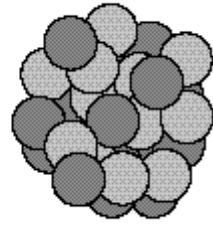




**Praktikum für Fortgeschrittene
Institut für Kernphysik
Technische Universität Darmstadt**



Versuch 2.8-B: Grundlagen der Positronen-Emissions-Tomographie (PET)

Die Positronen-Emissions-Tomographie ist ein in der Medizin verwendetes Verfahren zum Nachweis physiologischer Prozesse. Man untersucht dabei das orts- und zeitabhängige Verhalten radioaktiver Markierungsstoffe, die dem Patienten appliziert wurden. Dazu nutzt man die e^+e^- -Vernichtung aus, bei der zwei kollinare Photonen entstehen. Diese weist man dann in einem Detektorpaar gleichzeitig (koinzident) nach.

Bei diesem Versuch machen Sie sich zunächst mit einem Versuchsaufbau zur Messung koinzidenter Ereignisse vertraut. Sie lernen die Funktionsweise der verwendeten BGO-Detektoren mit Photomultipliern kennen, indem Sie das Spektrum einer ^{22}Na -Quelle aufnehmen und interpretieren. Anschließend stellen Sie den Output der einzelnen elektronischen Bauteile des Versuchsaufbaus mit Hilfe eines Oszilloskops dar. Ziel des Versuchs ist es, mit Hilfe von PET radioaktive Quellen in einem verschlossenen Behälter zu lokalisieren. Im Rahmen von PET haben Sie auch die Möglichkeit, relative Quellenintensitäten anzugeben.

Stichworte: β^+ -Zerfall, Positronen in Materie, Wechselwirkung von γ -Strahlung mit Materie, γ -Spektroskopie, Prinzip von Szintillationszählern, Nachweis koinzidenter Ereignisse, Vielkanalanalysator, Energie- und Zeit-Eichung, medizinische Anwendungen der Kernphysik (besonders PET), bildgebende Verfahren

1 Einleitung

In der medizinischen Diagnostik ist es für eine frühe Erkennung von Veränderungen oder Schäden im Gewebe unerlässlich, in den Körper des Patienten „hinein zu sehen“. Allgemein bekannte Verfahren sind die Röntgendiagnostik und immer mehr auch die Computerunterstützten tomographischen Verfahren (z.B. Kernspin-Tomographie und Szintigraphie). All diese Methoden geben nach der Auswertung fast immer nur ein Bild der Abschwächung der verwendeten Strahlung durch das untersuchte Gewebe wieder. Diese ist mit der Dichte und damit der Struktur des Gewebes verknüpft, so dass man auf den Bildern die entsprechenden anatomischen Veränderungen erkennen kann.

Manche Krankheitsbilder (z.B. die Frühstadien einer Tumorbildung) sind jedoch vorher bereits an Veränderungen im Stoffwechsel zu erkennen. Hier setzt nun die Positronen-Emissions-Tomographie (PET) an: Den Patienten werden radioaktiv markierte Stoffe (sog. *Tracer*) appliziert, die je nach Stoffwechselaktivität unterschiedlich stark in die Zellen eingebaut werden. Zur räumlichen und quantitativen Bestimmung dieser Anreicherung benutzt man eine Koinzidenz-Messanordnung.

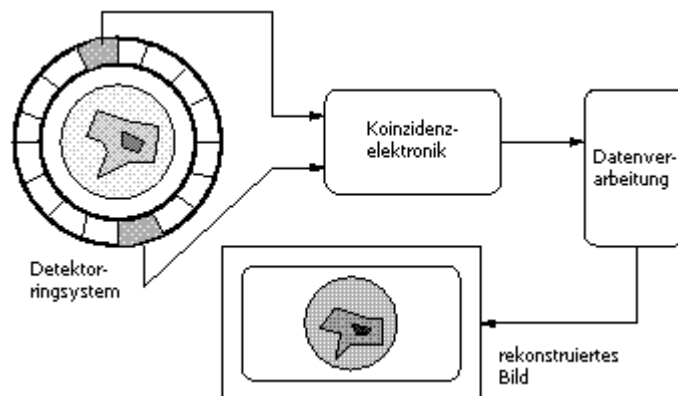


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau einer PET-Meßstation. Der Detektorring besteht aus bis zu 512 BGO-Kristallen. Bis zu acht Ringe werden durch Bleisepten getrennt übereinander angeordnet, um schneller Ganzkörperaufnahmen zu erstellen.

Dazu nutzt man aus, dass Positronen mit den Elektronen der Materie zu zwei γ -Quanten gleicher Energie zerstrahlen, die in einem Winkel von 180° auseinander fliegen (\rightarrow Kollinearität). Werden in zwei verschiedenen Detektoren einer Ringanordnung gleichzeitig (\rightarrow *koinzident*) Ereignisse registriert, geht man davon aus, dass sich auf der Verbindungslinie (engl.: *Line of Response –LOR*) der Detektoren ein Positronenemitter befunden hat. Aus der großen Zahl von linearen Schnitten, die man durch eine solche Anordnung erhält, kann man die Aktivitätsverteilung in einer Ebene rekonstruieren.

Die so erhaltenen Bilder stellen dann sog. Stoffwechsel-Räume dar. Bei geeigneten Rekonstruktionsverfahren und Messbedingungen kann man Aussagen über die Stoffwechselaktivität des Gewebes machen und eventuelle Veränderungen frühzeitig erkennen. Vergleicht man diese Bilder zusätzlich mit anatomischen Aufnahmen, wird die Genauigkeit der Diagnose weiter erhöht.

Probleme bei der PET bereiten die relativ hohen Kosten für den Aufbau einer Messanordnung. Auch die Auswahl der verwendeten Tracer will gut überlegt sein. Glücklicherweise stehen mit ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O und ^{18}F gleich mehrere (relativ) leicht herstell- und handhabbare Isotope zur Verfügung, die in organische Moleküle wie z.B. Glucose eingebaut werden können.

