufen des Organismus stattfinden
- schwer reparierbar: DNS-Doppelstrangbrüche
  - schwere Teilchen treffen häufiger Doppelstränge
  - Sauerstoff erhöht die Wahrscheinlichkeit für Doppelstrangbrüche

## 5.2 Strahlenbelastungen

- innere (Inkorporation): radioaktive Nuklide gelangen über  
Luftwege (Inhalation)  
Magen-Darm-Trakt (Ingestion)  
Haut (Submersion)  
in den Körper  $\Rightarrow$  Strahlenbelastung einzelner Organe
- äußere: Aufenthalt in Strahlungsfeldern

## 5.3 Strahlenschäden

### (1) nicht stochastische Schäden:

- oberhalb eines Wertes nachweisbarer Schaden
- Schaden steigt mit Belastung
- Latenzzeit: Zeit zwischen Absorption der Strahlung und Reaktion des Organismus
- Frühschäden: treten nach kurzer, hoher Bestrahlung auf  
Hautrötung - Verbrennungen ( $\approx 6$  Sv)  
Geschwüre  
Haarausfall

### (2) stochastische Schäden: Zufallsschäden

- Spätschäden:  
Akkumulation kleiner Dosen über lange Zeiträume, große Latenzzeit  
Eintrittswahrscheinlichkeit wächst mit der Dosis, aber Schweregrad  
hängt nicht von der Dosis ab  
nicht für den Einzelnen voraussagbar
- somatische Schäden:  
Induktion von Krebs und Leukämie
- genetische Schäden:  
Veränderungen des Erbgutes (Mißbildungsrate allgemein z.Z. 6 %)

### $\Rightarrow$ Aufgabe des Strahlenschutzes:

- Verhinderung nichtstochastischer Schäden
- Senken der Wahrscheinlichkeit für stochastische Schäden  
ALARA-Prinzip as low as reasonably achievable  
(So gering, wie mit vernünftigem Aufwand möglich)

## 5.4. Grenzwerte

- Empfehlungen der ICRP werden in nationalen Strahlenschutzverordnungen festgeschrieben (StrlSchV)
- Schutz der Bevölkerung und Umwelt in Abschnitt 6 der StrlSchV (BRD)
- Grenzwerte der Bevölkerung § 80 Abs. 1 und 2
- Grenzwerte für beruflich strahlenexponierte Personen: § 71  
Kategorie A                    )  
Kategorie B                    >       Angabe von 4 Teilkörperdosen
- Grenzwerte für fliegendes Personal  $< 1$  mSv im Jahr ( kosmische Strahlung )  
. Kategorie A  $> 6$  mSv im Jahr  
. Kategorie B  $> 1$  mSv im Jahr

- Grenzwerte für Strahlenschutzbereiche (§ 52 ):

*Überwachungsbereich:* eff. Dosis > 1mSv

oder Organ- Äquivalentdosis > 50 mSv (Hände, Unterarme, Füße, Knöchel )

oder lokale Hautdosis > 150 mSv

*Kontrollbereich:* eff. Dosis >6 mSv

oder Organ- Äquivalentdosis > 15 mSv ( Augenlinse )

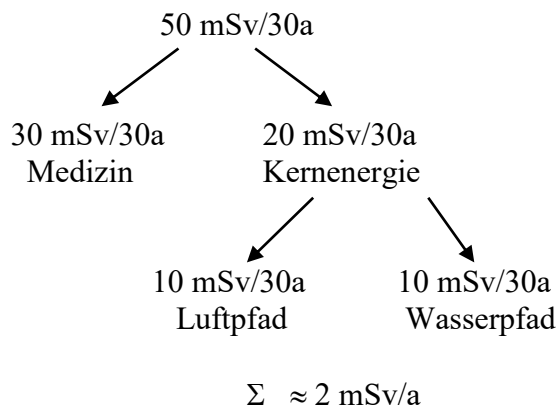
oder > 150 mSv ( Hände, Unterarme, Füße, Knöchel )

oder lokale Hautdosis > 150 mSv

*Sperrbereich:* Ortsdosisleistung > 3mSv/h

Grenzwerte für Bereiche, die nicht Strahlenschutzbereiche sind nach ICRP-Empfehlung:

genetisch signifikante Dosis für Bevölkerung ist auf 50 mSv in 30 Jahren zu begrenzen, davon 20 mSv für friedliche Nutzung der Kernenergie und 30 mSv für Medizin und sonstige künstliche Strahlenexposition



