

RC-07



---

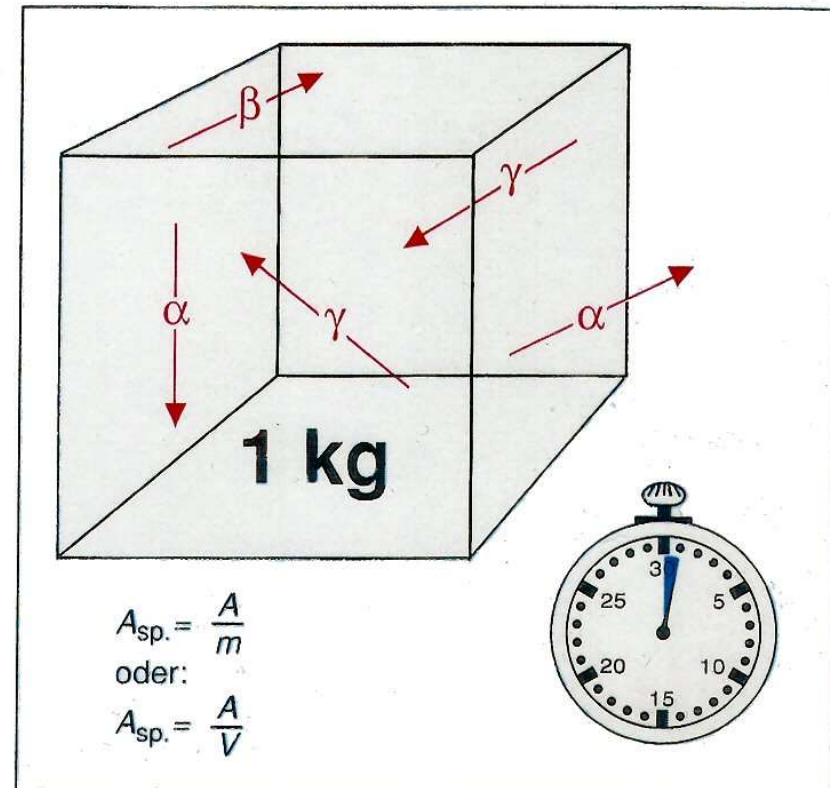
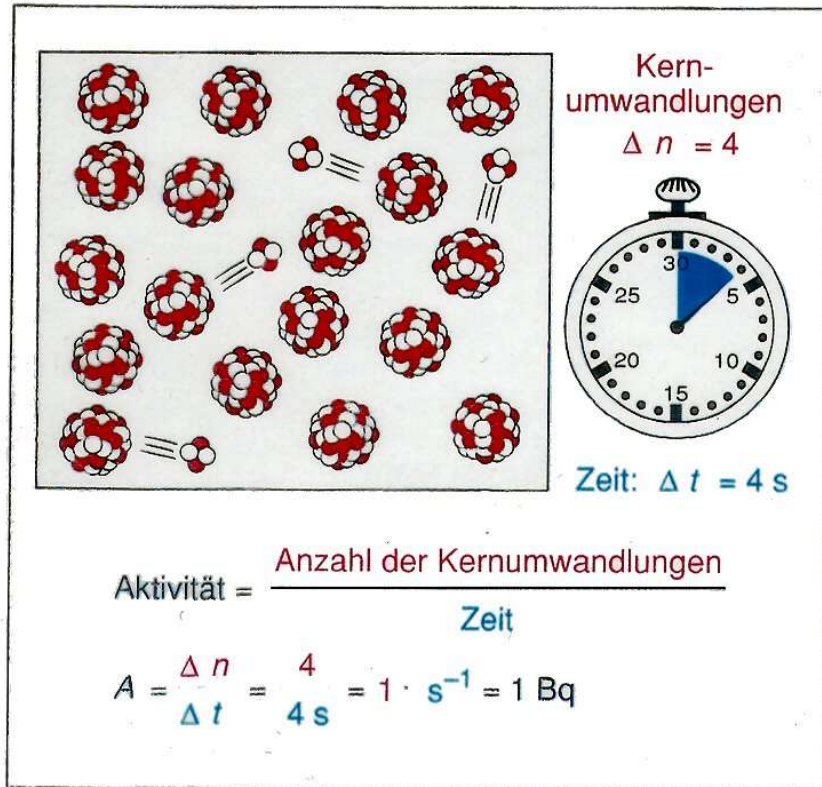
---

---

## **2.4 Strahlungsmessung, Spektrometrie, Dosimetrie**

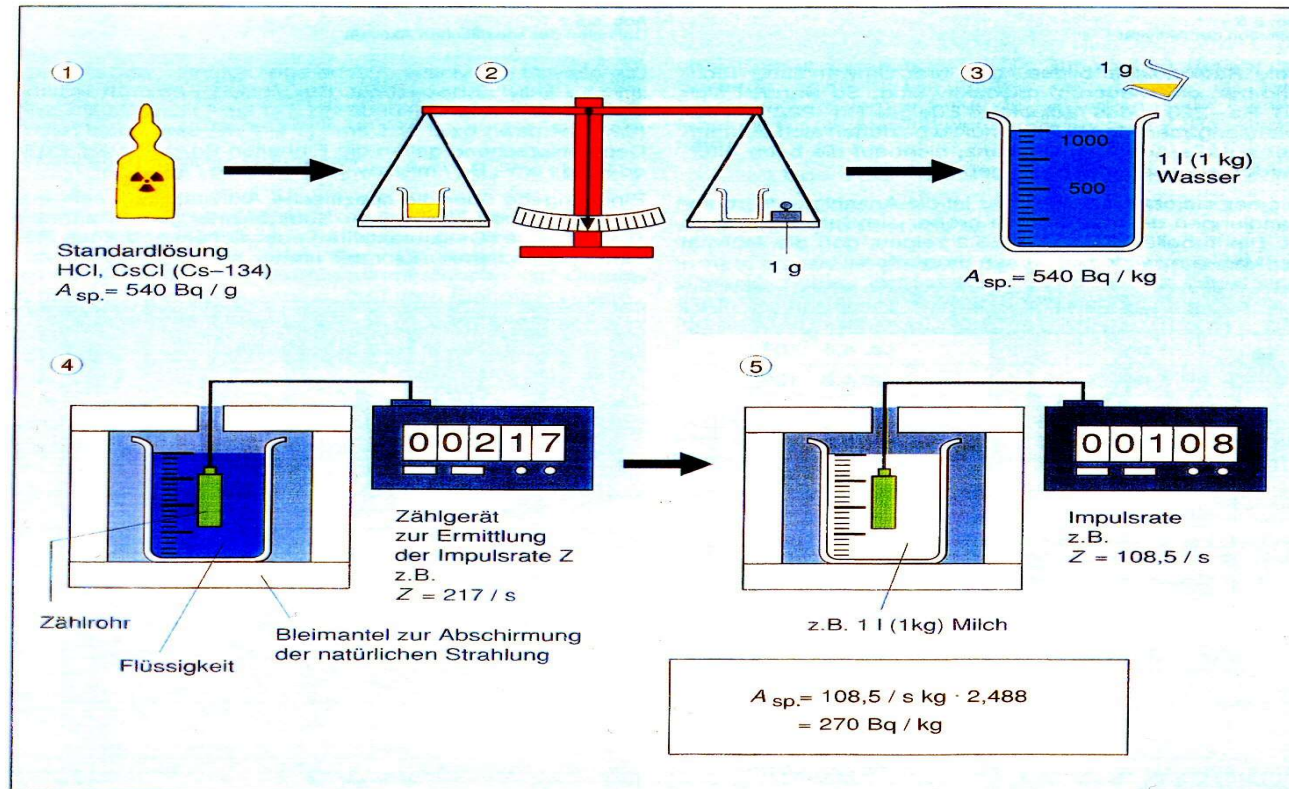
# Aktivitätsmessung (Wdh.)

## Definition Aktivität / Spezifische Aktivität



Definition Aktivität / Spezifische Aktivität

# Aktivitätsbestimmung



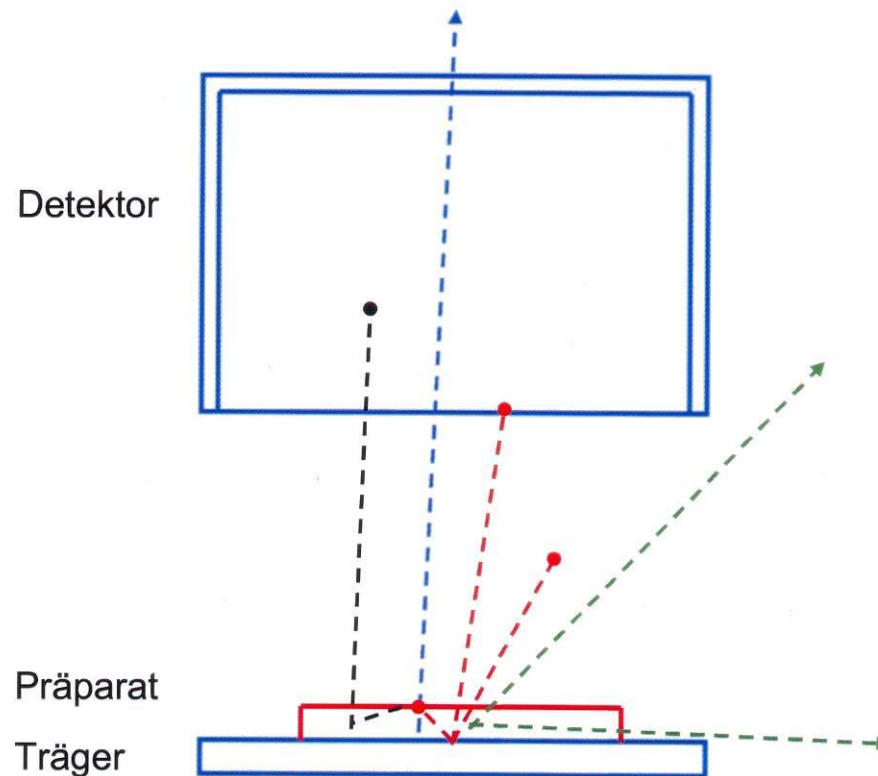
11.)

**Bestimmung der spezifischen Aktivität**  
(vereinfachte Darstellung)

$$K = 540/217 = 2,488$$

Durch die Glaswand des Zählrohres gelangen nur die Gammaquanten und die energiereichen Betateilchen. Bei reinen Alphastrahlen oder reinen Betastrahlen muss ein anderes Messverfahren gewählt werden.