Die Ortsauflösung von PET ist physikalisch begrenzt, da die Positronen nicht am Ort ihrer Emission zerstrahlen, sondern je nach Isotop eine Reichweite bis zu zwei Millimetern im Gewebe besitzen. Hinzu kommt noch der Einfluss sog. falscher Koinzidenzen (absorbierte, gestreute, zufällige und verworfene Koinzidenzen) auf die Auswertung der Messdaten. Auch Rekonstruktions-Algorithmen liefern nicht immer eindeutige Ergebnisse: Es kann zur Bildung von Artefakten kommen, worunter man entweder falsch eingeordnete Aktivitäten oder verschwommene Randbezirke versteht.

Trotz dieser Nachteile ist die PET ein immer weiter verbreitetes diagnostisches Verfahren in der Medizin. Die mittlerweile durch sog. Konsensuskonferenzen festgelegte klinische Aussagekraft der PET bei vorliegendem Befund trägt dazu bei, das Verfahren im klinischen Alltag immer mehr zu etablieren.

Neuere Anwendungen der PET findet man in der Verfahrenstechnik. So markiert man z.B. Schmiermittel und beobachtet deren Ausbreitung in Kugel- und Gleitlagern. Da die Reichweite der Positronen stark von der Dichte des sie umgebenden Mediums abhängt, kann man die PET auch zur Dichtebestimmung sog. Zweiphasenströmungen (z.B. Dampf mit beginnender Tröpfchenbildung) verwenden.

Anregungen und Fragen

- *Welche Eigenschaften sollte ein Isotop bezüglich Lebensdauer, Herstellung, Zerfall in den Grundzustand und chemischer Handhabung besitzen, um als Tracer für eine medizinische PET-Messung in Frage zu kommen?*
- *Suchen Sie die genannten Tracer-Isotope auf der Nuklidkarte [FZK 1995]. Wie könnte man sie herstellen und in welche Isotope zerfallen sie?*
- *Was stellen Sie sich unter den genannten falschen Koinzidenzen vor? Versuchen Sie ihre Ideen mit Hilfe einer Skizze für ein Detektorpaar zu verdeutlichen!*
- *Welche Schutzmaßnahmen kann und sollte man treffen, um die Strahlenbelastung für alle Beteiligten an einer PET-Diagnose so gering wie möglich zu halten?*

2 Versuchsziel

Ziel des Versuchs ist es, die physikalischen und technischen Grundlagen der Positronen-Emissions-Tomographie zu verstehen und mögliche Probleme im Ablauf des Verfahrens zu erkennen. Als Beispiel sollen die in einem Behälter versteckten radioaktiven Quellen lokalisiert und ihre Aktivität verglichen werden.

Die Kenntnisse, die zum Aufbau einer Messanordnung für koinzidente Ereignisse nötig sind, sollen vermittelt werden. Dazu gehören zum einen die physikalischen Grundlagen (z.B. Annihilation von Positronen, Verhalten von γ -Strahlung in Materie) und zum anderen der Umgang mit den verwendeten Detektoren, der Elektronik und der Analyse-Software.

Um die Kenntnisse in die Praxis umzusetzen, werden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- 1) Die Ausgangssignale aller verwendeten elektronischen Bauteile werden am Oszilloskop beobachtet und interpretiert.
- 2) Das γ -Spektrum der verwendeten ^{22}Na -Quellen wird aufgenommen und interpretiert.

- 3) Die Ortsauflösung der Koinzidenz-Messanordnung wird ebenso wie die Zeitauflösung bestimmt, um bei der Behälter-Analyse möglichst effektiv zu arbeiten.
- 4) Schließlich wird der Behälter „gescannt“ und aus den erhaltenen Daten die zweidimensionale Aktivitätsverteilung im Behälter bestimmt.

3 Physikalische Grundlagen

3.1 Der β^+ -Zerfall

Zu den β -Zerfällen zählt man alle Zerfallsprozesse, bei denen sich die Kernladungszahl Z um eins ändert ($Z_{\text{Tochter}} = Z_{\text{Mutter}} \pm 1$) und die Massenzahl A erhalten bleibt ($A_{\text{Tochter}} = A_{\text{Mutter}}$). Für die Positronen-Emissions-Tomographie benötigt man wie in Abschnitt 1 beschrieben sog. Positronen-Emitter als Tracer. Dabei handelt es sich um Isotope, die bei einem radioaktiven Zerfall – dem β^+ -Zerfall – unter Umwandlung eines Protons in ein Neutron durch schwache Wechselwirkung ein Positron und ein Neutrino erzeugen.

Allgemein kann man den β^+ -Zerfall auf der Ebene der Nuklide wie folgt beschreiben:



Der äquivalente Prozess dazu ist der sog. Elektroneneinfang (engl. electron capture), bei dem allerdings keine Positronen entstehen:



Da es sich beim β^+ -Zerfall um einen Drei-Teilchen-Zerfall handelt, besitzen die Positronen ein kontinuierliches Energiespektrum. Die maximale Positronenenergie $E_{e^+, \max}$ entspricht dabei genau dem Q -Wert des Zerfalls.

Damit überhaupt ein β^+ -Zerfall stattfindet, muss die Masse des Tochternuklids um mindestens zwei Elektronen-Ruhemassen ($m_0 = 511 \text{ keV}$) kleiner sein als die des Mutternuklids. Aufgrund der Gleichung (1) sollte klar sein, dass nur protonenreiche Kerne für diese Zerfallsart in Frage kommen.

Anregungen und Fragen

- Wo findet man in der Nuklidkarte [FZK 1995] Isotope, die unter Aussendung eines Positrons zerfallen?
- Bei welchem Vorgang entstehen ebenfalls Positronen? Warum wird er nicht für die PET genutzt?