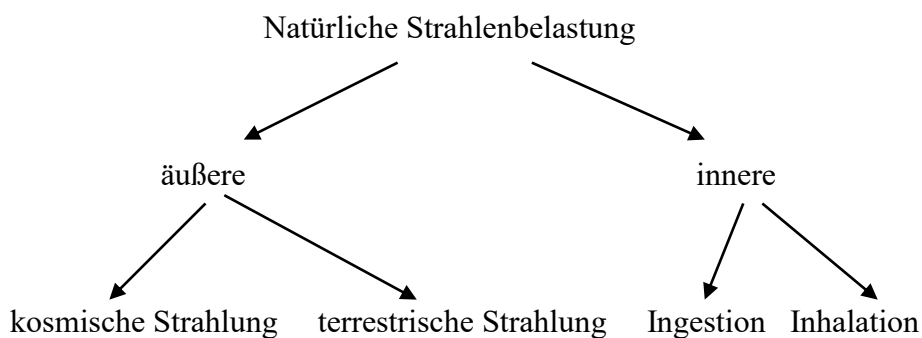
- Grenzwerte für Oberflächenkontaminationen (Anlage 4, Tabelle 1)

- Freigrenzen (Anlage 4, Tabelle 1)

- Strahlenschutz in Schulen und bei Lehr- und Ausbildungsverhältnissen § 82

## 6 Strahlenbelastung des Menschen

### 6.1 Natürliche Strahlenbelastung



**(1) kosmische Strahlung:**

Teilchenflußdichte  $\varnothing \approx 10 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ , Energie:  $< 10^{14} \text{ MeV}$

- Primäre Strahlung:  
90 % hochenergetische Protonen, 10 %  ${}^4_2\text{He}$  – Ionen, Elektronen, Photonen, Neutrinos  
Herkunft: insgesamt unklar  
galaktische kosmische Strahlung: Milchstraßensystem der Erde  
solare kosmische Strahlung:  $E < 40 \text{ MeV}$   
 $\Rightarrow$  Durchdringen von Flugzeugen  
Sonnenfleckenaktivität: 11-Jahres-Zyklus des Maximums  
 $\Rightarrow$  Verringerung der galaktischen Komponente durch Ablenkung und Erhöhung der solaren Komponente
- Sekundäre Strahlung:  
WW der primären Strahlung mit Atmosphäre, Kaskaden (Schauer) von Neutronen, Protonen, Pionen, Kaonen  
Strahlungsgürtel: Ablenkung zu Polen, van ALLEN - Strahlungsgürtel
- Höhenabhängigkeit der Strahlenbelastung:  
NN: 0,03  $\mu\text{Sv/h}$  ( $\approx 0,3 \text{ mSv/a}$ )  
10 km: 200fache Erhöhung  $\approx 5 \mu\text{Sv/h}$  (60 mSv/a)
- Breitenabhängigkeit der Strahlenbelastung  
Maximum bei  $50^\circ - 90^\circ$  (5-fach gegenüber Äquator für Neutronen, 2-fach für Gesamtstrahlung)  
 $\Rightarrow$  **Strahlenbelastung beim Flugverkehr:**  
Meßflüge ergaben große Schwankungen  
durch atmosphärische Schwankungen  
Meßgeräte nicht für Strahlungsfelder in Flughöhen ausgelegt  
Richtwert für Vielflieger in der BRD:  
5 mSv/500 Flugstunden pro Jahr  
 $\Rightarrow$  2wöchiger Urlaub im Hochgebirge 0,04 mSv
- Interne Exposition durch kosmogene Nuklide:  
Tritium-3  
Kohlenstoff-14  
Beryllium-7  
Natrium-22

