

Atombausteine

Protonen p

($1,672 \cdot 10^{-24}$ g; 938 MeV; e^+)

Neutronen n

($1,675 \cdot 10^{-24}$ g; 939 MeV; 0)

Elektronen e^-

($9,11 \cdot 10^{-28}$ g; 0,511 MeV; e^-)

Nuklide

Isotope: $Z = N(p) = \text{const}$

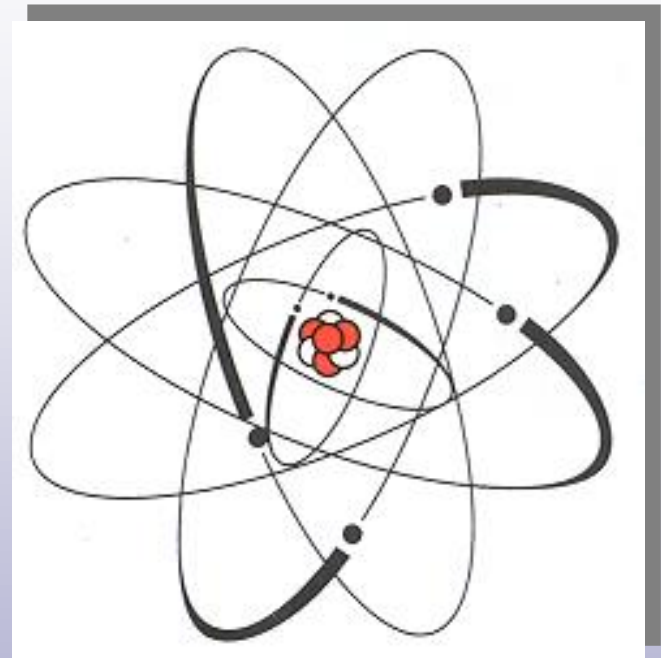
z.B. U-234, U-235, U-238

Isobare: $M = N(p+n) = \text{const}$

z.B. Ca-40, K-40, Ar-40

Isotone: $N = N(n) = \text{const}$

z.B. Fe-56, Mn-55, Cr-54



Insgesamt mehr als
2500 verschiedene Nuklide

Radioaktivität

natürliche Radioaktivität

($T_{1/2} > 10^9$ a)

künstliche Radioaktivität

($T_{1/2} < 10^9$ a)

Radioaktiver Zerfall

Alpha-Zerfall ($2p + 2n \rightarrow \alpha$)

U-238 ($4,5 \cdot 10^9$ a); Pu-239 (24400 a)

Beta⁻-Zerfall ($n \rightarrow p + e^- + \nu$)

K-40 ($1,3 \cdot 10^9$ a); I-131 (8,02 d)

Beta⁺-Zerfall ($p \rightarrow n + e^+ + \nu$)

O-15 (2,03 min); F-18 (110 min)

Isomerer Übergang

Tc-99m (6 h)

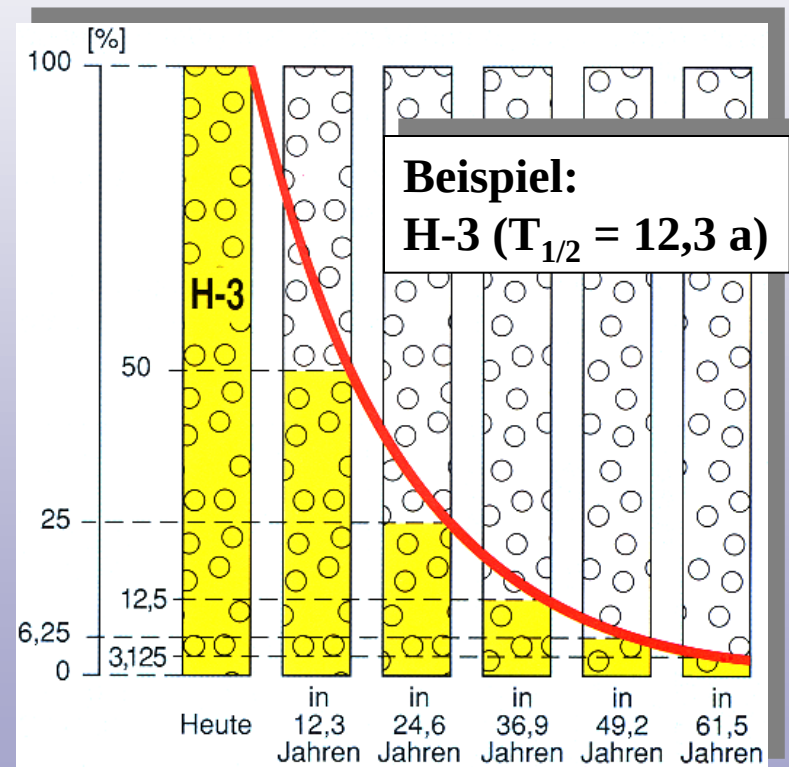
Zerfallsgesetz

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

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

λ Zerfallskonst.

$T_{1/2}$ Halbwertszeit



Korpuskularstrahlung

α -Strahlung

(monoenergetisch; $E = 2,2 \dots 10,6 \text{ MeV}$)

β^- -Strahlung

(Kontinuum; $E_{\max} = 0,01 \dots 3 \text{ MeV}$)

Photonenstrahlung

γ -Strahlung

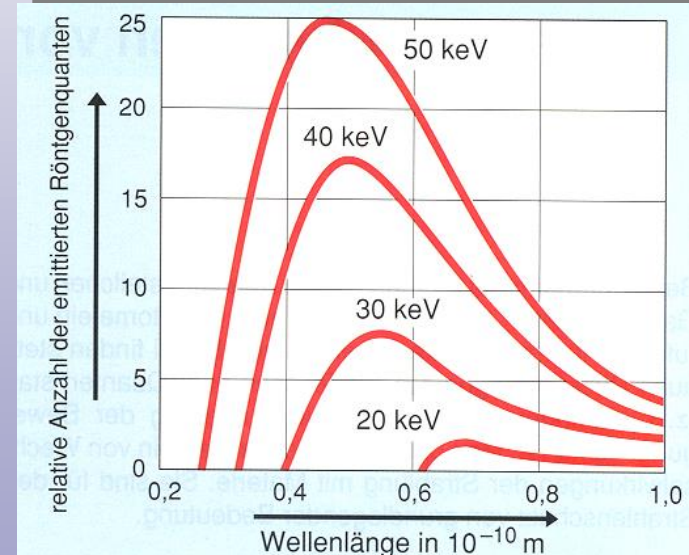
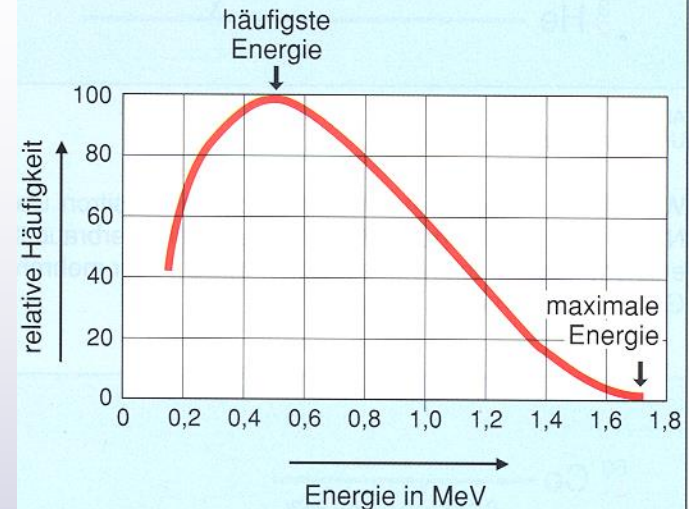
(monoenergetisch; $E = 0,03 \dots 3 \text{ MeV}$)

Charakteristische Röntgenstrahlung

(monoenergetisch; $E = 0,001 \dots 0,2 \text{ MeV}$)

Röntgen-Bremsstrahlung

(Kontinuum; $E_{\max} = E_{\text{kin}}$)



α -Strahlung

Reichweite in Luft (Kurve 1)

2 MeV: 1 cm

5 MeV: 3,2 cm

9 MeV: 8,5 cm

Reichweite in Gewebe (Kurve 2)

2 MeV: 1,2 μm

5 MeV: 4,8 μm

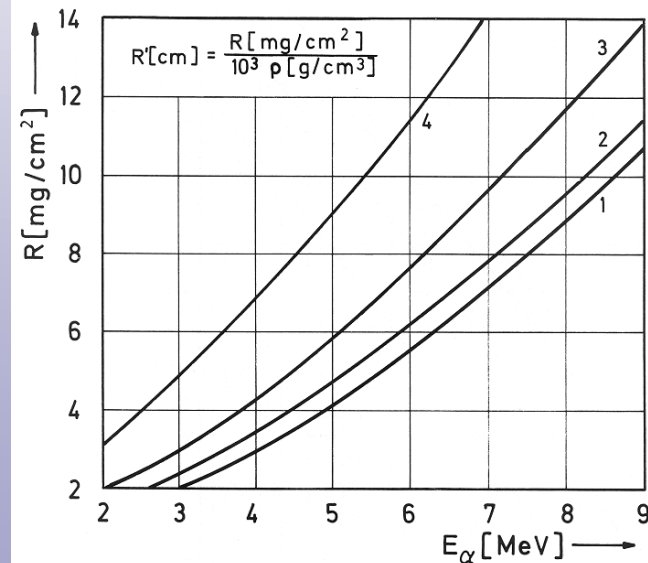
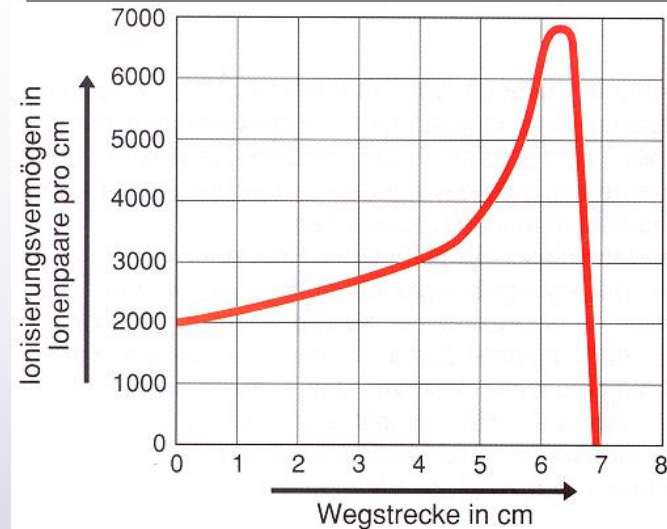
9 MeV: 11,5 μm

