

Radioökologie und Strahlenschutz

Vorlesung FHH: SS 2017

Ulrich J. Schrewe

Themen:

Anwendung kernphysikalischer Messverfahren in
der industriellen Messtechnik

Eigenschaften ionisierender Strahlung

Strahlungswirkung - Strahlenschutz

1. Einleitung
2. Grundlagen Atomphysik
3. Basiswissen Kernphysik
4. Röntgenstrahlung
5. Strahlungswechselwirkung
6. Strahlungsnachweis
7. Anwendungen
8. Grundlagen Strahlenschutz

Microsoft Power Point Dateien mit Vorlesungsunterlagen
finden Sie als web-Files:

<https://webfiles.hs-hannover.de>

Oder über die Homepage

<http://schrewe.wp.hs-hannover.de>

Fragen (jederzeit) auch per e-mail:

ulrich.schrewe@hs-hannover.de

Geladene Teilchen p setzen durch Ionisation der Gasatome X Elektronen frei. Der Nachweis ionisierender Strahlung beruht meist auf Messung der durch Ionisation erzeugten elektrischen Ladung.

Reaktionsgleichung:
$$X + p \rightarrow X^+ + p + e^-$$

Die Wirkungsquerschnitte für die Ionisation $\sigma \sim 10^{-16} \text{ cm}^2$ entsprechen Kreisflächen mit Radius $R \sim 0,1 \text{ nm}$ und damit der Atomgröße.

Typische Ionisationsenergien liegen zwischen 10 und 20 eV.

Beim Bremsen geladener Teilchen in Gasen ist die mittlere Energie zur Erzeugung eines Ionenpaares mit $W/e \sim 30 \text{ eV}$ jedoch höher, da neben Ionisation auch Anregung möglich ist.

W/e hängt kaum von der Teilchenenergie ab.

Für trockene Luft gilt: $W/e = 33,97 \text{ eV}$

Bereits kurz nach Entdeckung der ionisierenden Strahlungen beobachtete man Strahlungswirkungen beim Menschen.

Die Wirkungen können schädigend aber auch heilend sein.

Als Maß zur Abschätzung einer Strahlungswirkung führte man den Begriff „Strahlungsdosis“ ein, der sich aus pharmakologischen Verstellung ableitete.

Ursprünglich wurde die „Ionendosis“ bestimmt. (Die Ionendosis entspricht der Menge der pro Masseneinheit durch Strahlungswirkung erzeugten Ionenpaare).

Heute verwendet man den Begriff der „Energiedosis“.



Louis H. Gray
1905 - 1965

Energiedosis

Basisgröße der Dosimetrie: Die Energiedosis D („absorbed dose“) in einem bestimmten Punkt eines ionisierenden Strahlungsfeldes ist die pro Masseneinheit durch ionisierende Teilchen übertragene Energie.

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\varepsilon}{dV} \quad \text{mit} \quad \varepsilon = R_{in} - R_{out} + \sum Q$$

R_{in} ist die in ein Volumenelement eintretende, R_{out} die aus dem Volumenelement austretende Energie, $\sum Q$ die Summe der Änderungen.

Die Einheit „Gray“ ist: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ (alte Einheit: "Rad" : $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rd}$)

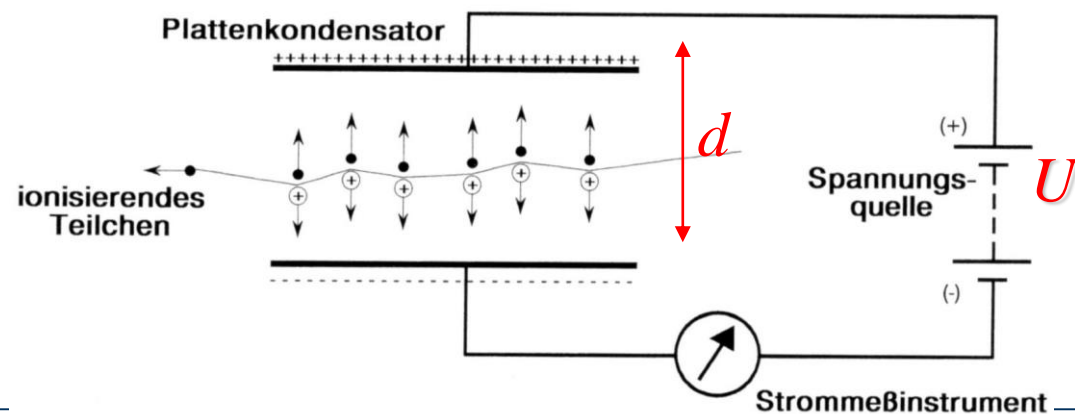
Man kann die Energiedosis durch Messung der in Luft gebildeten Ladungsmenge bestimmen, die sehr genau ermittelt werden kann. Allerdings benötigt man dann zusätzlich noch die mittlere Energie zur Bildung eines Ionenpaares W/e .

Ionisationskammern

Eine sehr einfache und trotzdem sehr genaue Methode zum Nachweis einer Strahlungsdosis ist die Messung des Ionisationsstroms in einem Plattenkondensator.

Geladene Strahlungsteilchen erzeugen Ionisation entlang ihrer Bahnsuren. Legt man die Spannung U an die Platten des Kondensators mit Abstand d , so entsteht ein elektrisches Feld $E = U/d$. Positive Ionisationsprodukte wandern – Pol, negative Elektronen zum + Pol.

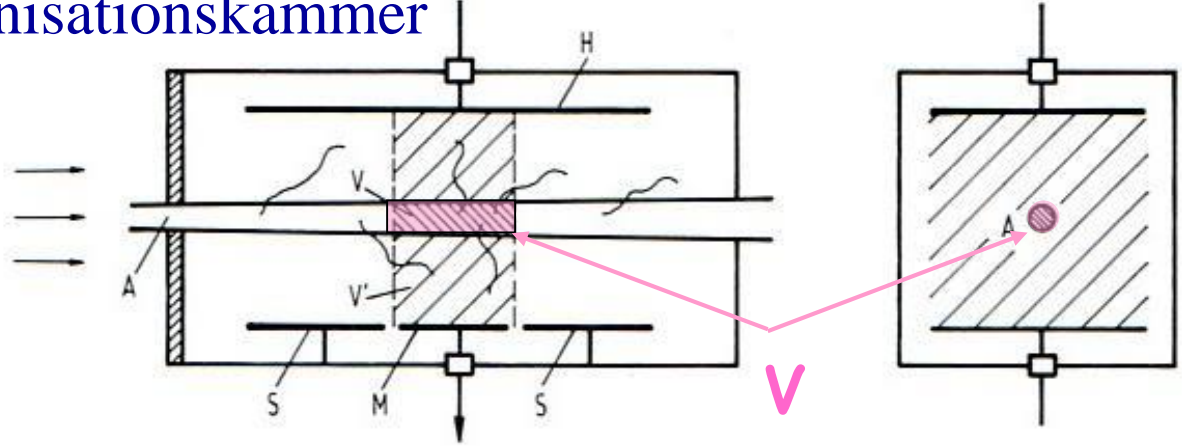
Es fließt ein messbarer elektrischer Strom I der proportional zur Dosisleistung \dot{D} ist.





Präzisionsmessungen

Ionisationskammer



Beispiel:

$$V = 100 \text{ cm}^3$$

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} = 1 \frac{\text{mGy}}{\text{s}}$$

Dosisleistung
ist proportional
zur Stromstärke:

$$\dot{D} = \frac{D}{t} = \frac{E}{m \cdot t} = \frac{(W/e) \cdot N \cdot e}{m \cdot t} = \frac{(W/e)}{\rho_{\text{Luft}} V} \cdot I$$

Beispiel:

$$I = \frac{\rho_{\text{Luft}} V \dot{D}}{W/e} = \frac{1,29310^{-4} \text{ kg} \cdot 10^{-3} \text{ J C}}{33,97 \text{ J kg s}} = 3,8 \text{ nA}$$

mit: $\frac{W}{e} = (33,97 \pm 0,06) \frac{\text{J}}{\text{C}}$ und: $\rho_{\text{Luft}} = 1,293 \text{ kg m}^3$

Welche
elektrischen
Ströme hat
man zu
messen?



Freiluftkammer der PTB



Elektroden Durchmesser: 40 cm; Hochspannung: 3 kV;
Energiebereich: 30 kV – 300 kV; Bezugsvolumen: $V = 2,5 - 180 \text{ cm}^3$;
Leckstrom: $< 50 \text{ fA}$; Unsicherheit 0,64%.



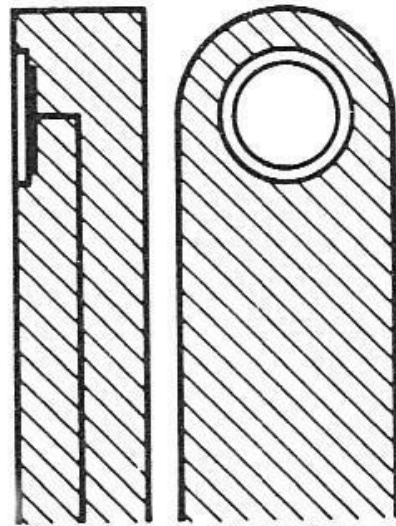
Ionisationskammern in der Medizin

Ionisationskammern (Hohlraumsonden) sind zuverlässige und sehr genaue Instrumente zur Dosisbestimmung in der Medizin.

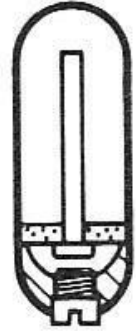
Sie besitzen bei hoher Strahlungsdosen sehr gute Reproduzierbarkeit ($< 10^{-3}$)



Kompaktkammer
(Fingerhutkammer)



Flachkammer



Kondensator-
kammer

Quelle: http://www.ptw.de/radiation_therapy.html

Ionisationskammer im Strahlenschutz



Hochdruckionisationskammer (Bereich 0 - 10 R/h)

Größe: 12" (30 x 30 x 30 cm)

Konstante Nachweiswahrscheinlichkeit von 0.07 bis 10 MeV

Unsicherheit +/- 5% bei Untergrundstrahlung

HPIC Druck: 25 at reines Argongas

Isotropes, sehr großes Ansprechvermögen, sehr zuverlässig, auch unter extremen Umgebungsbedingungen.



Ionisationskammer (0,1 mR/h - 50 R/h)

Volumen: 0,5 l

Konstante Nachweiswahrscheinlichkeit von 0.02 bis 1,3 MeV

Unsicherheit +/- 10%

Luft bei Atmosphärendruck

Alte Einheit Röntgen R : $1 R \cong 0,01 Gy$





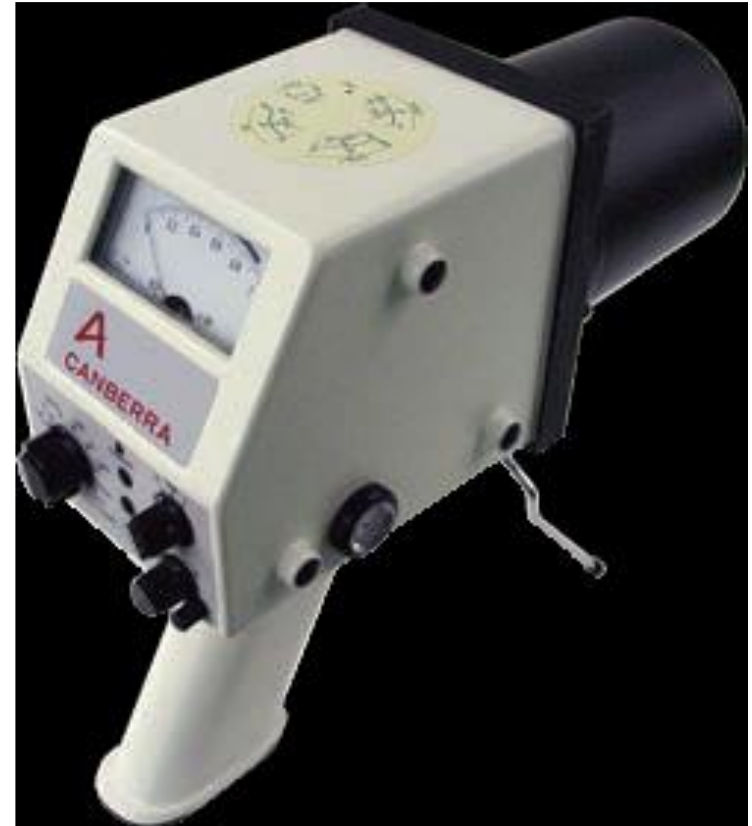
Ionisationskammer im Strahlenschutz

Ortsdosisleistungsmessgerät mit Ionisationskammer

Vorteil: Großer dynamischer Bereich. Geringe Energieabhängigkeit.

