

### 3.3 Szintillationszähler

In diesem Kapitel werden die Funktionsweise der verwendeten Szintillationszähler und die Signalverarbeitung diskutiert. Die Darstellung in Kapitel 3.3 basiert auf den verwendeten Lehrbüchern [4], [5], [6] und [8].

#### 3.3.1 Detektortyp und Messprinzip

Die Wirkungsweise eines Szintillationszählers beruht auf dem Prinzip, dass bestimmte anorganische Substanzen wie etwa Natriumiodid oder organische Verbindungen wie Plastik durch ionisierende Strahlung zur Emission von Licht angeregt werden.

Szintillationszähler bestehen aus zwei Komponenten, dem Szintillator und dem Photomultiplier (Abbildung 3.3). Die Atome eines Szintillators (scintillare, lat.: Funken sprühen, flackern) werden durch die Wechselwirkung mit geladenen Teilchen angeregt, die im Fall von elektromagnetischer Strahlung zunächst durch Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung erzeugt wurden, und strahlen ihrerseits die Energie in Form von Lumineszenzlicht wieder ab. Der Photomultiplier wandelt anschließend dieses Licht in ein elektronisch messbares Signal um. Dabei ist von entscheidender Bedeutung, dass die vom Szintillator abgestrahlte Lichtintensität bei vollständiger Absorption der  $\gamma$ -Quanten im Detektor proportional ist zur Energie der einfallenden Strahlung.

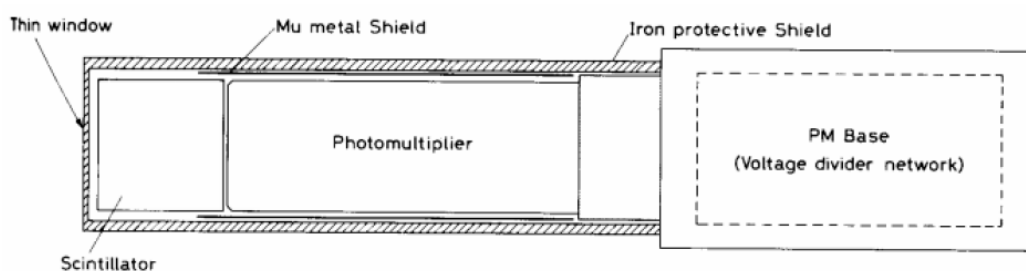


Abbildung 3.3: Schematischer Aufbau eines Szintillationszählers (aus [8])

Zur Abschirmung externer Magnetfelder ist der Photomultiplier von einer besonderen  $\mu$ -Metall-Schicht umgeben.

### 3.3.1.1 Szintillatoren

Als Szintillatoren werden anorganische Kristalle, organische Plastik- oder Flüssigszintillatoren oder Gas-Szintillatoren verwendet. Dabei muss der Szintillationsmechanismus in den verschiedenen Materialien unterschieden werden. So basieren die anorganischen Szintillatoren auf dem Lumineszenz-Mechanismus als Gittereigenschaft der Kristalle, während in organischen Szintillatoren eine An- und Abregung der Moleküle stattfindet. Bei Gas-Szintillatoren entsteht das Szintillationslicht durch Stöße der sekundären geladenen Teilchen mit den Gasatomen.

Im Rahmen des Versuchs „Szintillationszähler“ werden ein Ionenkristall aus der Gruppe anorganischer Szintillatoren und ein organischer Plastiksintillator eingesetzt.<sup>8</sup> Die Szintillationsmechanismen beider Szintillatoren werden nun diskutiert und im Anschluss beide Klassen von Szintillationszählern einander gegenübergestellt.

Der verwendete anorganische Szintillator ist ein mit Aktivatorzentren dotierter Alkaliiodidkristall. Bei dem im Versuch verwendeten Kristall handelt es sich um Natriumiodid (NaI), dem als Aktivatorzentren Thallium (Tl) zugesetzt wurde. Mit Hilfe des Bändermodells lässt sich das Verhalten der Ionenkristalle beschreiben.