LET in Gewebe (Mittelwert)

2 MeV: 1,7 MeV/ μm

5 MeV: 1,0 MeV/ μm

9 MeV: 0,8 MeV/ μm



β^- -Strahlung

Reichweite in Luft (Kurve 5)

I-131 (0,6 MeV): 140 cm

K-40 (1,3 MeV): 400 cm

Y-90 (2,3 MeV): 850 cm

Reichweite in Gewebe (Kurve 3)

I-131 (0,6 MeV): 0,2 cm

K-40 (1,3 MeV): 0,5 cm

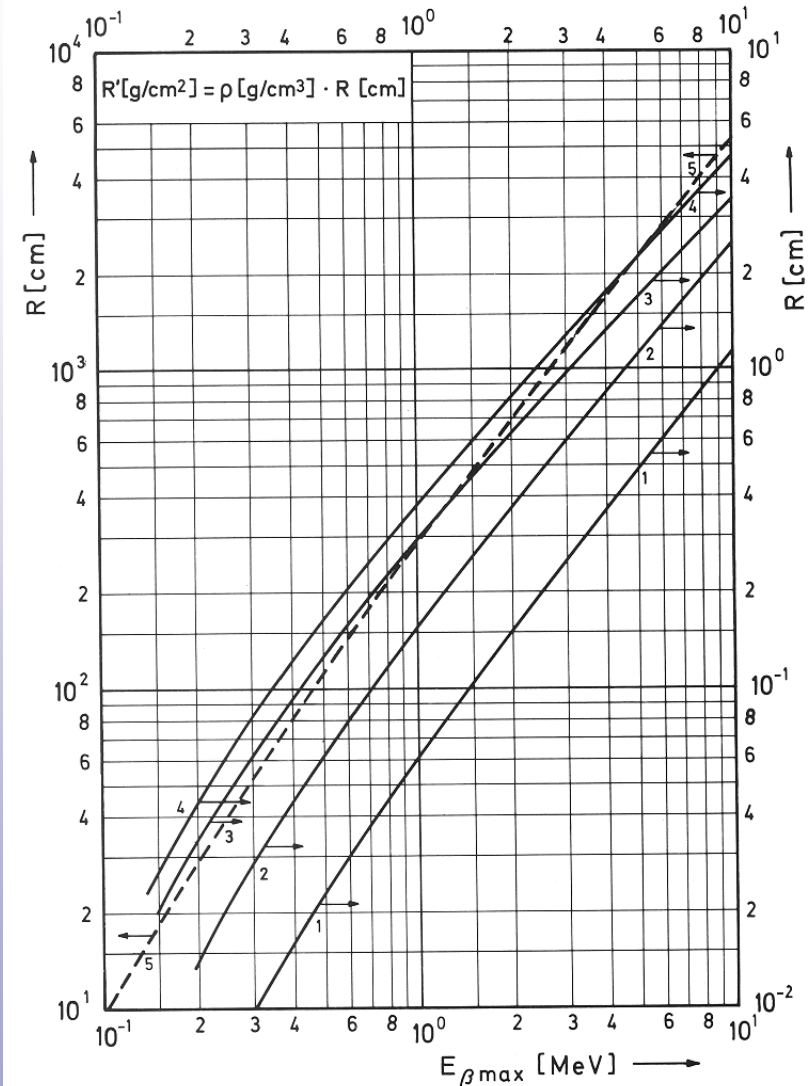
Y-90 (2,3 MeV): 1 cm

LET in Gewebe (Mittelwert)

2 MeV: 0,3 keV/ μ m

5 MeV: 0,26 keV/ μ m

9 MeV: 0,23 keV/ μ m



Photonen-Strahlung

Photoeffekt

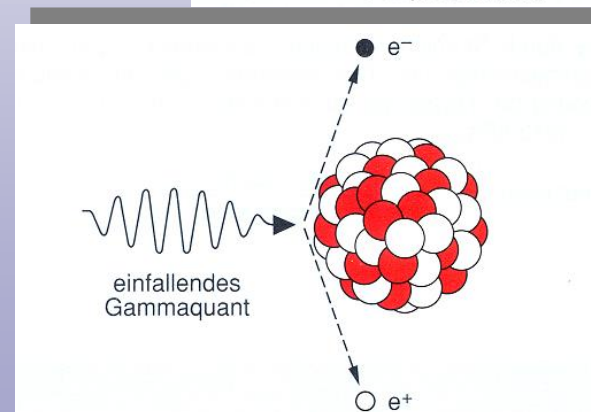
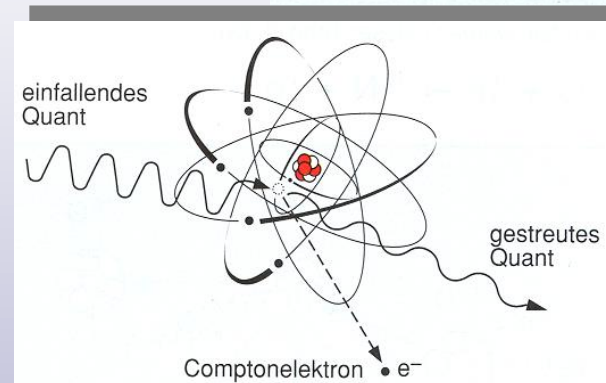
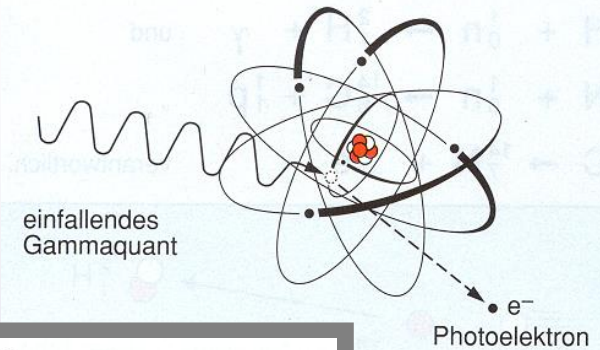
Vollabsorption des Photons
→ Photoelektron

Compton-Effekt

Streuung des Photons
→ Compton-Elektron

Paarbildungseffekt

Vollabsorption des Photons
→ Elektron + Positron



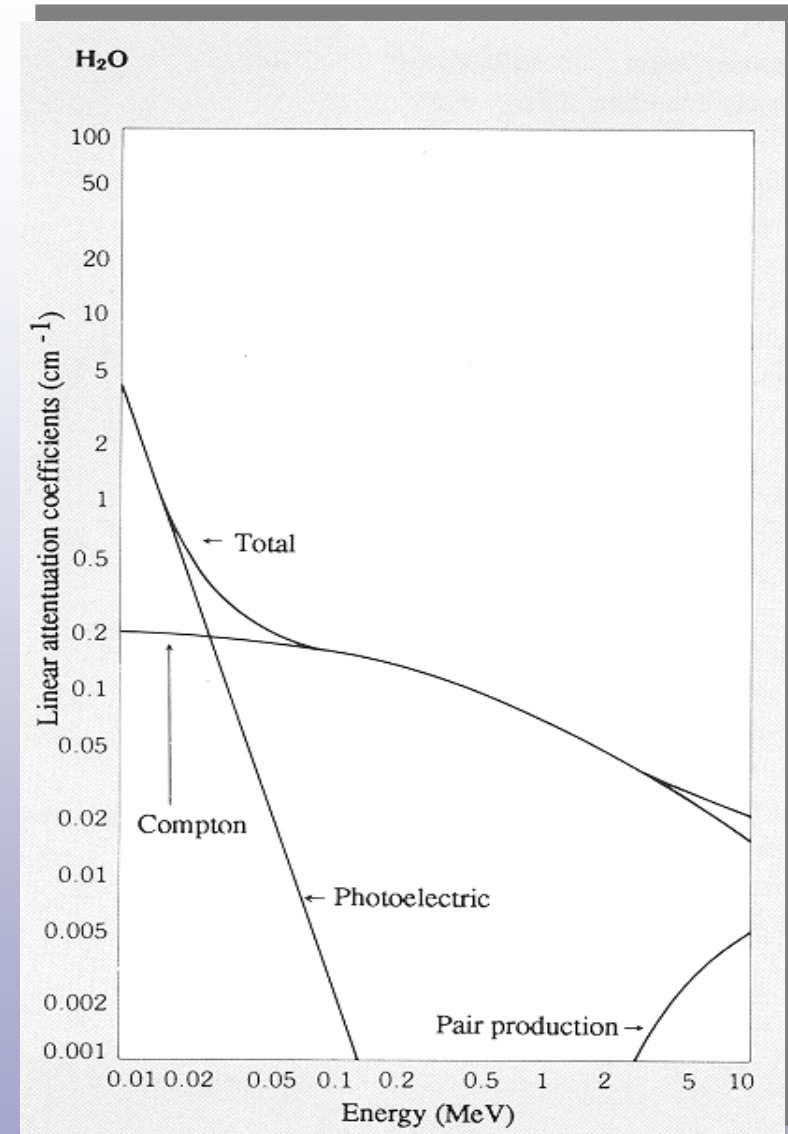
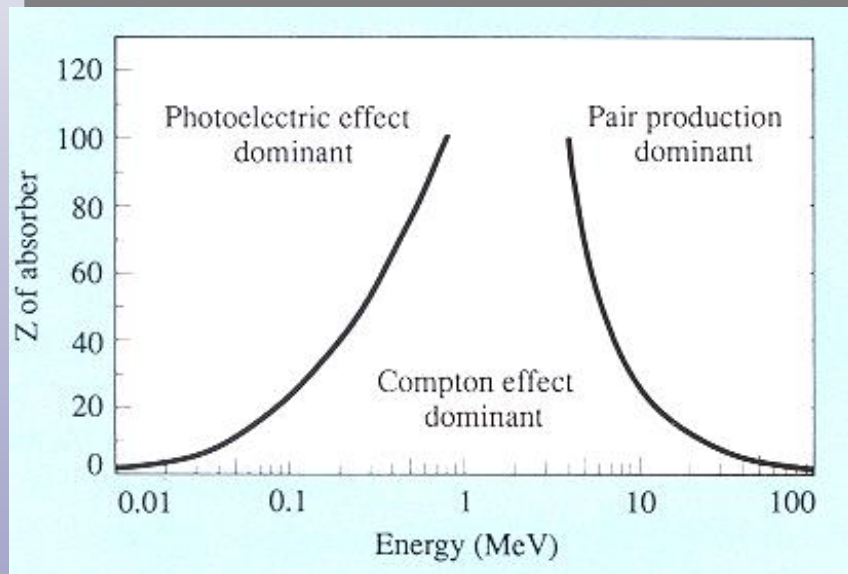
Photonen-Strahlung

