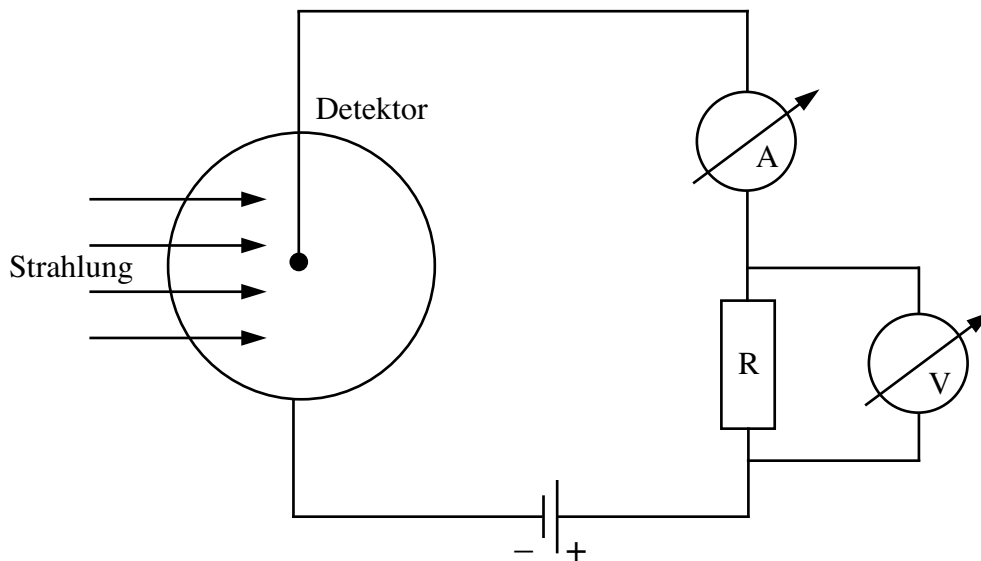


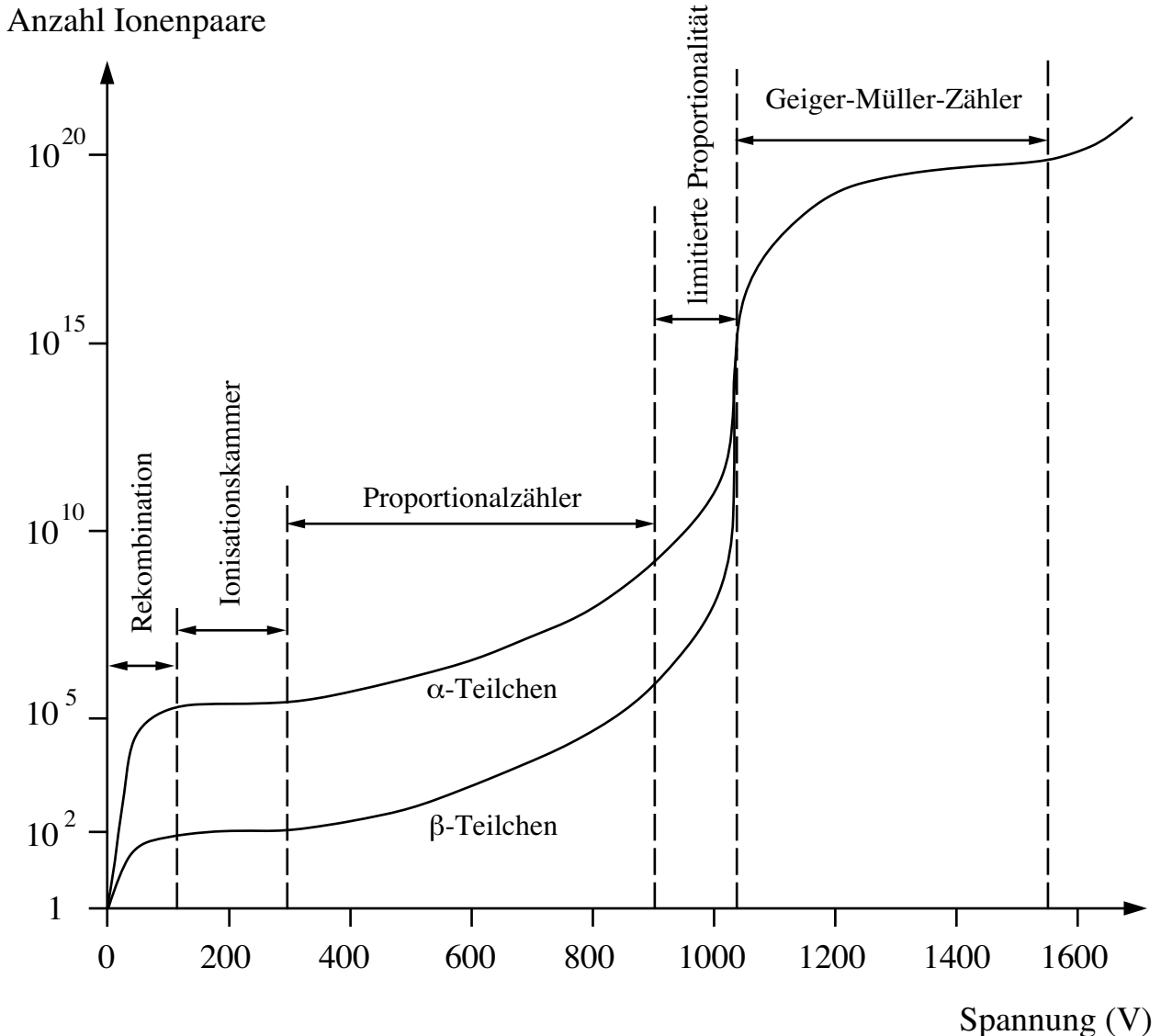
Messung von Kernstrahlung

Der Nachweis der radioaktiven Strahlung beruht auf den Ionisations- oder Anregungsprozessen, die in Materie durch die Strahlung ausgelöst werden. Eine besonders oft verwendete Familie von Messgeräten nutzt die Ionisation in Gasen aus. Das Messprinzip ist sehr einfach. Der Detektor besteht zum Beispiel aus einem Metallrohr und einem darin geführten dünnen Draht. Zwischen diesen beiden Teilen wird eine elektrische Spannung angelegt. Im Rohr befindet sich ein Gas mit bestimmter Zusammensetzung, das man als Zählgas bezeichnet.



Trifft radioaktive Strahlung in den Detektor, so können Gasatome ionisiert werden. Die entstehenden Paare von Elektronen und positiv geladenen Atomrümpfen bezeichnet man etwas unsauber als Ionenpaare. Durch die elektrische Spannung werden die Ladungen zu den entsprechenden Elektroden beschleunigt. Das entstehende Spannungs- oder Stromsignal kann dann gemessen werden.

Diese kurze Beschreibung der Vorgänge im Detektor sind allerdings etwas zu sehr vereinfacht. In Abhängigkeit von der angelegten Spannung können zusätzliche Effekte auftreten. Betrachtet man die Anzahl pro radioaktivem Ereignis entstehende Ionenpaare in Abhängigkeit von der Spannung, so erhält man folgendes Bild:



Bei sehr tiefer Spannung rekombinieren einige der Ionen wieder mit den Elektronen, ohne dass sie ein Signal im Detektor hätten auslösen können. Erreicht die angelegte Spannung einen gewissen Schwellwert, die Sättigungsspannung, werden sämtliche Ladungsträger zu den Elektroden geführt, ohne wesentliche Rekombination. Man erhält damit pro Ereignis einen konstanten, von der Spannung unabhängigen Stromstoß, dessen Stärke nur von der Anzahl der Ionenpaare abhängig ist, die vom Strahlungsteilchen längs seines Weges im Zählgas erzeugt werden, also von der Art der Strahlungsquelle.

Ionisationskammer

Ein Messgerät, das bei der Sättigungsspannung betrieben wird, bezeichnet man als Ionisationskammer. Ein α -Teilchen mit 3,5 MeV Energie erzeugt etwa 10^5 Ionenpaare. Das entspricht einer Ladungsmenge von etwa 10^{-14} As. Die Reichweite von α -Teilchen beträgt in einem Gas bei Normaldruck einige Zentimeter. Ionisationskammern sind so gross gebaut, dass fast alle α -Teilchen ihre Energie vollständig im Zählgas

deponieren können. Da pro Ionenpaar etwa 30 eV benötigt werden, ist die Anzahl primärer Ionenpaare recht genau proportional zur Energie der α -Teilchen. Damit wird auch die dadurch getrennte Ladung proportional zur Energie. Man kann also mit einer Ionisationskammer die Energie der Strahlung bestimmen.