Man ordnet dem Kristall als ganzem ein Energie-Niveau-Schema zu, wobei dichtliegende Niveaus als Bänder bestimmter Breite betrachtet werden und unter Berücksichtigung des Pauli-Prinzips mit einer bestimmten Anzahl an Elektronen besetzt werden können. Das höchste vollständig besetzte Band wird als Valenzband bezeichnet und das darüber liegende als Leitungsband. Es ist bei niedrigen Temperaturen und ohne äußere Anregung der Elektronen normalerweise unbesetzt. Bei tiefen Temperaturen sind die äußeren Elektronen eines jeden Atoms in die Bindungen zu den jeweiligen Nachbaratomen eingebaut. Bei höheren Temperaturen oder nach Absorption energiereicher Strahlung wird ein kleiner Teil der Elektronen ins Leitungsband angeregt, in dem sie frei beweglich sind - der Kristall wird elektrisch leitend. Bei Alkaliiodidkristallen beträgt der Abstand zwischen dem Valenzband und dem im Grundzustand leeren Leitungsband etwa 6-8 eV, Abbildung 3.4 zeigt schematisch das Bändermodell eines dotierten Szintillationskristalls.

---

<sup>8</sup>

Im FPII-Versuch „Lebensdauer des Myons“ wird ein Tank mit Flüssigsintillator verwendet.

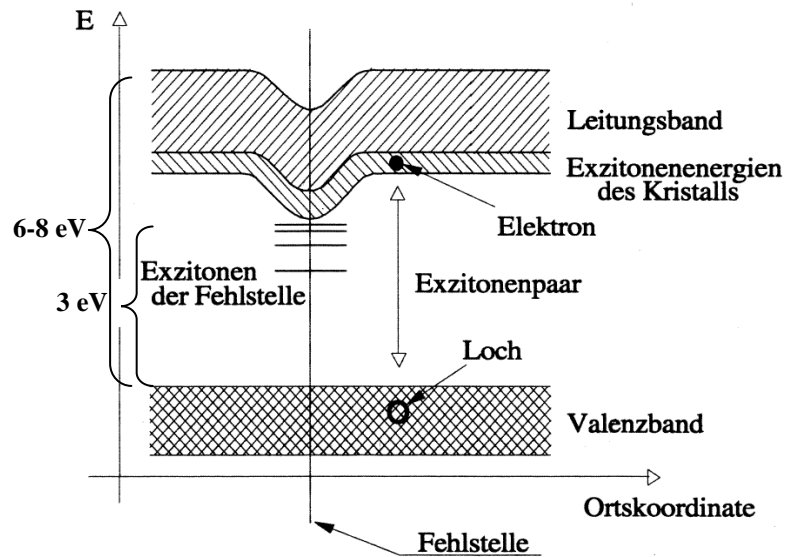


Abbildung 3.4: Bändermodell eines dotierten Szintillationskristalls (aus [13], ergänzt)

Durch Wechselwirkung der  $\gamma$ -Quanten im Szintillator durch die in Abschnitt 1.5.2.2, 1.5.2.3 und 1.5.2.4 beschriebenen Prozesse, hauptsächlich durch Photoeffekt, werden Elektronen angeregt. So werden sie auf höhere Energieniveaus, d.h. vom Valenzband ins Leitungsband, gehoben. Im Valenzband bleibt ein Loch zurück, das sich ebenfalls durch den Kristall bewegt. Ein Elektron, das einen Teil der Energie des  $\gamma$ -Quants absorbiert hat, aber das Leitungsband nicht erreicht, bleibt elektrostatisch an das Loch gebunden. Solche lose gekoppelten Elektron-Loch-Paare werden Exzitonen genannt und können sich im Kristall ebenfalls frei bewegen. Die angeregten Zustände kehren unter Emission von  $\gamma$ -Quanten wieder in den Grundzustand zurück.