Reichweite in Gewebe (H_2O)

Tc-99m (141 keV): 6,2 cm

I-131 (364 keV): 8,0 cm

F-18 (511 keV): 9,1 cm



Gasgefüllte Detektoren

Ionisationskammern

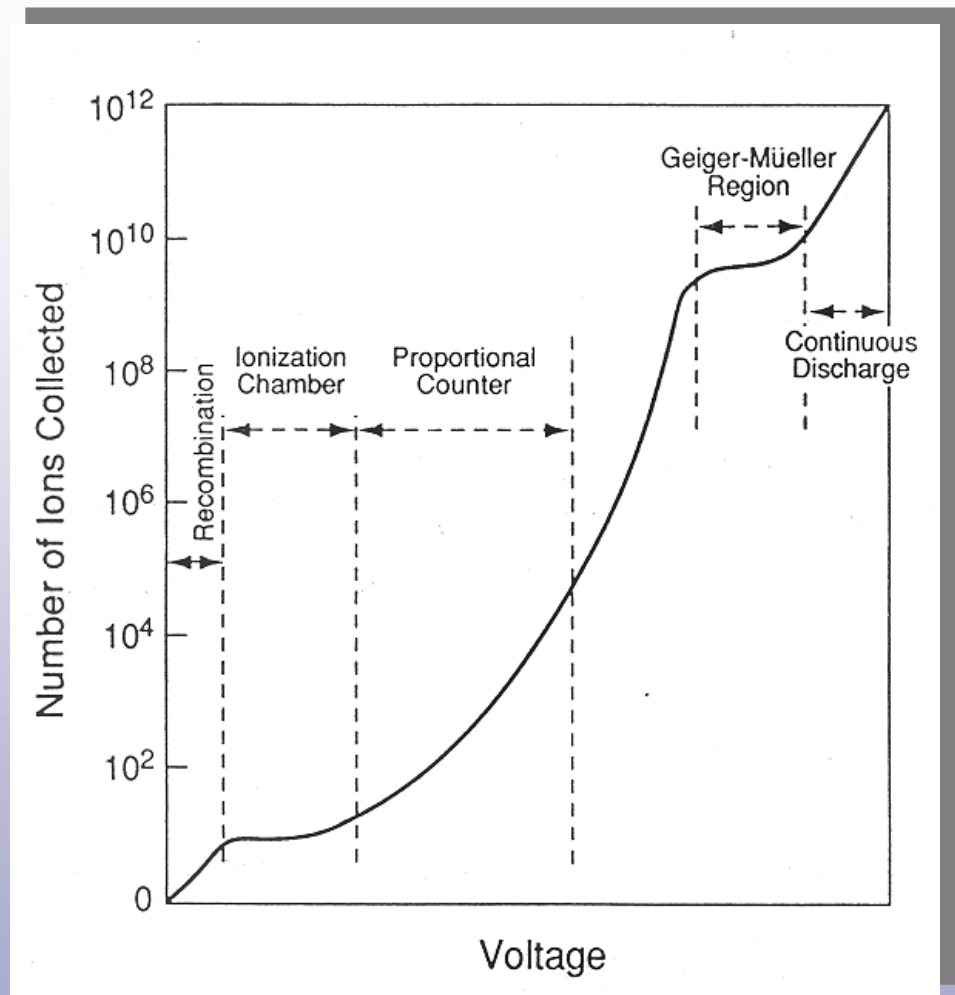
($U < 100 \text{ V}$)

Proportionalzähler

($100 \text{ V} < U < 400 \text{ V}$)

Geiger-Müller-Zähler

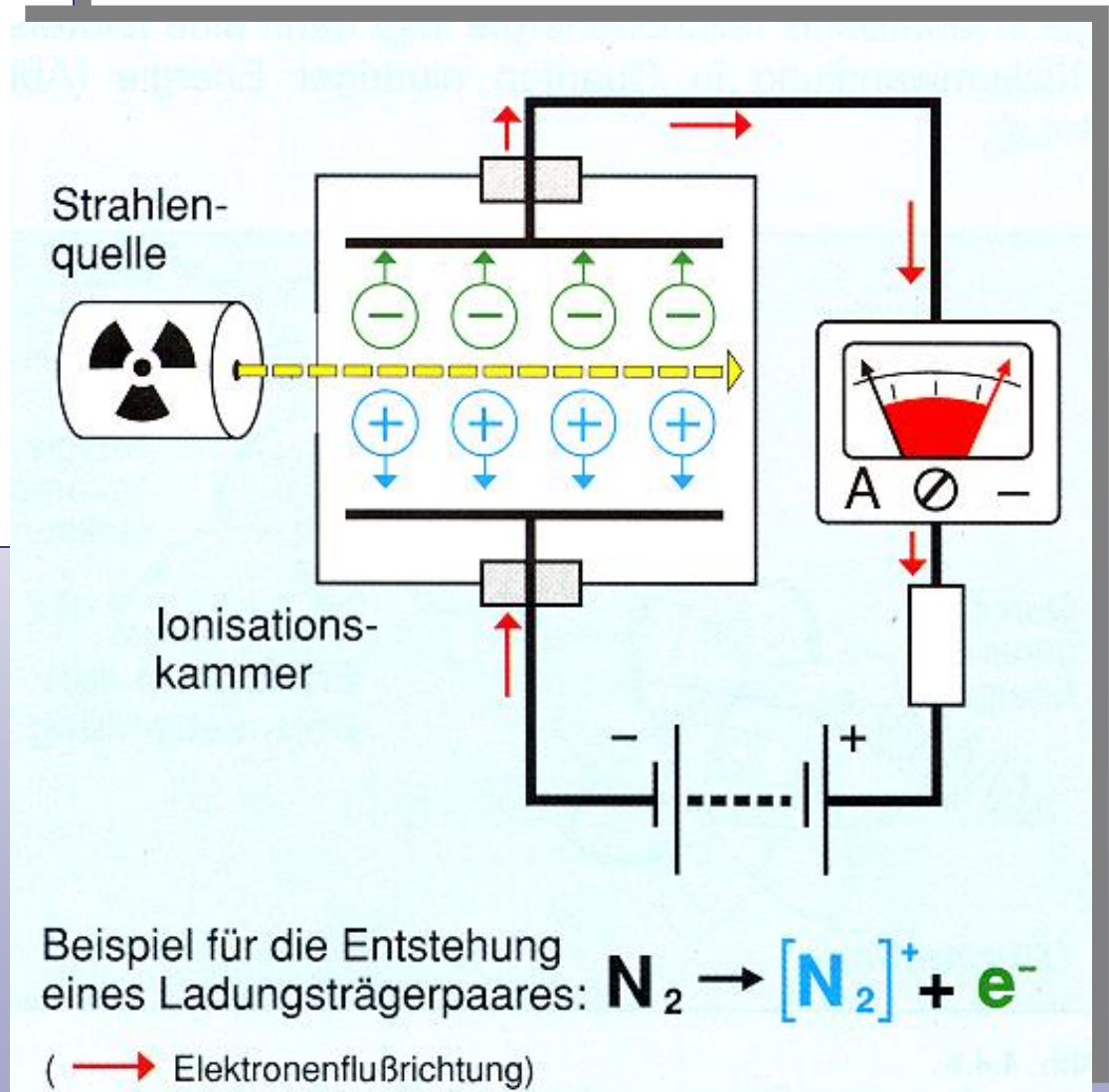
($U > 400 \text{ V}$)



Gasgefüllte Detektoren

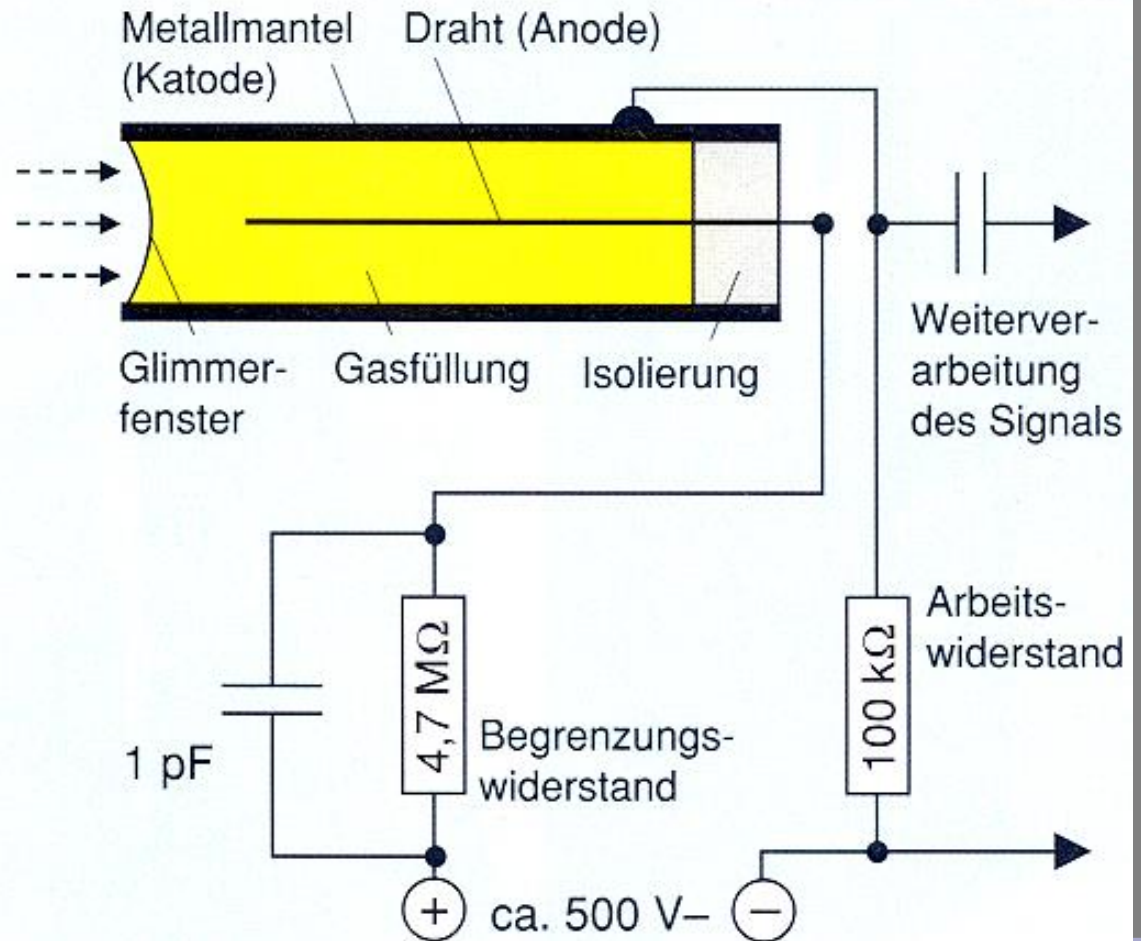
Ionisationskammern

($U < 100 \text{ V}$)