3.2 Annihilation von Positronen

Trifft ein Antimaterieteilchen, das selbst stabil sein kann, auf sein zugehöriges Materieteilchen, kommt es zur paarweisen Vernichtung beider Teilchen unter Aussendung

elektromagnetischer Strahlung (\rightarrow *Annihilation*). Die Energie der Strahlungsquanten setzt sich aus den Ruheenergien der beteiligten Teilchen sowie ihrer gesamten kinetischen Energie zum Zeitpunkt der Annihilation zusammen.

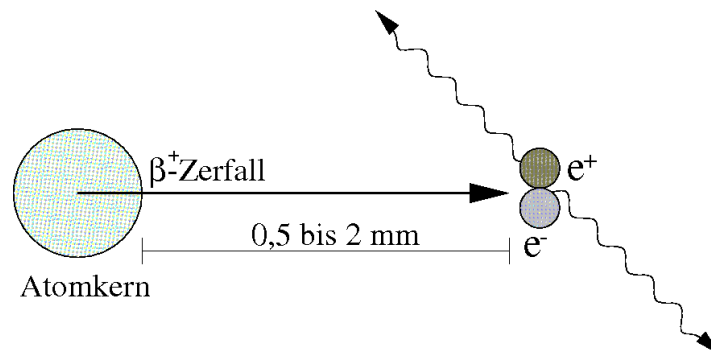


Abb. 2: Positronenzerfall und Annihilation mit typischer Reichweite der Positronen in Körpergewebe

Da Positronen die Antiteilchen der Elektronen sind, finden sie in der Realität sehr schnell einen Partner für die Annihilation. Allerdings ist der Wirkungsquerschnitt für die Zerstrahlung stark energieabhängig: Erst wenn die Relativgeschwindigkeit beider Teilchen gering sind, wird der Prozess mit hoher Wahrscheinlichkeit stattfinden.

Positronen aus β^+ -Zerfällen besitzen typischerweise Energien im MeV-Bereich, so dass sie zunächst in der Materie abgebremst werden müssen. Der Energieverlust erfolgt vor allem durch Stöße mit den Atomelektronen der umgebenden Materie und gehorcht einer modifizierten Bethe-Bloch-Formel. Nur bei sehr hohen Energien (größer 10 MeV) spielt der Energieverlust durch Bremsstrahlung eine Rolle. Da die Abweichungen von der Kollinearität der beiden Annihilationsquanten sehr gering ist, geht man davon aus, dass die Restenergien von Positron und Elektron im Bereich einiger Elektronenvolt liegen.

Anregungen und Fragen

- Wie groß ist die Reichweite von Positronen in Luft, Wasser und Kunststoff? Schätzen Sie sie mit Hilfe von Abbildung 2 ab (Körpergewebe besteht im wesentlichen aus Wasser!)
- Welche Energie besitzen die Annihilationsquanten aus einer e^+e^- -Vernichtung? Was ergibt sich unter ansonsten gleichen Voraussetzungen für eine Proton-Antiproton-Vernichtung?
- Machen Sie sich mit Hilfe einer Skizze klar, welchen Einfluss die Restenergien von Elektron und Positron auf die Eigenschaften der Annihilationsquanten besitzen!

3.3 Szintillationszähler

Szintillationszähler bestehen im wesentlichen aus einem Szintillationskristall, an den ein Photomultiplier zur Elektronenvervielfachung angeschlossen ist.

Szintillationskristalle zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Atome bzw. Moleküle nach einer Anregung durch energiereiche Strahlung unter Aussendung von Lichtblitzen in den Grundzustand übergehen¹. Dieses Licht wird an einer Photokathode gesammelt und in

¹Der Oberbegriff für diese Erscheinung heißt Luminiszenz. Man spricht von Fluoreszenz, wenn der Grundzustand nach etwa 10^{-8} s erreicht wird, und von Phosphoreszenz, wenn ein metastabiler angeregter Zustand vorliegt.

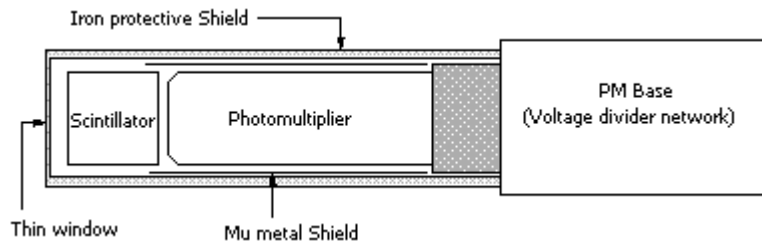


Abb. 3: Prinzipieller Aufbau eines Szintillationszählers (nach [LEO 1987], S. 157, Fig. 7.1)

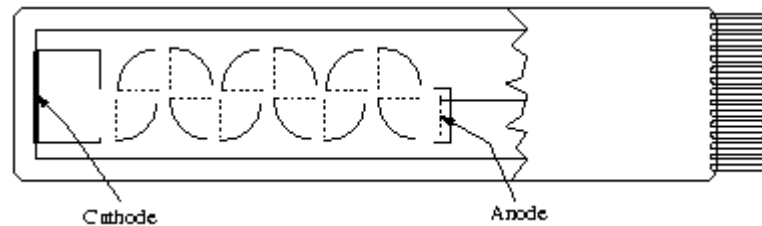


Abb. 4: Schnitt durch einen Photomultiplier mit sog. *box and grid*-Anordnung der Dynoden (nach [LEO 1987], S. 182, Fig. 8.4b)

einige wenige Elektronen umgewandelt. Die Elektronen werden über ein Dynodensystem beschleunigt, so dass etwa 10^7 Sekundärelektronen pro Elektron entstehen. Diese können dann mit Hilfe einer passenden Elektronik registriert und ausgewertet werden.