Die eintreffenden Photonen haben Energien im Bereich von  $100\text{ keV}$  bis  $\text{MeV}$ , so dass ihre Energie ausreicht, um  $100$  bis  $1000$  Elektronen anzuregen, d.h. entsprechend viele Photonen zu erzeugen. Um diese „neuen“  $\gamma$ -Quanten nutzen zu können, müssen sie Energien haben, bei denen sie kaum re-absorbiert werden. Dazu wird der Kristall mit Aktivatorzentren dotiert. Ohne Aktivatorband würde das Elektron direkt wieder ins Valenzband fallen und es käme zu einer Emission eines Photons der Energie, die ausreicht, erneut ein Elektron ins Leitungsband zu heben. Der Szintillator wäre ohne Dotierung also für das ausgesandte Licht undurchlässig, da die emittierten Photonen wiederum absorbiert werden könnten. Die Dotierung des  $\text{NaI}$ -Kristalls mit  $\text{Tl}$  verformt lokal das Leitungsband und schafft somit neue Energieniveaus in der Bandstruktur des Kristalls, so genannte Aktivatorbänder. Sie besitzen genau die gewünschten Energieniveaus zwischen Valenzband und Leitungsband und bestimmen die Szintillation entscheidend durch den Einfang von Exzitonen, von freien Elektron-

Loch-Paaren und von freien Ladungsträgern. Elektronen, Löcher und Exzitonen diffundieren durch den Kristall, bis sie auf ein Aktivatorzentrum stoßen. Insbesondere an diesen Thallium-Störstellen rekombinieren sie und über die Aktivator-Niveaus erfolgt Abregung unter Emission von Photonen, die Energien im sichtbaren und im nahen UV-Bereich haben. Diese Energie liegt bei Thallium bei etwa 3 eV, entsprechend einer Wellenlänge von 413 nm. Die Energie von „Aktivator-Photonen“ ist somit niedriger als die nötige Anregungsenergie, um ein Valenzband-Elektron ins Leitungsband zu heben. Das emittierte Licht dieser Wellenlänge kann also zur Photokathode gelangen und dort durch Photoeffekt Elektronen herausschlagen, die im Photomultiplier weiterverarbeitet werden.

Zur Gruppe organischer Szintillatoren gehört der verwendete Plastikszintillator. Bei solchen ist die Trägersubstanz ein festes durchsichtiges Medium, in das die Aktivatoren in Form einer festen Lösung hinein gegeben sind. Die einfallende elektromagnetische Strahlung erzeugt geladene Teilchen, die wiederum die Moleküle des Plastikmaterials anregen sowie die Anregungsenergie auf die Moleküle der Aktivatorsubstanz übertragen. Die Energieniveaus der Moleküle der Aktivatorsubstanz sind verschieden von denen des Plastikmaterials. Vergleichbar mit den anorganischen Szintillatoren kann ein  $\gamma$ -Quant, das bei der Abregung der Aktivatormoleküle emittiert wird, nicht re-absorbiert werden. Es kann somit den Szintillator verlassen und zur Photokathode des Photomultipliers gelangen.

Wichtige Anforderungen an den Szintillator sind eine gute Lichtausbeute und die Transparenz für das eigene Lumineszenzlicht. Die Transparenz für das eigene Lumineszenzlicht wird wie bereits erläutert durch die Dotierung mit Aktivatorzentren erreicht. Unter guter Lichtausbeute versteht man die effiziente Umwandlung der Anregungsenergie der Teilchen in Lumineszenzlicht. Abbildung 3.5 a) zeigt eine deutlich größere Lichtausbeute für einen anorganischen NaI-Kristall als für einen organischen Anthrazen-Szintillator, nach Abbildung 3.5 b) ist die Lichtausbeute von NaI(Tl) für Elektronen größer als für  $\alpha$ -Teilchen. Beide Erscheinungen lassen sich mit dem Energieverlust nach Bethe und Bloch erklären (vgl. Kapitel 1.5.1.1 und 1.5.1.2). Für den Energienachweis von  $\gamma$ -Quanten sind anorganische Kristalle vorzuziehen, da sie eine größere mittlere Ordnungszahl  $\bar{Z}$  haben und folglich häufiger Photoeffekt stattfindet. Für NaI(Tl) ist  $\bar{Z} = 32$  und hat bei einer Dicke von 5mm eine Absorptionswahrscheinlichkeit von 12 % bei  $\gamma$ -Energien von 1 MeV. Plastik dagegen hat mit  $\bar{Z} = 2,7$  eine Absorptionswahrscheinlichkeit von weniger als 3 %, wobei hier hauptsächlich Compton-Effekt stattfindet.