Das bedingt allerdings, dass man das gemessene Signal einem einzelnen radioaktiven Ereignis zuordnen kann. Dazu ist eine enorme Verstärkung des Signals erforderlich. Zudem darf die Zählrate nicht zu hoch sein. Die einzelnen Ereignisse müssen zeitlich aufgelöst sein.

Die Reichweite von β -Teilchen bleibt nur für ^3H und andere sehr weiche Strahler in einem Bereich von wenigen Zentimetern. Ionisationskammern sind nicht auf die üblichen Reichweiten der β -Strahler von mehreren Metern ausgelegt, wodurch der im Gas deponierte Energieanteil klein ist. Harte β -Strahler wie ^{32}P deponieren nur einen kleinen Anteil ihrer Energie im Zählgas. Der grösste Teil wird ohne Auswirkung auf das Signal an die Detektorwand abgegeben. Zudem ist die spezifische Ionisation aller β -Strahler etwa konstant. Die Impulshöhe ist daher für die meisten β -Quellen unabhängig von der Energie der Strahlung. Der erzeugte Stromimpuls ist in einer Ionisationskammer sehr klein. β -Strahler können daher mit einer Ionisationskammer nur mit grossem Aufwand nachgewiesen werden. Das erlaubt aber die Unterscheidung zwischen den Strahlungsarten.

Oft verzichtet man auf die Bestimmung der Energie einzelner Ereignisse. Man bestimmt den erzeugten Strom während der Messung und verliert so die zeitliche Auflösung. Kennt man die Energie eines α -Strahlers und die Messausbeute, kann damit die Aktivität der Quelle bestimmt werden. Eine hohe Verstärkung ist nicht nötig, wenn die Zählrate entsprechend gross ist. So betriebene Ionisationskammern eignen sich also zur Bestimmung sehr hoher Aktivitäten. In dieser Betriebsart können auch β -Strahler gemessen werden. Eine Kalibration ist in jedem Fall erforderlich.

Proportionalzähler

Erhöht man die Spannung am Detektor weiter, so tritt ein neuer Effekt auf. Die entstehenden Elektronen werden auf ihrem Weg zur Anode so stark beschleunigt, dass sie durch Stösse weitere Ionenpaare erzeugen. Auf diese Weise entsteht aus einem primären, durch die Strahlung verursachten Ionenpaar eine Kette sekundärer Ionenpaare. Bei nicht zu hohen Spannungen sind die Ketten voneinander weitgehend unabhängig. Daher ist die Impulshöhe proportional zur Anzahl primärer Ionenpaare. In diesem Spannungsbereich arbeitet der Proportionalzähler, der seinen Namen von der Proportionalität zwischen Impulshöhe und Energie der einfallenden Teilchens bekommen hat. Der durch die Stossionisation verursachte Verstärkungsfaktor beträgt 10^2 bis 10^6 . Er ist von der angelegten Spannung abhängig. Die Verstärkung der Impulse bereitet keinerlei Schwierigkeiten. Proportionalzähler ermöglichen eine Energiebestimmung der Strahlung, wenn dies bei einer Ionisationskammer ebenfalls möglich ist. Man kann gleichermassen auch zwischen den verschiedenen Strahlungsarten unterscheiden.

Geiger-Müller-Zähler

Erhöht man die Spannung am Detektor weiter, so wird die Impulshöhe extrem abhängig von der Spannung. Dieser Bereich ist für Messgeräte daher ungeeignet. Schliesslich wird bei weiterer Erhöhung ein Plateau erreicht. In diesem so genannten Auslösbereich arbeitet der Geiger-Müller-Zähler. Ein einzelnes Teilchen löst durch seine primären Ionenpaare derart viele sekundäre Ladungstrennungen aus, dass eine lawinenartige, vollständige Gasentladung erfolgt. Die Anzahl sekundärer Ionenpaare ist maximal. Der durch die Stossionisation erreichte Verstärkungsfaktor beträgt bis zu 10^8 . Da im Prinzip ein einziges primäres Ionenpaar die vollständige Entladung auslöst, kann der Geiger-Müller-Zähler weder zwischen den verschiedenen Strahlungsarten unterscheiden, noch erlaubt er eine Bestimmung der Strahlungsenergie. Er hat einen weiteren entscheidenden Nachteil.