Die Lichtausbeute ist ab einer bestimmten Minimalenergie proportional zur deponierten Energie im Kristall, so dass das elektrische Signal ihr ebenfalls proportional ist, wenn der Photomultiplier richtig eingestellt ist. Damit ergibt sich die Möglichkeit zur Energiespektroskopie. Aufgrund der kurzen Reaktionszeit des Kristalls ergeben sich kurze Totzeiten des Systems, so dass auch sehr hohe Zählraten gut verarbeitet werden können.

Anregungen und Fragen

- *Nicht jedes Szintillatormaterial eignet sich zum Bau von Detektoren. Welche Eigenschaften müssen zwingend erfüllt sein?*
- *An welchen Stellen im Detektorsystem kann es zu einer Verletzung der Proportionalität zur deponierten Energie kommen?*

3.4 γ -Spektroskopie

Um ein γ -Spektrum zu verstehen, muss man wissen, wie sich γ -Strahlung in Materie verhält. Die drei wesentlichen Prozesse, die an dieser Stelle nicht detailliert erläutert werden sollen, sind der *Photoeffekt*, der *Comptoneffekt* und die *Paarbildung*.

- **Photoeffekt:** Das γ -Quant überträgt seine gesamte Energie auf ein Atomelektron, das dadurch aus dem Atomverbund herausgeschlagen wird. Dessen Energie kann dann im Detektor nachgewiesen werden. Der Photoeffekt dominiert vor allem bei kleinen γ -Energien $E_\gamma < 100$ keV auf.
- **Comptoneffekt:** Das γ -Quant wird an einem (quasi-) freien Elektron gestreut. Es besitzt danach eine geringere Energie und einen andersgerichteten Impuls. Im

Detektor weist man wieder die Energie des gestreuten Elektrons nach. Der Comptoneffekt tritt vor allem bei mittleren γ -Energien $E_\gamma \approx 1 \text{ MeV}$ auf.

- **Paarbildung:** Im elektrischen Feld eines Atomkerns (seltener auch eines Elektrons) bildet das γ -Quant ein e^+e^- -Paar. Man weist die kinetische Energie von Elektron und Positron im Detektor nach. Außerdem zerstrahlt das Positron mit einem Elektron in zwei γ -Quanten mit $E_\gamma = 511 \text{ keV}$. Aufgrund der Ruhemassen von Elektron und Positron ist die Paarbildung erst bei $E_\gamma \geq 1022 \text{ keV}$ möglich; sie tritt vor allem bei hohen γ -Energien $E_\gamma \geq 5 \text{ MeV}$ auf.

Anregungen und Fragen

- Skizzieren Sie das γ -Spektrum einer ^{22}Na -Quelle bei einer 2π -Geometrie eines BGO-Detektors (Quelle liegt direkt auf dem Kristall auf!). Beachten Sie das Termschema für ^{22}Na (Anhang A, Abb. 9) und die Wirkungsquerschnitte von Photonen in BGO (Anhang A, Abb. 8)!
- Erfüllt ^{22}Na die Anforderungen an einen PET-Tracer (siehe Anregungen und Fragen zu Abschnitt 1)? Was könnte auch bei verfahrenstechnischen PET-Messungen störend wirken?

3.5 Nachweiswahrscheinlichkeit

Die Nachweiswahrscheinlichkeit eines Detektors ergibt sich als Quotient aus den detektierten (bzw. nachgewiesenen) und den insgesamt emittierten Quanten oder Teilchen. Dabei ist die geometrische Ansprechwahrscheinlichkeit und die intrinsische Ansprechwahrscheinlichkeit des verwendeten Detektors für die jeweilige Strahlung zu beachten.

Die geometrische Ansprechwahrscheinlichkeit $\varepsilon_{\text{geom}}$ ergibt sich aus dem durch die Detektoroberfläche abgedeckten Raumwinkelbereich $d\Omega$. Dieser lässt sich für eine punktförmige Quelle aus deren Abstand zum Detektor a und der wirksamen Detektoroberfläche A berechnen:

$$\varepsilon_{\text{geom}} = \frac{d\Omega}{\Omega_{\text{ges}}} = \frac{\frac{A}{a^2}}{4\pi} = \frac{A}{4\pi \cdot a^2} \quad (3)$$

Die intrinsische Ansprechwahrscheinlichkeit ε_{int} kann man verschiedenen Tabellenwerken entnehmen. Sie ergibt sich als Quotient aus der Anzahl der detektierten und der den Detektor erreichenden Quanten oder Teilchen. Man berechnet sie aus der im Detektor zurückgelegten Strecke x und der mittleren freien Weglänge λ :

$$\varepsilon_{\text{int}} = 1 - \exp\left(\frac{-x}{\lambda}\right) \quad (4)$$

Für ein homogenes Detektormaterial erhält man die Nachweiswahrscheinlichkeit ε in guter Näherung zu:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{geom}} \cdot \varepsilon_{\text{int}} \quad (5)$$

Bei Koinzidenzmessungen ist zu beachten, dass man nur dann ein Signal erhält, wenn in beiden Detektoren ein Ereignis registriert wird. Die Nachweiswahrscheinlichkeit eines Koinzidenz-Aufbaus ϵ_{koinz} erhält man mit Gleichung (5) für unabhängige Ereignisse zu:

$$\epsilon_{\text{koinz}} = \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 = \epsilon_{\text{geom},1} \cdot \epsilon_{\text{int},1} \cdot \epsilon_{\text{geom},2} \cdot \epsilon_{\text{int},2} \quad (6)$$

Anregungen und Fragen

- Was können Sie verändern, um die geometrische Ansprechwahrscheinlichkeit nach Gleichung (3) zu halbieren bzw. zu verdreifachen?
- Vereinfachen sie Gleichung (6) unter der Annahme, dass mit zwei identischen Detektoren γ -Quanten aus einer Positronenannihilation in Koinzidenz registriert werden sollen!
- Betrachten Sie die Line of Response (LOR) eines detektorpaares mit gegebenem Abstand r . Auf welchem Punkt der LOR müssen Sie einen Positronenemitter setzen, um die maximale Koinzidenzzählrate zu erhalten? Machen Sie sich die Unterschiede mit Skizzen klar!