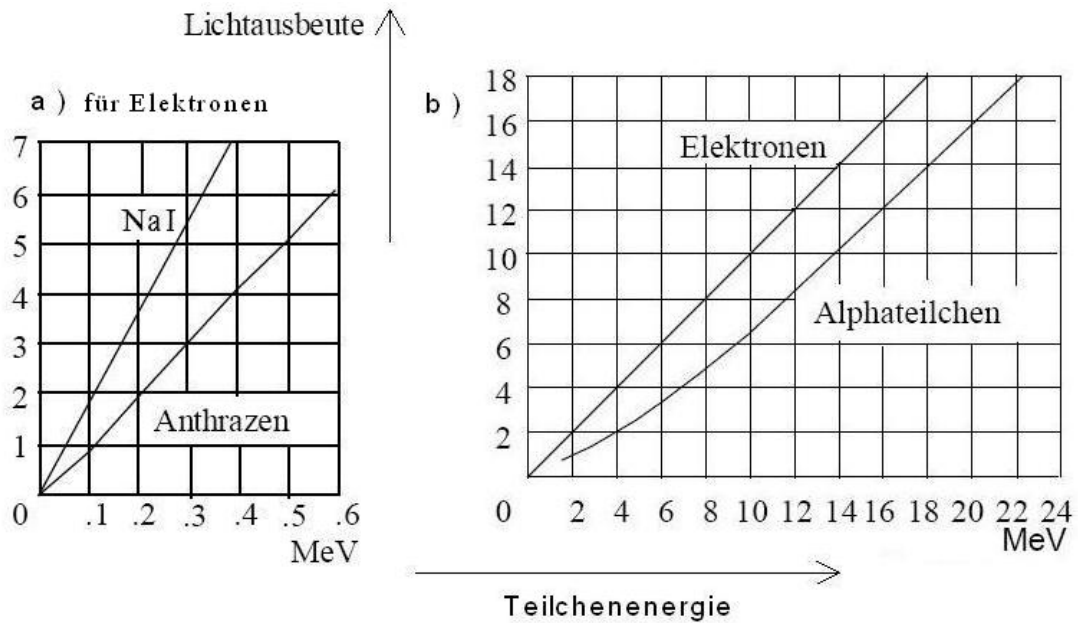


Abbildung 3.5: Lichtausbeute in Szintillatoren als Funktion der Teilchenenergie (aus [11])

a) Vergleich von anorganischem NaI und anorganischem Anthrazen

b) Vergleich von Elektronen und  $\alpha$ -Teilchen in NaI

Zwei weitere wichtige Größen sind die Energieauflösung und die Auflösungszeit des Detektors. Zur Energiemessung von Teilchen ist Natriumiodid besser geeignet. Aufgrund der höheren Lichtausbeute erhält man hier weniger statistische Schwankungen im Elektronenstrom und die Energieauflösung verbessert sich.

Bei Interesse an einer guten Zeitauflösung bei einer Koinzidenzmessung oder an einer schnellen Information für ein Triggersignal<sup>9</sup> oder bei Zeitmessungen sind organische Szintillatoren besser geeignet. Die genannten Szintillationsmechanismen laufen unterschiedlich schnell ab: Die An- und Abregung der Moleküle organischer Szintillatoren wie die der Gasatome findet auf der Zeitskala der Atom- und Molekülphysik statt, die in der Größenordnung von Nanosekunden liegt. Plastik hat eine Abklingzeit von  $8 \cdot 10^{-9}$  s. Dagegen findet bei Festkörpern wie Natriumiodid die An- und Abregung durch Gitterschwingungen in deutlich größerer Zeitkonstante von bis zu  $100 \mu\text{s}$  statt.