Da sich die Elektronen im elektrischen Feld wesentlich schneller bewegen als die Ionen, bildet sich im Bereich der Anode eine positive Ladungswolke aus, die die Feldstärke im Detektor so weit reduziert, dass die Stossionisation zum Erliegen kommt. Das Gerät ist damit für primäre Ionisationen unempfindlich, bis die Ionen an der Kathode entladen sind. Diese so genannte Totzeit dauert etwa $100 - 400 \mu\text{s}$. Erst wenn sich das Potential erholt hat, kann der Zähler wieder arbeiten.

Eine Totzeit von $100 \mu\text{s}$ bewirkt bei Impulsraten von mehr als etwa 100 ips merkliche Zählfehler, die nur korrigiert werden können, wenn die Totzeit bekannt ist. Bezeichnet man die Totzeit mit τ , die wirklich gemessene Impulsrate mit I' und die wahre Impulsrate mit I , dann gilt:

$$I = I' \left(1 + \frac{I' \tau}{1 - I' \tau} \right)$$

Die Totzeit kann auf verschiedene Art bestimmt werden. Am einfachsten ist die Zweiquellenmethode. Man misst unter gleichen Bedingungen die Impulsrate $I'_{,1}$ einer Quelle 1, die Impulsrate $I'_{,2}$ einer Quelle 2 und schliesslich die Impulsrate $I'_{,1,2}$ beider Quellen zusammen. Daraus lässt sich die Totzeit folgendermassen berechnen:

$$\tau = \frac{1}{I'_{1,2}} - \frac{\sqrt{I'_1 I'_2 (I'_{1,2} - I'_1) (I'_{1,2} - I'_2)}}{I'_1 I'_2 I'_{1,2}}$$

Rechenbeispiel:

$$\begin{aligned} I'_1 &= 175 \text{ s}^{-1} & I'_2 &= 225 \text{ s}^{-1} & I'_{1,2} &= 380 \text{ s}^{-1} \\ \tau &= 267,6 \mu\text{s} \end{aligned}$$

Wenn die positiven Ionen an der Kathode ankommen, können sie durch Stösse weitere Ionenpaare erzeugen und den Entladungsprozess wieder starten. Die drohende

Dauerentladung muss durch einen Löschvorgang verhindert werden. Man kann für eine kurze Zeit die Spannung am Detektor reduzieren oder sogar umkehren. Eine andere Möglichkeit besteht darin, dem Zählgas eine Komponente beizumischen, die durch die positiven Ionen leicht ionisiert wird. Den positiv geladenen Atomrümpfen wird dadurch sanft ihre Beschleunigungsenergie entzogen. Die ionisierten Löschgasmoleküle, etwa Brom, dissoziieren auf dem Weg zur Kathode. Sie sind danach nicht mehr in der Lage, Sekundärelektronen zu erzeugen.

Die Impulshöhen sind beim Geiger-Müller-Zähler so gross, typischerweise einige Volt, dass eine Verstärkung überflüssig ist. Man kann das Ausgangssignal direkt einer Zähl-einheit zuleiten. Dies ist einer der grössten Vorteile dieses Geräts. Es kann kompakt gebaut werden und ist daher mobil.

Die gasgefüllten Detektoren im Vergleich

Die Ionisationskammer hat keine Totzeit, während der keine Impulse registriert werden können. Sie ist daher geeignet für sehr hohe Impulsraten. Die Verstärkung des winzigen elektrischen Signals stellt aber hohe Anforderungen an die Elektronik. Daher sind Ionisationskammern teuer. Die Energie der Strahlung kann mit grosser Genauigkeit bestimmt werden. Verzichtet man auf die zeitliche Erfassung der einzelnen Impulse und integriert stattdessen die erzeugte Ladung, während einer bestimmten Zeit, ist keine leistungsfähige Elektronik nötig. Man muss dann aber über die Details der Ladungserzeugung informiert sein, um sinnvoll Impulsraten bestimmen zu können.