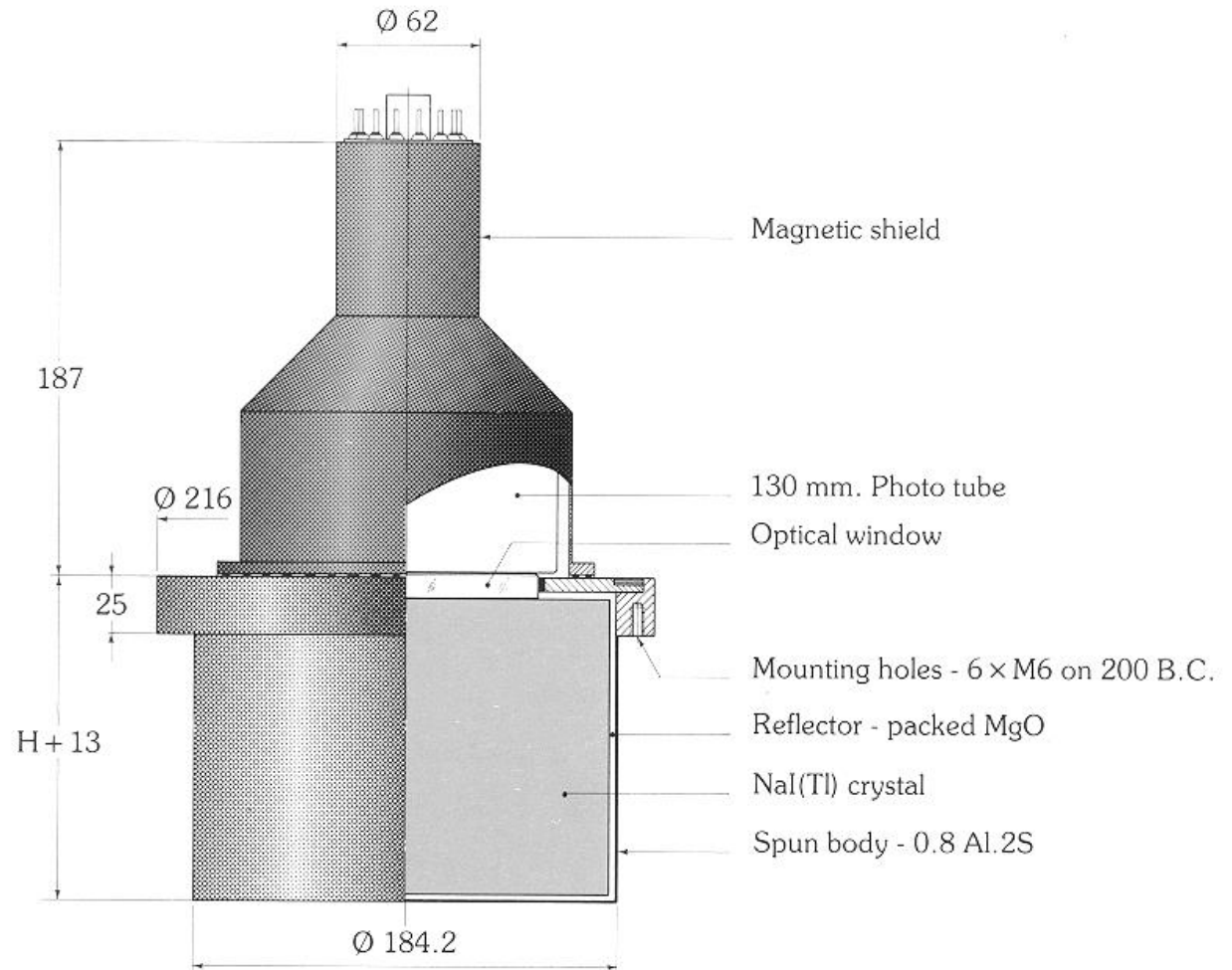
Gasgefüllte Detektoren

Geiger-Müller-Zähler ($U > 400 \text{ V}$)



