

ANLAGE V	NP
KERNSTRAHLUNGSDETEKTOREN	

Kernstrahlungsdetektoren und Meßelektronik



Geiger-Müller-Zählrohr (Auslösezählrohr)

Beim Durchgang radioaktiver Strahlung durch Materie werden durch inelastische Stöße Elektronen aus den Atomverbänden herausgeschlagen und die Atome ionisiert. Geschieht dies durch Anlegen einer Spannung innerhalb eines elektrischen Feldes, so werden sich die entstandenen freien Ladungsträger (Elektronen, Ionen) bewegen und einen Strom verursachen, der nachgewiesen werden kann.

Zählrohre sind gasgefüllte Elektrodensysteme mit koaxialer Elektrodenanordnung. Als Zählgase finden meist Edelgase Verwendung (Ne, Ar, He). Beim *Geiger-Müller-Zählrohr* (GM-Zählrohr; *Hans Geiger*; 1882-1945; dt. Physiker; *Ernst-Wilhelm Müller*; *1911; dt. Physiker; 1951 Prof. an der FU Berlin) ist die angelegte Spannung so groß (typisch 500 V), daß die durch die Strahlung gebildeten primären Ladungsträger (*Primärionisation*) in dem elektrischen Feld sehr stark beschleunigt werden und weitere Atome des Zählgases ionisieren (*Sekundärionisation*). Es entstehen *Ladungslawinen*, deren Größe unabhängig von der Primärionisation, und damit allerdings auch unabhängig von der Energie des eingefallenen Strahlungsquants ist. Durch zusätzliche *Löschgase* wird erreicht, daß der Ionisationsprozess wieder abbricht und zu keiner dauernd brennenden Gasentladung führt.

Der durch ein *Ereignis* ausgelöste, kurzzeitige Strom im Zählrohrkreis verursacht an einem Außenwiderstand R einen kurzzeitigen Spannungsabfall (Impuls), der über einen Kondensator ausgekoppelt wird. Die Impulse des GM-Zählrohrs sind wegen der hohen Gasverstärkung so groß, daß sie ohne weitere Nachverstärkung direkt einem Zählgerät zugeführt werden können.

Bei gleichbleibender Strahlungsintensität ist die Zählrate von der angelegten Spannung abhängig (Zählrohrcharakteristik). Die *Einsatzspannung* ist der untere, kritische Spannungsgrenzwert für die Lawinenbildung. Es schließt sich ein Bereich an, in dem die Zählrate nur wenig von der Spannung abhängt (*Zählrohrplateau*) und innerhalb dessen ein *Arbeitspunkt* für den Zählrohrbetrieb gewählt wird. Ein leichter Anstieg der Zählrate innerhalb dieses Plateaus wird durch eine Vergrößerung des effektiven Nachweisvolumens und durch eine mit der Spannung steigende Zahl von Fehl- und Nachentladungen verursacht. Mit noch größerer Spannung wird schließlich eine Dauerentladung ausgelöst.

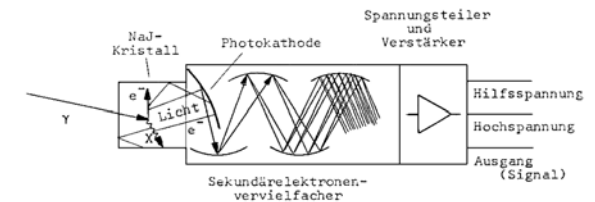
Nach dem Nachweis eines Ereignisses kommt es kurzzeitig zu einer Abnahme der Feldstärke im Zählrohr durch die Abschirmung des negativen Potentials der Zählrohrwand, durch die nur langsam abwandernde Raumladungswolke der positiven Ionen und zusätzlich durch den Spannungsabfall am Außenwiderstand. Während dieser *Totzeit* kann kein weiteres Strahlungsquant im Zählrohr nachgewiesen werden.