<sup>9</sup> Vergleiche FPII-Versuch „Lebensdauer des Myons“

### 3.3.1.2 Photomultiplier

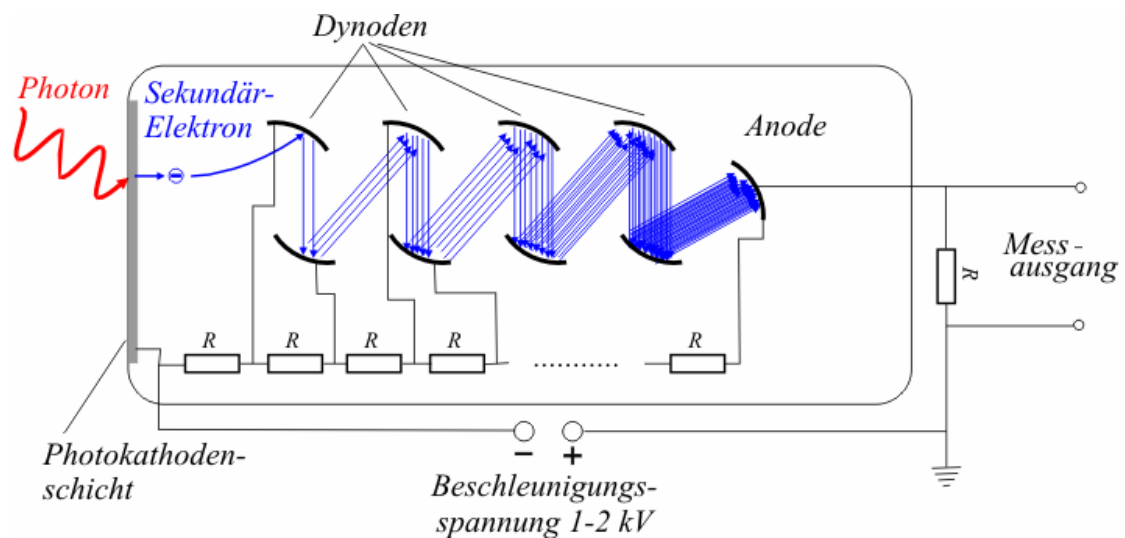


Abbildung 3.6: Prinzipielle Funktionsweise eines Photomultipliers (aus [1])

Abbildung 3.6 zeigt den typischen Aufbau eines Photomultipliers. An der Photokathode werden durch Photoeffekt Elektronen herausgeschlagen und durch eine anliegende Spannung zur ersten Dynode beschleunigt. Dort schlagen sie mehrere Sekundärelektronen aus der Oberfläche, die nun zur zweiten Dynode hin beschleunigt werden. Eine Vielzahl von Dynoden ist hintereinander geschaltet und so geformt und geometrisch angeordnet, dass möglichst wenige Elektronen verloren gehen. Jede Dynode wird durch einen Spannungsteiler auf ein höheres Potential gebracht als ihre Vorgängerdynode. Die durch die Beschleunigung gewonnene Energie wird beim Auftreffen der Elektronen auf die Dynoden zum Erzeugen weiterer freier Elektronen genutzt. So wird die Elektronenanzahl mit einem material- und spannungsabhängigen Verstärkungsfaktor pro Dynode vervielfältigt und an der Anode in proportionale Stromimpulse umgesetzt. Die Stromimpulsmessung entspricht im Prinzip also dem Zählen der Elektronen, die an der Anode ankommen.

Die Proportionalität kann durch eine schwankende Zahl an Lichtquanten im Kristall, unterschiedliche Quantenausbeute an der Photokathode, inhomogene Oberflächen und schwankende Elektronenvervielfältigung gestört werden. Dies führt zu einer Linienverbreiterung im Spektrum, die in der Größenordnung von etwa 10% der  $\gamma$ -Energie liegt. Wenn man ein Signal an einer mittleren Dynode abnimmt, ist das Signal zwar weniger verstärkt. Dafür vermeidet man aber mögliche Sättigungseffekte. Die Linearität zwischen der Intensität des einfallenden Lichts und der Amplitude des ausgehenden Spannungsimpulses ist damit besser erfüllt.