# Aktivität und Zählrate



- Geometriefaktor (Raumwinkel  $< 4 \pi$ )
  - Absorption im Präparat, Luft, Fenster des Detektors ( $\alpha$ - und  $\beta$ -Teilchen)
  - Durchqueren des Detektors ohne Wechselwirkung ( $\gamma$ -Quanten)
- + Rückstreuung in Präparat und Träger

---

---

---

---

---

---

**- Strahlungsmessung, Spektrometrie**

# Nutzbare Effekte zur Strahlungsmessung

---

---

**Ionisierende Strahlung ruft Wechselwirkungen hervor,  
diese sind stark abhängig von Strahlungsart und -energie**

Strahlungsart	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Wechsel- wirkung	Ionisation Anregung	Ionisation Anregung Bremsstrahlung Streuung	Photoeffekt Comptoneffekt Paarbildung

**Nicht nur Bestimmung der gesamten Strahlung von Interesse, sondern Art und Herkunft,  
deshalb Spektrometrie – Unterscheidung der Strahlungsenergie notwendig**

***Art der erzeugten Ladungsträger und Energie detektieren!***

# Messung radioaktiver Strahlung

---

---

- in den letzten 50 Jahren sind verschiedenste Detektoren entwickelt worden
- Nachweis der radioaktiven Strahlung beruht auf Ionisations- oder Anregungsprozessen, die in Gasen bzw. in festen Stoffen durch die Strahlung ausgelöst werden
- Prozesse führen in Gasen und Halbleitern zur Erzeugung beweglicher elektrischer Ladung
- Kristalle, Gase und Lösungen können auch Lumineszenzlicht emittieren
- ungeladene Teilchen (Photonen, Neutronen) lassen sich nur über die im Wechselwirkungsmaterial gebildeten geladenen Sekundärteilchen nachweisen (bei Neutronen, Protonen,  $\alpha$ -Teilchen; bei Photonen Photo-, Compton-, Paarelektronen)
- Klassifizierung in drei Gruppen:
  - \* **Ionisationsdetektoren (Gasdetektoren)**
  - \* **Szintillationsdetektoren**
  - \* **Halbleiterdetektoren**



# Ionisationsdetektoren

---

---

- bei diesen Detektoren wird die Ionisation in Gasen ausgenutzt
- drei grundsätzliche Arbeitsweisen solcher Zähler in Abhängigkeit des Druckes und der Art des Gases, des Baues und der Bauweise (z. B. Feldstärke)

- \* Ionisationskammer

- \* Proportionalitätszählrohr

- \* Auslösezählrohr (Geiger-Müller-Zählrohr)

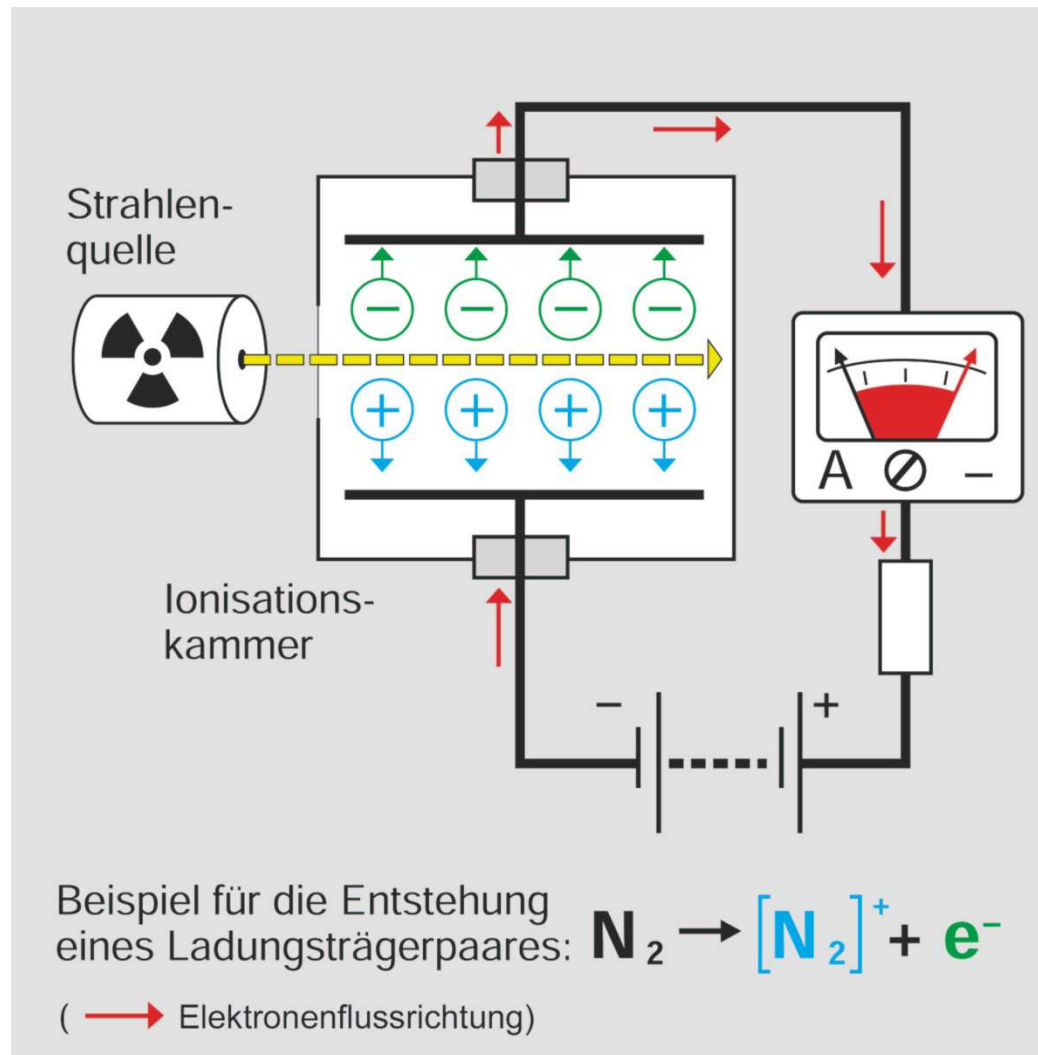
# Wirkungsweise der Ionisationsdetektoren

---

---

- an Elektroden wird eine **langsam ansteigende Spannung** angelegt, dadurch gelangen die durch radioaktive Strahlung gebildeten Ionen zunehmend an die entsprechenden Elektroden → Erreichen eines Sättigungsstromes, wenn alle Ionen bei anliegender Spannung an Elektroden  
= **Arbeitsbereich der Ionisationskammer** (Messung von  $\alpha$ -Strahlung)
- wird Feldstärke weiter erhöht, Effekt, dass Elektronen auf ihrem Weg zur Anode so stark beschleunigt werden, dass durch „Stoßionisation“ weitere Ionenpaare (Faktor  $10^3 - 10^5$ ) erzeugt werden (Durchflusszähler, Präparat in Zähler) → durch radioaktive Strahlung erzeugtes Ionenpaar wird vervielfacht (Messung von  $\alpha$ - und  $\beta$ -Strahlung)  
= **Arbeitsbereich des Proportionalitätszählers**
- wird Spannung weiter erhöht, wird der Auslösebereich erreicht, Entladung breitet sich lawinenartig über den Zähler aus, neben vielfacher Stoßionisation auch Ionisation des Zählgases möglich (Messung energiereicher  $\beta$ -Strahlung nur ca. 1 % der  $\gamma$ -Quanten) → Entladungserscheinungen müssen gelöscht werden, bei nicht selbstlöschenden Zählern Abschaltung (500  $\mu$ s) durch elektronische Einheit, bei selbstlöschenden Löschgas Methanol, Brom z. B., Totzeit zwischen 100 – 400  $\mu$ s)  
= **Arbeitsbereich des Geiger-Müller-Zählrohres**

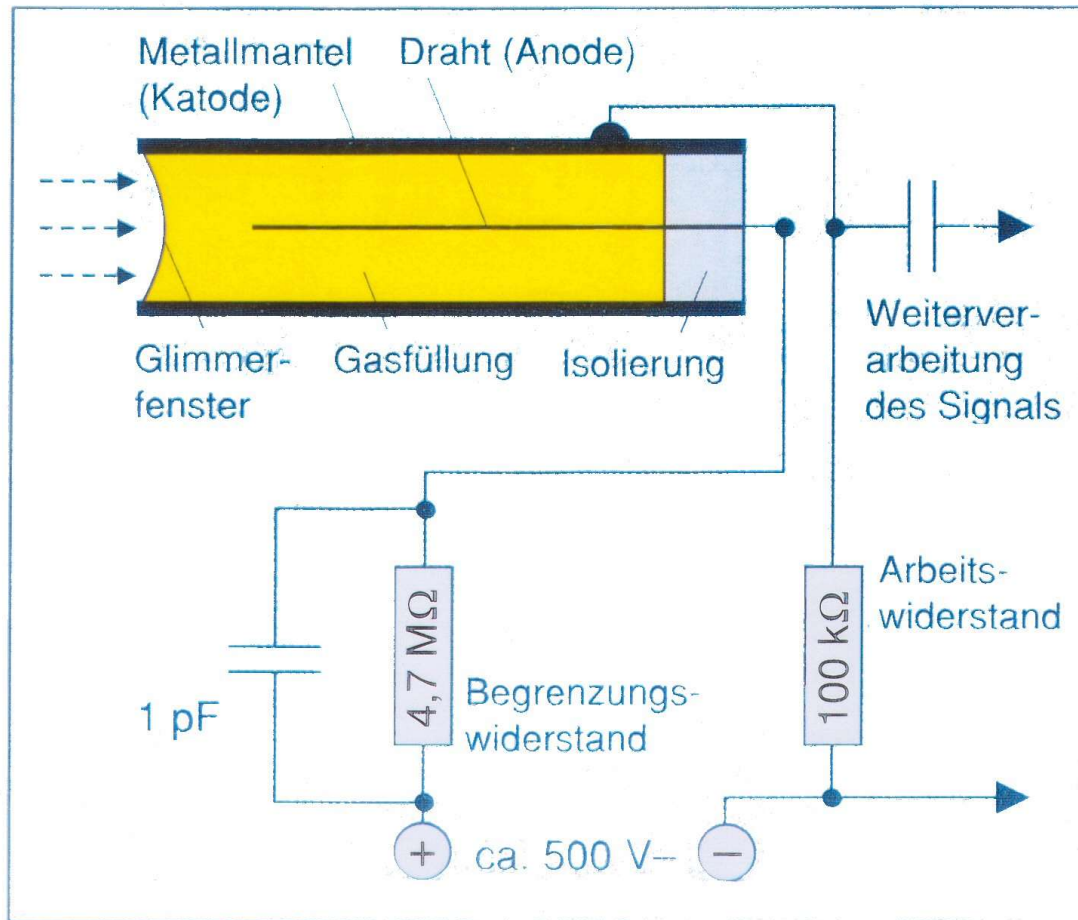
# Aufbau Ionisationskammer



11.)