**(2) Terrestrische Strahlung**

- **äußere Bestrahlung** durch langlebige Radionuklide (K-40, Th-232, U-238)  
in Gesteinen (Granit, Quarzporphyr)  
Gebäuden  
starke Schwankungen in Abhängigkeit von Gesteinsart, Bedeckung und geografischer Lage  
 $\Rightarrow$  mittlere Belastung von  $\approx 0,5 \text{ m Sv/a}$
- **innere Bestrahlung** durch natürliche Radionuklide im Körper (K-40, Po-210, Ra-226, Rn-222, Rn-220); am bedeutsamsten ist **Radonbelastung:**  
Entstehung aus Zerfallsreihen von Thorium und Uran  
Edelgase, geringe HWZ  
Entstehung von Polonium-214, Blei-214, Wismut-214  
Ablagerung in der Lunge (Schneeberger Krankheit)

- Schwankungen in Abhängigkeit von
- geografischer Lage (besonders Uranbergbauggebiete)
  - Luftdruck (hoher Druck → niedrige Radonkonzentration)
  - Lage im Gebäude (Keller besonders gefährdet)
- ⇒ **gesamte mittlere Strahlenexposition aus natürlichen Quellen:  $\approx 2$  mSv/a**

## 6.2 Zivilisatorische Strahlenbelastung

- (1) **Kernwaffenexperimente**
- (2) **Radionuklide in Nahrung und Wasser**  
(z.B. Verzehr von 10 kg Maronen: 0,07 mSv)
- (3) **technische Konsumgüter**
  - Fernsehen( Röhrengeräte ): 2 - 3 h/d und  $r = 2,5$  m: ⇒ 0,03 mSv/a
  - Leuchtfarben
  - Glas- und Porzellanprodukte
  - elektrische Bauteile: Rauch- und Feuermelder
- (4) **Technik**
  - Werkstoffprüfung mit RÖNTGENstrahlen
  - Füllstands- und Dickenmessung
  - Aktivierungsanalyse (Nachweis von Spurenelementen)
- (5) **Forschung**
  - RÖNTGENspektroskopie und -struktur
  - Kernforschung
  - Elektronenmikroskopie
  - Beschleunigeranlagen
- (6) **Energiewirtschaft**
  - Kernkraftwerke: 0,08 - 3  $\mu$ Sv/a (Routinebetrieb)
  - Kohlekraftwerke: 0,03 - 1  $\mu$ Sv/a (Braunkohle: 1/6 von Steinkohle)
- (7) **Berufliche Strahlenexposition**  
Überwachung von 130 000 Beschäftigten in der BRD:  
mittlere jährliche Personendosis: 0,5 - 2 mSv/a
- (8) **Medizinische Strahlenbelastung**
  - Diagnostik: RÖNTGENstrahlen  
Radiopharmaka  
1500 Untersuchungen auf 1000 Einwohner ergaben:  
mittlere jährliche effektive Äquivalentdosis: 1 - 2 mSv/a
  - Therapie:
    - genetisch signifikante Dosen (Gonadendosis):  
Berechnung der Empfindlichkeit der Keimzellen bei verschiedenen Untersuchungen
    - somatisch signifikante Dosen  
Knochenmarkdosis  
Oberflächen(Haut)-dosis  
Organdosen

## (9) Strahlenbelastung durch Schulquellen

**Tabelle 7: Eigenschaften der Schulquellen**

Nuklid	Aktivität / kBq	Dosisleistung / $\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$	
		r = 1 cm	r = 10 cm
Na - 22	37	14	2
Co - 60	370	200	15
Kr - 85	185	1	1
Cs - 137	185	25	1,5

### Zusammenfassung

Strahlenexposition der Bevölkerung (Ganzkörperbestrahlung):

Natürliche Strahlenexposition	2 mSv/a
Medizinische Strahlenexposition	$\approx 1,5$ mSv/a
Strahlenexposition durch Kernkraftwerke	0,003 mSv/a