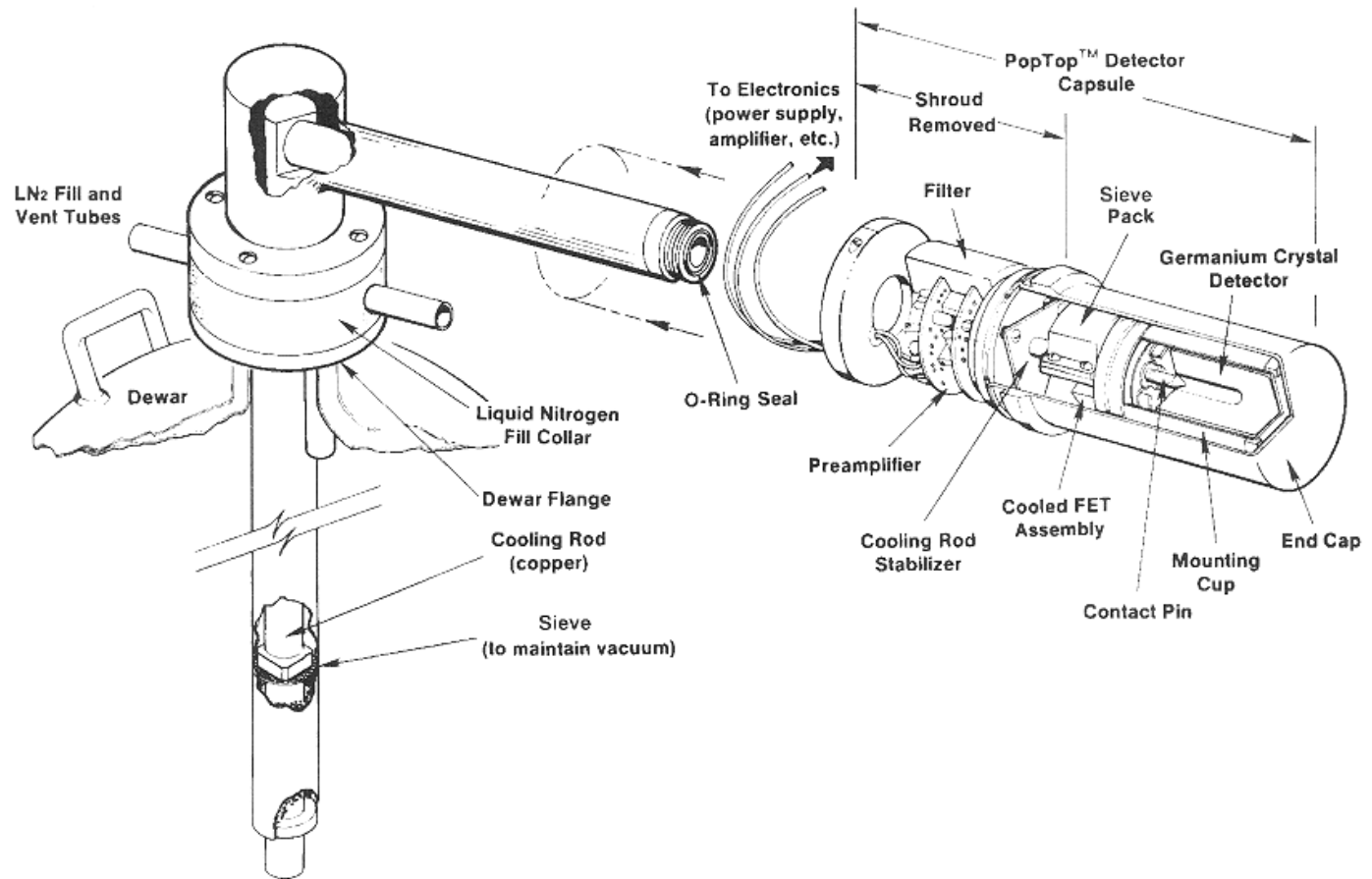
Szintillationsdetektoren

NaI(Tl) Detektor

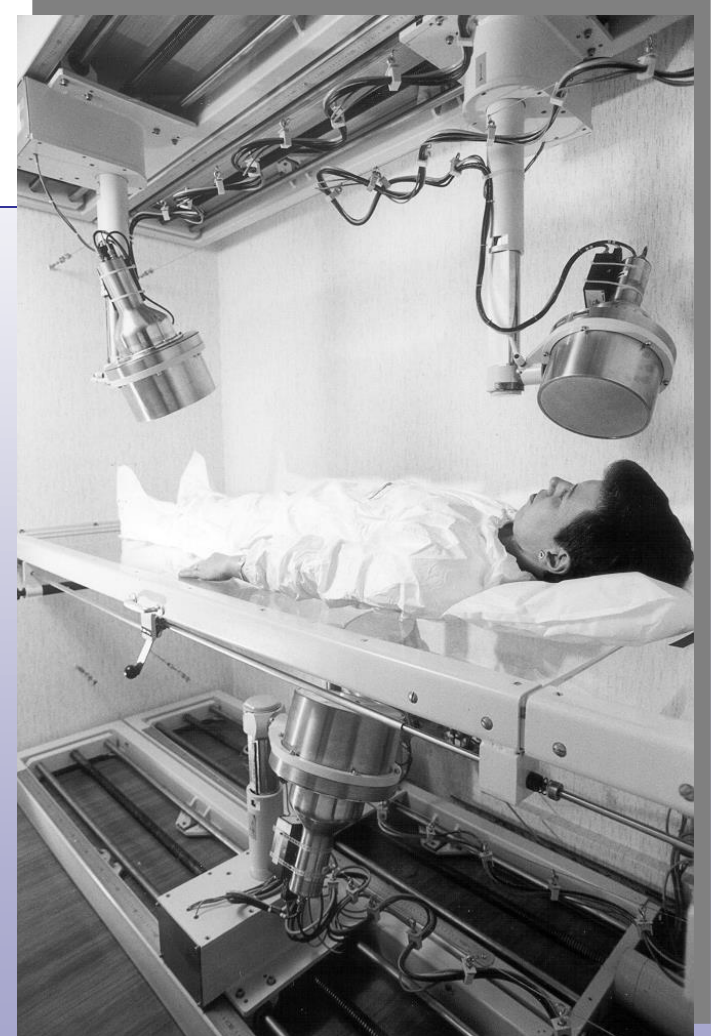


Halbleiterdetektoren

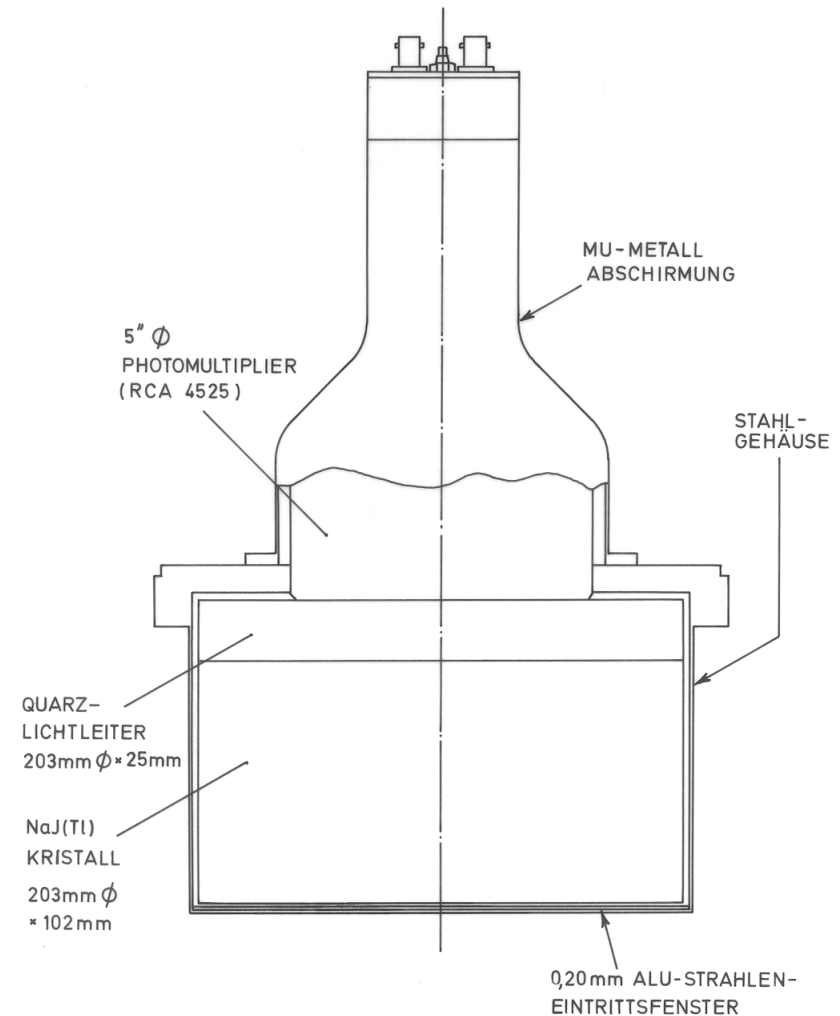
HPGe Detektor



Ganzkörperzähler des FZK



Ganzkörperzähler des FZK NaI(Tl) Szintillationsdetektor



Ganzkörperzähler des FZK Impulsverarbeitung

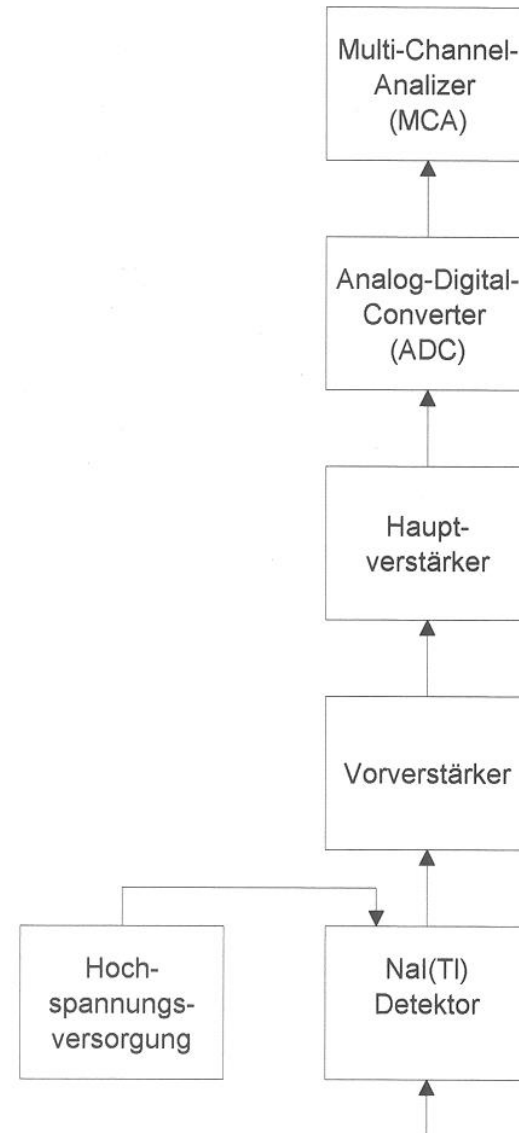
Hochspannungsversorgung
1 kV

Vorverstärker
Impedanzanpassung

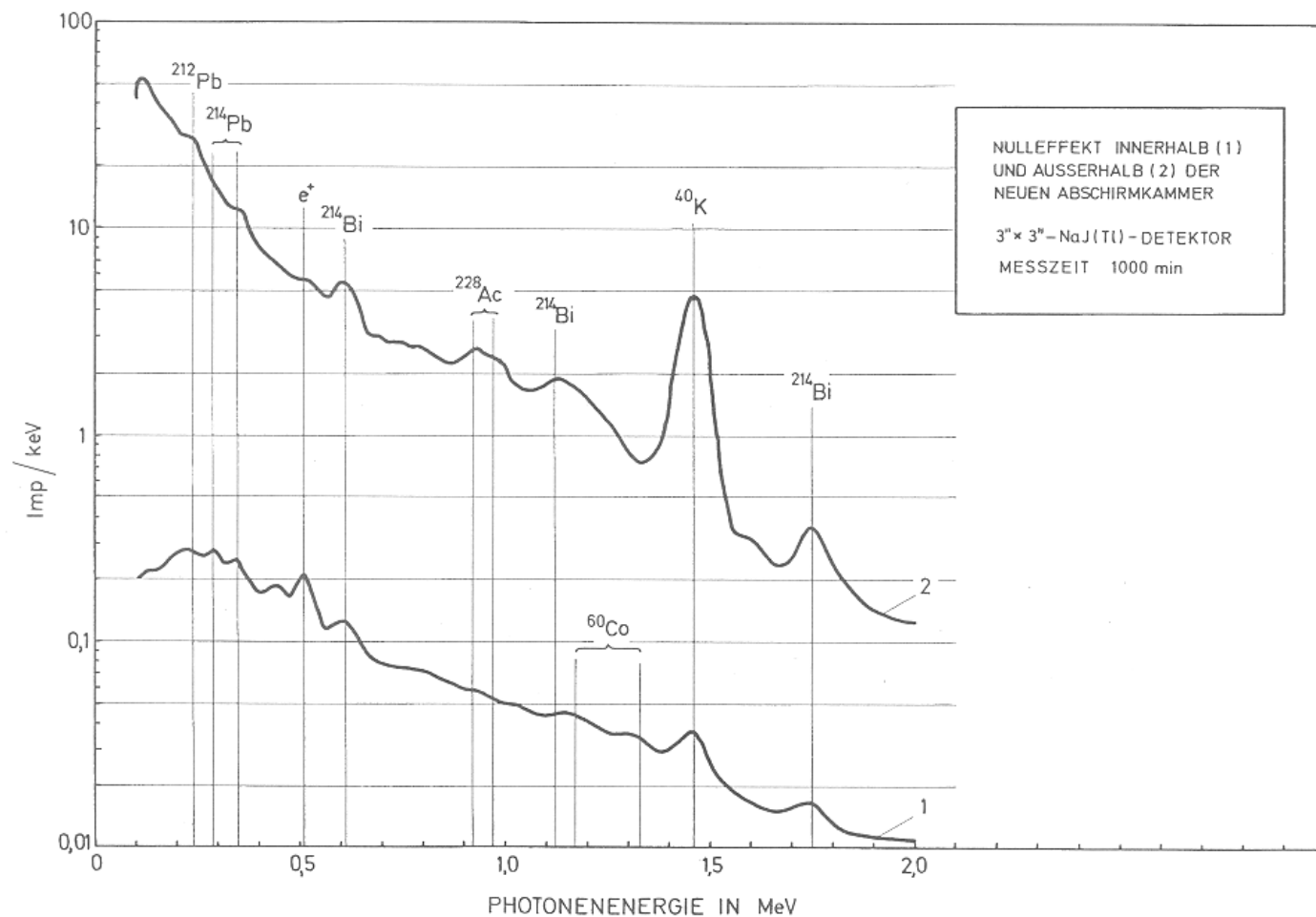
Hauptverstärker
Impulsformung/verstärkung