Proportionalzähler haben eine Totzeit von etwa $10 \mu\text{s}$. Das ist wesentlich weniger als beim Geiger-Müller-Zähler. Man kann daher auch entsprechend höhere Impulsraten messen. Die Verstärkung des elektrischen Signals ist wenig problematisch. Die Energie der Strahlung kann bestimmt werden. Allerdings ist die Genauigkeit im Vergleich mit der Ionisationskammer etwas erniedrigt, da nicht nur die Erzeugung der primären Ionenpaare statistischen Schwankungen unterliegt. Es sind zusätzlich noch die Fluktuationen beim Multiplikationsprozess zu berücksichtigen.

Geiger-Müller-Zähler können nicht zwischen den verschiedenen Strahlenarten unterscheiden. Ebenso können sie die Energie der Strahlung nicht bestimmen. Eine Verstärkung der Signale ist hingegen nicht nötig. Geiger-Müller-Zähler sind daher kostengünstig.

Keines der bisher besprochenen Geräte eignet sich für die Erfassung von γ -Strahlung, da nur ein winziger Teil aller Photonen innerhalb des Detektionsvolumens absorbiert wird. Mit Xe unter hohem Druck als Zählgas kann man Röntgenstrahlung mit einigermaßen vernünftigen Messausbeuten bestimmen.

Eine weitere Erhöhung der Spannung am Detektor über die Betriebsspannung des Geiger-Müller-Zählers hinaus, führt zu einer Dauerentladung, die jede sinnvolle Messung verunmöglicht.

Halbleiterzähler

Ein Messprinzip, das mit der Ionisationskammer gewisse Analogien aufweist, wendet man bei den Halbleiterzählern an. Die Strahlung bewirkt in Halbleitern eine Ladungstrennung. Durch eine angelegte Spannung können die Ladungen beschleunigt werden und verschwinden an den Elektroden.

Zur Beschreibung der elektrischen Leitfähigkeit eines Halbleiters bedient man sich meist des Bändermodells. Danach besetzen die höchstenergetischen Elektronen des Halbleiters die Energieniveaus des Valenzbandes vollständig. Die nächst höheren Energiezustände der Elektronen sind unbesetzt und bilden zusammen das Leitungsband. Zwischen den beiden Bändern besteht eine energetische Lücke. Durch Anregung können Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband befördert werden, was zu einer kleinen elektrischen Leitfähigkeit führt. Bereits die thermische Anregung bei Umgebungstemperatur bewirkt eine Leitfähigkeit, die durch Kühlen mit flüssigem Stickstoff verhindert werden kann. Für den Detektorbau werden ausschliesslich Einkristalle verwendet, die durch das aufwendige Zonenschmelzverfahren gewonnen werden.

Werden die Halbleiter Si und Ge mit kleinen Mengen eines Elements der Gruppe V (P, As, Sb) dotiert, so führt dies zu einem Überschuss an Elektronen im Gitter. Im Bändermodell besetzen diese Elektronen Energieniveaus unmittelbar unterhalb des Leitungsbandes. Es ist daher sehr leicht, diese Elektronen ins Leitungsband anzuregen. Man bezeichnet solche Systeme als n-Halbleiter.

Werden Si und Ge mit kleinen Mengen eines Elements der Gruppe III (B, Al, Ga, In) dotiert, so fehlen Elektronen im Gitter. Diese unbesetzten Niveaus befinden sich dicht oberhalb des Valenzbandes. Eine Anregung auf diese Niveaus ist daher sehr leicht möglich. Man bezeichnet solche Systeme als p-Halbleiter.

Dotierte Halbleiter weisen bei Umgebungstemperatur eine recht grosse elektrische Leitfähigkeit auf. Der Transport der Ladung geschieht im n-Halbleiter durch angeregte Elektronen, im p-Halbleiter durch Löcher im Valenzband.

Verbindet man einen n-Halbleiter mit einem p-Halbleiter (Diode), bildet sich an der Grenzschicht eine nichtleitende Sperrzone aus. Diese kann durch Anlegen einer Spannung noch verbreitert werden, sofern der negative Pol an der p-Seite angebracht wird.