### 3.3.2 Signalverarbeitung

Zur Signalverarbeitung werden ein Vorverstärker, ein Hauptverstärker, ein Einkanalanalysator, ein Vielkanalanalysator und ein Zähler verwendet. Bei der Koinzidenzmessung wird zusätzlich eine Koinzidenzeinheit verwendet. Die Funktionsweise dieser beiden Geräte wird im Folgenden diskutiert.

#### 3.3.2.1 Vorverstärker

Um die kurzen Stromimpulse des Photomultipliers zu messen, wird ein ladungsempfindlicher Vorverstärker benutzt, in dem die Stromimpulse in Spannungsimpulse leicht messbarer Amplitude umgewandelt werden und deren Impulshöhe proportional zur Energie der einfallenden Strahlung ist. In einem ladungsempfindlichen Vorverstärker wird die Ladung auf einen Kondensator integriert und am Ausgang des Vorverstärkers wird ein dieser Ladung proportionaler Spannungsimpuls generiert, der nach Ende des Pulses zur Verfügung steht

Der Vorverstärker ist bei diesem Versuch nicht ein einzelnes Gerät im NIM-Überrahmen (NIM = Nuclear Instrument Module), sondern bereits im Gehäuse des Photomultipliers integriert. Dies hat den Vorteil, dass der Abstand bzw. die Kabellänge zwischen Detektor und Vorverstärker minimiert ist, um ein schwaches Signal bestmöglich zu registrieren.

#### 3.3.2.2 Hauptverstärker

Im Hauptverstärker (Amplifier) werden die Impulse weiter verstärkt, so dass sie anschließend eine Amplitude von einigen Volt besitzen. Es ist zu beachten, dass bei zu hohen Verstärkungsfaktoren der Hauptverstärker in Sättigung geht – die Ausgangssignale sollten also eine maximale Spannungsamplitude nicht überschreiten. Die maximale Spannungsamplitude beträgt beim verwendeten „Amplifier 571“ 10 V. Zum anderen sind statistische Schwankungen, die im Detektor selbst oder in den Widerständen und Kapazitäten entstehen, unerwünschte Begleiteffekte. Durch Differentiation und Integration über eine geeignete Zeitspanne mitteln sich statistisch streuende Schwankungen heraus und die Signale werden zur weiteren Verarbeitung geformt. Die Zeitkonstante der Differentiation und Integration wird als *shaping time* bezeichnet und gilt gleichermaßen für die Differentiation wie für die Integration. Sie kann beim verwendeten Verstärker „Amplifier 571“ der Firma Ortec zwischen  $0,5 \mu s$  und  $10 \mu s$  gewählt werden. Bei der Wahl der *shaping time* ist darauf zu achten, dass sie zum einen genügend groß gewählt wird, um die maximale Amplitude innerhalb der *shaping time* zu erreichen. Andererseits sollte sie möglichst klein sein, um die Totzeit

zu minimieren, innerhalb der kein weiteres Ereignis registriert werden kann. Dies ist der Fall, wenn zwei Ereignisse so kurz nacheinander stattfinden, dass der erste Impuls noch nicht komplett abgeklungen ist, wenn der zweite eintrifft.

Das geformte Signal kann am unipolaren Ausgang des Verstärkers abgegriffen werden. Durch eine weitere Differentiation des unipolaren Signals entsteht zusätzlich das bipolare Ausgangssignal, das den Nulldurchgang an der Stelle des Maximums bzw. Minimums des unipolaren Signals hat.

Beide Signale können verzögert werden, ein regulierbares *delay* erlaubt eine gezielte Verlängerung der elektronischen Laufzeit eines Signals.

Durch einen Schalter „positiv-negativ“ kann die Polarität des Signals erhalten oder umgekehrt werden.

### 3.3.2.3 Vielkanalanalysator

Das Impulshöhenspektrum des Photomultipliers enthält die Zeitinformation der einfallenden Quanten und das vollständige Energiespektrum. Jeder Spannungsimpuls am Ausgang des Hauptverstärkers besitzt eine Amplitude, die proportional zur einfallenden Strahlungsenergie ist.