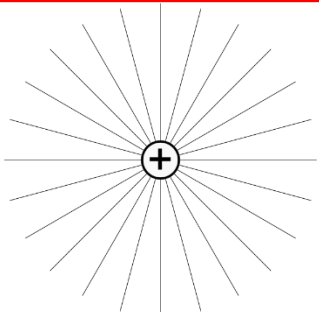
Anwendung: Gepulste Strahlenquellen.

Luftionisationskammer mit $V = (515 \pm 10) \text{ cm}^3$
Wandstärke: 0.007 g/cm^2 aus gewebeäquivalentem Material zur Bestimmung der Dosis direkt unter der Haut ($D'(0.07)$, $H'(0.07)$).
Empfindlichkeit: $4.8 \cdot 10^{-12} \text{ A pro mGy/h}$;
Untergrundanzeige: $0.6 \text{ } \mu\text{Gy/h}$ Energiebereich: 8 keV bis 2 MeV . Weitgehend isotropes Ansprechvermögen.



Proportionalzählrohr

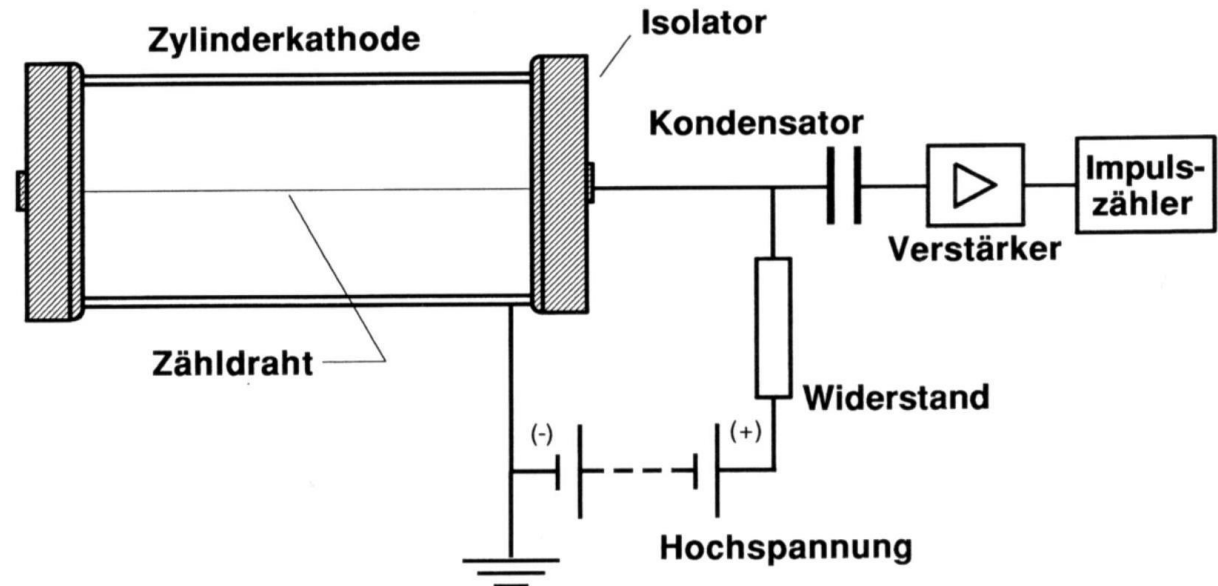
Bei geringen Strahlungsintensitäten ist es vorteilhaft, die primär erzeugte Ionisationsladung zu verstärken. In Zähldrahtnähe bewirkt die große elektrische Feldstärke (hohe Feldliniendichte) eine Ladungsvervielfachung durch Lawineneffekt.



Elektrische Feldstärke beim
zylindrischen Kondensator

$$E(r) = \frac{\lambda}{2\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{1}{r}$$

$E(r) \rightarrow \infty$ wenn $r \rightarrow 0$

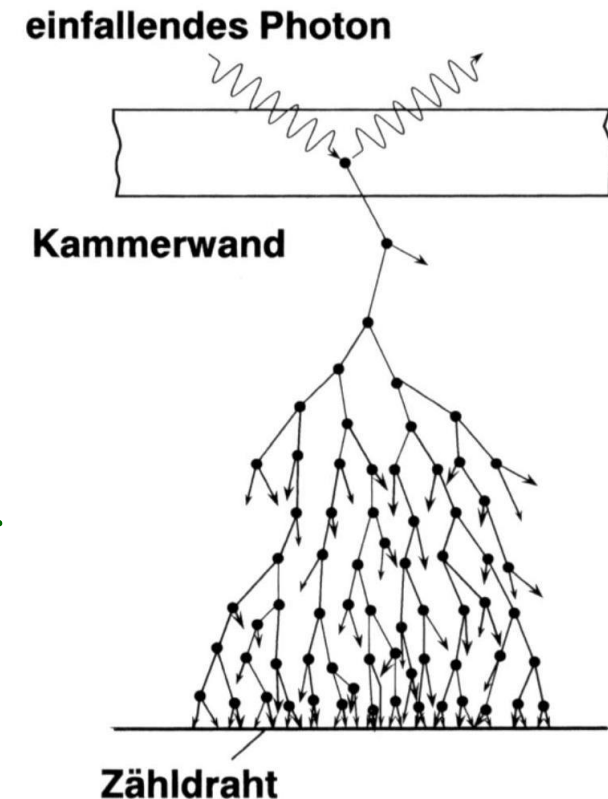


Prinzip Gasverstärkung

Bei hoher Betriebsspannung und dünnem Zählrohr kann durch die große elektrische Feldstärke in der Nähe des Zählrohres eine Ladungslawine erzeugt werden.

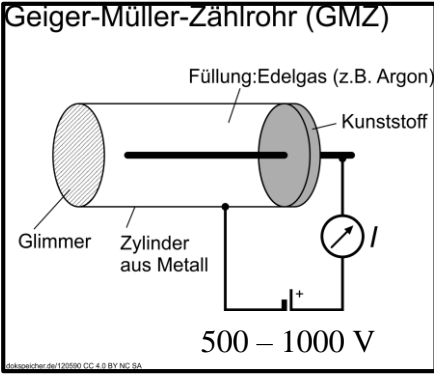
In einem Bereich dicht um den sehr dünnen Zählrohr ist die Feldstärke so groß, dass primär gebildete Elektronen durch Stoßionisation weitere Elektronen erzeugen können. Die neu gebildeten sekundären Elektronen werden erneut beschleunigt und erzeugen dann ihrerseits wieder neue Elektronen.

Folge: Man erhält ein exponentielles Anwachsen der elektrischen Ladung → Ladungslawine

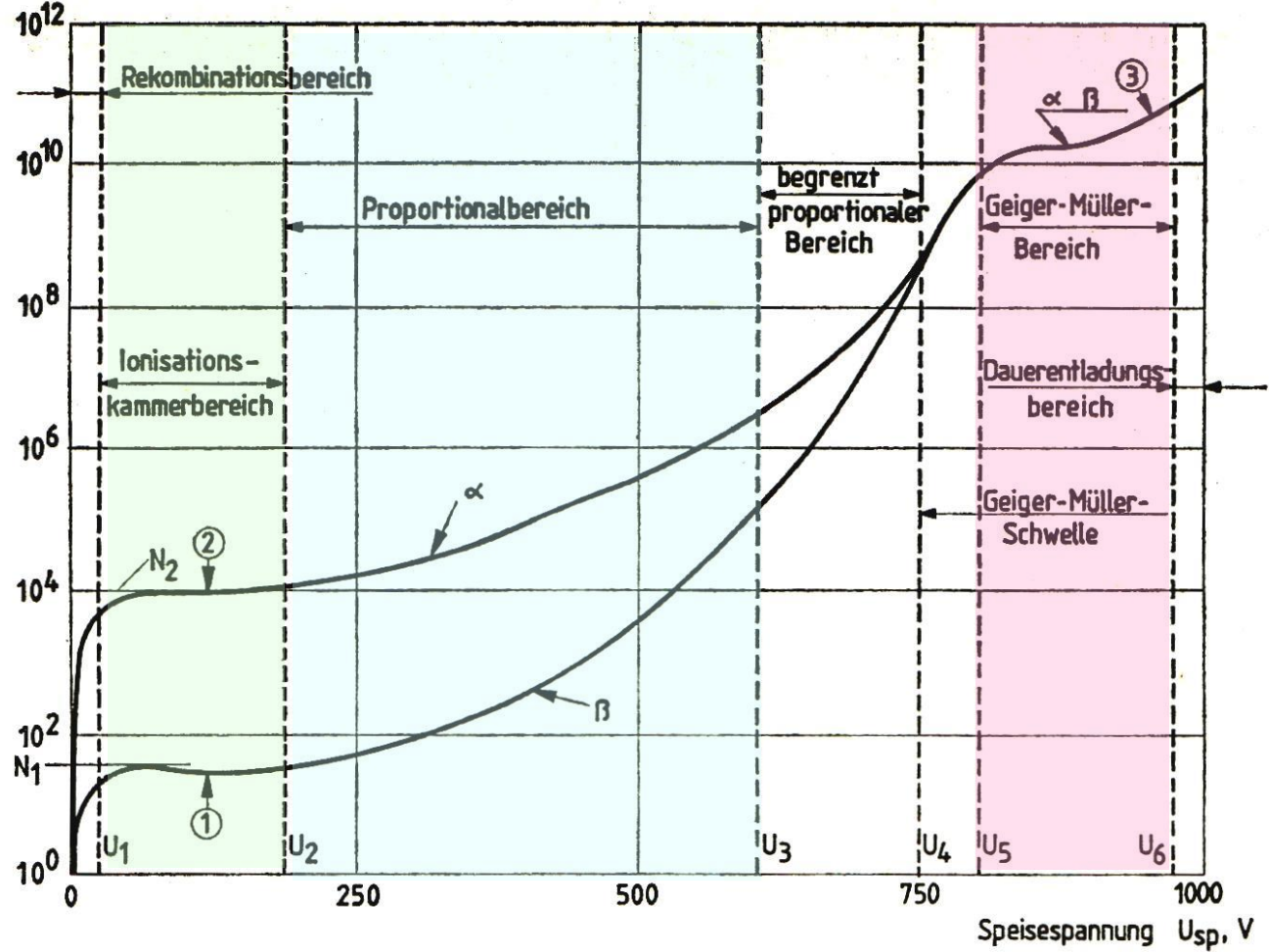




Kennlinien der Gasverstärkung



Proportionalzähler im Strahlenschutz

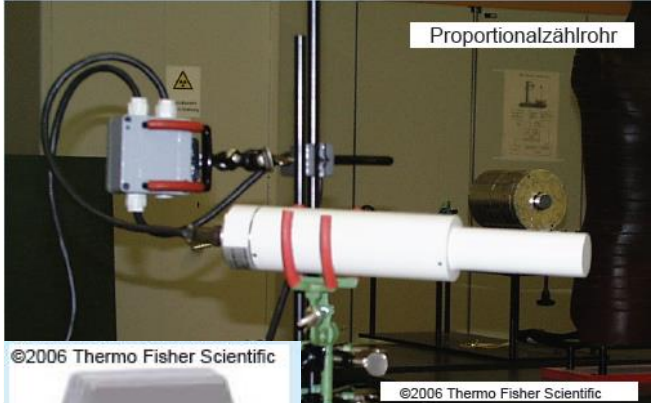


Ionisationskammer Proportionalzähler Geiger-Müller-Detektor



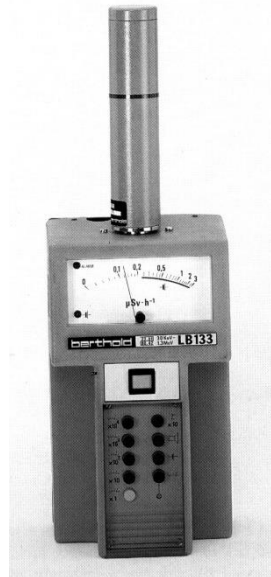
Dosimeter mit

Proportionalzählern



©2006 Thermo Fisher Scientific

©2006 Thermo Fisher Scientific



Proportionalzählrohr

Proportional-Zählrohr 70 020
mit End-Eintrittsfenster für den separaten Nachweis von α - und β -Strahlung