- 
- Durchschnittsmensch 5 mSv/a  $\approx 0,3$  Sv im Leben
  - überwachtes Personal 50 mSv/a
  - Auftreten von Strahlenkrankheiten  $> 2$  Sv
  - Letaldosis 4 Sv (50 % Überlebenschance)

## Aufgaben mit Lösungen zum Strahlenschutz

1 Berechnen Sie die Aktivität von 1 g  $^{238}\text{U}$ !

*Lösung:*

$$m = 1 \text{ g}; \quad M = 238 \text{ g mol}^{-1}; \quad \lambda = 4,88 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}; \quad 1 \text{ mol} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ Teilchen.}$$

$$A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{m}{M} \lambda$$

$$A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1 \cdot 4,88 \cdot 10^{-18}}{238} \text{ Bq}$$
$$= 12,3 \text{ kBq}$$

2 Berechnen Sie die Aktivität für  $^{192}\text{Ir}$  nach 120 Tagen, wenn die Anfangsaktivität  $A_0 = 1 \cdot 10^{12} \text{ Bq}$  ( $T_{1/2} = 74 \text{ d}$ )!

*Lösung:*

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot t}$$
$$= 1 \cdot 10^{12} \text{ Bq} \cdot e^{-\frac{0,693}{74} \cdot 120}$$
$$= 3,25 \cdot 10^{11} \text{ Bq}$$

3 Welche Äquivalentdosis erhält eine Person in 1,5 m Abstand von einem  $^{137}\text{Cs}$ -Präparat mit der Aktivität  $1,6 \cdot 10^9 \text{ Bq}$  bei einem Aufenthalt von 3 Stunden?

*Lösung:*

$$k_{\gamma}^{137\text{Cs}} = 8,46 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Sv m}^2}{\text{h Bq}}$$

$$H = k_{\gamma} \cdot \frac{A}{r^2}$$

$$H = \dot{H} \cdot t$$

$$\dot{H} = 8,46 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Sv m}^2}{\text{h Bq}} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^9 \text{ Bq}}{2,25 \text{ m}^2} = 6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Sv}}{\text{h}}$$

$$H = 6 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Sv m}^2}{\text{h Bq}} \cdot 3 \text{ h} = 0,18 \text{ mSv.}$$

- 4 Im Abstand von 3m beträgt die Dosisleistung für eine punktförmige Quelle  $\dot{H}_1 = 100 \text{ mSv/h}$ . Wie groß ist die Dosisleistung in 10 m Abstand?

**Lösung:**

Für die Dosisleistung einer punktförmigen Gammastrahlenquelle gilt:

$$\dot{H}_2 = \dot{H}_1 \cdot \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

$$\dot{H}_2 = \frac{100 \text{ mSv}}{\text{h}} \cdot \frac{(3\text{m})^2}{(10\text{m})^2} = \frac{9 \text{ mSv}}{\text{h}}$$

- 5 Berechnen Sie die Dosisleistung für eine Halbwert- und eine Zehntelwertschicht, wenn die Anfangsdosisleistung  $\dot{H}_0 = 0,5 \text{ Sv/h}$  beträgt!

**Lösung:**

$$\dot{H}_{0,5} = \frac{\dot{H}_0}{2} = \frac{250 \text{ mSv}}{\text{h}};$$

$$\dot{H}_{0,1} = \frac{\dot{H}_0}{10} = 50 \text{ mSv/h}$$

- 6 Wieviel Zehntelwertdicken sind notwendig, um eine Anfangsdosisleistung von  $\dot{H}_0 = 0,5 \text{ Sv/h}$  auf  $\dot{H} = 0,1 \text{ mSv/h}$  abzuschwächen?

**Lösung:**

$$\dot{H} = \frac{\dot{H}_0}{10^m}$$

$$0,1 \frac{\text{mSv}}{\text{h}} = \frac{0,5 \text{ Sv/h}}{10^m}$$

$$10^m = \frac{0,5 \text{ Sv/h}}{0,1 \text{ mSv/h}} = 5000$$

$$5000 \approx 10^{3,7}$$

$$\Rightarrow m \approx 3,7 \text{ Zehntelwertdicken}$$



- 7 Die Dosisleistung einer  $^{60}\text{Co}$ -Quelle beträgt im Abstand von 1 m  $100 \mu\text{Sv/h}$ . Wie hoch ist die Aktivität des Strahlers?