3.6 Besonderheiten von PET

Die vier γ -Quanten, die bei der PET nachgewiesen werden, sind korrelierte Ereignisse, d.h., sie stehen in einer festen Beziehung zueinander. Das entscheidende Merkmal für die Koinzidenzmessung ist die Kollinearität der beiden Vernichtungsquanten: Man kann davon ausgehen, dass die geometrische Ansprechwahrscheinlichkeit für den zweiten Detektor hundert Prozent beträgt, wenn im ersten Detektor ein Vernichtungsquant registriert wurde.

Die Detektoren, die paarweise die koinzidenten Ereignisse messen, sind bei der PET identisch, d.h. sie bestehen aus dem gleichen Material und haben die gleichen Abmessungen. Deshalb sind in Gleichung (6) die intrinsischen Ansprechwahrscheinlichkeiten $\epsilon_{\text{int},1}$ und $\epsilon_{\text{int},2}$ identisch.

Da die Ortsauflösung der PET bereits physikalisch begrenzt ist (siehe Abschnitt 1), muss mit dem Aufbau eine möglichst gute Auflösung erzielt werden. Dies erreicht man, indem man den Raumwinkel möglichst klein macht: Man vermindert die Detektoroberfläche durch Kollimatoren aus Blei, muss aber dafür eine geringere Zählrate in Kauf nehmen.

In den Anwendungen hat es sich dagegen als vorteilhaft erwiesen, möglichst kleine Detektoroberflächen zu verwenden. Daraus ergeben sich die hohe Anzahl von Detektoren in einem Ringsystem (vergleiche Abb. 1) und damit die hohen Kosten der Messanordnung.

4 Technische Grundlagen

Im folgenden sollen die für diesen Versuch benötigten elektronischen Bauteile und ihre Funktion kurz beschrieben werden. Ausführlichere Informationen und technische Daten finden Sie in der Literaturliste zum Versuch.

4.1 Verstärker (engl.: *amplifier*)

Ein Verstärker hat die Aufgabe, ein ankommendes Signal zu verstärken, das heißt dessen Amplitude zu vergrößern. Man unterscheidet zwischen *Vorverstärkern* und *Hauptverstärkern*.

Ein Vorverstärker (engl.: *preamplifier*) wird direkt hinter den Detektor geschaltet und verstärkt das Signal so, dass die anschließenden Verluste im Kabel möglichst gering sind. Bei den verwendeten BGO-Detektoren ist dies aber nicht notwendig!

Ein Hauptverstärker soll entweder ein Signal mit möglichst kurzer Anstiegsflanke produzieren (engl.: **T**iming **F**ilter **A**mplifier – *TFA*) oder das Signal möglichst proportional zum Eingangssignal verstärken (engl.: *spectroscopy amplifier*).

Es ist in der Regel nicht möglich, in den meisten Anwendungen aber auch nicht nötig, sowohl kürzeste Anstiegsflanken als auch möglichst proportionale Verstärkung zu erreichen. Im Praktikum stehen Ihnen beide Möglichkeiten zur Verfügung.

4.2 Diskriminatoren (engl.: *discriminator*)

Diskriminatoren arbeiten nur, wenn das Eingangssignal eine vorgegebene Pulshöhe überschreitet. Ist dies der Fall, wird ein logisches Signal bestimmter Höhe und Breite ausgegeben. Die drei Parameter können einzeln gewählt werden.

Beginnt der Output genau dann, wenn die Schwelle überschritten wird (engl.: *leading edge discrimination*), so werden Signale mit gleicher Anstiegsflanke aber verschiedener Amplitude in verschiedenen Zeiten registriert. Es kommt zu einem Zeitversatz bei gleichzeitig ankommenden Signalen.

Um dies zu verhindern, wird das einkommende Signal zunächst bearbeitet, wie in Abb. 5 dargestellt. Dann wird das logische Signal beim Nulldurchgang dieses modifizierten Eingangssignals ausgesandt (engl.: *constant fraction discrimination*).

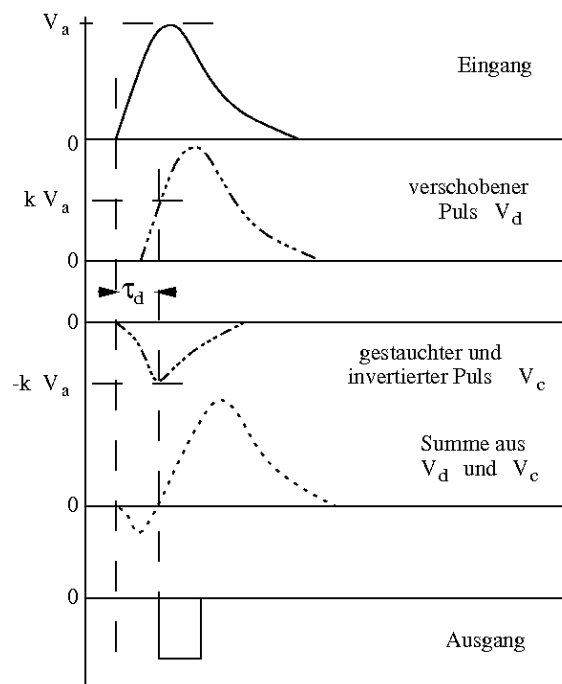


Abb. 5: Zur Arbeitsweise eines Constant Fraction Discriminators: Das Eingangssignal wird zunächst um die Zeit τ_d verschoben (Puls V_d). Außerdem wird es invertiert und die Amplitude um den Faktor k gestaucht (Puls V_c). Der Nulldurchgang des Summenpulses aus V_d und V_c startet das logische Ausgangssignal (nach [LEO 1987], S. 327, Fig. 17.4 und S. 328, Fig. 17.5).