Proportional-Zählrohr 70 021/022
mit Glimmer-/Al-Fenster im „pancake style“



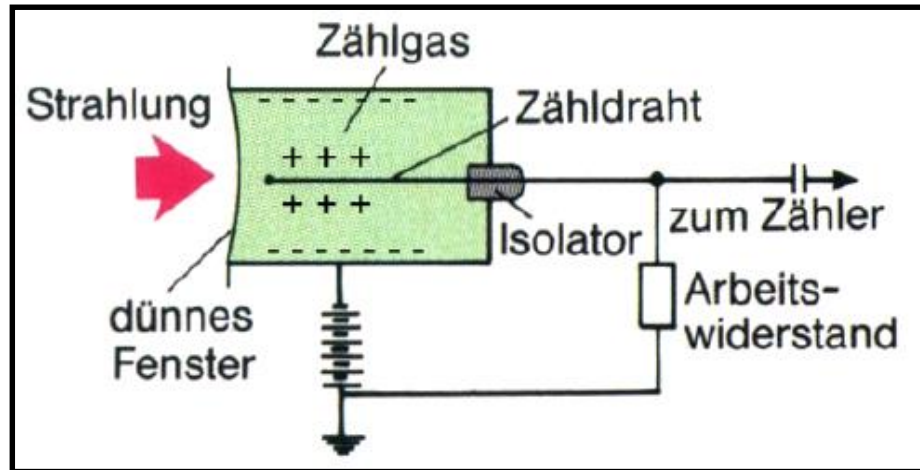
Hans Geiger
1882 - 1949



Walther Müller
1905 - 1979

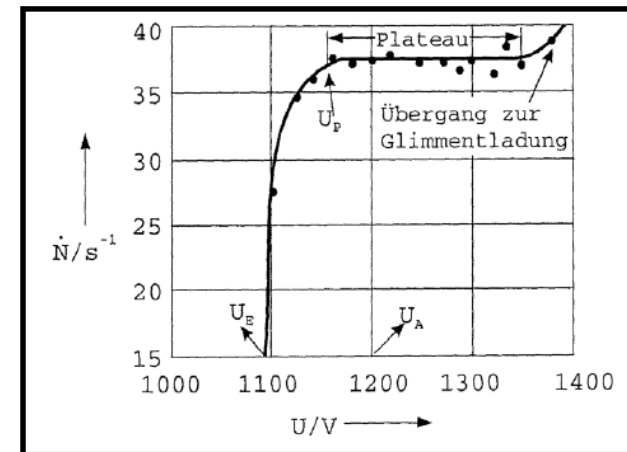
Geiger-Müller-Zählrohr

Geiger-Müller-Zählrohre werden im Auslösebereich betrieben.
Die von einem Strahlungsteilchen erzeugte elektrische Ladungsmenge ist unabhängig von der Teilchenart und von der Energie des Teilchens.



Quelle: <http://www-med-physik.vu-wien.ac.at/physik/ws95/w9590dir/w9596000.htm>

Kennlinie des Geiger-Müller-Zählrohrs:
Zählrate als Funktion der Spannung. U_E ist die Einsatzspannung, U_P der Proportionalbereich. Man betreibt das Zählrohr im Plateau und meidet den Übergang zur Glimmentladung.



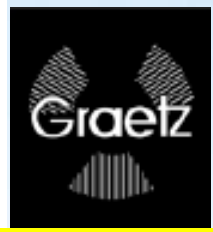
Quelle: <http://www.tu-chemnitz.de/physik/FPRAK/F-Praktikum/Versuche/vgeiger.pdf>



**HOCHSCHULE
HANNOVER**
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES
AND ARTS

*Fakultät II
Maschinenbau und*

Dosimeter mit GM-Zählrohr



2 Geiger-Müller-Zählrohre



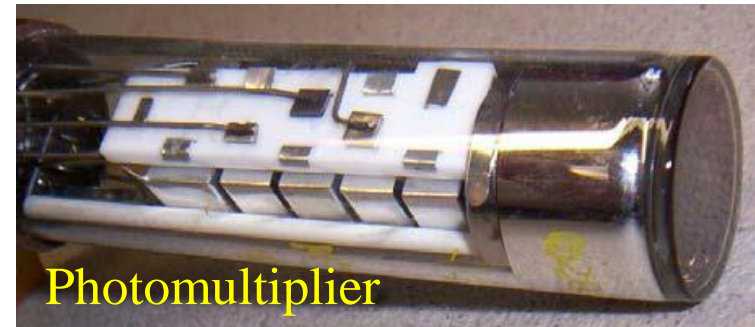
Geiger-Müller-Zählrohr



Szintillationsdetektor

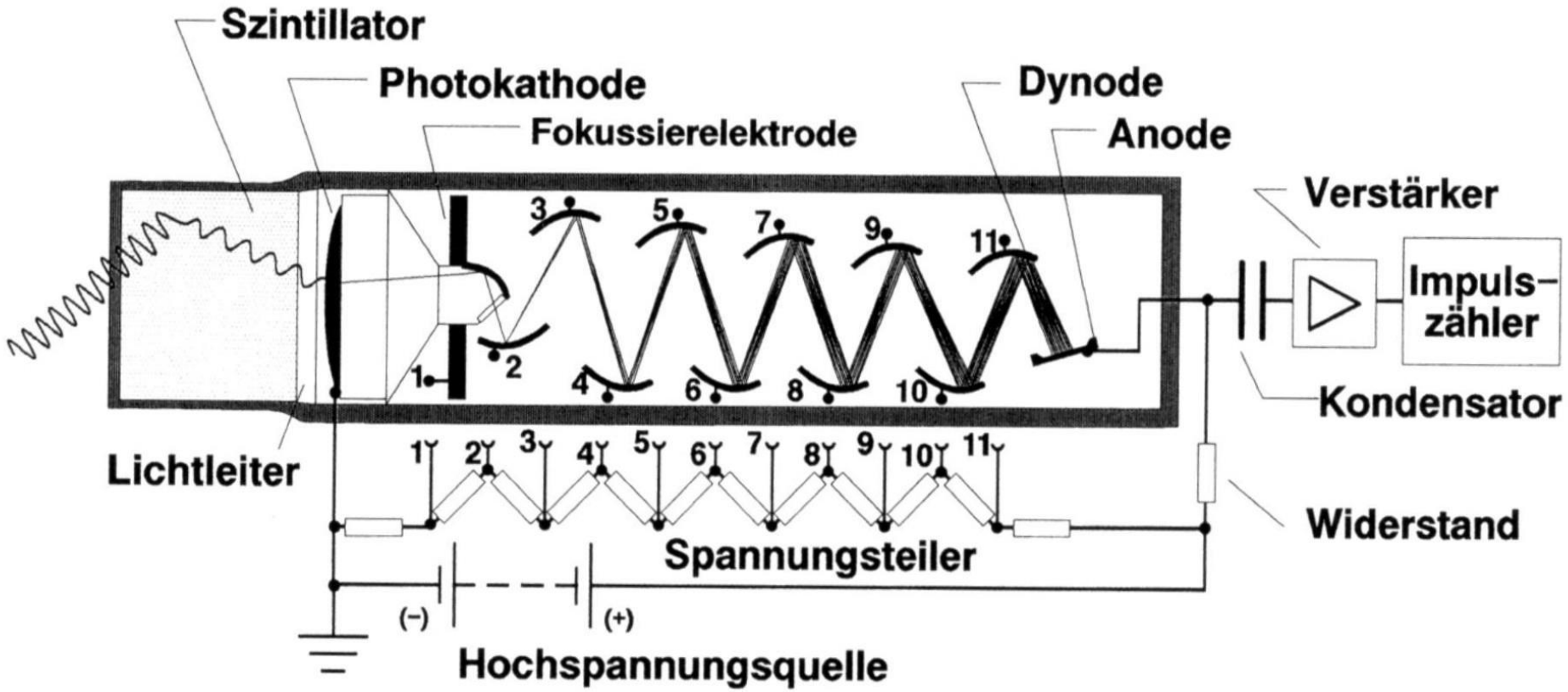
Einige Einkristalle, zum Beispiel NaJ mit einer geringen Beimischung von Tl, können durch geladene Teilchen zum Leuchten angeregt werden. Das im Kristall entstandene Licht kann anschließend nachgewiesen werden. Die Dotierung mit Tl ist entscheidend für Lichterzeugung

Mit Hilfe eines Photomultiplier kann aus dem Licht des Szintillators ein elektrische Signal gewonnen werden.





Aufbau des Photomultiplier

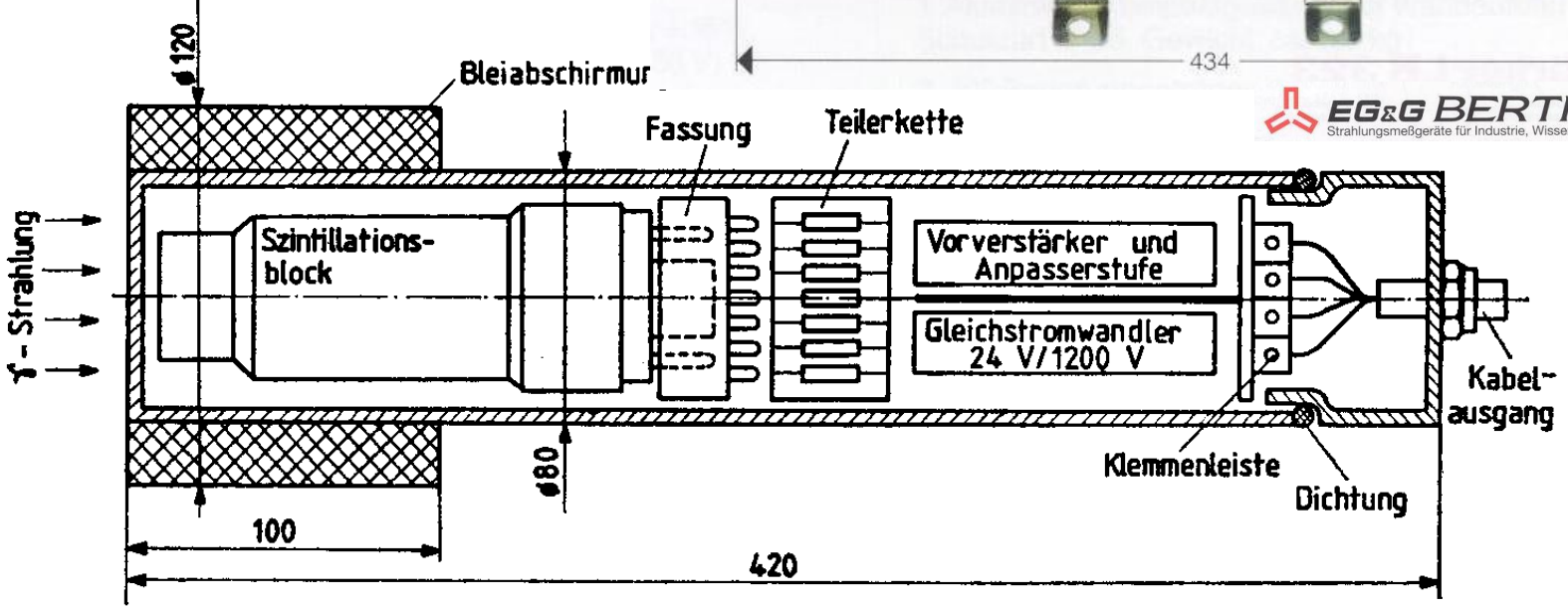




Szintillationsdetektor

Robuster Szintillationsdetektor für den industriellen Einsatz.