ADC
Impulsdigitalisierung

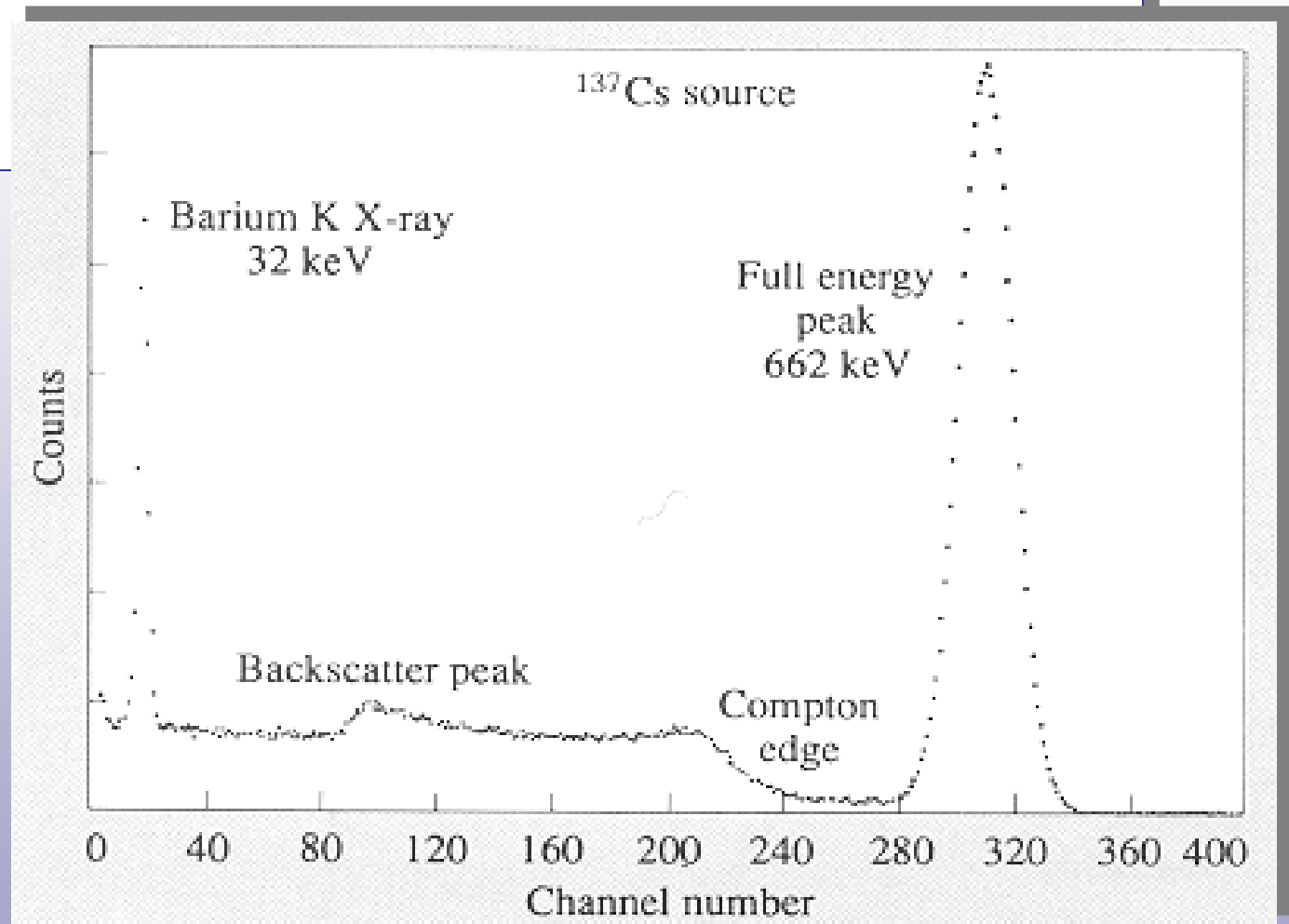
MCA
Spektrumserzeugung



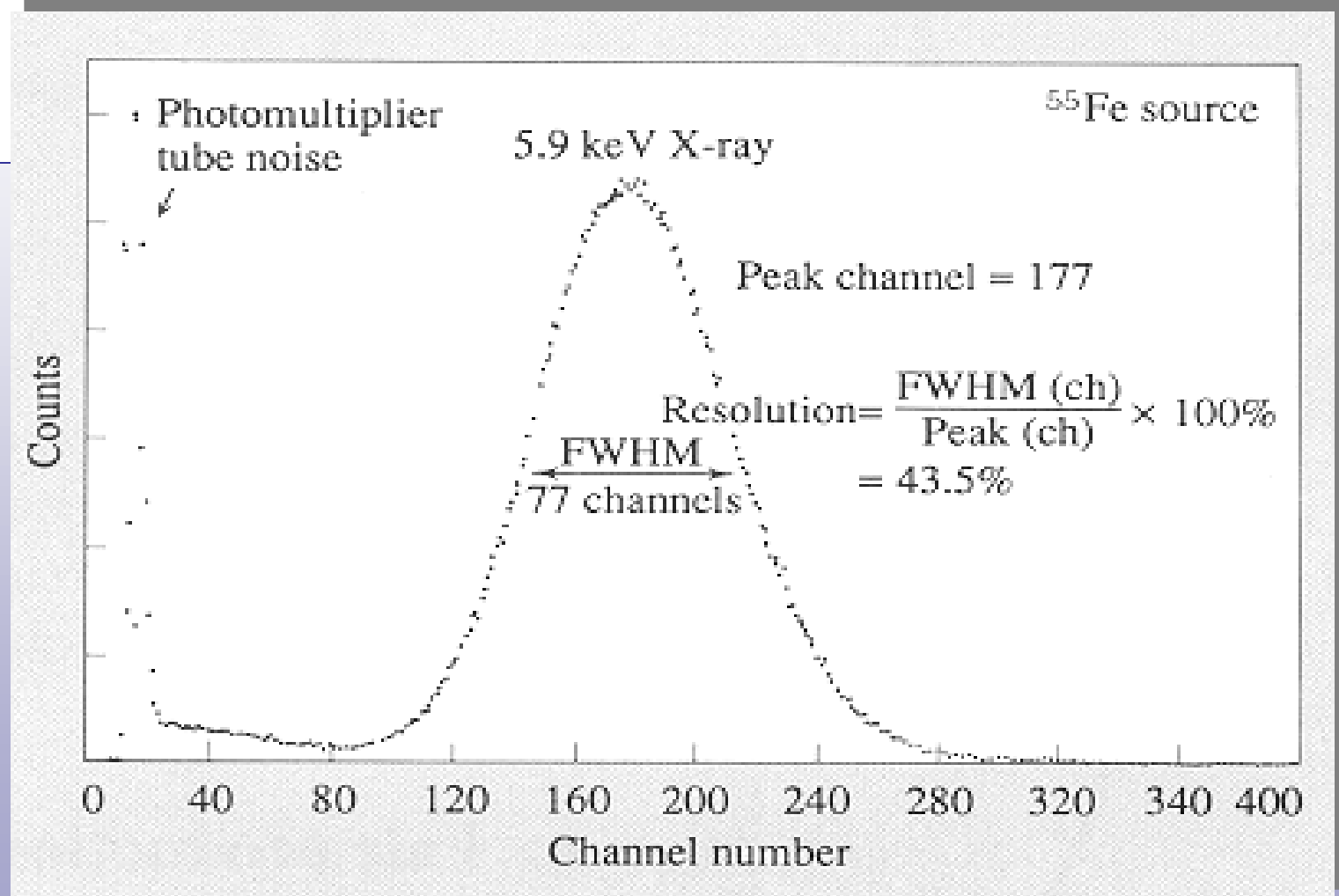
Ganzkörperzähler des FZK - Nulleffekt



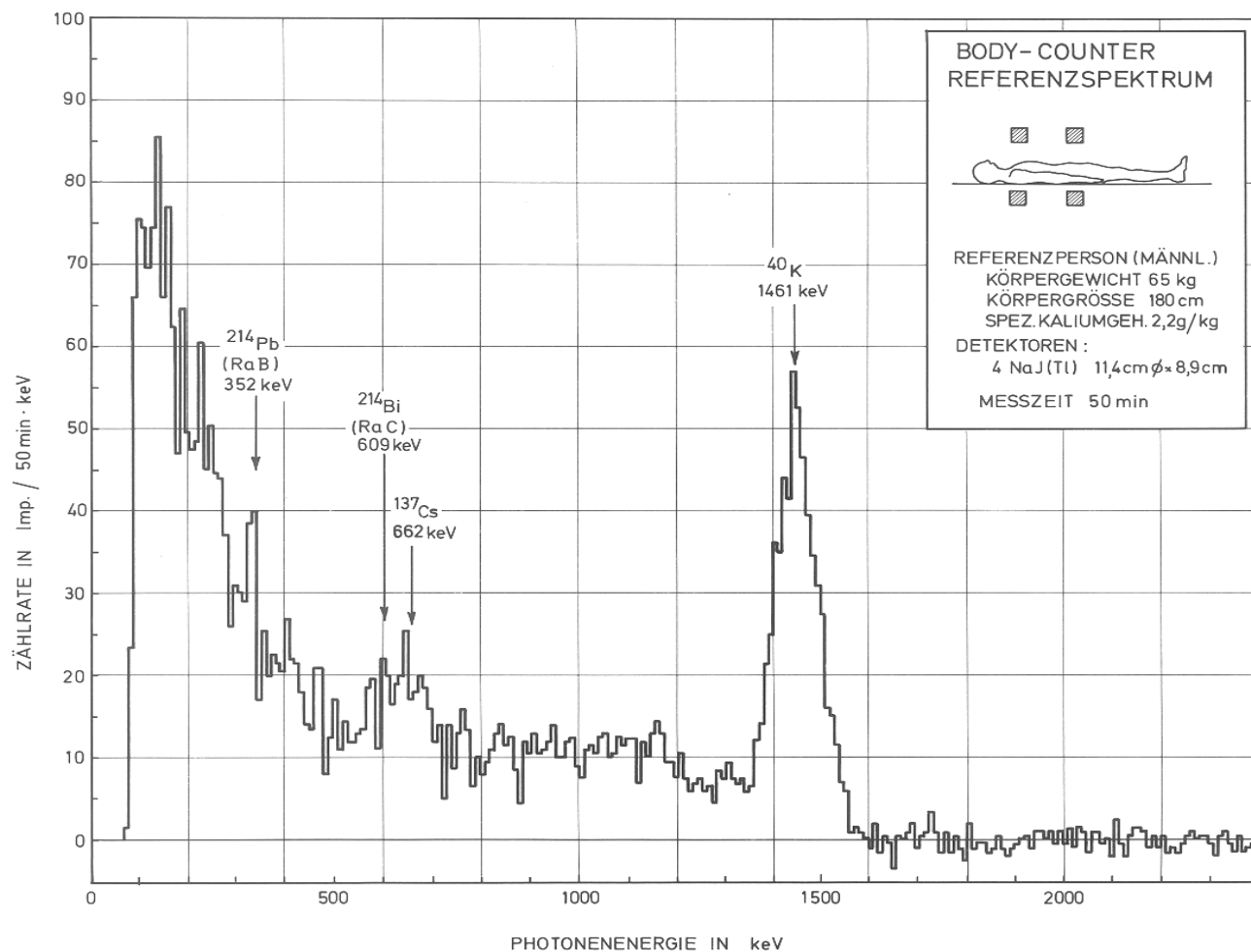
Ganzkörperzähler des FZK - Spektralkomponenten