Radioaktive Strahlung kann in der Sperrzone Paare von Elektronen und Löchern entstehen lassen, die leicht zu den entsprechenden Polen wandern. Dadurch kann ein Strom gemessen werden. Der Vorgang ähnelt in gewissem Sinn den Vorgängen in einer Ionisationskammer. Bei letzterer sind allerdings etwa 35 eV Energie nötig, um ein Ionenpaar entstehen zu lassen. In einem p-n-Halbleiterdetektor genügen etwa 4 eV, um ein Elektron-Loch-Paar zu erzeugen. Das bedeutet, dass ein Teilchen in einem Halbleiterdetektor etwa zehnmal so viele Elektron-Loch-Paare erzeugt, wie Ionenpaare in einer Ionisationskammer entstehen. Dadurch werden statistische Fluktuationen um

etwa einen Faktor drei verkleinert. Entsprechend ist die Energieauflösung hervorragend.

Man kann mit billigen p-n-Sperrschichtzählern α - und β -Strahlung messen, wobei nicht nur die hohe Energieauflösung bemerkenswert ist, sondern auch die kurze Ansprechzeit. Sie beträgt weniger als 1 ns. Zur Bestimmung von γ -Strahlung ist das empfindliche Volumen von p-n-Sperrschichtzählern im allgemeinen zu klein. Heute werden dafür hauptsächlich Halbleiterzähler aus reinstem Germanium hergestellt, die beim Betrieb auf die Temperatur des flüssigen Stickstoffs gekühlt sein müssen. Sie haben eine sehr grosse Energieauflösung.

Szintillationszähler

Im Jahr 1908 haben Rutherford und Geiger entdeckt, dass ZnS-Pulver Lichtblitze aussendet, wenn es mit α -Teilchen bestrahlt wird. Man bezeichnet diesen Vorgang als Szintillation. Man kann diesen Prozess ausnutzen, um die radioaktive Strahlung zu detektieren. Substanzen, die bei radioaktiver Bestrahlung mit der Emission von Lichtquanten reagieren, nennt man Szintillatoren.

Für Festkörper-Szintillationszähler setzt man vorwiegend Einkristalle von anorganischen Substanzen ein, etwa Natriumiodid dotiert mit einer Spur Thallium. Die radioaktive Strahlung, z. B. ein γ -Quant, regt ein Elektron des Szintillators aus dem Valenzband ins Leitungsband an und erzeugt dabei ein Elektron-Loch-Paar. Dieses wandert verlustfrei durch den Kristall, bis es auf eine Verunreinigung trifft. Im Fall eines NaI(Tl)-Szintillationszählers ist dies meist ein Thalliumatom. Das Elektron-Loch-Paar zerfällt dort, das Elektron fällt ins Valenzband zurück. Die dabei freiwerdende Energie wird als Photon abgestrahlt. Die Lichtquanten werden über einen Photomultiplier gezählt.

Früher wurden auch Einkristalle von organischen Substanzen verwendet, etwa Anthracen oder Stilben. Heute verwendet man organische Substanzen im Allgemeinen nicht mehr als Einkristalle, sondern in gelöster Form in Flüssig-Szintillationszählern. Man kann den Szintillator auch in Kunststoffe einbauen. Es versteht sich von selbst, dass die Szintillatoren für die emittierten Photonen transparent sein müssen.