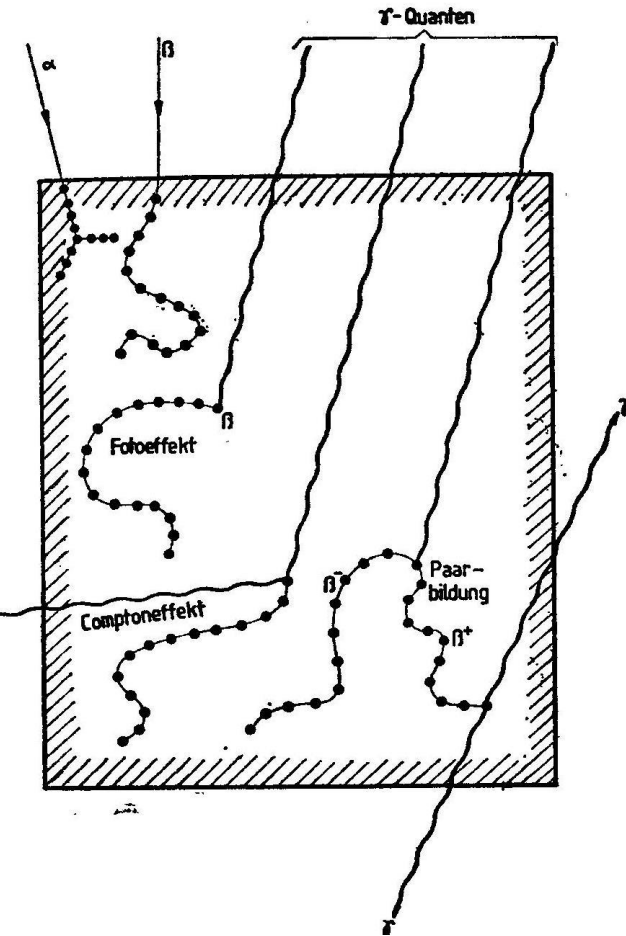
Das gezeigte Modell ist vollständig gekapselt und kann mit Wasser gekühlt werden.



Wechselwirkung im Szintillator

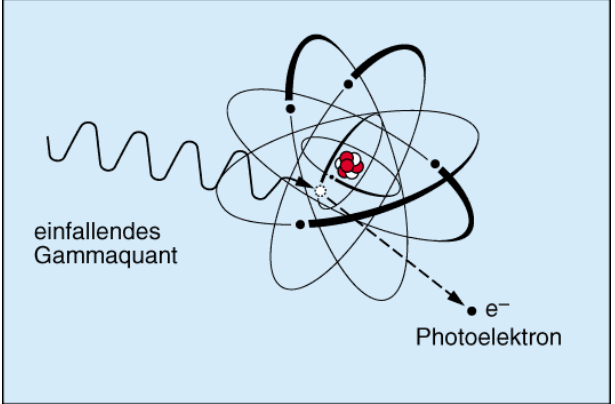
Der Szintillator wird oft zum Nachweis der γ -Strahlung benutzt. Die γ -Quanten (Photonen) können selbst kein Licht im Szintillator produzieren. Sie erzeugen zunächst geladene Sekundärteilchen, die dann wiederum Licht erzeugen und den Nachweis ermöglichen.

Die γ -Strahlung kann durch Photo-, Compton- oder Paarbildungseffekt wechselwirken und geladene Teilchen (Elektronen) erzeugen. In den spektralen Energieverteilungen können die verschiedenen Effekte weitgehend getrennt beobachtet werden.

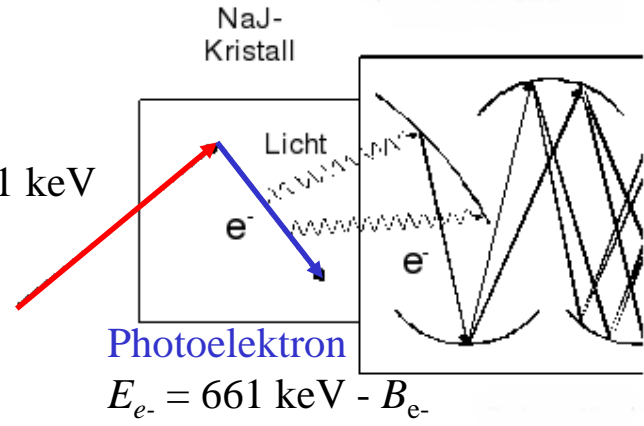




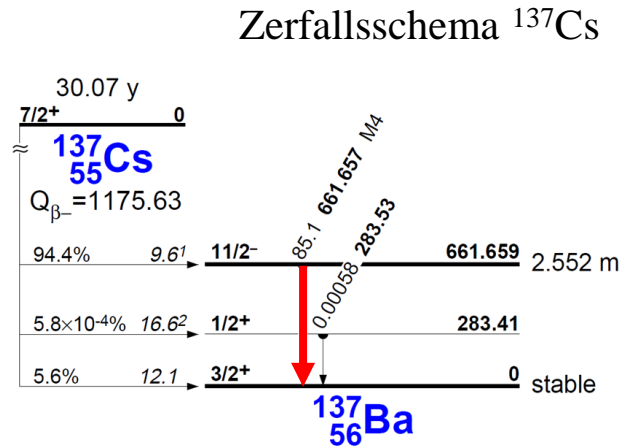
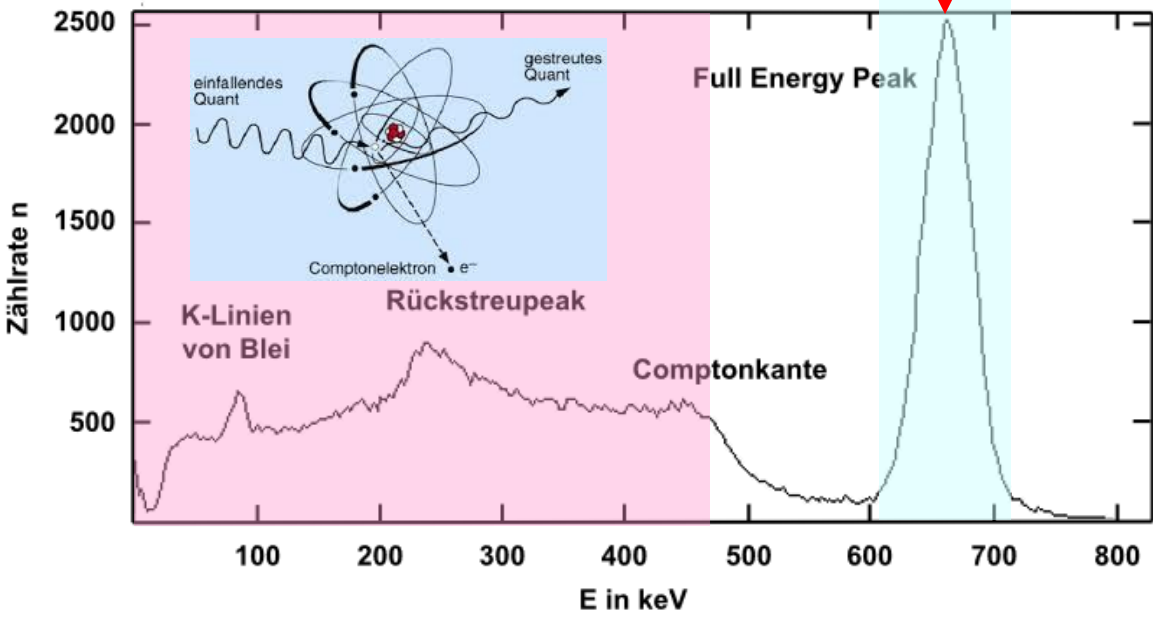
NaJ-Spektrum des ^{137}Cs



Photon
 $E_{\text{ph}} = 661 \text{ keV}$



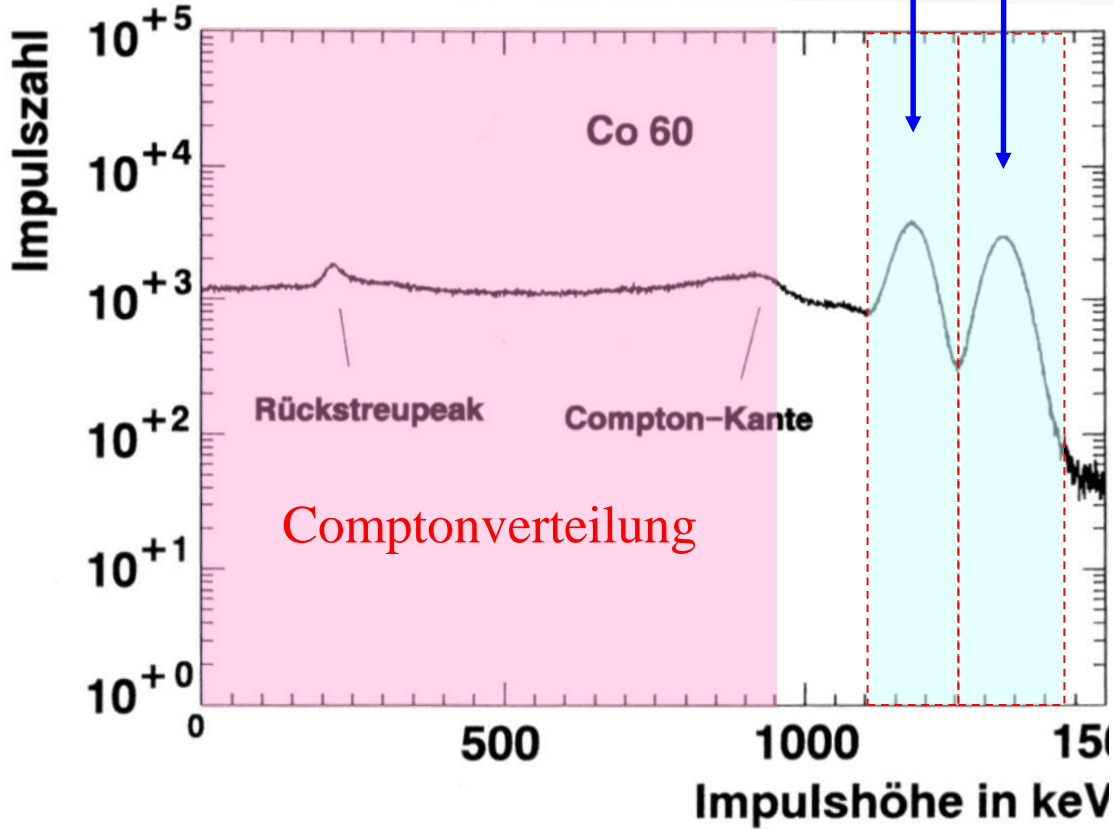
Gammaspektrum von Cs-137 Photopeak: $E_{\gamma} = 1173 \text{ keV}$