Ganzkörperzähler des FZK - Energieauflösungsvermögen



Ganzkörperzähler des FZK - Referenzspektrum



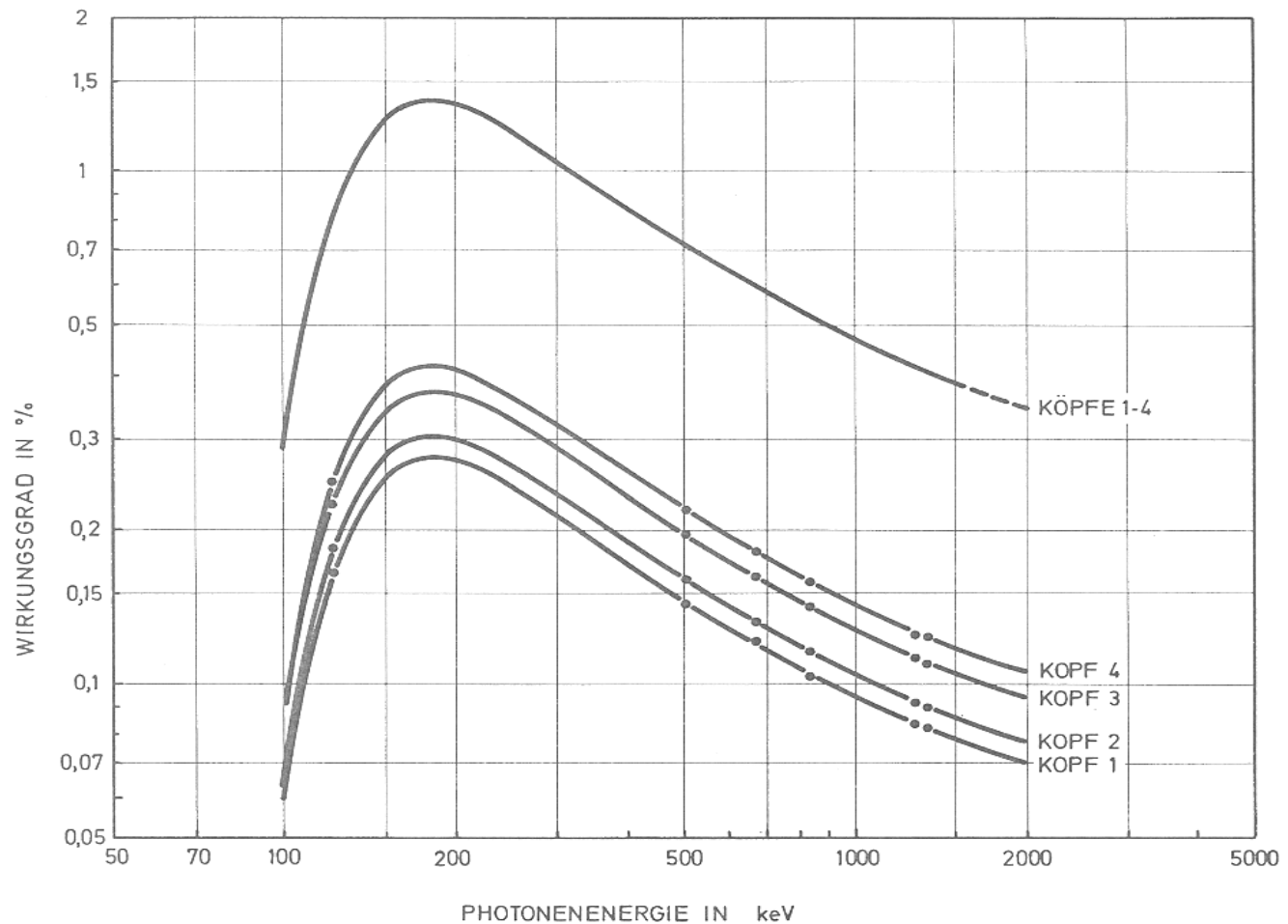
Ganzkörperzähler des FZK - Kalibrierung



Ganzkörperzähler des FZK - Kalibrierung



Ganzkörperzähler des FZK - Wirkungsgrad

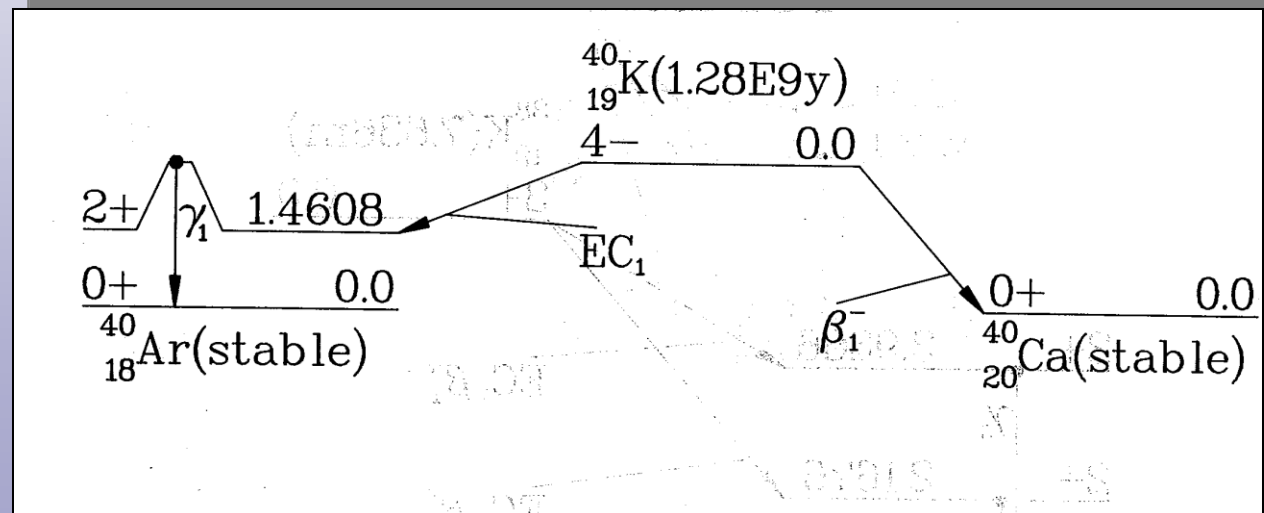


Isotopenkomposition des natürlichen Kaliums:

K-39:	96,2581 %	(stabil)
K-40:	0,0117 %	(Beta-Strahler)
K-41:	6,7302 %	(stabil)

Zerfallsparameter von K-40:

Physikalische Halbwertszeit:	1,28 E09 a
Beta-Strahlung:	1,3 MeV (89,3 %)
Gamma-Strahlung:	1,46 MeV (10,7 %)



Spezifische Aktivität A_S des K-40:

N_A	Avogadro-Konstante
A	Atomgewicht des Isotops
p	Gewichtsanteil des Isotops
$T_{1/2}$	Physikalische Halbwertszeit des Isotops

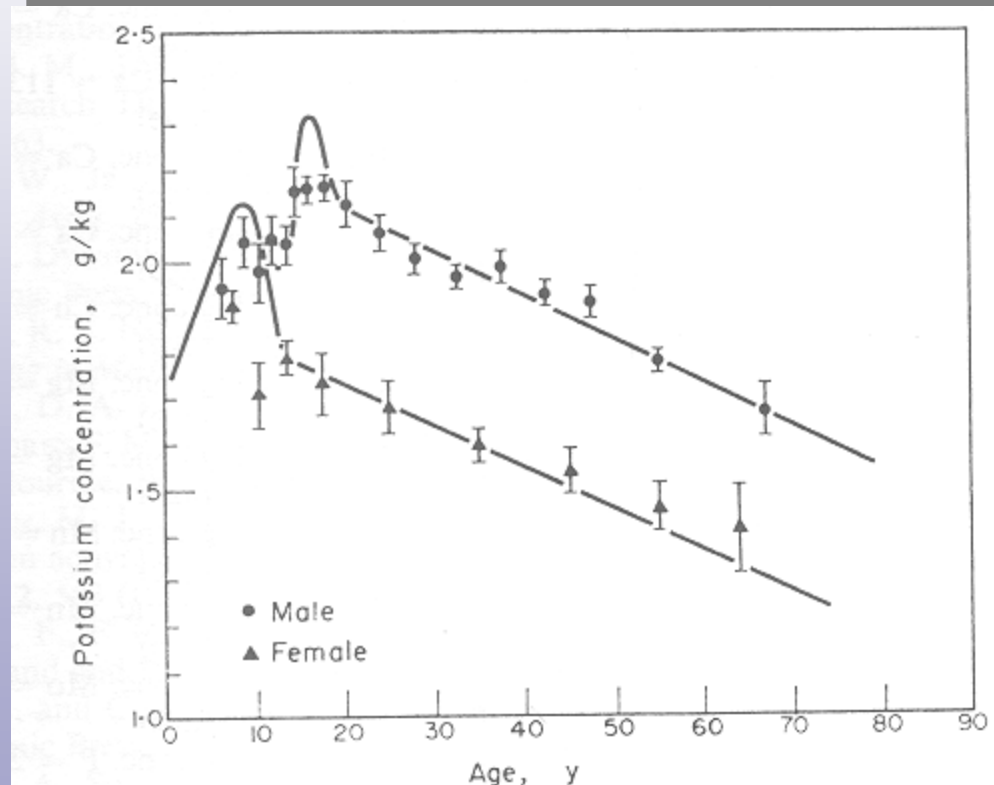
$$A_S = \frac{N_A}{A} \cdot p \cdot \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$$

$$A_S = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \text{ Atome / Mol}}{40 \text{ g / Mol}} \cdot 1,17 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{0,693 \text{ Zerfälle / Atom}}{1,28 \cdot 10^9 \text{ a} \cdot 3,15 \cdot 10^7 \text{ s / a}}$$

$$A_S = 30,3 \frac{\text{Zerfälle}}{\text{g} \cdot \text{s}} = 30,3 \frac{\text{Bq}}{\text{g}}$$

Spezifische K-40-Körperaktivität

Mann (25 Jahre):	2,1 g K pro kg	d.h.	64 Bq K-40 pro kg
Frau (25 Jahre):	1,7 g K pro kg	d.h.	52 Bq K-40 pro kg



Energiedosis

D	Energiedosis
E	in einem Volumenelement absorbierte Energie
m	Masse in dem betreffenden Volumenelement

$$D = \frac{E}{m}$$

$$1\text{Gy} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 6,24 \cdot 10^{12} \frac{\text{MeV}}{\text{kg}}$$

Biologische Wirkung der Energiedosis

Qualitativ:

Physikalische Komponente:

Proportional zur Anzahl der Ionisationen pro Zelle

Biologische Komponente:

Umgekehrt proportional zur Effizienz der
Reparaturmechanismen

Quantitativ:

Physikalische Komponente:

Proportional zur Ionisierungsdichte (LET)

Biologische Komponente:

Proportional zur Zellteilungsrate

Äquivalentdosis H

w_R Strahlenwichtungsfaktor
D Energiedosis

$$H = w_R \cdot D$$

Strahlen- bzw. Teilchenart	Strahlenwichtungsfaktor w_R
Photonen	1
Elektronen und Myonen	1
Neutronen	5 20
Protonen	5
Alpha-Teilchen	20