Der Vorteil des GM-Zählrohrs liegt im einfachen Aufbau und den großen Ausgangsimpulsen durch die hohe Gasverstärkung. Die Nachteile sind ein fehlendes *Energieauflösungsvermögen* und die Begrenzung auf kleine Zählraten wegen der vergleichsweise großen Totzeit.

Natrium-Jodid-Szintillationsdetektor

Natrium-Jodid-Szintillationsdetektoren (NaJ-Detektoren) dienen dem Nachweis von γ -Strahlung und beruhen auf dem (inneren) Photoeffekt. In einem NaJ-Kristall wird das γ -Quant durch Photoeffekt gestoppt und die gesamte Quantenenergie auf ein Elektron übertragen (Primärelektron). Das Elektron wird freigesetzt und verursacht zusammen mit dem nachfolgenden Röntgenquant eine Kaskade weiterer elektronischer Anregungsprozesse, an deren Ende durch deren spontanen Zerfall eine bestimmte Lichtmenge entsteht, die der primären -Energie äquivalent ist.

Der NaJ-Kristall wird in optischen Kontakt mit einem *Sekundärelektronenvervielfacher* gebracht (SEV; engl. Photomultiplier). An der Photokathode des SEV werden durch das Licht Elektronen im Vakuum ausgelöst, die elektrostatisch beschleunigt und an weiteren sogenannten *Dynoden* vervielfacht werden. Die dadurch entstehende Ladungsmenge wird schließlich elektronisch weiter verstärkt. Zum Prinzipaufbau eines NaJ-Detektors siehe folgende Abbildung.



Der gesamte Prozeß ist linear, so daß am Ausgang des Systems ein Impuls erscheint, dessen Höhe der Energie des einfallenden γ -Quants proportional ist und eine *Linie* verursacht (*Photolinie*; *Photopeak*).

Neben dem Photoeffekt finden im Kristall auch Compton-Prozesse statt, bei denen das γ -Quant inelastisch gestreut wird. Für den Fall, daß das gestreute Quant den Kristall wieder verläßt, wird nur ein Teil der Energie auf das System übertragen und nachgewiesen. Wegen der Abhängigkeit von den mit statistischer Verteilung auftretenden Streuwinkeln erscheint dadurch ein zusätzliches *Compton-Plateau* im Spektrum, das bei der maximalen Übertragungsenergie bei einem Streuwinkel von 180° abbricht (*Compton-Kante*).

Umgekehrt finden Compton-Streuprozesse auch in der übrigen Materie des Detektors außerhalb des Kristalls statt, wobei aufgrund der geometrischen Verhältnisse hauptsächlich zurück gestreute γ -Quanten im Bereich der maximalen Übertragungsenergie in den Nachweis-kristall eintreten und dort eine breite, sogenannten *Rückstreulinie* verursachen (Backscatter-peak). Diese Linie ist in den Spektren hier im Praktikum deutlich zu beobachten.

Die Nachweis-Impulse eines NaJ-Detektors sind im wesentlichen durch die statistischen Prozesse im SEV vergleichsweise stark verbreitert. Für das Auflösungs-

vermögen von Kernstrahlungsmessgeräten ist es üblich, als Linienbreite die volle Breite bei halben Maximum zu

berücksichtigen (engl. *FWHM* = Full Width at Half Maximum) und gegenüber der Begriffsbildung in der Optik den Kehrwert des Breite-Lage-Verhältnisses anzugeben:

$$(1) \text{ Auflösungsvermögen} = \frac{FWHM}{\text{Linienlage}}$$

Das Auflösungsvermögen von NaJ-Detektoren bewegt sich im Bereich einiger Prozent (5-10 %)

Auslösezähler

Einfache Detektoren ohne Energieauflösungsvermögen können eingesetzt werden, wenn es ausreichend ist, das integrale Spektrum zu registrieren, wobei die Weiterverarbeitung der Impulse digital durch Zähler (siehe Versuch *RADIOAKTIVER ZERFALL*) oder durch analoge Integration mit einer geeigneten Zeitkonstanten erfolgt. Dabei wird die Pulsfolge in eine der mittleren Pulsrate proportionale Spannung umgesetzt, die mit einem Voltmeter angezeigt oder mit einem Schreiber aufgezeichnet werden kann (Beispiel: Ionendosisleistungsmeßgerät am Versuch *RADIOAKTIVER ZERFALL*).