*Prinzipbild*

# Gasgefülltes Zählrohr (Schnitt)



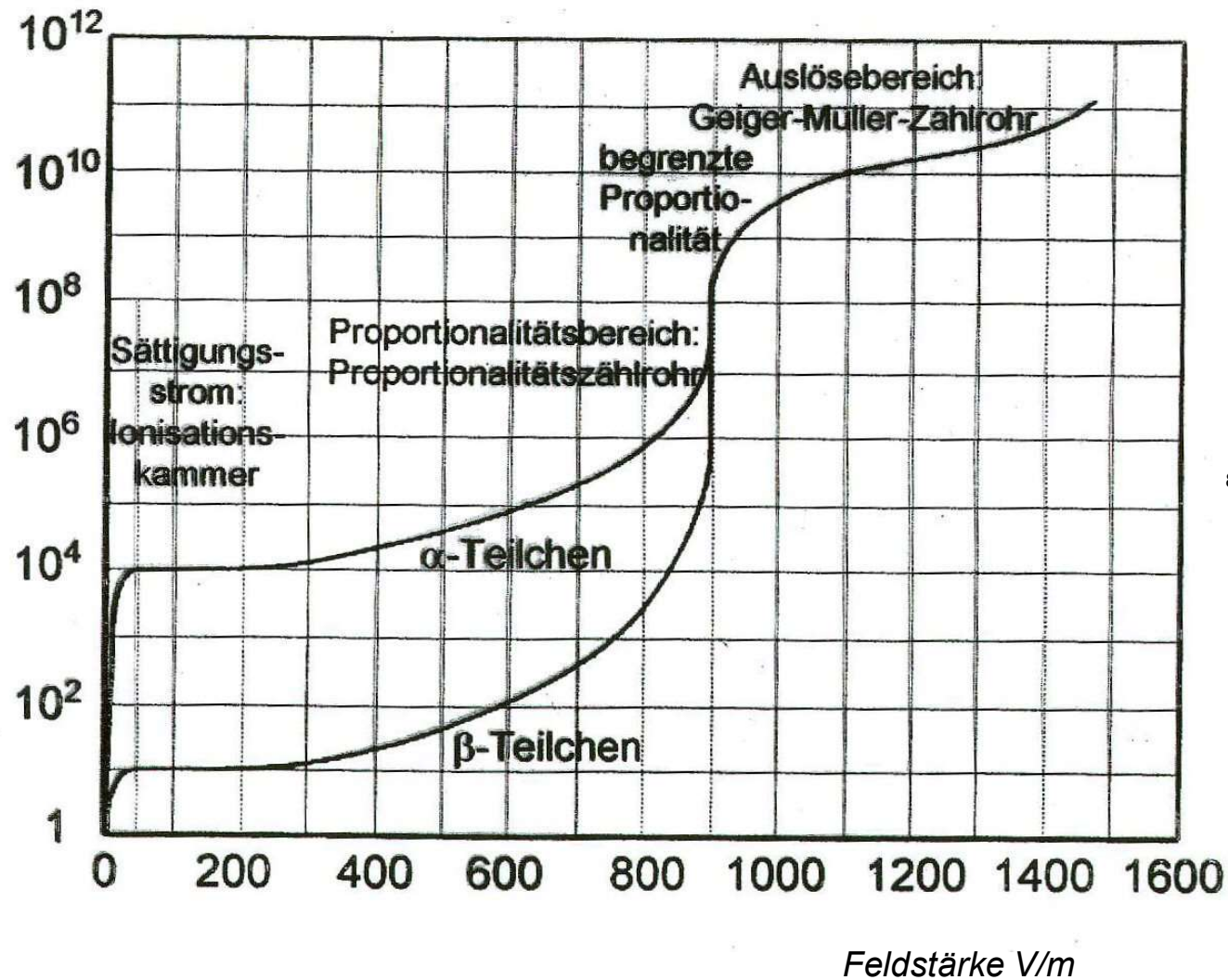
**Kammer- und Elektrodenmaterial**  
von Art der nachzuweisenden Strahlung abhängig,  
(Al, Cu, Messing, Graphit, e-leitende Kunststoffe)

**Füllgas:**  
Luft, Wasserstoff, Argon, Kohlendioxid, Bortrifluorid

**Isolierung:**  
sehr wichtig, hoher Widerstand  
Bernstein, Quarz, Polystyren, Keramik

# Impulshöhe als Funktion der Feldstärke

Impulse



8.)

# Szintillationszähler I

---

---

- Nutzung der von angeregten Atomen oder Molekülen fester oder flüssiger Körper emittierten Fluoreszenzlichtblitze (Szintillationen), Vorteil hohe Nachweiseffektivität
- **Grundprinzip:**

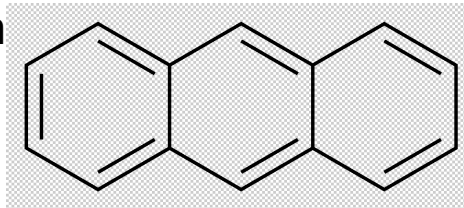
Szintillator (nachzuweisende Strahlung erzeugt Fluoreszenzlicht) und Sekundärelektronenvervielfacher – SEV- (Umwandlung der Lichtblitze in elektrische Impulse)
- eignen sich gut für  $\gamma$ -Strahlen (dicke Kristalle, z. B. NaI/Tl) und energiearme  $\beta$ -Strahlung (Tritium, Kohlenstoff-14),  $\alpha$ -Strahlung (dünne Schichten)
- Szintillatorabmessungen so dimensionieren, dass Strahlung voll absorbiert wird

# Szintillationszähler II

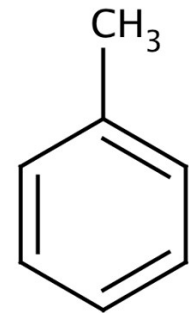
## Szintillatoren:

- Anorganische Kristall- und Glasszintillatoren:  
NaI/Tl, ZnS/As, CsI/Tl

- Organische Kristallszintillatoren  
**Antracen**

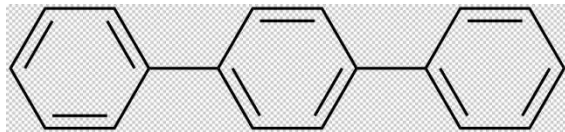


- Organische Lösungen:  
Lösungsmittel, **Touluen**, Xylen werden geringe Mengen Substanz  
zugesezt:

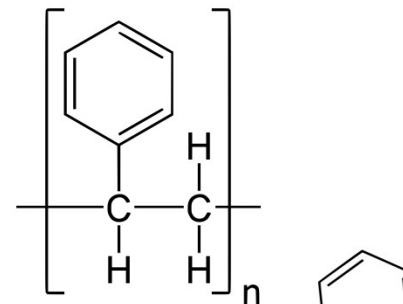


**p-Terphenyl, (A) 1,4-Bis(5-phenyloxazol-2-yl)benzen (POPOP) (B)**

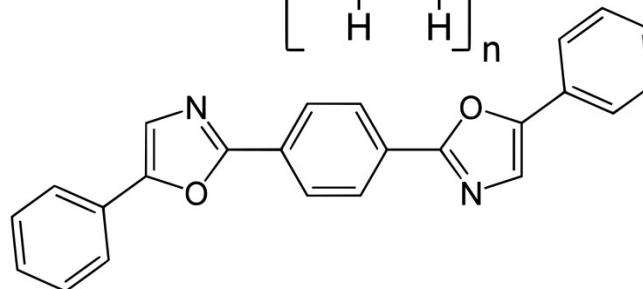
- Organische Plastszintillatoren:  
polymerisierte Kunststoffe (**Polystyren**)



(A)



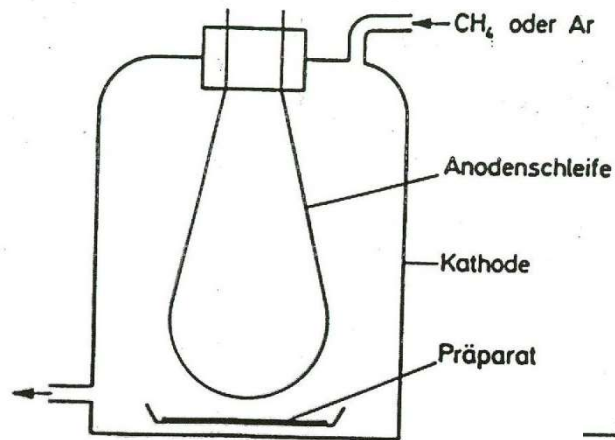
(B)



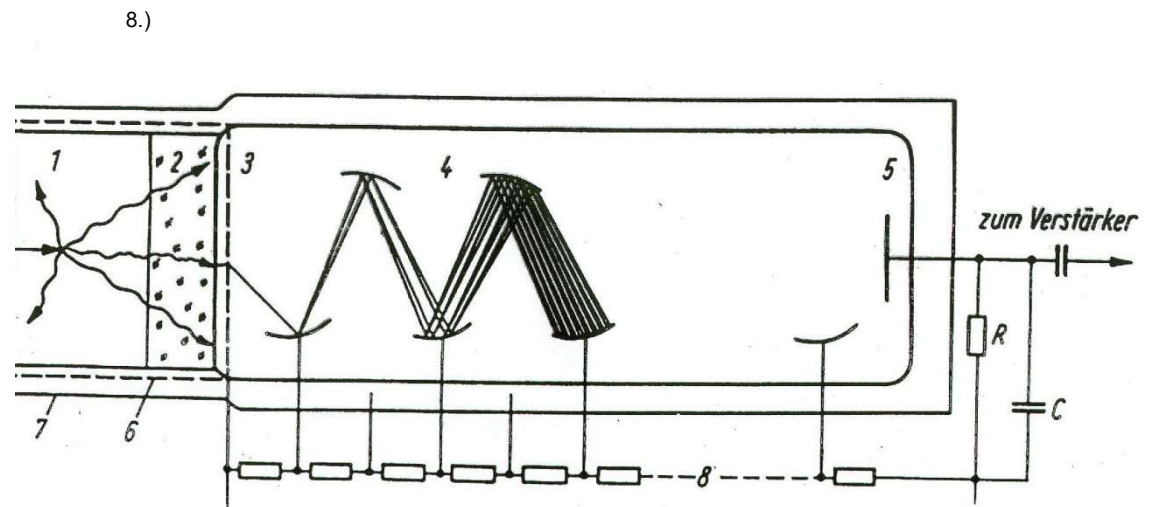
- 
- 
- homogenes Gemisch aus Probe und Szintillations-Cocktail
  - **Szintillations-Cocktail** wird durch  $\beta$ - oder  $\alpha$ -Teilchen zur Emission von Lichtquanten angeregt:
    - **Lösungsmittel** (z. B. Toluol, Benzol, Xylol, **Diisopropylnaphtalin**)  
kinetische Energie des Kernzerfalls regt p-Elektronen an: 200-300 nm
    - **primärer Szintillator**  
(z.B. Oxazole, Oxadiazole, Benzooxazole, Pyrazoline, **2,5 Diphenyloxazol PPO** ca.  $10^{-2}$  m)  
*Energieübertragung durch Molekülzusammenstöße, Strahlung Dipol-Dipol-Wechselwirkung: 340-400 nm*
    - **sekundärer Szintillator**  
(ähnliche Struktur wie primäre aber längerwelliges Fluoreszenzmaximum, z.B. **p-bis-(o-Methylsteryl)-benzol** ca.  $10^{-4}$  m)  
*absorbiert das Licht vom primären Szintillator und gibt es als Fluoreszenzlicht weiter – „Wellenlängenschieber“ 400-470nm*