4.3 Zeit-Amplituden-Wandler (engl.: *time-to-amplitude-converter*)

Ein Zeit-Amplituden-Wandler (engl.: *Time-to-Amplitude-Converter – ADC*) besitzt zwei Eingänge: einen für das „Start“- und einen für das „Stopp“-Signal. Der Ausgang liefert einen Puls, dessen Höhe proportional zu der Zeitdifferenz zwischen dem Eintreffen von „Start“- und „Stopp“-Signal ist.

Realisiert wird dies in der Regel durch die konstante Entladung eines Kondensators während dieser Zeit. Die Entladegeschwindigkeit und damit die Pulshöhe kann ebenso gewählt werden wie die Breite des Ausgangssignals.

4.4 Zeitverzögerung (engl.: *delay*)

Eine Zeitverzögerung des „Stopp“-Signals am TAC gegenüber dem „Start“-Signal ist immer dann nötig, wenn durch das Experiment nicht festgelegt ist, welcher Detektor zuerst ein Signal registriert. Um keine koinzidenten Ereignisse zu verlieren, verschiebt man das „Stopp“-Signal um eine bestimmte Zeit (engl.: *delay*).

Ist diese Zeit im Bereich einiger 100 ns, wird einfach die Kabellänge für das „Stopp“-Signal mit Hilfe einer variablen Delay-Box vergrößert. Bei Zeitverzögerungen größer als 1 μ s muss ein elektrischer Schaltkreis verwendet werden, um Verluste zu vermeiden.

4.5 Analog-Digital-Wandler (engl.: *analog-to-digital converter*)

Die Aufgabe eines Analog-Digital-Wandlers (engl.: *Analog-to-Digital Converter - ADC*) ist es, ein analoges Signal in ein digitales umzuwandeln, damit es z.B. von einem Computer weiterverarbeitet werden kann. Dabei ist es wichtig, dass der zugeordnete Kanal proportional zur Amplitude des Signals ist (engl.: *integral linearity*) und dass die Kanäle alle gleich breit sind (engl.: *differential linearity*).

Es gibt zwei grundlegende Methoden zur Umwandlung des Signals. Bei der Wilkinson-Methode wird in der Zeit, in der das Eingangssignal eine Schwelle übersteigt, ein Kondensator aufgeladen. Wird die Schwelle unterschritten, beginnt die gleichmäßige Entladung des Kondensators (engl.: *run down*). Während des Entladevorgangs werden die Pulse eines Frequenzgebers gezählt und als digitales Signal weiterverwendet. Diese Methode verwendet der im Praktikum eingebaute ADC.

Die Approximationsmethode vergleicht dagegen die Pulshöhe des Eingangssignals nacheinander mit vorgegebenen Werten, die sich aus dem vorhergehenden Vergleich ergeben. Je nachdem, ob sie größer oder kleiner sind, wird eine 1 oder eine 0 an die entsprechende Stelle im Binärcode geschrieben.

4.6 Vielkanalanalysator (engl.: *multichannel analyzer*)

Ein Vielkanalanalysator (engl.: *MultiChannel Analyzer - MCA*) sortiert ankommende Signale je nach ihrer Pulshöhe in einen Speicherkanal ein und gibt die Anzahl der Signale in jedem Kanal tabellarisch oder graphisch aus. Im vorliegenden Versuchsaufbau übernimmt diese Aufgabe das „WinTMCA“-Programm, ein kommerziell erhältliches Software-Paket zur Aufnahme, Darstellung und Analyse von γ -Spektren.

Anregungen und Fragen

- Welche elektronischen Bauteile sind nötig, um ein Energiespektrum bzw. das Spektrum einer Koinzidenzmessung aufzunehmen? Skizzieren Sie jeweils den Aufbau der Messanordnung!
- Was passiert mit dem Peak im Spektrum einer Koinzidenzmessung, wenn Sie einen anderen Delay verwenden?

5 Versuchsdurchführung

5.1 Aufbau des Versuchs

Abb. 6 stellt eine Skizze des Versuchsaufbaus dar.