Effektive Äquivalentdosis H_{eff}

w_T Gewebewichtungsfaktor

H Äquivalentdosis

$$H_{\text{eff}} = w_T \cdot H = w_T \cdot w_R \cdot D$$

Gewebeart	Gewebewichtungsfaktor w_T
Keimdrüsen	0,20
Rotes Knochenmark	0,12
Lunge	0,12
Schilddrüse	0,05
Knochenoberfläche	0,01

Effektive Äquivalentdosis H_{eff} aufgrund der K-40-Körperaktivität:

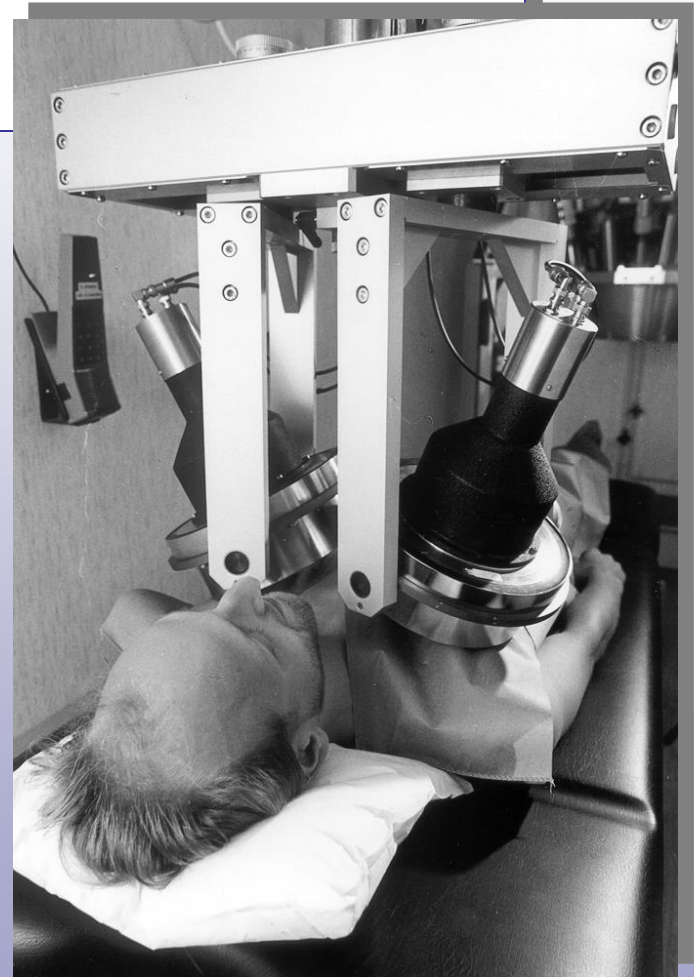
w_T	Gewebewichtungsfaktor ($w_T = 1$; homogene Ganzkörperexposition)
w_R	Strahlenwichtungsfaktor ($w_R = 1$; Beta-Strahlung)
A/m	spezifische K-40-Körperaktivität ($A/m = 64 \text{ Bq/kg}$ beim Mann)
E_β	Beta-Energie ($E_\beta = 1,3 \text{ MeV}$)
p_β	Emissionswahrscheinlichkeit der Beta-Strahlung ($p_\beta = 0,893$)
t	Expositionszeit

$$H_{\text{eff}} = w_T \cdot w_R \cdot D = w_T \cdot w_R \cdot \frac{E}{m} = w_T \cdot w_R \cdot \frac{A}{m} \cdot E_\beta \cdot p_\beta \cdot t$$

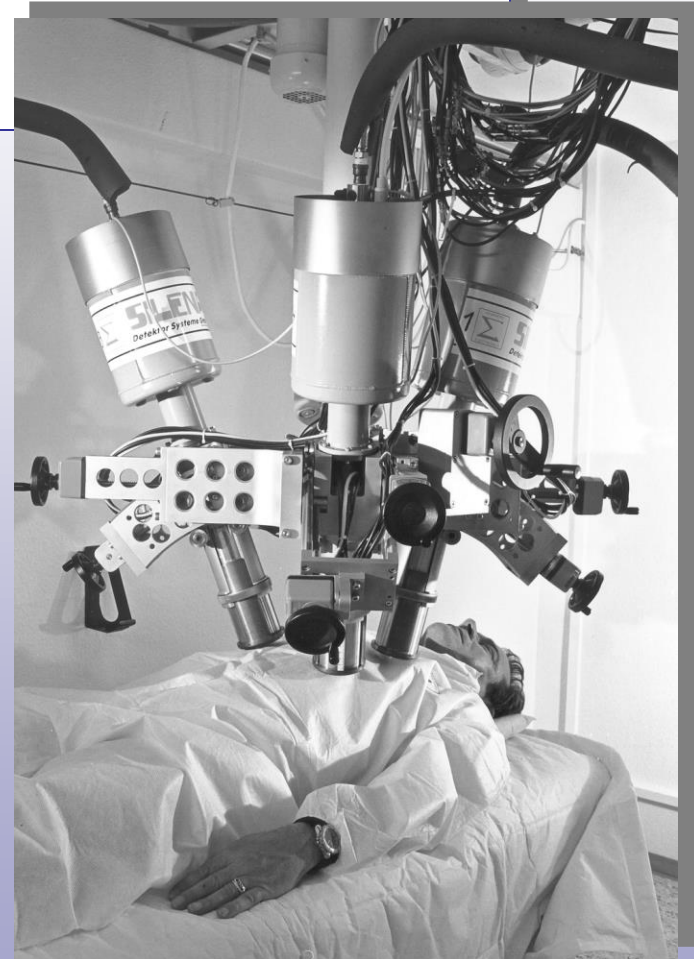
$$H_{\text{eff}} = 1 \cdot 1 \cdot 64 \frac{\text{Zerfälle}}{\text{kg} \cdot \text{s}} \cdot 1,3 \frac{\text{MeV}}{\text{Zerfall}} \cdot 0,893 \cdot 3,15 \cdot 10^7 \frac{\text{s}}{\text{a}}$$

$$H_{\text{eff}} = 2,34 \cdot 10^9 \frac{\text{MeV}}{\text{kg} \cdot \text{a}} = 0,38 \text{ mSv/a}$$

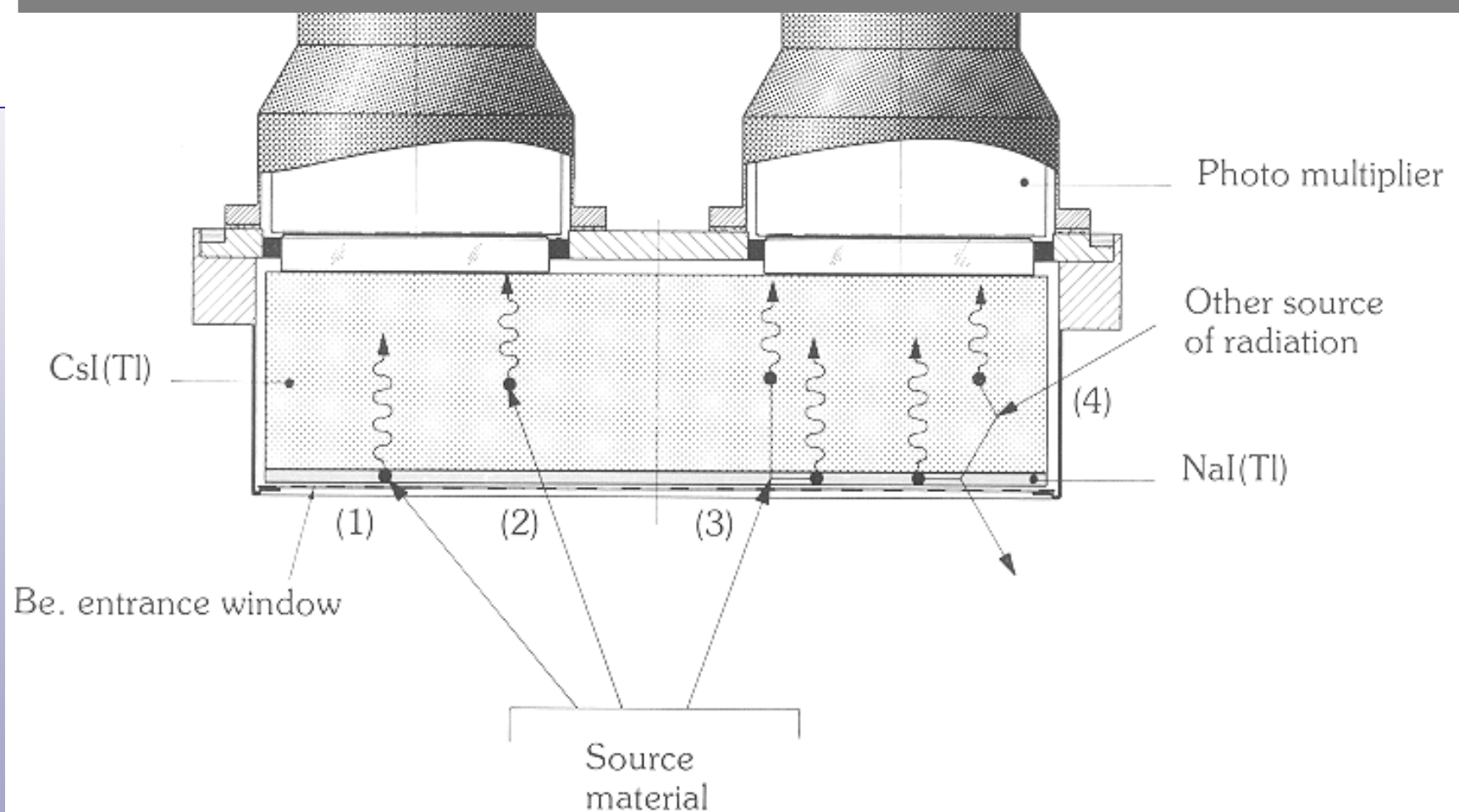
Teilkörperzähler des FZK - Phoswich-Detektoren mit Anti-Compton-Diskriminierung



Teilkörperzähler des FZK - HPGe-Detektoren mit Anti-Compton-Diskriminierung



Teilkörperzähler des FZK - Prinzip der Anti-Compton-Diskriminierung (Phoswich)



Teilkörperzähler des FZK - Torsophantom zur Organkalibrierung



Teilkörperzähler des FZK - Rumpfphantom zur Organkalibrierung