## Aufbau Durchflusszähler



## Aufbau Szintillationszähler



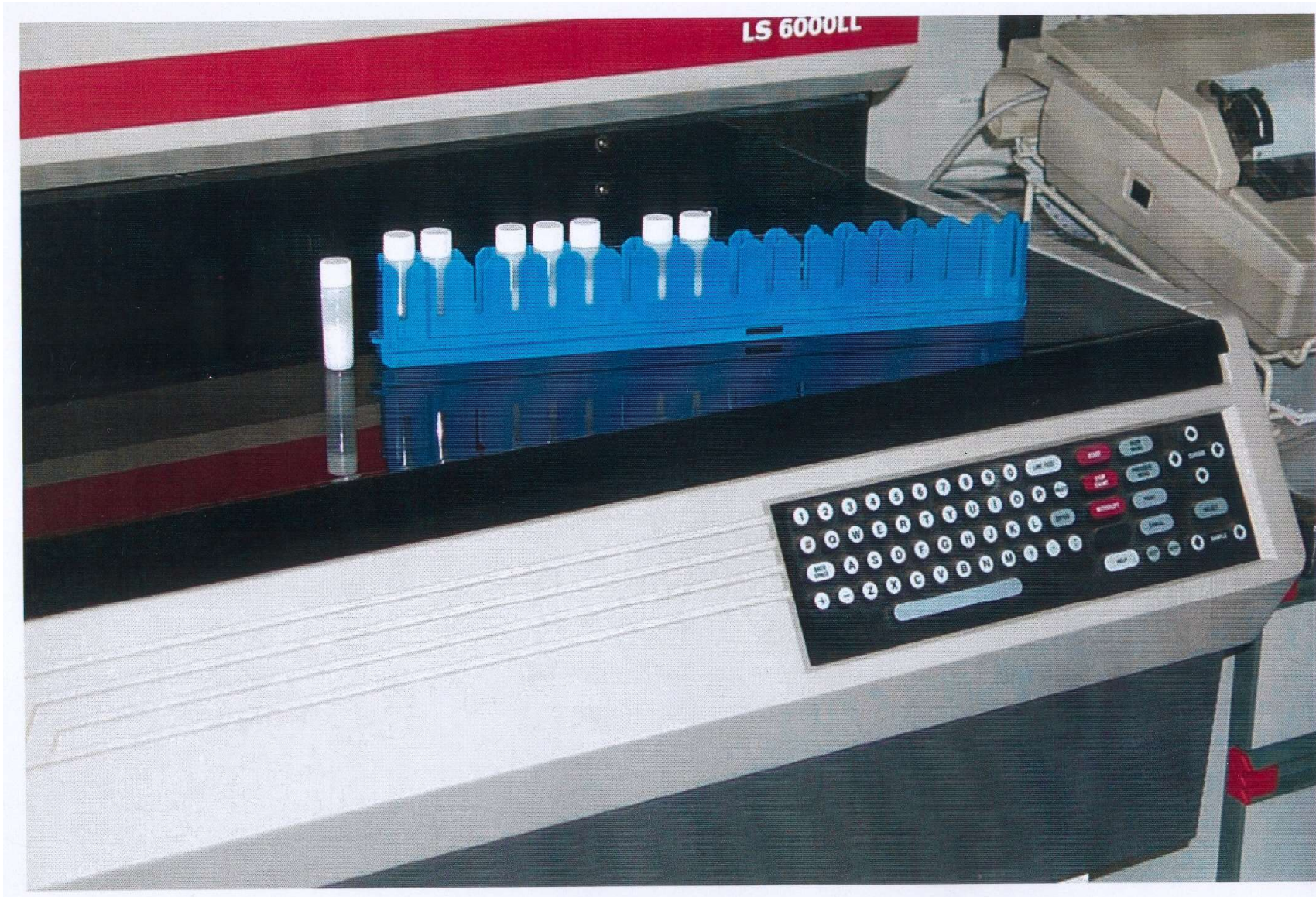
1 Szintillator, 2 Lichtleiter, 3 Photokatode, 4 Dynoden, 5 Anode, 6 Reflektor,  
7 Lichtdichtes Gehäuse, 8 Spannungsteiler

## Szintillationszähler, kommerzielles Gerät





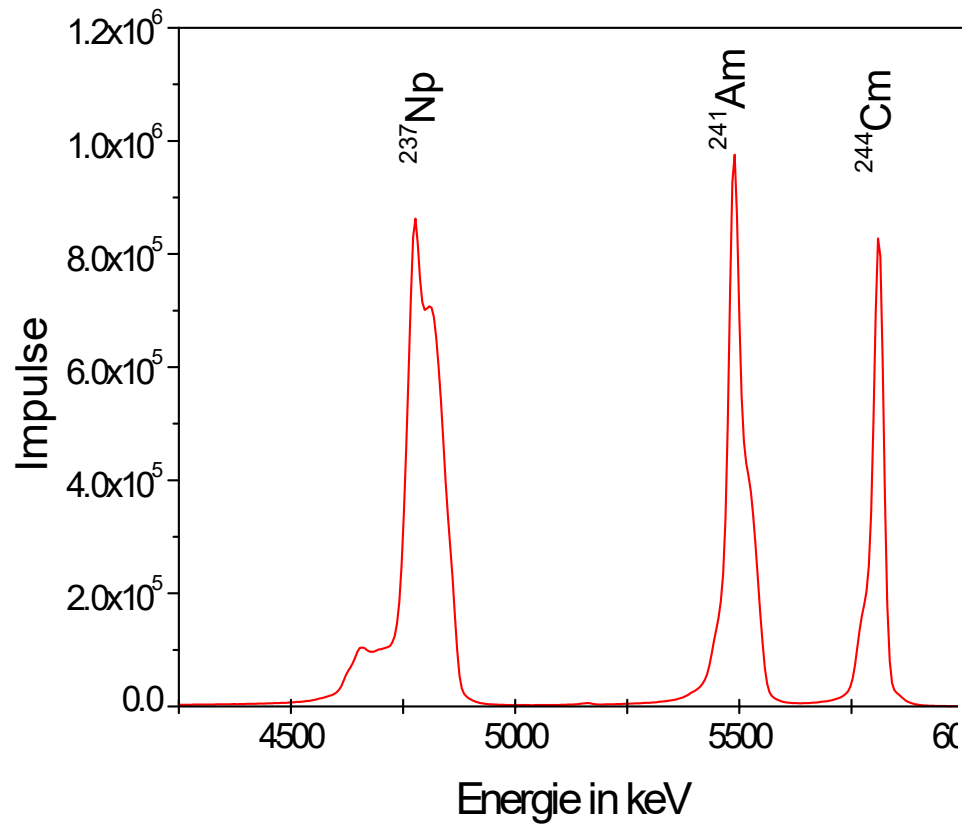
## Szintillationszähler, kommerzielles Gerät