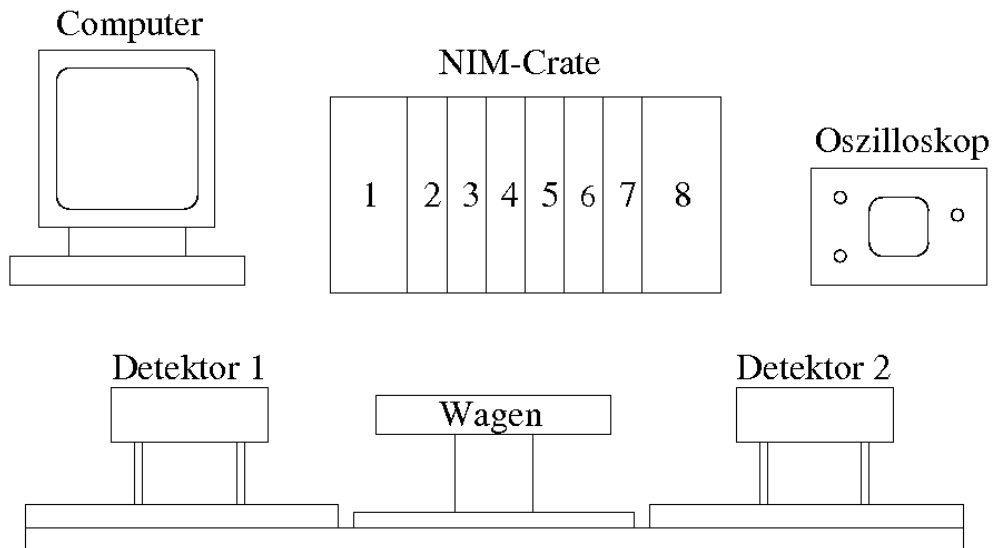


Abb. 6: Die Skizze zeigt die wesentlichen Bauteile des Versuchs. Zur besseren Übersicht ist die für die einzelnen Versuchsabschnitte notwendige Verkabelung nicht eingetragen. Folgende elektronische Komponenten befinden sich im NIM-Crate: 1 – ADC, 2 – TAC, 3 – Delay, 4 – Diskriminator, 5 und 6 – TFA, 7 – Verstärker und 8 – Hochspannungsversorgung für die Detektoren. Der Computer ist mit einem Drucker ausgestattet.

Bevor Sie mit der Messung beginnen, sollten Sie sich vergewissern, dass der Versuchsaufbau richtig justiert ist. Gegebenenfalls justieren Sie bitte den Aufbau unter Anleitung des Betreuers neu.

Die im weiteren benötigten Kabel und Stecker wird Ihnen Ihr Betreuer auf Anfrage zur Verfügung stellen.

5.2 Detektorsignal am Oszilloskop

Schließen Sie einen der beiden BGO-Detektoren an die Hochspannungsversorgung an. Verbinden Sie den Ausgangskanal des Detektors mit Kanal 2 des Oszilloskops.

Wenn Ihr Betreuer die Verkabelung überprüft hat, schalten Sie zunächst das NIM-Crate ein. Dann regeln Sie die Hochspannung langsam bis auf 700 V ein. Alle weiteren Verkabelungen nehmen Sie ebenfalls unter Aufsicht des Betreuers vor!

Das Eintrittsfenster des Detektors sollte sich möglichst nahe an der Quellenhalterung befinden. Achten Sie außerdem darauf, dass die Quelle später etwa in der Mitte der Detektorfläche positioniert ist. (*Warum?*)

Die Handhabung der radioaktiven Quelle erfolgt nur durch den Betreuer oder auf Anweisung des Betreuers! Die Quellen dürfen nur mit einer Pinzette angefasst werden!

Sobald sich die Quelle in der Halterung befindet, nehmen Sie am Oszilloskop folgende Einstellungen vor:

- Channel2: 50 mV
- Time: 10 μ s

Vergewissern Sie sich, dass die Triggerung für ein negatives Signal richtig eingestellt ist. Skizzieren Sie das Detektorsignal!

5.3 Verstärkersignal am Oszilloskop

Schalten Sie den Verstärker hinter den BGO-Detektor, und stellen Sie eine geeignete Verstärkung ein. Greifen Sie das Signal am unipolaren Ausgang ab, und stellen Sie es auf dem Oszilloskop mit folgenden Einstellungen dar:

- Channel2: 1 V
- Time: 1 μ s

Betrachten Sie das Signal sowohl mit Triggerung auf die positive wie die negative Flanke. Skizzieren Sie beide Detektorsignale! Das Oszilloskop können Sie nun wieder ausschalten.

5.4 Spektrum der ^{22}Na -Quelle

Verbinden Sie nun wieder den Verstärker mit dem ADC. Schalten Sie den Monitor des PCs ein und wechseln Sie zur Windows-Partition (\rightarrow *Betreuer!*). Dort starten Sie das Programm „WinTMCA“. Die Bedienung des Programms ist Windows-konform; für weitere Fragen liegt ein Manual bereit.

Legen Sie ein Unterverzeichnis im Verzeichnis \f-praktikum\spektren an, in dem Sie Ihre gemessenen Spektren abspeichern. Definieren Sie dieses Verzeichnis als Arbeitsverzeichnis des WinTMCA-Programms (Spektrum → Definitionen).

Die Länge des Spektrums sollten Sie entsprechend der Einstellung $2^3 - 2^{12}$ am ADC auf 1024 Kanäle festlegen (Spektrum → Länge).

Messen Sie das Spektrum etwa zweieinhalb Minuten lang, so dass der Fehler im kleinsten Peak kleiner als ein Prozent ist (*Wie vielen Counts entspricht das?*). Speichern Sie das Spektrum ab!

5.5 TFA-Signal am Oszilloskop

Sie benötigen jetzt beide BGO-Detektoren und die beiden Timing Filter Amplifier. Stellen Sie zunächst beide Detektoren auf den gleichen Abstand zur Quelle ein und schließen Sie die TFAs an. Betrachten Sie die Signale beider TFAs nacheinander am Oszilloskop auf Kanal 2 bei folgenden Einstellungen:

- Channel2: 0,5 V
- Time: 0,5 μ s

Vergleichen Sie beide Signale und skizzieren Sie sie!

5.6 Diskriminatorsignal am Oszilloskop

Verbinden Sie die Ausgänge der TFAs mit je einem Eingang am Diskriminator. Die Ausgangssignale betrachten Sie wieder nacheinander auf Kanal 2 bei den Einstellungen:

- Channel2: 0,5 V
- Time: 0,02 μ s

Vergleichen Sie beide Signale und skizzieren Sie sie!

5.7 TAC-Signal am Oszilloskop

Verbinden Sie einen der Diskriminator-Ausgänge mit dem “Start”-Eingang des TACs; den anderen Diskriminator-Ausgang verbinden Sie über einen Delay mit dem “Stopp”-Eingang. Das Ausgangssignal des TACs beobachten Sie am Oszilloskop bei den Einstellungen:

- Channel2: 0,5 V
- Time: 0,1 μ s

Skizzieren Sie auch dieses Signal! Das Oszilloskop benötigen Sie im weiteren Versuchsablauf nicht mehr; schalten Sie es bitte aus!