NaJ-Spektrum des ^{60}Co

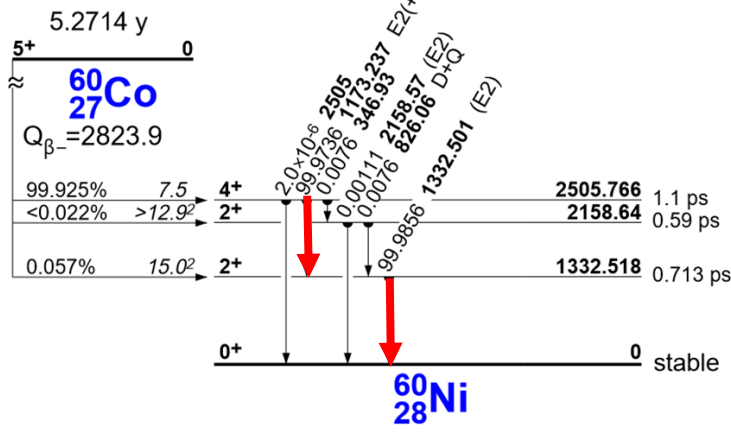
Spektrale Energieverteilung des ^{60}Co



Photopeak: $E_\gamma = 1173 \text{ keV}$

Photopeak: $E_\gamma = 1333 \text{ keV}$

Zerfallsschema ^{60}Co



Man verwendet auch andere anorganische Szintillationskristalle:

NaJ(Tl), CsJ(Tl), LiJ(Eu)

sowie:

Bismutgermanat (BGO) - $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$

Bleiwolframat (PWO) - PbWO_4

Lutetiumoxyorthosilicat (LSO) - Lu_2SiO_5

Zinksulfid - ZnS

Plastikszintillator
als Portalmonitor

organische Festkörperszintillatoren:

Anthrazen, Naphtalen

und flüssige Szintillatoren:

p-Terphylen in Xylol



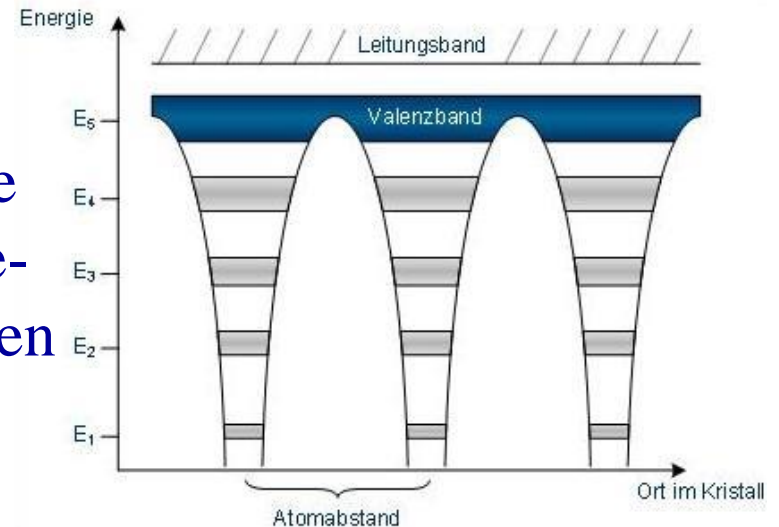
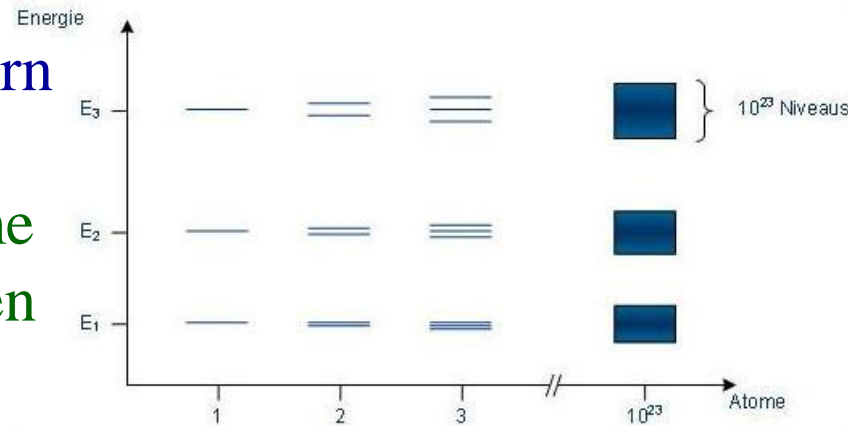
Flüssige Szintillatoren können auch einem Plexiglas zugemischt werden. Es entsteht ein Plexiglas ähnlicher Werkstoff: Plastikszintillator genannt

Ionisation in Festkörpern

Strahlungswechselwirkung in Festkörpern kann im Bändermodell erklärt werden. Diskrete Energieniveaus einzelner Atome werden durch Wechselwirkung zu breiten Energiebändern. Die Energiebänder der äußeren Elektronen erstrecken sich über den gesamten Festkörper.

Ist ein Valenzband leer oder nur teilweise gefüllt, können sich die Elektronen bewegen. Ist es voll besetzt, sind die Elektronen an die Atome gebunden und nicht verschiebbar.

Quelle: <http://www.halbleiter.org/grundlagen/leiter/>

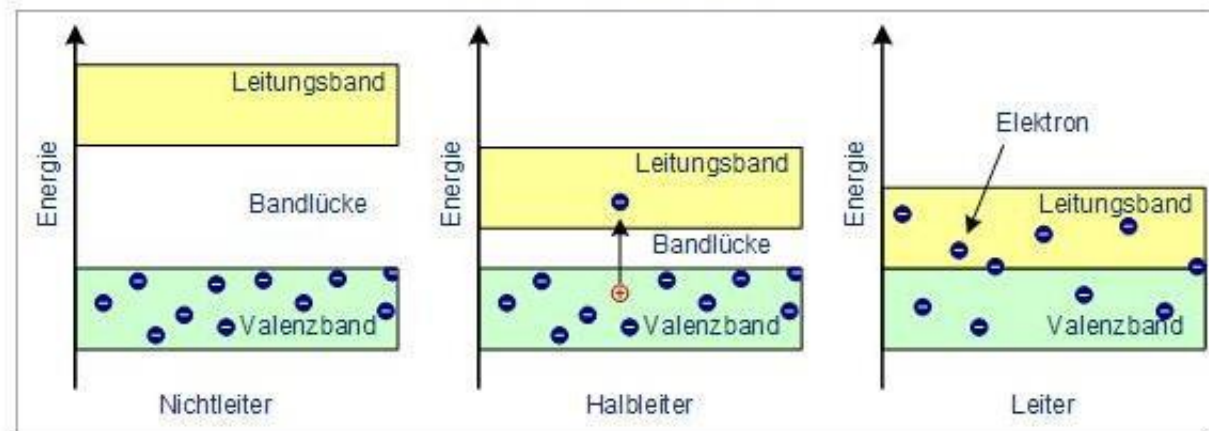


Elektrische Leitfähigkeit

Nichtleiter/Isolatoren: Valenzband und Leitungsband sind durch eine Bandlücke getrennt, die so groß ist, dass diese nur mit erheblichem Energieaufwand überwunden werden kann.

Halbleiter: Valenzband und Leitungsband sind zwar ebenfalls getrennt, aber die Temperaturbewegung der Elektronen, als auch Stöße durch geladene Teilchen können Elektronen aus dem Valenz- ins Leitungsband befördern.

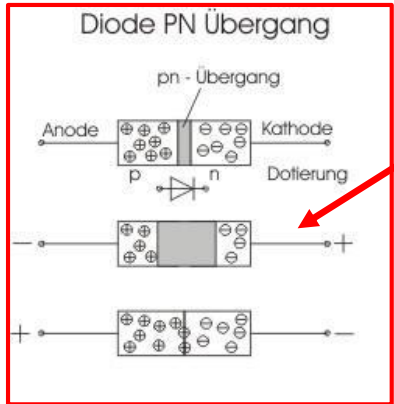
Elektrischer Leiter: Das Valenzband ist entweder nur teilweise gefüllt oder es überlappt mit einem leeren Leitungsband.



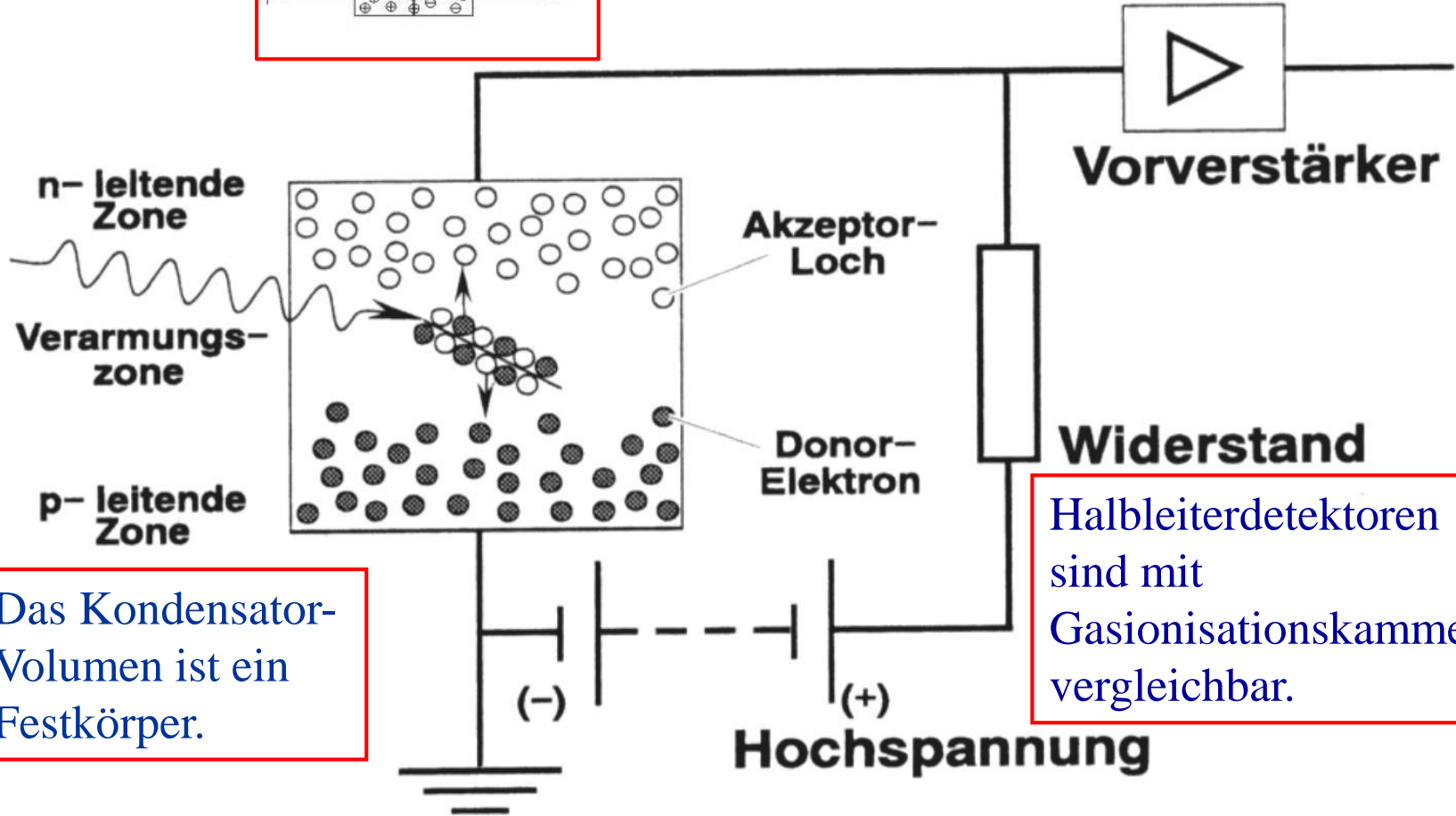
Quelle: <http://www.halbleiter.org/grundlagen/leiter/>



Halbleiterdetektoren



Eine in Sperrrichtung gepolte Diode stellt einen Strahlungsdetektor dar.



Das Kondensator-Volumen ist ein Festkörper.

Halbleiterdetektoren sind mit Gasionisationskammern vergleichbar.



Vorteile des Halbleiterdetektors

1. Mittlere Energie zur Bildung eines Ion-Elektron-Paares ist mit 2 - 4 eV in Si und Ge erheblich kleiner als in Gasen, 30 - 40 eV. Es werden somit mehr als zehnmal so viele primäre Elektronen erzeugt.