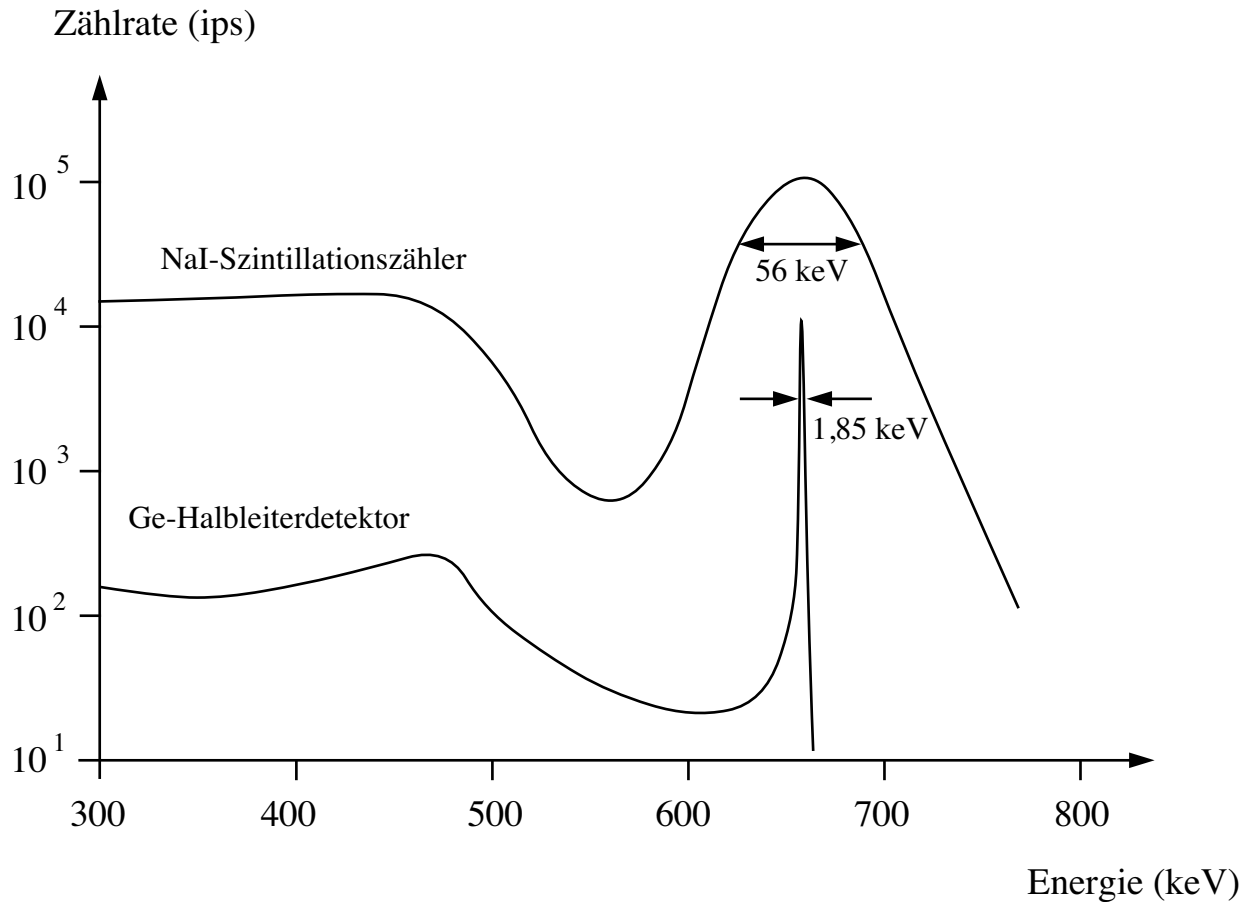
Ein Flüssigszintillator-Cocktail besteht aus der eigentlichen Szintillatorsubstanz, zum Beispiel p-Terphenyl, und einem Lösungsmittel für Szintillator und Probe. Durch die radioaktive Strahlung werden primär die Lösungsmittelmoleküle angeregt, die ihre Energie auf Szintillatormoleküle übertragen. Diese geben anschliessend die Anregungsenergie in Form von Licht wieder ab. Besonders geeignete Lösungsmittel sind Toluol und p-Xylol. Falls die Probe in diesen Lösungsmitteln nur schlecht löslich ist, müssen Sekundärlösungsmittel zugegeben werden. Dabei kann es sich z. B. um 1,4-Dioxan handeln.

Der grosse Vorteil der Flüssigszintillation liegt in der Möglichkeit, sehr weiche β -Strahlung erfassen zu können. Die β -Strahlung von Tritium hat eine maximale Energie von nur 18,6 keV. Ihre Reichweite in Luft beträgt nur wenige Zentimeter. Da der Zerfall bei der Flüssigszintillation in unmittelbarer Nähe zum "Detektor" stattfindet, kann auch extrem weiche β -Strahlung problemlos gemessen werden.