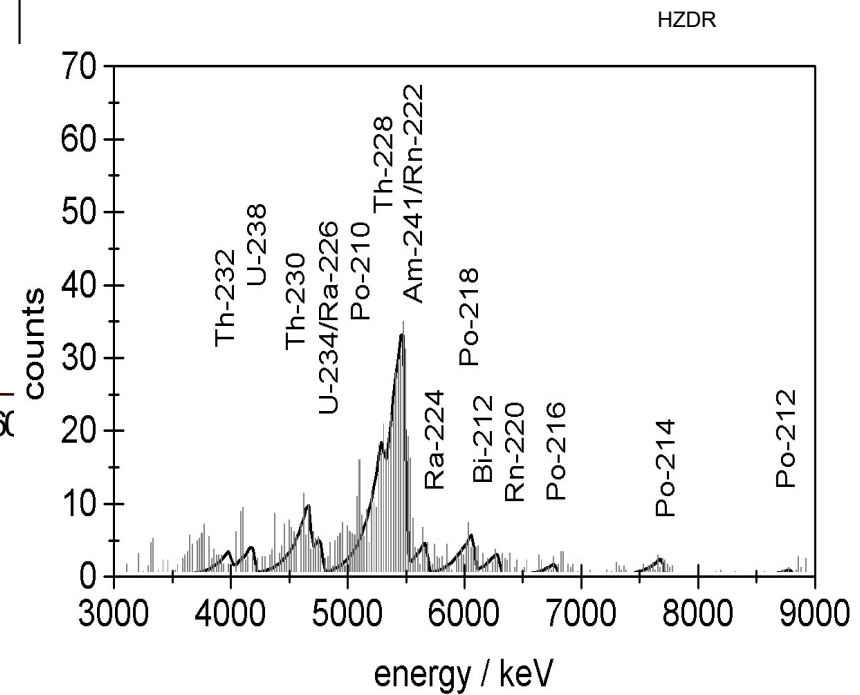
HZDR

# $\alpha$ -Spektrometrie

## Typische $\alpha$ -Spektren



$\alpha$ -Standard Probe

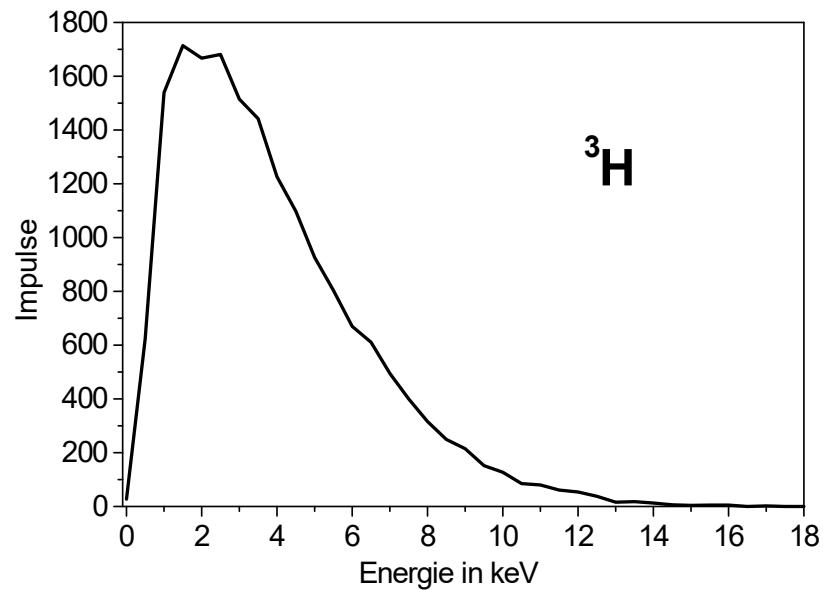


mit  $^{241}\text{Am}$  kontaminierter Bauschutt

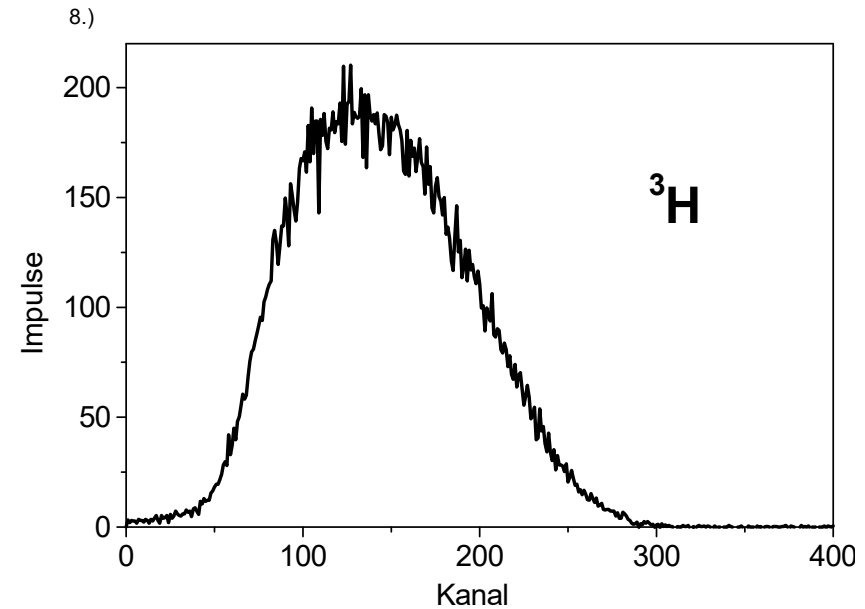
# **$\beta$ -Spektrometrie** Typische $\beta$ -Spektren (niedrige Energie)

**lineare Energieachse**

**$^3\text{H}$ : 18,6 keV maximale  $\beta$ -Energie**



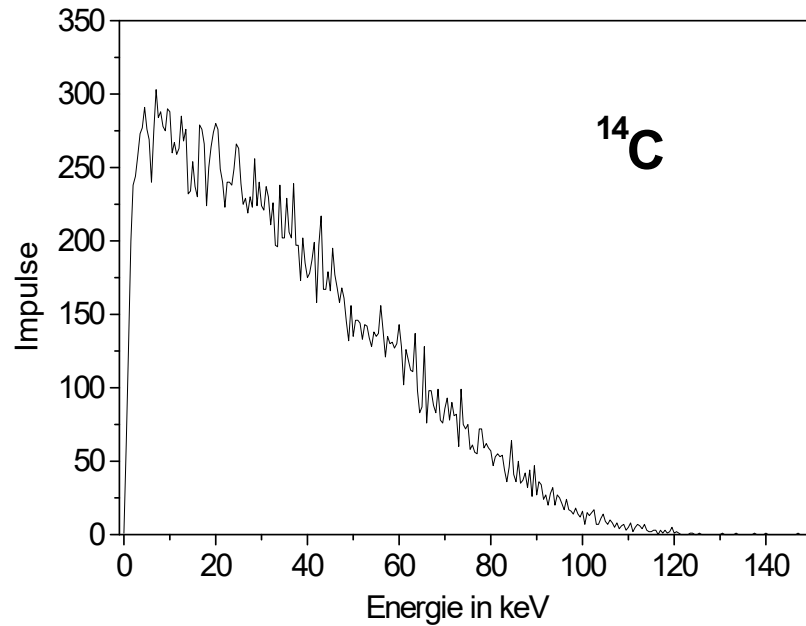
**logarithmische Energieachse**



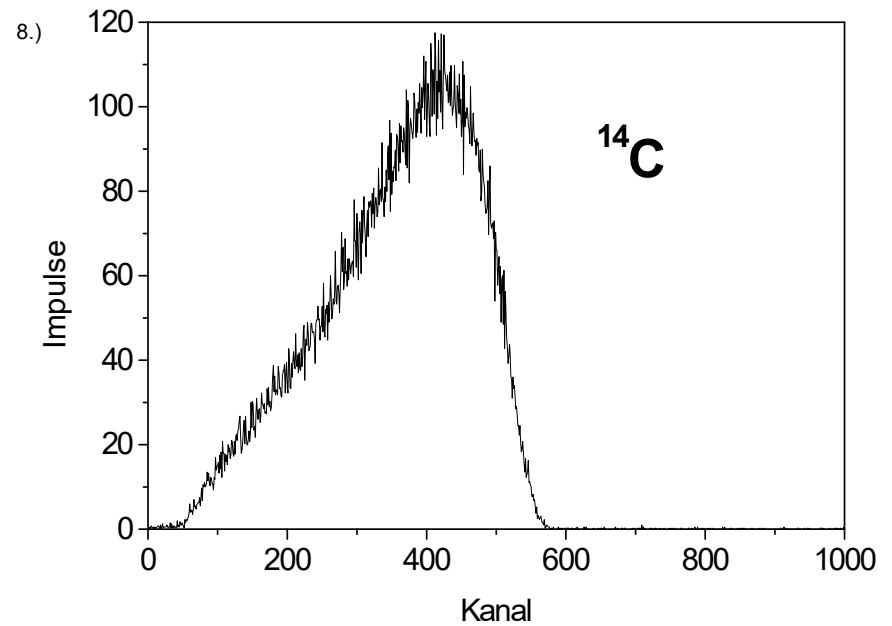
# **$\beta$ - Spektrometrie** Typische $\beta$ - Spektren mittlerer Energie

**lineare Energieachse**

**$^{14}\text{C}$ : 156,5 keV maximale  $\beta$ -Energie**



**logarithmische Energieachse**



# Messung der Gamma-Energie mittels Halbleiterdetektor I

---

---

- bei Bestimmung der Gesamtaktivität kann man nicht angeben, welche Radionuklide die Strahlung verursacht haben
- die meisten Radionuklide senden aber bei Kernumwandlung Gammaquanten bestimmter Energie aus – Energiewert(e) = Radionuklid
- Bestimmung mittels Szintillationszähler oder Halbleiterdetektor

Radionuklid	Energie der Gammaquanten in keV
$^{24}\text{Na}$	1275
$^{60}\text{Co}$	1331, 1173...
$^{40}\text{K}$	1461
$^{134}\text{Cs}$	605, 796, 569 ...
$^{137}\text{Cs} / ^{137\text{m}}\text{Ba}$	662
$^{131}\text{I}$	364, 637, 284
$^{16}\text{N}$	6129, 7115
$^{226}\text{Ra}$	186 (262 ...)
$^{238}\text{U}$	(50)
$^{90}\text{Sr}$	kein $\gamma$