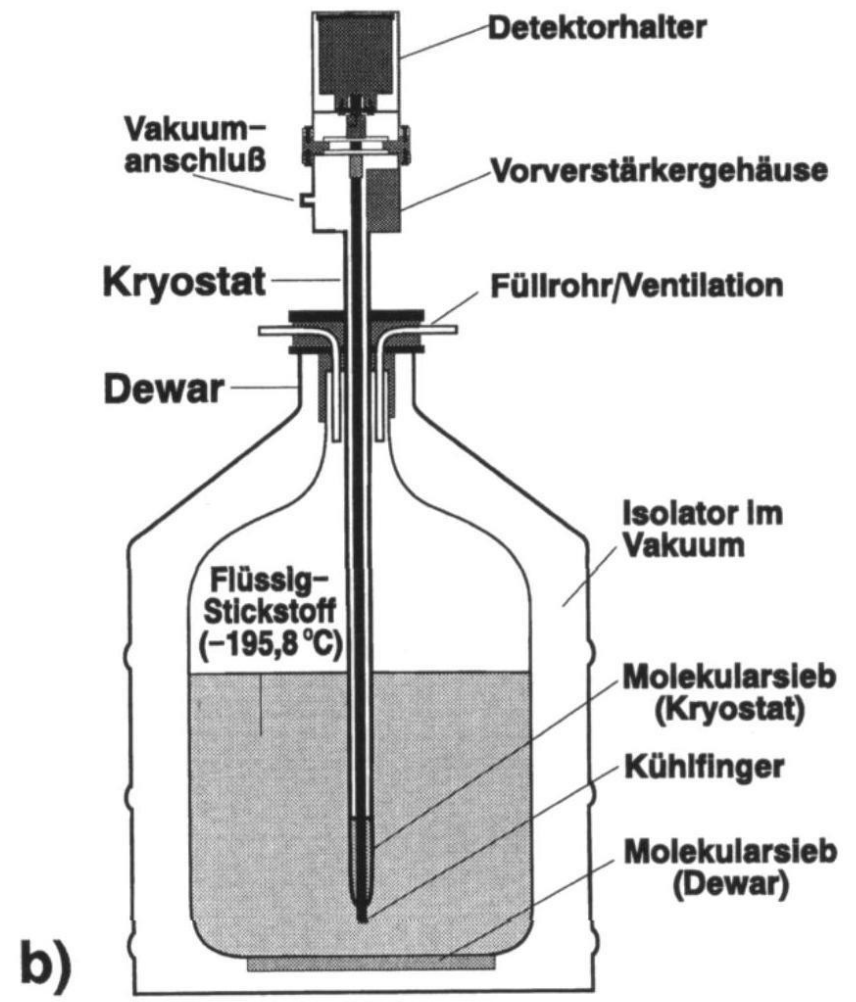
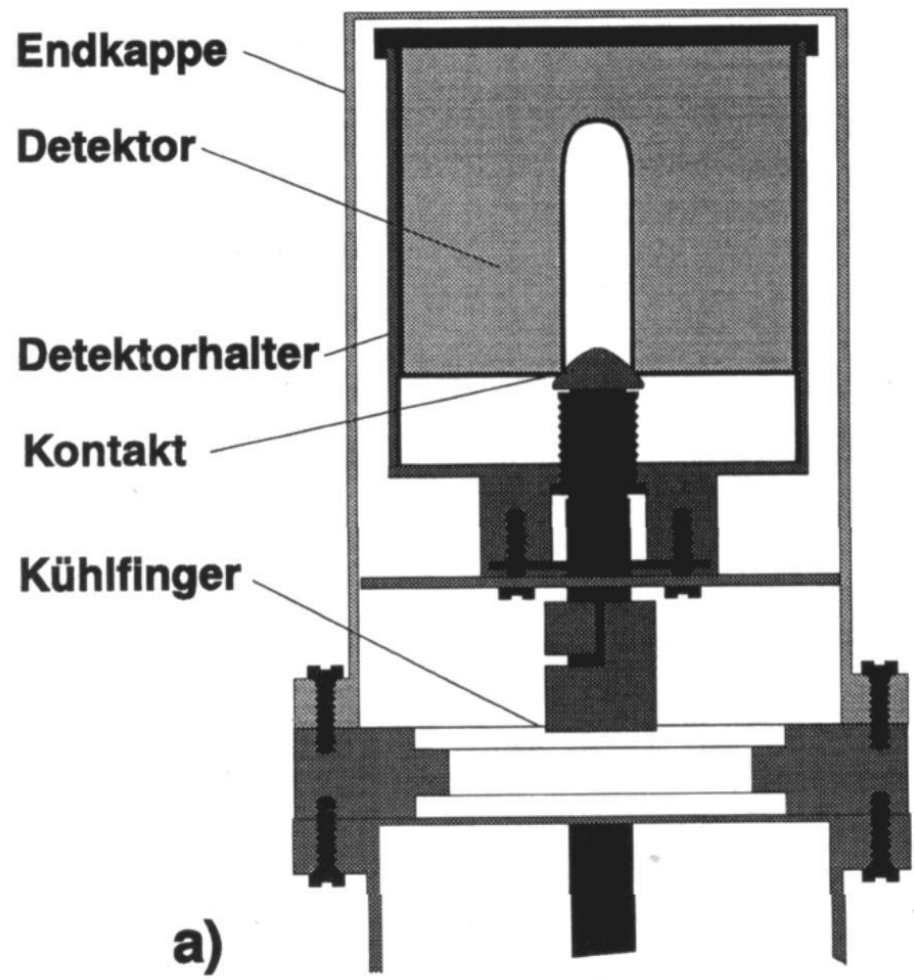
Folgerung: Halbleiter haben erheblich bessere Energieauflösung als Gasionisationskammern oder Szintillatoren.

2. Die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung ist dichteabhängig und deshalb im Festkörper erheblich (mehr als 1000 mal) höher, als in typischen Gasen.

Folgerung: Die Nachweiswahrscheinlichkeit ist viel höher.



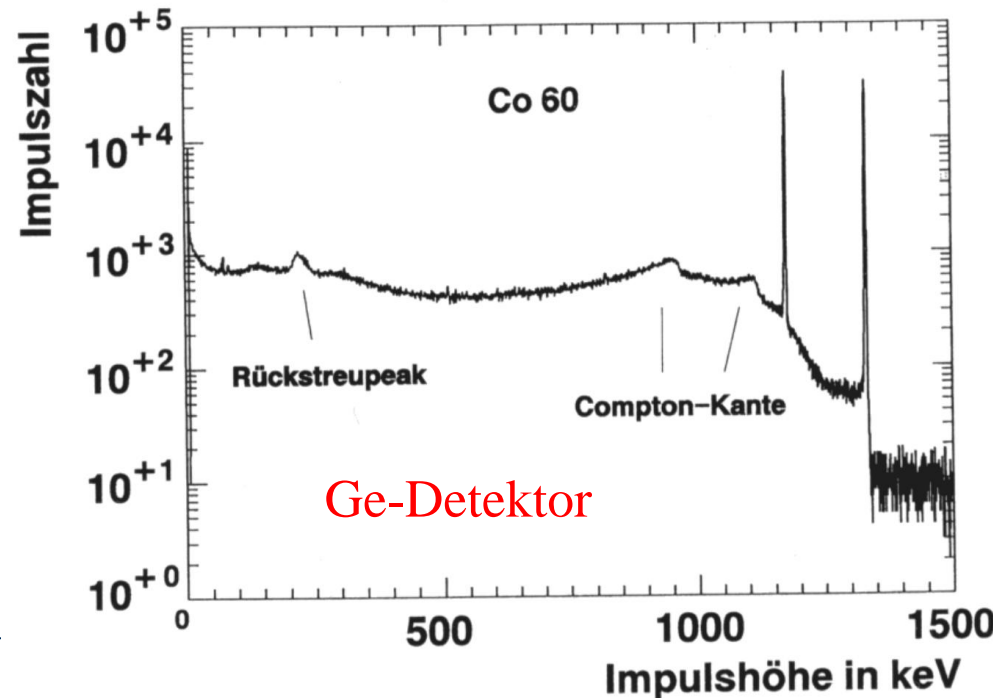
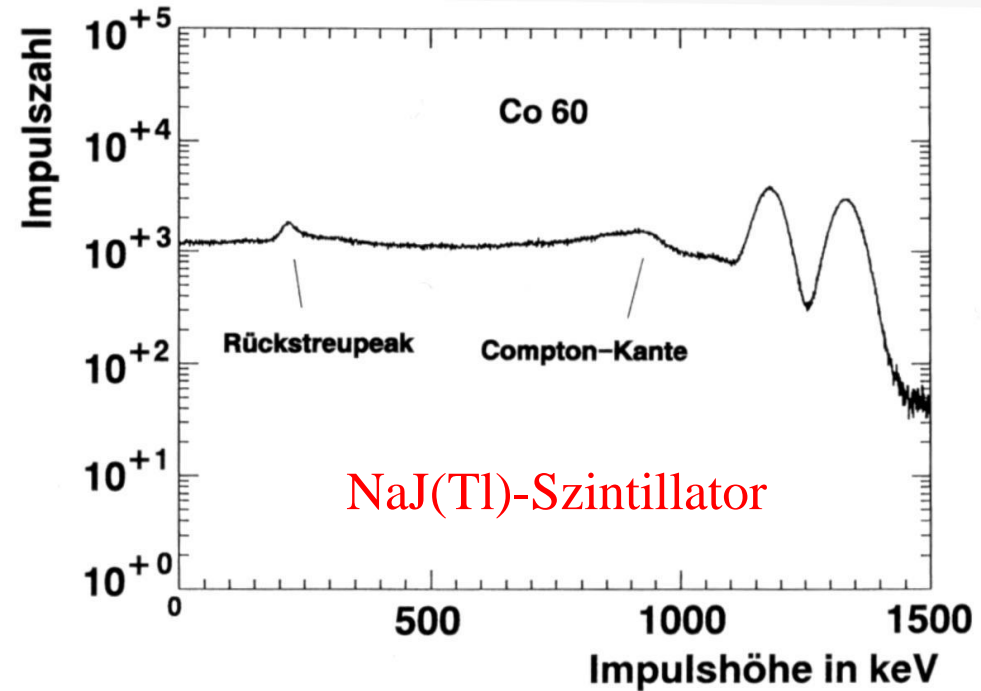
Aufbau der Halbleiterdetektoren



Vergleich

Der Vergleich von Ge-Detektor mit einem NaJ(Tl)-Detektor zeigt:

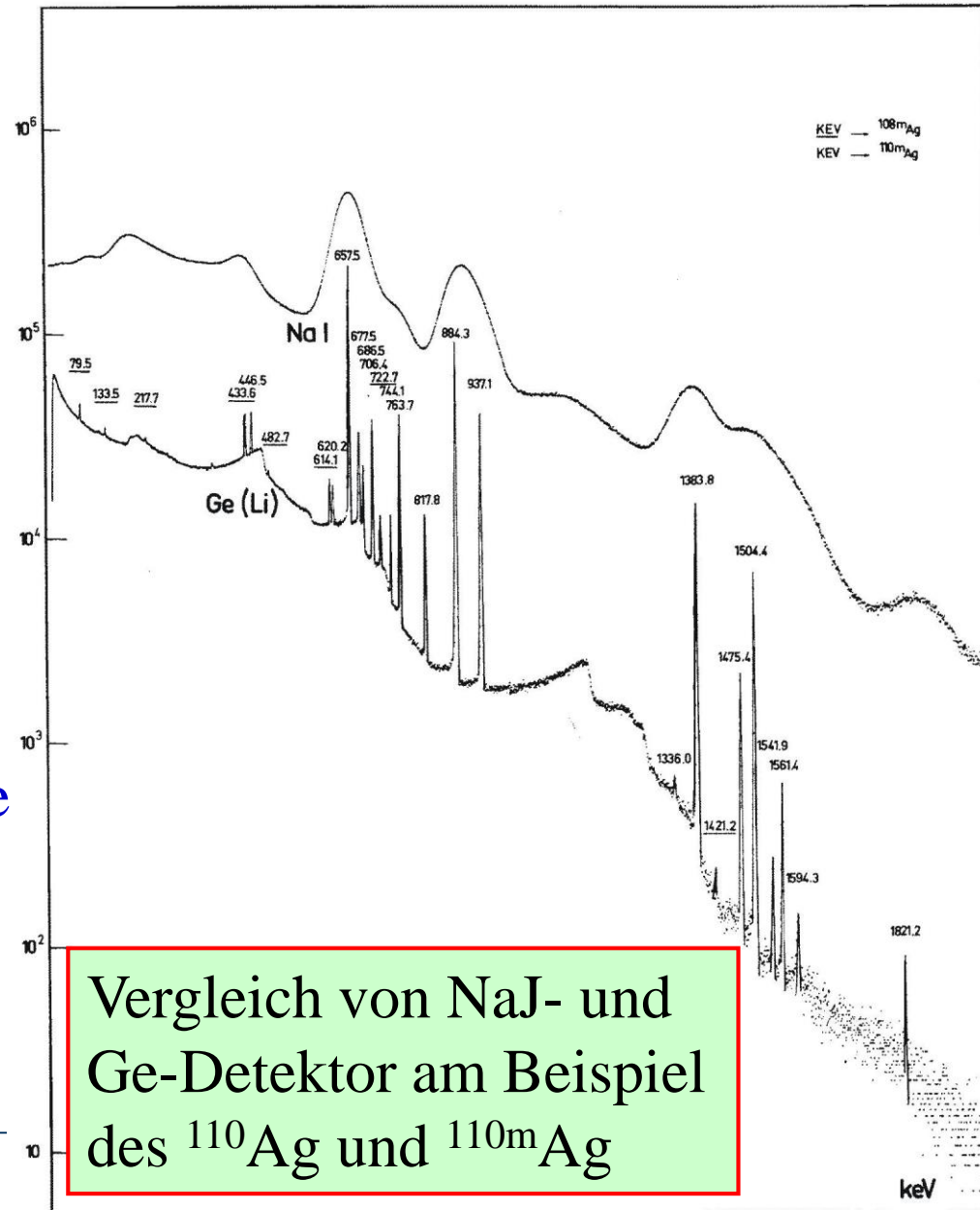
Die Photolinien der γ -Strahlung sind mit einem Ge-Detektor erheblich besser erkennbar. Halbleiter eignen sich besonders gut für Untersuchungen komplexer nuklid-spezifischer γ -Strahlung, da Energie und Intensität sehr genau bestimmt werden können.





Die γ -Spektren verschiedener Isotope können eindeutig zugeordnet werden, da mit dem Ge-Detektor praktisch alle unterschiedlichen γ -Linien aufgelöst werden können.
Die meisten radioaktiven Isotope können anhand ihrer γ -Spektren eindeutig zugeordnet werden.

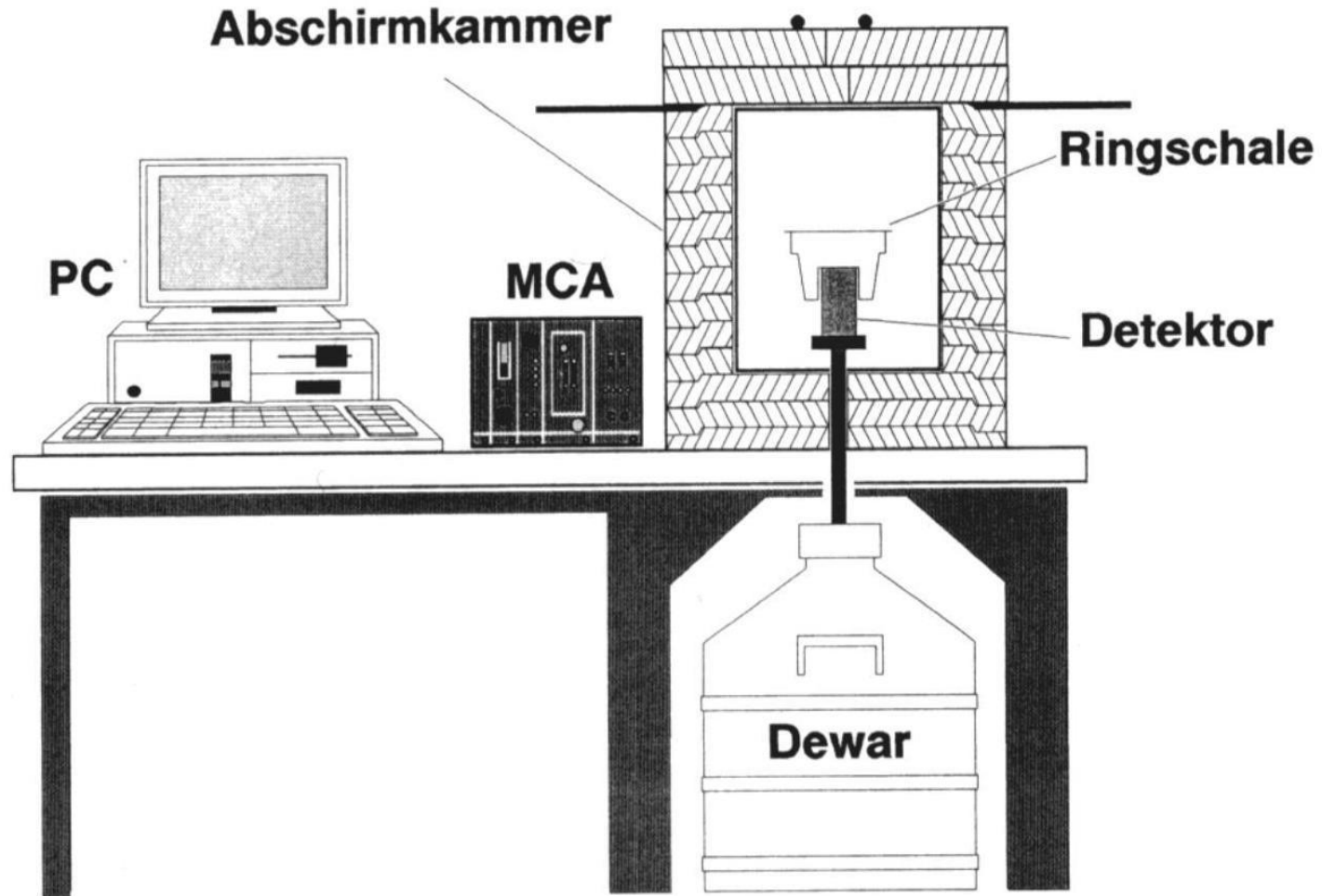
Nachweisgrenzen $< 10^{-3}$ Bq





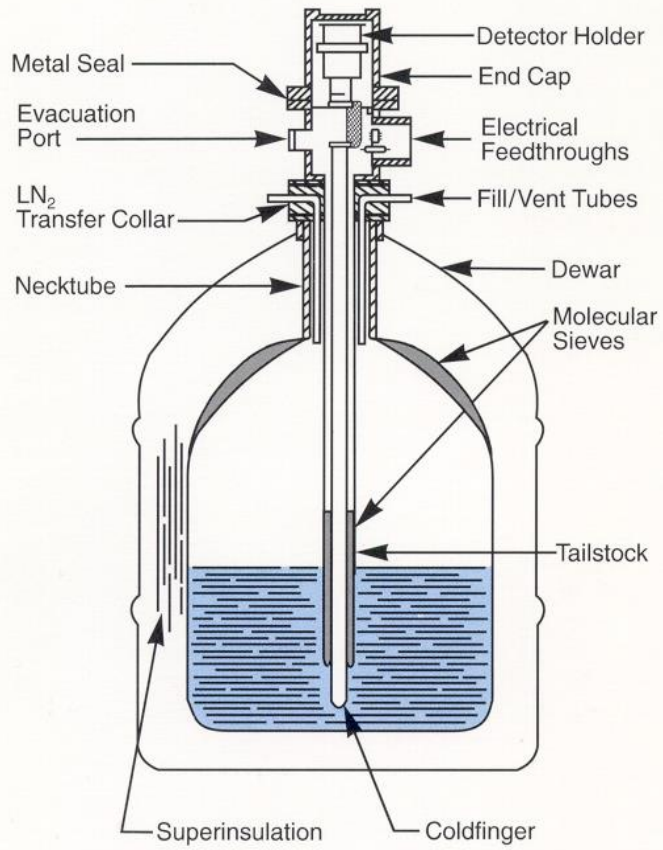
Ge-Detektor-Messplatz

Laborversuch:
Hochauflösende
Gamma-
spektroskopie

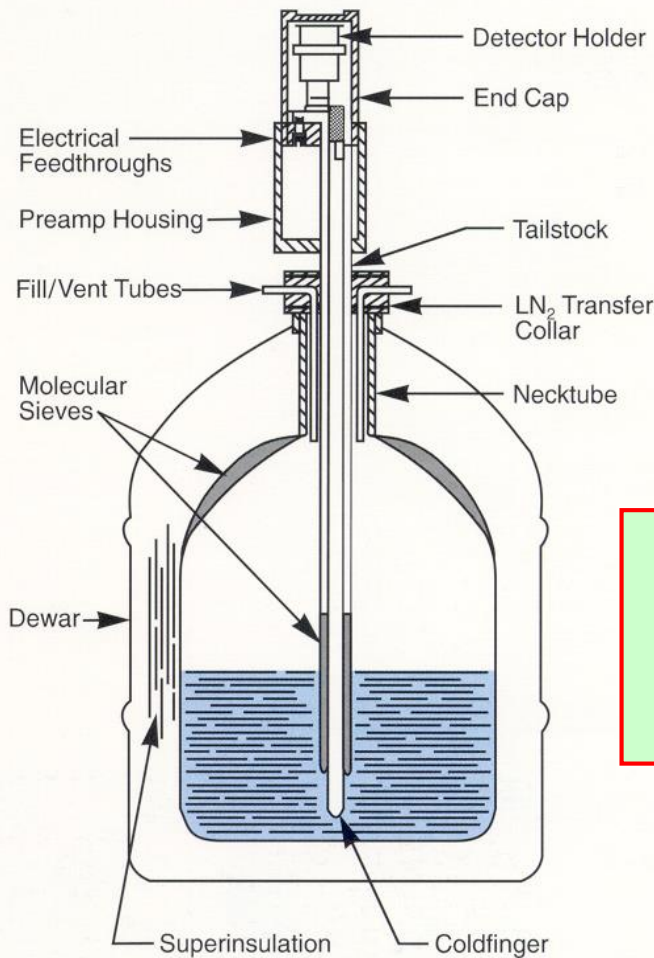




**Model 7500
Vertical Dipstick Cryostat**



**Model 7500SL
Vertical Slimline Cryostat**

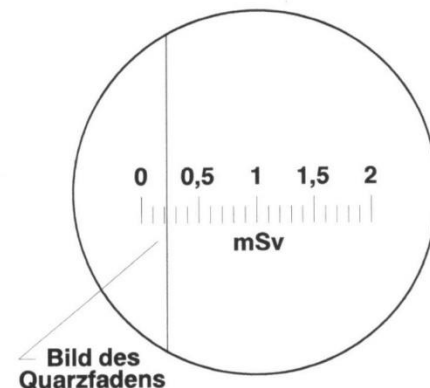
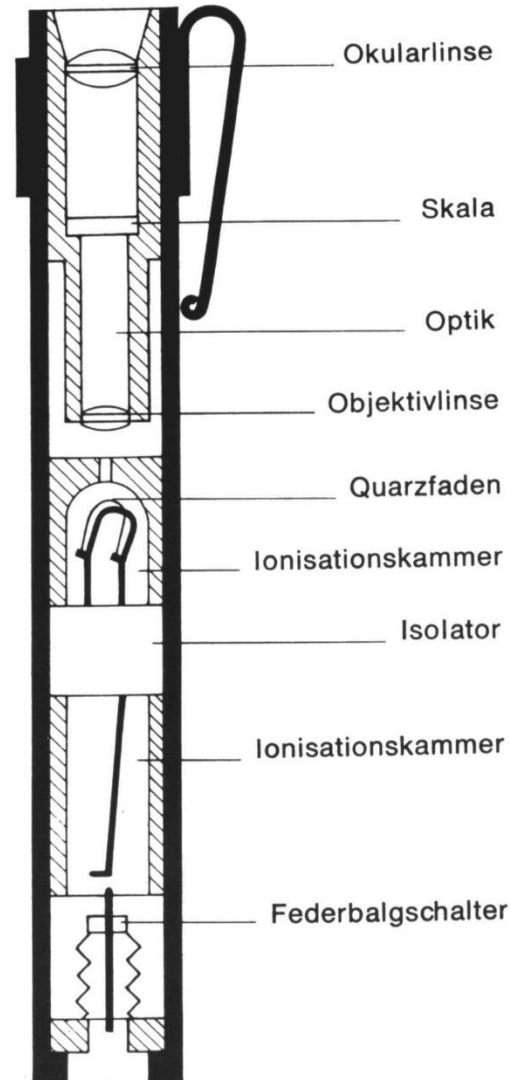


**Aufbau
verschiedener
Ge-Detektoren**

Älterer Typ eines
Personendosimeters zur
direkten Dosisablesung:

Messprinzip: Entladung eines
elektrisch aufgeladenen
Kondensators.