Im Vielkanalanalysator (VKA) wird die Verteilung der Ausgangsimpulse durch einen Impulshöhenanalysator gemessen, der die Impulse je nach Spannungshöhe auf verschiedene Kanäle (in diesem Fall auf 8192 Kanäle) verteilt. Dies geschieht, in dem jeder Impuls gedehnt und mit dem Momentanwert einer gleichzeitig mit dem Impuls einsetzenden Sägezahnspannung verglichen wird. Die Zeit zwischen der Anstiegsflanke des Impulses und dem Zeitpunkt, in dem Impulsamplitude und Sägezahnspannung gleich sind, ist ein Maß für die Größe der Impulsamplitude. Dieser entsprechend erfolgt dann die Einsortierung in die Kanäle, wobei der Kanalinhalt bei jedem Ereignis um 1 erhöht wird.

Mittlerweile können dazu schnellere parallele Verfahren genutzt werden, in dem es so viele Komparatoren wie Kanäle gibt, die signalisieren, ob der eintreffende Puls die dem Kanal entsprechende Amplitude überschritten hat. So kann der Puls dem Kanal mit der größten Amplitude, der den Puls registriert hat, zugeordnet werden.

Durch bekannte Zerfallsspektren und den bekannten 511-keV-Vernichtungspeak im Spektrum von  $^{22}\text{Na}$  kann die Energieeichung durchgeführt werden.

Der Vielkanalanalysator ist bei diesem Versuch nicht ein externes Gerät im NIM-Überrahmen, sondern als Steckkarte im Computer eingebaut. Mit der dazugehörigen Software kann das Spektrum dargestellt werden. Der VKA benötigt zum einen das unipolare Ausgangssignal des Hauptverstärkers und zum anderen ein Gate-Signal, wenn er im Koinzidenzmodus betrieben wird.



Das Gate (gate, engl.: Tor) ist ein Zeitraum, in dem ein Signal registriert wird. Mit Beginn des Gate-Signals öffnet der Vielkanalanalysator ein Tor, das er am Ende des Signals wieder schließt. Als solches verwendet wird das logische Ausgangssignal des EKAs, das zeitlich korreliert kurz nach dem Spannungsimpuls des Hauptverstärkers zur Verfügung steht. Das Gate-Signal muss im Koinzidenzmodus etwa  $1 \mu\text{s}$  nach dem zu analysierenden Impuls im VKA eintreffen. Im Antikoinzidenzmodus werden die Impulse verarbeitet, wenn zu diesem Zeitpunkt kein Gate-Signal registriert wird.

### 3.3.2.4 Einkanalanalysator

Das bipolare Ausgangssignal des Hauptverstärkers wird auf einen Einkanalanalysator (EKA) gegeben, der die Funktion der Signaldiskriminierung hat, wodurch es möglich ist nur  $\gamma$ -Quanten ausgewählter Energien zu registrieren. Durch die Wahl zweier Schwellenwerte, *lower level* und *upper level* genannt, kann ein Impulshöhenfenster gewählt werden. Liegt die Amplitude eines Impulses innerhalb des gewählten Fensters, wird ein Normimpuls erzeugt, der am Ausgang des EKAs zur Verfügung steht. Eine schematische Darstellung zeigt Abbildung 3.7.

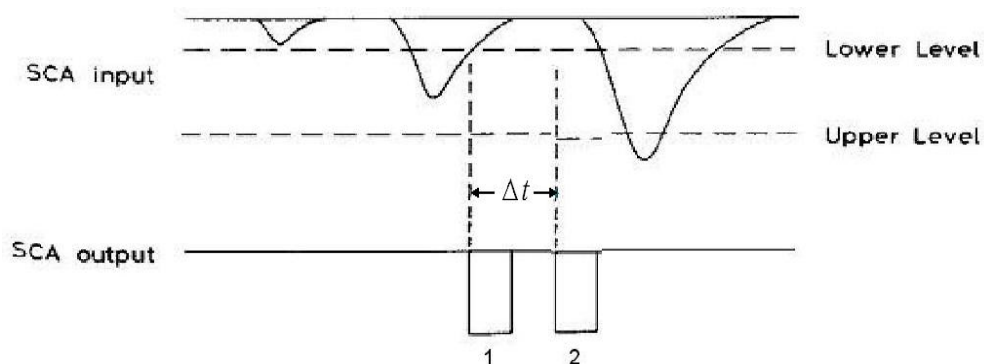


Abbildung 3.7: Erzeugung eines Normimpulses (1) und eines um  $\Delta t$  zeitverzögerten Normimpulses (2) im Einkanalanalysator (aus [8], ergänzt)