# Messung der Gamma-Energie mittels Halbleiterdetektor II

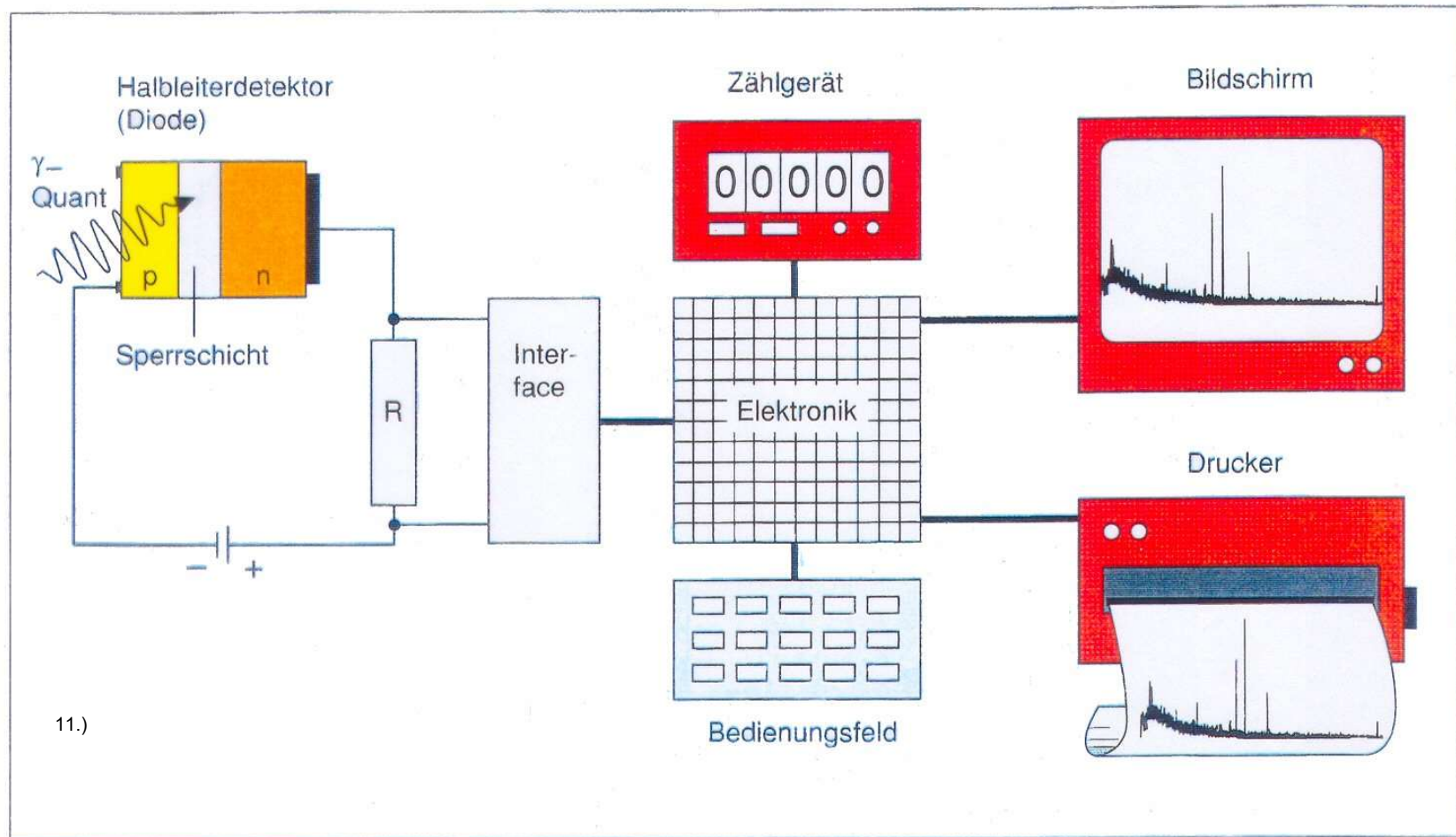
---

---

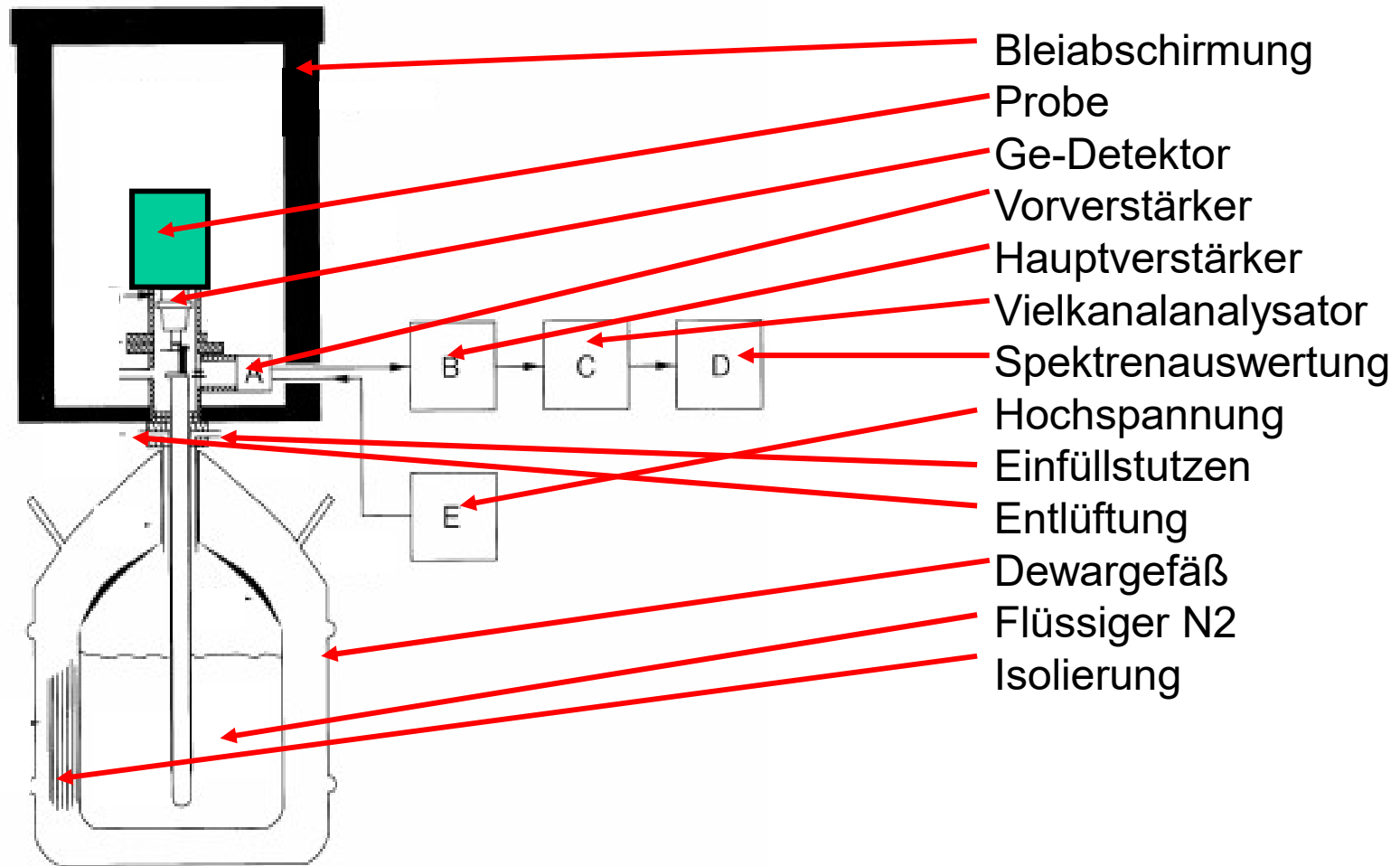
- Halbleiterdiode, die in Sperrrichtung betrieben wird
- dringt ein Gammaquant in die Sperrschicht ein, werden Elektronen-Loch-Paare erzeugt (bei Si 3,23 eV, Ge 2,84 eV)
- der hervorgerufene geringe Strom führt zu einem Spannungsabfall an einem Arbeitswiderstand, der elektronisch verarbeitet wird
- jedes Gammaquant erzeugt einen Spannungsimpuls, der gezählt wird, die Amplitude des Impulses ist proportional zur Energie, die das Quant an das Halbleitermaterial abgegeben hat
- wird die gesamte Energie an das Halbleitermaterial abgegeben, ist die Höhe des Spannungsimpulses der Energie des Quants proportional
- mittels „Computer“ werden die Impulse nach ihrer Höhe „elektronisch sortiert“  
x-Achse: Gammaenergie (in Form von Kanälen)  
y-Achse: Anzahl der Impulse, die von Quanten bestimmter Energie erzeugt werden (Spektrum)
- Kühlung der Detektoren (Verhinderung der unkontrollierten Elektronen-Lochpaarbildung durch Wärme), Abschirmung der Probe gegen Umgebungsstrahlung