Die Flüssigszintillation ist allerdings etwas störungsanfällig. Es gibt Verbindungen, etwa Aceton, deren Gegenwart die Ausbeute an Lichtquanten erheblich reduzieren kann. Man bezeichnet diesen Vorgang als chemisches Quenching (Löschung). Man kann den Effekt über eine geeignete Kalibration in den Griff bekommen. Ist die Probe gefärbt, können allenfalls nicht alle erzeugten Photonen den Photomultiplier erreichen. Einige werden je nach Intensität der Färbung absorbiert (Farbquenching).

Ein einziger radioaktiver Zerfall bewirkt die Anregung von vielen Szintillatormolekülen innert einer sehr kurzen Zeit. Dies kann zu einer drastischen Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses ausgenutzt werden. Zwei Photomultiplier müssen je ein Ereignis innerhalb von 8 ns registrieren, ansonsten die Ereignisse ignoriert werden. Man bezeichnet diese Methodik als Koinzidenz-Messung. Störungen durch den Untergrund können dadurch auf ein Minimum beschränkt werden.

Man kann mit Szintillationszählern die Energie der Strahlung bestimmen, allerdings nicht mit gleich grosser Auflösung, wie das mit der Ionisationskammer oder mit Halbleiter-Detektoren möglich ist. Dafür ist die Empfindlichkeit des Szintillationszählers mehr als eine Grössenordnung besser als jene von Halbleiterdetektoren. Zum Vergleich wird hier das γ -Spektrum von ^{137}Cs wiedergegeben, gemessen mit einem NaI-Szintillationszähler und einem Ge-Halbleiterdetektor.



Der Peak bei 661 keV rührt von den Photoelektronen her, die Kante bei 480 keV entspricht dem Maximum der Energieverteilung von Compton-Elektronen.

Autoradiographie

Der Ursprung radioaktiver Strahlung lässt sich sehr genau lokalisieren, besonders im Fall von α - und β -Strahlung. Man hat davon sehr früh Gebrauch gemacht. Auf Fotoplatten macht sich durch Schwärzung der Ort bemerkbar, an dem sich die Radionuklide befinden. Man bezeichnet diese Technik als Autoradiographie. Man benötigt dazu eine Probe mit glatter Oberfläche, etwa Gewebeschnitte, angeschliffene Werkstücke, Dünnschichtchromatogramme und dergleichen. Heute werden kaum mehr fotografische Emulsionen als Detektor verwendet, da sie recht teuer sind und nicht wiederverwendet werden können.

Es stehen heute Proportionalzähler zur Verfügung, die eine örtliche Auflösung von wenigen $100 \mu\text{m}$ in zwei Dimensionen erlauben. Eine alternative Technik arbeitet mit Platten aus dem Element Europium. Bei Bestrahlung werden die Eu-Atome in einen metastabilen Zustand angeregt. Nach der Exposition der Platte mit dem radioaktiven Präparat tastet ein Laser die Platte Zeile für Zeile ab. Angeregte Eu-Atome werden durch die Photonen aus ihrem metastabilen Zustand in einen noch höheren Zustand angeregt, aus welchem sie sofort unter Aussendung eines Photons in den Grundzustand zurückfallen. Da die Wellenlänge des emittierten Lichts kleiner ist als jene des

Laserlichts, lässt es sich problemlos detektieren. Die Platte kann daraufhin für einen neuen Versuch wiederverwendet werden.

Andere Detektoren

Es gibt noch eine ganze Palette weiterer Messgeräte, die die unterschiedlichsten Phänomene ausnutzen, um radioaktive Strahlung zu detektieren. Sie haben aber entweder eine sehr spezielle Anwendung, oder das Messprinzip ist veraltet und wird nicht mehr angewandt.

Die Flugbahnen einzelner Teilchen lassen sich mit Kernspurdetektoren vielfältiger Art nachweisen. Die häufigsten Ausführungen sind als Nebelkammer und Blaskammer bekannt. Mithilfe von elektrischen und magnetischen Feldern können die Teilchen gezielt abgelenkt werden, was Information über ihre Ladung, Masse und Energie liefert. Solche Detektoren sind in der Elementarteilchen-Physik von Bedeutung. In der Radiochemie haben sie keine breite Anwendung gefunden.