Der im Versuch verwendete „TSCA 551“ der Firma Ortec (TSCA, Timing Single Channel Analyzer) kann in drei verschiedenen Modi betrieben werden. Im „*normal mode*“ können die obere und untere Schwelle unabhängig voneinander gewählt werden, sie entsprechen den absoluten Impulshöhen. Im „*window mode*“ fungiert das „*upper level*“ nicht als absolute Impulshöhe, sondern gibt die Fensterbreite oberhalb der unteren Schwelle an, so dass man die obere Schwelle durch Addition von „*lower level*“ und „*upper level*“ erhält. Im „*integral mode*“ wird die obere Schwelle nicht berücksichtigt, es werden alle Pulse diskriminiert, die die untere Schwelle überschreiten.

Die zusätzliche Funktion der möglichen Zeitverzögerung des Signals ist durch den Zusatz „Timing“ angedeutet. Abbildung 3.7 zeigt ebenfalls einen um  $\Delta t$  zeitverzögerten Normimpuls.

Bei der Aufnahme der Energiespektren, bei der es nur auf die Erzeugung eines Gate-Signals ankommt, aber keine Energieauswahl getroffen werden soll, kann ein maximal geöffnetes Fenster gewählt werden. Sollen hingegen nur Impulse bestimmter Amplitude ausgewählt werden, d.h. eine Energieauswahl getroffen werden, können die registrierten Ereignisse am energiegeeichten MCA beobachtet werden und so die Einstellungen der Fenster bestimmt werden.

### 3.3.2.5 Koinzidenzeinheit

Mit Hilfe einer Koinzidenzeinheit können zwei emittierte und mit verschiedenen Detektoren registrierte  $\gamma$ -Quanten auf ihre „Gleichzeitigkeit“ überprüft werden. Dabei gelten zwei eintreffende  $\gamma$ -Quanten als koinzident, wenn sie innerhalb einer kurzen Zeitspanne  $\Delta t$ , der Auflösezeit der Koinzidenzeinheit, eintreffen. In diesem Fall wird ein Normimpuls erzeugt. Abbildung 3.8 zeigt die Erzeugung eines Normimpulses in der Koinzidenzeinheit. Die Anzahl koinzidenter  $\gamma$ -Quanten wird mit einem Zähler gezählt.

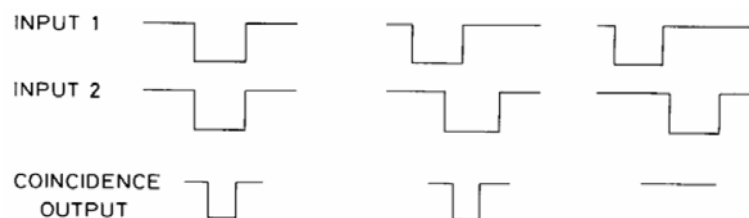


Abbildung 3.8: Erzeugung eines Normimpulses in der Koinzidenzeinheit (aus [8])

Bei einer Koinzidenzmessung ist es entscheidend, dass zwei zeitgleiche Ereignisse auch zeitgleich registriert werden, dass also zwei Signale auch die gleiche Kabellaufzeit und Elektroniklaufzeit brauchen, um die elektronische Schaltung bis hin zur Koinzidenzeinheit zu durchlaufen. Dazu wird die Zeitverzögerung des Signals nach dem NaI-Szintillationszähler durch Beobachtung beider Signale am Oszilloskop ausgeglichen und die Winkelverteilung bei optimierter Zeitverzögerung gemessen.

### 3.3.2.6 Zähler

Als Zähler wird ein Hex-Scaler verwendet, der die logischen Ausgangspulse der Koinzidenzeinheit zählt. Er ist in diesem Versuch als NIM-Einschub realisiert.