# Versuchsaufbau zur Gammaspektrometrie (vereinfachte Darstellung)



## Schematischer Aufbau des $\gamma$ -Spektrometers

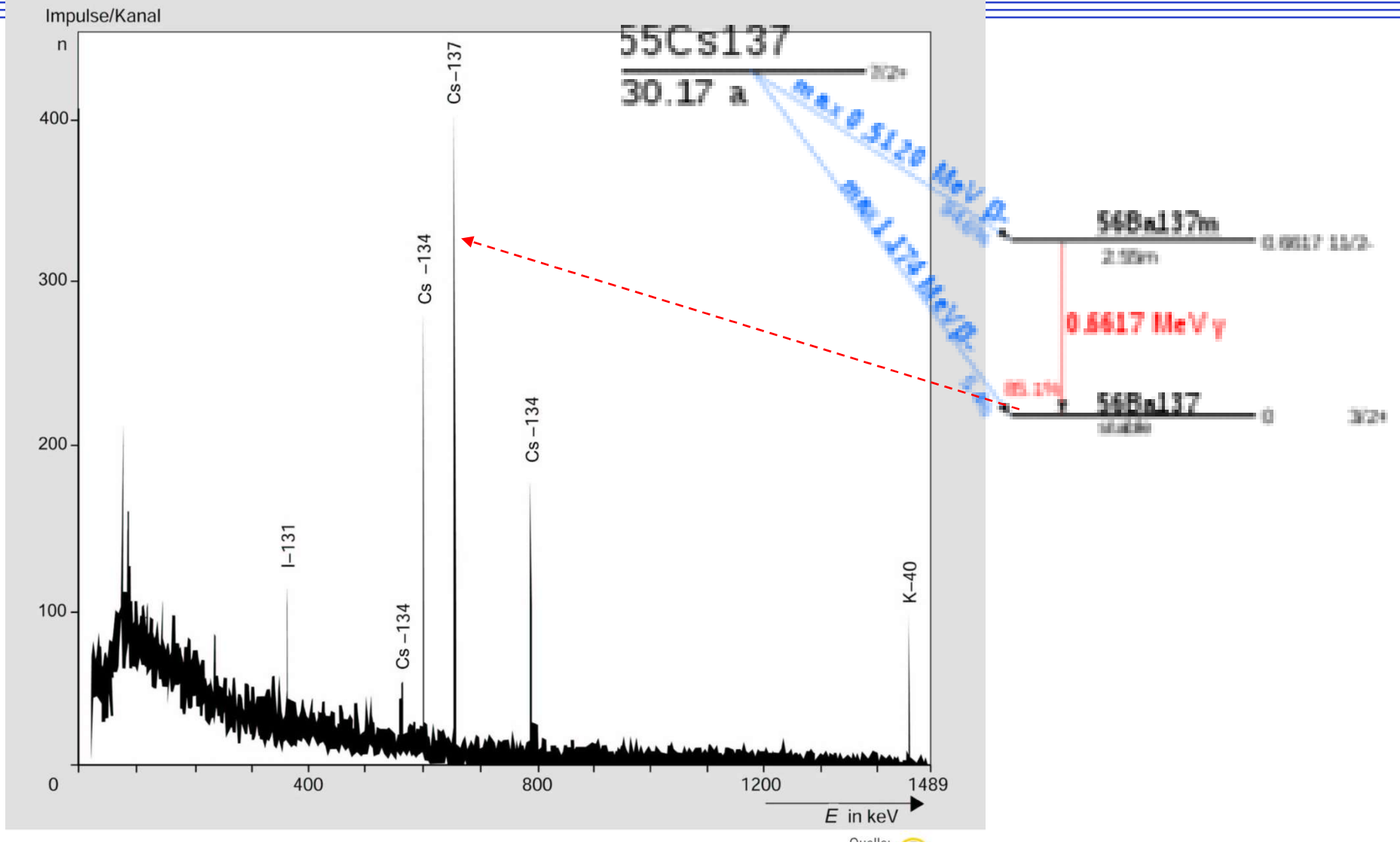


## Gamma-Spektrometer, kommerzielles Gerät



HZDR

# Gamma-Energie-Spektrum

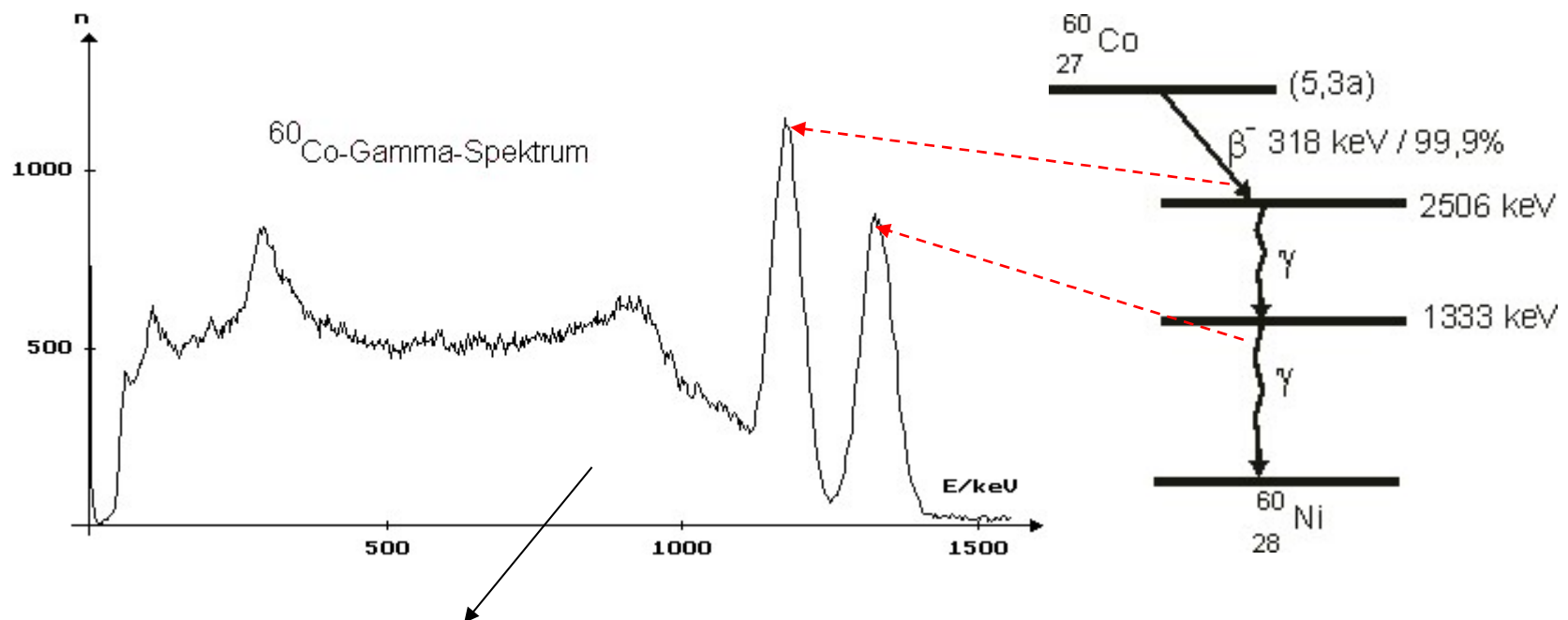


*Beispielspektrum einer Probe*

# Gamma-Spektrum von Co-60

Das Isotop Co-60 zerfällt beim  $\beta$ -Zerfall zu 99,9% aller Zerfälle zunächst in einen angeregten Zustand des Ni-60 Kern.

Dieser geht bald darauf unter Aussendung zweier  $\gamma$ -Quanten der Energien **1173 keV** und **1333 keV** in den Grundzustand über.



*zwei Fotopeaks, sowie Comptongebirge mit Comptonkante und Rückstreupeak sowie K-Linien*



## Geeignete Messanordnungen für verschiedene Strahlungsarten

Art der Strahlung	Ionisationskammer	Proportionalzähler	Geiger-Müller-Zähler	Szintillationszähler	Halbleiterdetektoren
$\alpha$ -Strahlung	günstig	sehr günstig (Methandurchflußzähler)	ungünstig	geeignet (ZnS) günstig (flüss. Szintillatoren)	günstig (Si-Sperrschichtzähler)
Energiereiche $\beta$ -Strahlung (> 1 MeV)	ungeeignet	geeignet	sehr günstig	günstig (organ. Kristalle)	günstig (Si-Sperrschichtzähler)
Energiearme $\beta$ -Strahlung (< 0,5 MeV)	ungeeignet	günstig	ungünstig	sehr günstig (flüssige Szintillatoren)	günstig (Si-Sperrschichtzähler)
Energiereiche $\gamma$ -Strahlung (> 0,1 MeV)	ungeeignet	ungeeignet	ungünstig	sehr günstig (NaI, CsI)	sehr günstig (Ge(Li)-Zähler)
Energiearme $\gamma$ -Strahlung (< 0,1 MeV)	ungeeignet	ungeeignet	geeignet (Röntgenzählrohr)	günstig (NaI, CsI)	sehr günstig (Si(Li)-Zähler)

---

---

---

---

---

---

**- Dosimetrie**

# Filmdosimeter

---

---

- **Verwendung als amtliches Dosimeter**
- dünne, lichtdichte Kunststoffkassette mit zwei Filmabschnitten
- Teile des Films sind mit verschiedenen Metallfiltern abgedeckt
- Gammastrahlen lösen in der Kunststoffwand, den Filtern und im Film Elektronen aus
- Elektronen bewirken in der Silberbromid-Schicht Ionisationen, bei Entwicklung entstehen dort Silberkörnchen, diese sind für Licht undurchlässig und rufen eine Trübung hervor
- Trübung ist von Energie und Menge der eingefallenen Quanten abhängig
- Auswertung der Trübungsunterschiede, Ionendosis mit Computer berechenbar
- zur Energiebestimmung Metallfilter
- Bleifilter zur Bestimmung aus welcher Richtung Strahlung kam (von hinten = vollständige Bestrahlung des Körpers)



# Filmdosimeter (Typ Gleitschattendosimeter)

Einsatzgebiete: Überwachung in Gamma-(Beta)-Strahlungsfeldern

Messprinzip: Schwärzung fotografischer Film (Ionisation durch rad. Strahlung)  
Absorberplatten → Aussagen über Art der Strahler → Personendosis

damit wird entsprechend den Anforderungen aus:

- StrlSchV: Anlage VI
  - Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosen, Teil 1: Ermittlung der Körperdosis bei äußerer Strahlenexposition (§§40, 41, 42 StrlSchV; § 35 RöV)
  - Anforderungen an Personendosimeter, Empfehlungen der Strahlenschutzkommission vom 01.03.2002, Bundesanzeiger Nr. 112 vom 21.06.2003
- die Tiefen-Personendosis  $H_p(10)$  bestimmt.

Durch das Prinzip des Gleitschattens wird der dosis-mitbestimmende Einfallswinkel der Strahlung automatisch berücksichtigt.

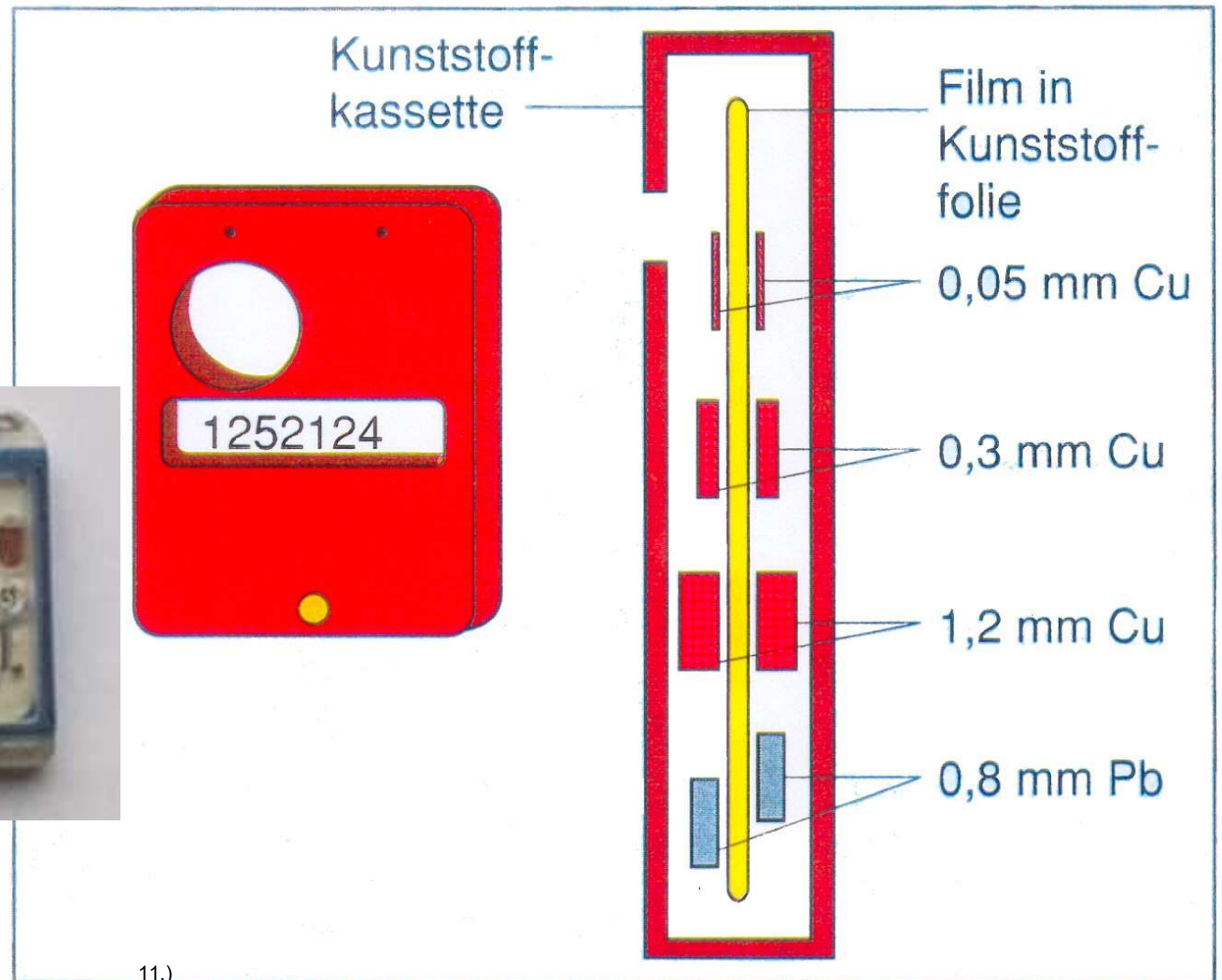
→ Tragezeitraum für Mitarbeiter 3 Monate

→ Auswertung an LPS-Berlin als zugelassene Messstelle  
(max. 6 mSv/a für strahlenexponierte Person Typ B)