Anwendung: Besucher,
persönliche Kontrolle





HOCHSCHULE
HANNOVER
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES
AND ARTS

Fakultät II
Maschinenbau und
Bioverfahrenstechnik

Elektronische Dosimeter

Modernes elektronisches
Personendosimeter:

Sehr vorteilhaft zur direkten Dosis-
ermittlung in Bereichen mit
kritischer Ortsdosisleistung.

Einfache und sichere Bedienung.

Digitale Direktanzeige der Dosis und
der Dosisleistung.



THERMO FISHER SCIENTIFIC
Personendosimeter EPD Mk2+



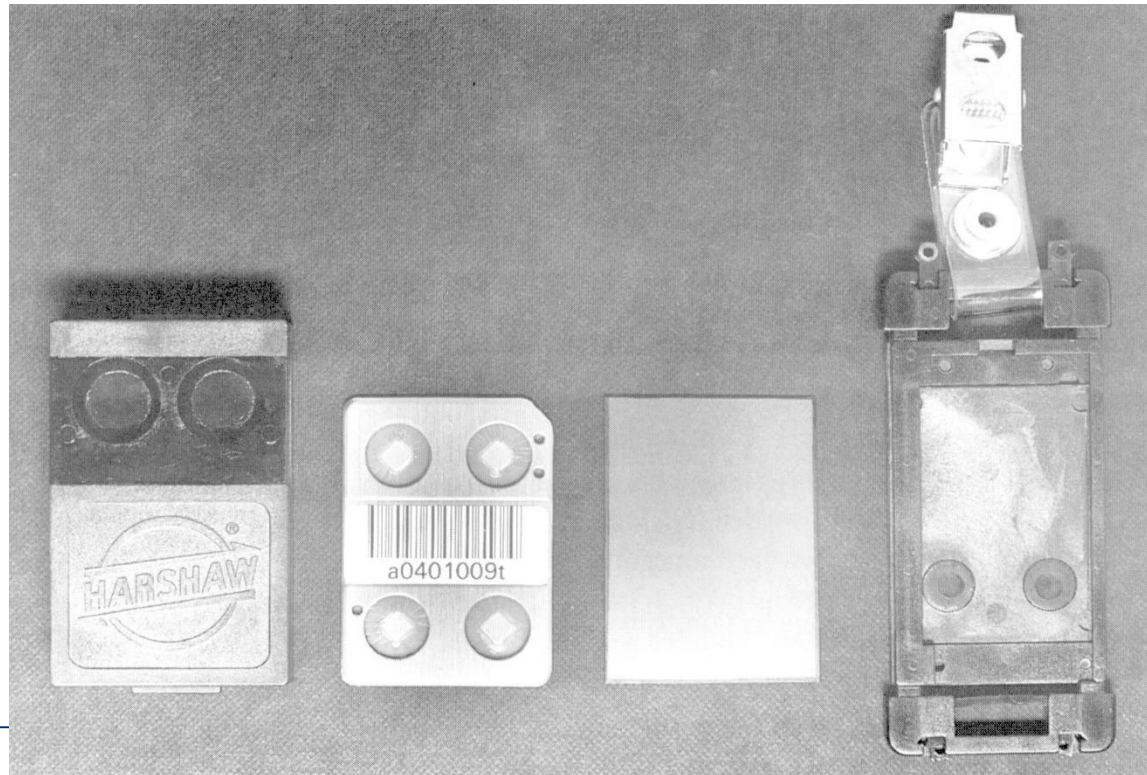
- 1 Metallfilter
- 2 Plastikfilter
- 3 Kupferabsorber
- 4 Silberabsorber
- 5 Richtungsanzeige
- 6 Gebrauchsbereich

Strahlenexponierte Personen müssen im Kontrollbereich ein amtliches Personendosimeter tragen. Die Dosis wird monatlich von einer zugelassenen Auswertestelle ermittelt und in einem zentralen Dosisregister erfasst.



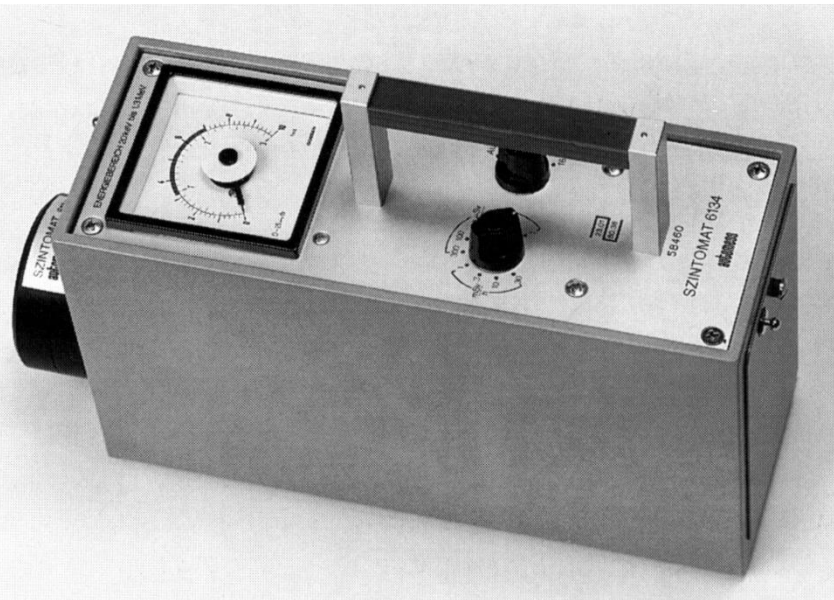
Personendosimeter für Neutronen

Bei Arbeiten und Tätigkeiten unter Neutronenstrahlung sind spezielle Personendosimeter erforderlich, da die normalen Filmdosimeter die Dosis der Neutronen nicht korrekt nachweisen können.





Ortsdosisleistungsmessgerät (ODL)



Ortsdosisleistungsmessgeräte mit
Geiger-Müller-Zählrohr (oben links),
Proportionalzähler (oben rechts)
und mit Szintillator (links).

Anwendung: Dosisüberwachung im Labor,
Untersuchungen in der Nähe von Strahlungs-
quellen.



HOCHSCHULE
HANNOVER
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES
AND ARTS

*Fakultät II
Maschinenbau und
Bioverfahrenstechnik*

Ortsdosisleistungsmessgerät (ODL)

Ortsdosisleistungsmessgerät (ODL) mit
Proportionalzählrohr.

Vorteil: Sehr hohe Empfindlichkeit,
hohe Genauigkeit.

Anwendung: Umgebungsüberwachung,
Umweltdosimetrie.





HOCHSCHULE
HANNOVER
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES
AND ARTS

Fakultät II
Maschinenbau und
Bioverfahrenstechnik

Ortsdosisleistungs- messgerät (ODL)

Ortsdosisleistungsmessgerät
(ODL) mit Ionisationskammer.

Vorteil: Großer dynamischer
Bereich. Geringe Energieab-
hängigkeit. Messung basiert auf
Strommessung.

Anwendung: Gepulste
Strahlenquellen.





HOCHSCHULE
HANNOVER
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES
AND ARTS

Fakultät II
Maschinenbau und
Bioverfahrenstechnik

Neutronendosimeter

Ortsdosisleistungsmessgeräte
(ODL) für Neutronenstrahlung.





HOCHSCHULE
HANNOVER
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES
AND ARTS

Fakultät II
Maschinenbau und
Bioverfahrenstechnik

Kontaminations- monitor

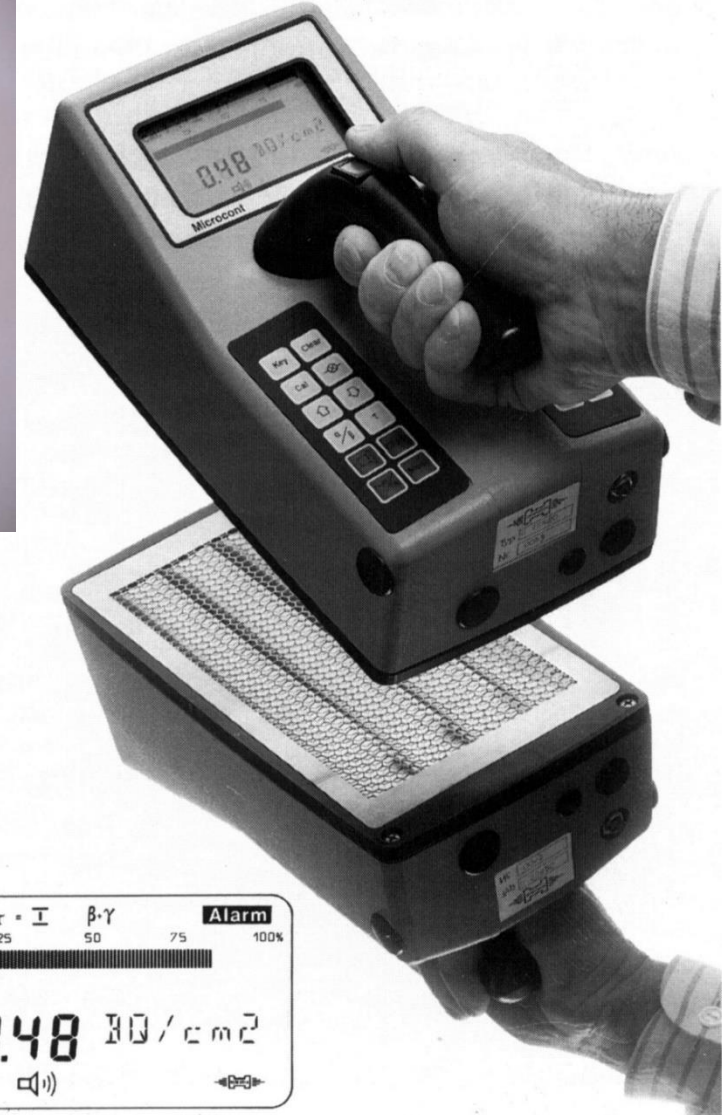
FHT 111 Contamat

Wird im
Laborversuch
verwendet.



Vorteil: Großer empfindliche
Fläche, dünnes Eintrittsfenster.

Anwendung: Labor, Überprüfung
von Räumen und Gegenständen
auf radioaktive Kontamination.





HOCHSCHULE
HANNOVER
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES
AND ARTS

*Fakultät II
Maschinenbau und
Bioverfahrenstechnik*

Hand- Fuß- Monitor

Das Messsystem besteht aus einer Kombination verschiedener Kontaminationsmonitore

Anwendung: Eingangsbereiche von Laboratorien, in denen mit offenen radioaktiven Stoffen umgegangen wird.

Überprüfung von Personen auf radioaktive Kontamination.