Spektrometer

Energieauflösende Systeme mit Proportionalzählrohren, Szintillationsdetektoren oder Halbleiterdetektoren als Detektoren bezeichnet man als *Spektrometer*. Sie liefern für jedes im Detektor absorbierte Strahlungsquant (α -, β -Teilchen, Röntgen- oder Gamma-Quant) einen elektrischen Impuls, dessen Höhe zu der im Detektor absorbierten Energie proportional ist. Die Breite und Form der Impulse (typisch 1 μ s bzw. einige Volt) wird durch die *Zeitkonstanten*-Bauglieder in den Verstärkerstufen des Systems bestimmt. Bestimmte Wechselwirkungsprozesse (z.B. der innere Photoeffekt) absorbieren die gesamte Quantenenergie, so daß die Impulshöhe direkt der Energie der Strahlung entspricht (Photolinie). Die Linien (Peaks) eines Spektrums sind dabei an der Häufung von Pulsen gleicher Amplitude zu erkennen. Andere Prozesse (z.B. der Compton-Effekt) absorbieren nur einen Teil der Quantenenergie und liefern kleinere Impulse einer bestimmten Verteilung, die einen zusätzlichen kontinuierlichen *Untergrund* im Spektrum verursachen. Es wird empfohlen, sich am Versuch *GAMMA-SPEKTROSKOPIE* die Impulse des Szintillati-

onsdetektors auf dem Oszilloskop bei langsamer und bei schneller Zeitablenkung anzusehen.

Die Weiterverarbeitung der Impulse, in deren Impulshöhe die Information über die Energie liegt, kann nach unterschiedlichen technischen Methoden erfolgen.

Einkanalanalysator

Besteht die Aufgabe z.B. darin, die Zeitabhängigkeit eines bestimmten Übergangs, d.h. einer bestimmten Linie zu messen, so kann dies einfach durch einen *Einkanalanalysator* erfolgen (EKA; engl. SCA von Single-Channel-Analyzer). Ein EKA besitzt zwei einstellbare Spannungswerte (*Schwellen*) und gibt genau dann einen logischen Ausgangsimpuls ab (Rechteckimpuls fester Höhe und Länge), wenn die Impulshöhe am Eingang in das *Fenster* zwischen den beiden Schwellwerten fällt. Die Ausgangsimpulse können dann gezählt oder anders weiterverarbeitet werden. Ein Nachteil des EKA liegt darin, daß damit nur eine Linie beobachtet werden kann, und daß das Fenster den kontinuierlichen Untergrund mit erfaßt. Die Aufnahme eines (differentiellen) Gesamtspektrums ist nur umständlich und zeitraubend vermittelt durchstimmen des EKA möglich (*Boxcar*-Prinzip).

Vielkanalanalysator

Einfacher und eleganter läßt sich die Aufgabe durch Verwendung eines *Vielkanalanalysators* lösen (VKA; engl. MCA von Multichannel-Analyzer). Ein VKA besteht aus einem *Analog-Digital-Wandler* (AD-Wandler; engl. ADC von Analog-Digital-Converter) und einer Vielzahl von nachgeschalteten Zählstellen (typisch 256 bis 4096 und mehr). Der ADC wandelt die Höhe eines am Eingang eintreffenden Impulses in eine Zahl um. In einem gängigen Verfahren wird durch den Impuls über eine Diode zunächst ein Kondensator aufgeladen und so die Peakhöhe fest gehalten. Danach wird der Kondensator bei konstantem Strom entladen, und die Zeit bis zur vollständigen Entladung durch Zählen von Uhrimpulsen bestimmt (typisch 100 Mhz), so daß die Anzahl dieser Impulse der Peakhöhe und damit der absorbierten Strahlungsenergie entspricht. Diese Zahl wird als Adresse eines Zählers (Kanal) interpretiert, und dessen Inhalt um eins erhöht. Die Zählerinhalte liefern so die Verteilungsfunktion der Strahlungsintensität über der Energie, die z.B. auf einem Bildschirm dargestellt oder zur weiteren Auswertung auch numerisch ausge-