HZDR

# Prinzipaufbau Filmdosimeter



# Thermolumineszenzdosimeter

---

- Amtliches Dosimeter
- Messprinzip: **Thermolumineszenz**
- Thermolumineszenz beruht auf durch Strahlung hervorgerufene angeregte Zustände (e-Lochpaare)
- beim Erhitzen (ca. 300 °C) Übergang unter Lichtemission in den Grundzustand
- hierbei ist die emittierte Lichtintensität proportional zur empfangenen Strahlungsdosis

**Einsatz bei  $\beta$ -Strahlern, Photonenstrahlung**



# Stabdosimeter

---

---

---

- arbeitet nach dem Prinzip der Ionisationskammer (Elektrometer, Elektroskop)
- wird an einer Spannungsquelle aufgeladen, bewegliches Fädchen spreizt sich (Nullwert)
- Auftreffen von Gammastrahlen, Entladung des Elektrometers, die Spannung an ihm sinkt, Rückgang des gespreizten Fädchens
- Messwert, Skala ist in  $\mu\text{Sv}$  kalibriert, Äquivalentdosis ablesbar
- solange keine Bestrahlung erfolgt, beträgt der Spannungsrückgang durch Selbstentladung nur wenige Prozent
- bei Messung geringenergetischer Gammastrahlung – Kunststoffumhüllung statt Metall

# Prinzipaufbau Stabdosisimeter

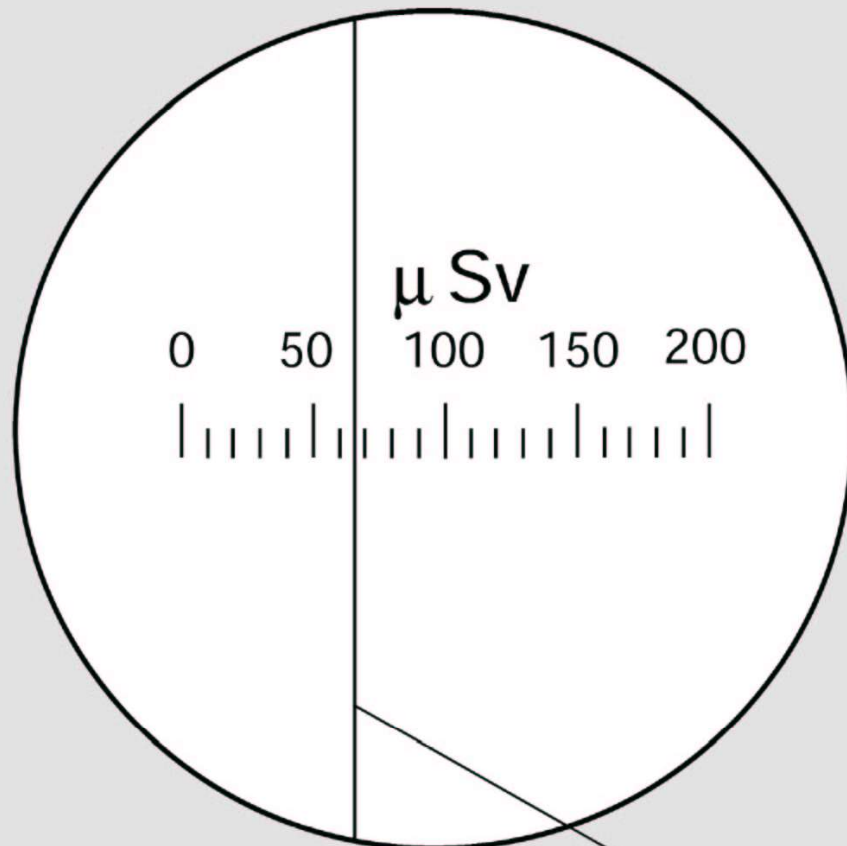
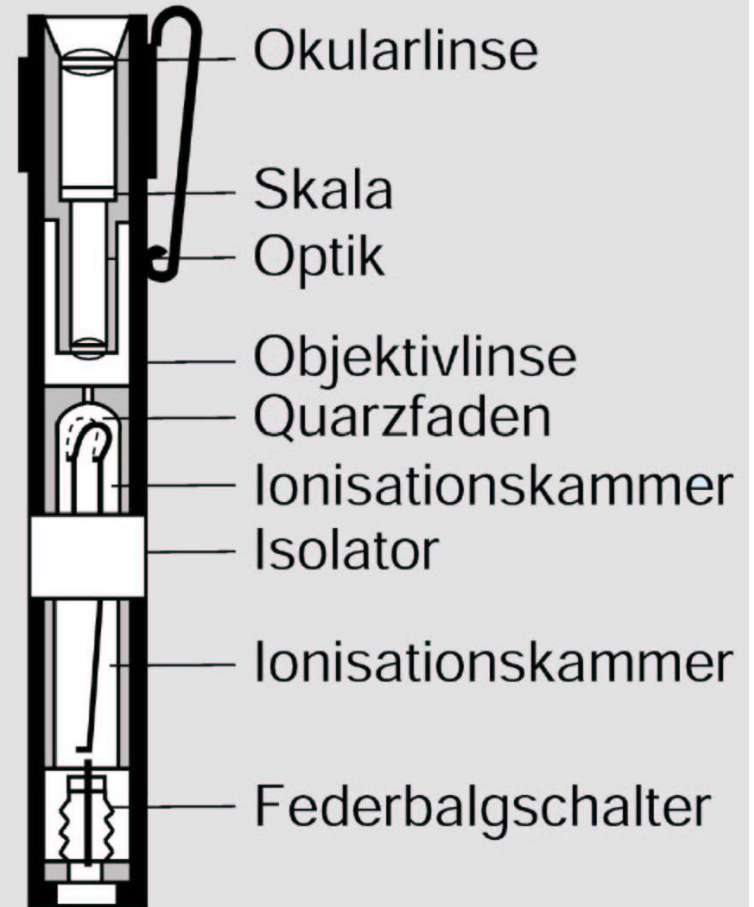


Bild des Quarzfadens



# Neutronenmessgeräte

---

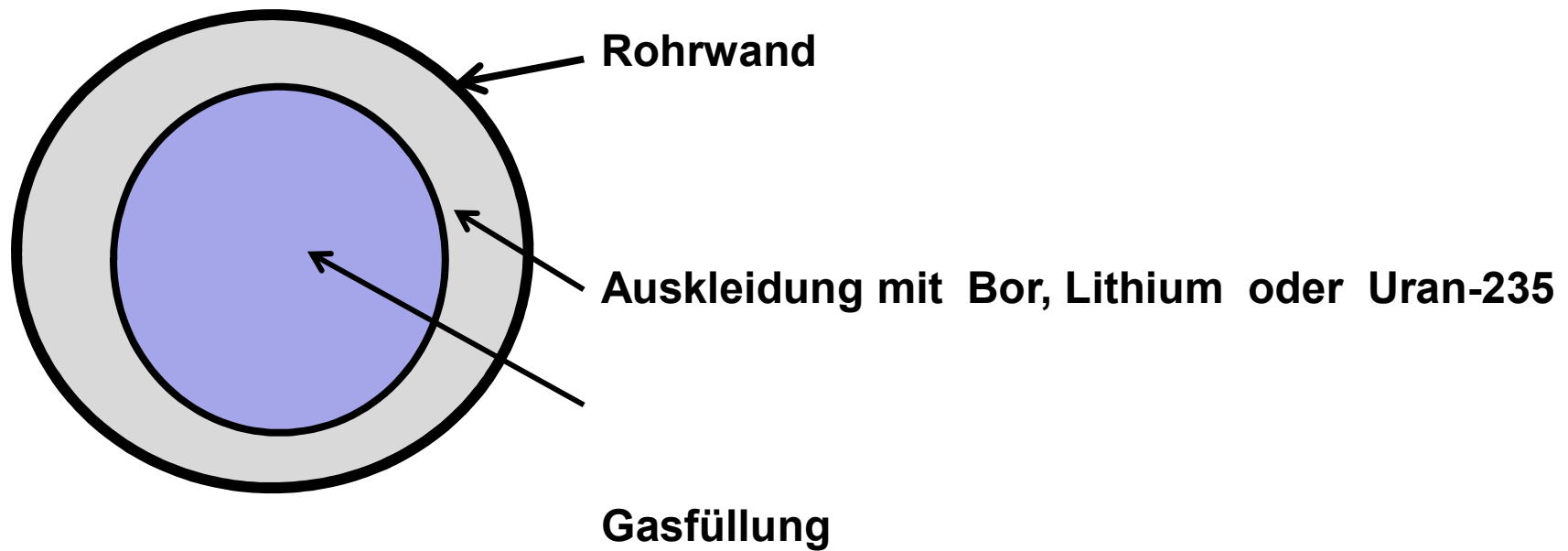
---

- keine direkte Ionisierung von Atomen, deshalb Nutzung von Kernreaktionen / Kernspaltungen, die dabei erzeugten geladenen Teilchen (Alphateilchen, Trümmerkerne) bewirken in der Gasfüllung Ionisation
- Nachweis von thermischen Neutronen:  
\*gasgefülltes Aluminium oder Messingrohr, Innenseite mit Bor, Lithium oder Uran-235 ausgekleidet
- Reaktionen:  
\*Bor bzw.  $\text{BF}_3$ -Gas
$$^{10}_5\text{B} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^7_3\text{Li} + ^4_2\text{He}$$
  
\*Lithium
$$^6_3\text{Li} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^3_1\text{H} + ^4_2\text{He}$$
  
\*Uran-235
$$^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{236}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{56}\text{Ba} + ^{89}_{36}\text{Kr} + 3\ ^1_0\text{n}$$

# Zählrohr für Neutronenstrahlung

---

---



# Oberflächenkontaminationskontrolle

---



HZDR

## Proportionalzählrohr Typ LB 122

- Zählgas( Methan/Wasserstoff-Mischung P10)
- Ablesbar Impulsrate, nuklidbezogene Flächenaktivität, Kalibrierung erforderlich
- $\alpha, \beta$ -Detektor, Detektorfläche ca. 270 cm<sup>2</sup>
- Messbereich 0...999 kBq/cm<sup>2</sup>



# Oberflächenkontaminationskontrolle



## Proportionalzählrohr Typ LB 133-1

- $\beta$ ,  $\gamma$ -Strahlung
- Messbereich: 30 nSv/h- 30 mSv/h
- Optisch akustische Schwellwertanzeige
- Photonenenergie 30 keV – 1,3 MeV

HZDR



# Prüfung auf Kontaminationen

---

---



HZDR

# Ganzkörperzähler

---

---

---



Quelle:   
Informationskreis  
KernEnergie



# Ganzkörpermonitor



11.)

Quelle:   
Informationskreis  
KernEnergie

**Ausgang Kontrollbereich**