*Lösung:*

$$\dot{H} = 100 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}}$$

$$r = 1\text{m}$$

$$k_{\gamma} = 3,41 \cdot 10^{-13} \frac{\text{Sv m}^2}{\text{kBq}}$$

$$A = \frac{\dot{H} r^2}{k_{\gamma}} = \frac{1 \cdot 10^{-4} \text{Sv/h} \cdot 1 \text{m}^2}{3,41 \cdot 10^{-13} \text{Sv m}^2 \text{hBq}} = 2,910^8 \text{Bq}$$

;

- 8 Berechnen Sie die Abschirmdicke für Eisen, die notwendig ist, um die Dosisleistung einer  $^{60}\text{Co}$ -Quelle von  $6 \text{mSv/h}$  soweit abzuschwächen, daß die Körperdosis für nicht überwachtes Personal unterschritten wird!

*Lösung:*

$$\dot{H}_0 = 6 \text{mSv/h}$$

$$\dot{H} = 2 \mu\text{Sv/h}$$

$$\dot{H} = \dot{H}_0 e^{-\mu x}$$

$$\mu_{\text{Fe}} = 0,34 \text{cm}^{-1} \quad \text{für } ^{60}\text{Co}$$

$\Rightarrow$

$$x = \ln \frac{\dot{H}_0}{\dot{H}} / \mu = \ln 3000 / 0,34 \text{cm} \approx 23,6 \text{cm}$$

## Literatur

- Dörschel, B, Schuricht, V.  
und Steuer, J.:  
Praktische Strahlenphysik  
Spektrum Akademischer Verlag,  
Heidelberg 1992
- Fritz-Niggli, H.:  
Strahlengefährdung  
Strahlenschutz: Ein Leitfaden für die Praxis  
Huber  
Bern 1991
- Herforth, L. und Koch, H.:  
Praktikum der Radioaktivität und Radiochemie  
Johann Ambrosius Barth,  
Leipzig 1992
- Kiefer, H.:  
Strahlen und Strahlenschutz  
Springer-Verlag  
Berlin 1987
- Sauter, E.:  
Grundlagen des Strahlenschutzes  
Karl Thiemig AG,  
München 1983
- Stolz, W.:  
Radioaktivität: Grundlagen – Messung -  
Anwendungen, 4. überarbeitete und erweiterte  
Auflage  
B. G. Teubner GmbH, Stuttgart/Leipzig/  
Wiesbaden, 2003
- StrlSchV  
Verordnung über den Schutz vor Schäden durch  
ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverord-  
nung) vom 29.11.2018 (BGBl , I, S.2034,2036),  
die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom  
20.11. 2020 (BGBl, I S. 2502) geändert worden  
ist
- Bragg, W.H.:  
Durchgang der  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - und Röntgen-Strahlen  
durch Materie  
Verlag von Johann Ambrosius Barth,  
Leipzig 1913
- Mayer- Kuckuk, T.:  
Kernphysik Eine Einführung  
7. überarbeitet und erweiterte Auflage  
B. G. Teubner GmbH, Stuttgart/Leipzig/  
Wiesbaden, 2002

- Lösche, A. (Herausg.) Grimsehl Lehrbuch der Physik, Band 4,  
Struktur der Materie  
17. völlig neu bearbeitete Auflage  
BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft  
Leipzig 1988
- Krieger, H.: Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz  
Band 1 Grundlagen  
5. völlig neu bearbeitete Auflage  
B. G. Teubner GmbH, Stuttgart/Leipzig/  
Wiesbaden, 2002
- Melcher, H.: Transmission und Absorption - Ein allgemeines  
Gesetz für ionisierende Strahlungen  
VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften  
Berlin 1970
- [www.bfs.de](http://www.bfs.de) BfS- Startseite, Strahlenschutzregister