geben werden kann. Weitere Bausteine eines VKA sind ein Rechenwerk zur Ablauf- und Zeitsteuerung und ein Digital-Analog-Wandler (DA-Wandler bzw. DAC) zur Umsetzung von Kanaladressen und -inhalten in analoge Spannungen zur Darstellung auf dem Bildschirm (oder einem Schreiber). Ein DAC steuert durch die Bits der digital kodierten Zahl elektronische Schalter und summiert Einzelströme zu einem Gesamtstrom, der dann an einem Widerstand eine der Zahl proportionale Spannung erzeugt.

Messungen und Auswertungen von Spektren werden durch einen VKA erheblich erleichtert. Intensitäten von Linien können durch numerische Integration der Peaks bestimmt werden, wobei Untergrundanteile aus dem Verlauf der Spektren außerhalb der Linien ermittelt werden können. Im allgemeinen muß bei den Auswertungen zusätzlich die Nachweisempfindlichkeit des Detektors berücksichtigt werden, die stark von der Energie der einfallenden Strahlung abhängig sein kann.

Der Einsatz von Vielkanalanalysatoren beschränkt sich nicht auf die Kernspektroskopie; sie werden in der modernen Meßtechnik für viele Aufgaben verwendet. Einige Beispiele: Mit einem *TPHC* (Time-to-Pulse-Height-Converter) können Pulse erzeugt werden, deren Höhe proportional zum zeitlichen Abstand zwischen einem Start- und einem Stoppimpuls ist. Die Weiterverarbeitung in einem VKA liefert dann z.B. die Lebensdauer eines Zwischenzustands in einer Gamma-Kaskade (Start und Stopp: EKA auf den entsprechenden Peaks) oder eines angeregten Atomzustands (Start: Anregungs-Laserpuls, Stop: vom Atom emittierte Strahlung). Bei der *Sampling-Technik* werden mit einem schnellen Schalter Impulse aus einer kontinuierlich veränderlichen Spannung *herausgeschnitten*; der VKA liefert dann das zugehörige Amplitudenspektrum. Ebenso wichtig sind Anwendungen, bei denen der VKA nicht im bisher betrachteten PHA-Modus (Pulse-Height-Analysis), sondern im MCS-Modus Modus betrieben wird (Multi-Channel-Scaling). Dabei werden eintreffende (Einheits-) Pulse für eine bestimmte Zeit in die einzelnen Kanäle gezählt, und damit die Abhängigkeit der Impulsrate von der Zeit oder von einer zeitlich modulierten Größe registriert. Breite Anwendung findet dies beim *Signal-*

Averaging-Verfahren, wo zur Verringerung statistischer Fehler viele Meßzyklen addiert werden. Als Beispiel seien *Sampling-Oszilloskope* erwähnt, bei denen die Sampling-Technik mit einem VKA in MCS Betrieb kombiniert wird. Die Echtzeit-Darstellung hochfrequenter Signale mit Oszilloskopen wird ab 50 MHz teuer und stößt bei 1000 MHz an technische Grenzen. Da es aber möglich ist, wesentlich schnellere Trigger- und Sampling-Schaltungen zu bauen, kann der Momentanwert eines periodisch wiederkehrenden Signals nacheinander für verschiedene Verzögerungen gegen einen Triggerzeitpunkt gespeichert werden. Die Darstellung der Kurvenform kann dann auf einem "langsamen" Oszilloskop erfolgen.