5.8 Eichung der Zeitachse

Verbinden Sie nun den Ausgang des TAC mit dem ADC. Achten Sie bitte darauf, dass sich die Quelle auf der Line of Response (LOR) der beiden BGO-Detektoren befindet, bevor Sie mit den Messungen beginnen.

Mit Hilfe des Delay-Einschubs haben Sie die Möglichkeit, das „Stopp“-Signal verschieden lang gegen das „Start“-Signal zu verschieben.

Nutzen Sie die gegebenen Einstellungen möglichst breit aus und bestimmen Sie die genaue Lage der Peaks bei drei verschiedenen Delay-Einstellungen durch Integration (Messdauer: $t_{\text{mess}} = 120 \text{ s}$).

Mit diesen Punkten können Sie nun die Zeitachse eichen (Spektrum → Energiekalibrierung). Wenn Sie dazu nur zwei der drei Spektren benutzen, haben Sie eine Kontrollmöglichkeit für Ihre Eichung.

5.9 Ortsauflösung der Koinzidenzmessung

Ziel dieser Aufgabe ist es festzustellen, welchen Einfluss die Lage der Quelle bezüglich der Line of Response (LOR) der beiden Detektoren auf die Koinzidenzzählrate hat. Außerdem sollen Sie die Integrationsgrenzen für den weiteren Ablauf des Versuchs festlegen.

Dazu schieben Sie den Wagen mit der Quelle mit fester Schrittweite durch den interessanten Bereich, der durch die Detektoren abgedeckt wird. Messen Sie jeweils zwei Minuten lang das Spektrum und speichern Sie es unter Angabe der Position des Wagens ab.

Legen Sie die Integrationsgrenzen in dem dafür am besten geeigneten Spektrum fest (*Welches ist das?*). Versuchen Sie im interessantesten Bereich eine noch kleinere Schrittweite zwischen den einzelnen Messungen zu verwenden. Die Gesamtzahl der Messungen sollte nicht größer als zehn sein.

5.10 PET-Analyse der „Schatztruhe“

Sie erhalten nun von Ihrem Betreuer eine verschlossene Truhe, in deren Innerem sich mehrere verschieden starke radioaktive ^{22}Na -Quellen befinden. Mit Hilfe mehrerer Koinzidenzmessungen sollen Sie die Lage der Quellen im Behälter und in etwa das Aktivitätsverhältnis der Quellen untereinander bestimmen.

Für die erste Messung (sowohl in x- als auch in y-Richtung) notieren Sie sich bitte die Lage der Kante des Behälters bezüglich der LOR der Detektoren. Dann messen Sie jeweils fünf Minuten lang bei einer festen Position. Überlegen Sie sich eine sinnvolle Schrittweite (*Die Versuchsdauer sollte endlich bleiben!*).

Haben Sie die x-Richtung vermessen, verfahren Sie genauso in y-Richtung. Dazu entnehmen Sie den Behälter dem Wagen und setzen ihn um 90° gedreht wieder ein.

Jetzt führen Sie noch die Messungen in der Diagonalen durch. Überlegen Sie sich die Position der Kante bezüglich der LOR und die Schrittweite anhand Ihrer vorherigen Messungen. Die Abb. 7 in Abschnitt 6.4 liefert einen Überblick der geometrischen Situation. Für diese Messreihe ist eine Messzeit von $t_{\text{mess}} = 120$ Sekunden ausreichend.

Speichern Sie die Spektren für eine spätere Auswertung so ab, dass Sie sie der jeweiligen Position des Wagens wieder zuordnen können. Gegebenenfalls sollten Sie weitere Unterverzeichnisse zur besseren Übersicht anlegen.

5.11 Ende des Versuchs

Wenn Sie die Messung beendet haben, informieren Sie bitte Ihren Betreuer. Dieser wird Ihnen dann noch einige Daten des Aufbaus mitteilen, die Sie zur weiteren Auswertung benötigen. Kopieren Sie alle Spektren, die Sie noch auswerten müssen, auf Diskette; in der Bibliothek steht Ihnen dazu das WinTMCA-Programm zur Verfügung!

Regeln Sie die Hochspannung langsam herunter und schalten Sie sie anschließend aus! Schalten Sie das NIM-Crate ebenfalls aus!

Nehmen Sie alle Kabel ab und sortieren Sie sie wieder ein. Zuletzt sollten Sie den Computer wieder auf die Linux-Partition der Festplatte booten.

6 Auswertung des Versuchs

6.1 Auswertung der verschiedenen Signale am Oszilloskop

Für alle am Oszilloskop beobachteten Signale sollten Sie eine Skizze anfertigen. Geben Sie auch die jeweiligen Einstellungen des untersuchten Bauteils an. Ordnen Sie bitte die skizzierten Signale den einzelnen γ -Energien zu. Beschreiben Sie die Bedeutung von Signalhöhe und –breite, dazu können Sie auch während der einzelnen Versuchsabschnitte die Einstellungen der Geräte variieren. Welche Bauteile liefern logische Signale? Woran erkennt man das in den Skizzen?

6.2 Eichung und Interpretation des ^{22}Na -Spektrums

Führen Sie zunächst eine Energiekalibrierung des Spektrums mit Hilfe der bekannten γ -Linien durch (Spektrum \rightarrow Energiekalibrierung). Um die genaue Kanalnummer der Peaks zu bestimmen, integrieren Sie diese.

Nach der Eichung sollten Sie sich das Spektrum in logarithmischer Darstellung anschauen, um auch kleine Effekte zu erkennen. Interpretieren Sie alle Peaks und finden Sie die zugehörigen Compton-Kanten. Drucken Sie das Spektrum in der von Ihnen bevorzugten Darstellung aus. Welche Probleme könnten sich bei der Koinzidenzmessung einstellen?

6.3 Auswertung zur Ortsauflösung der Koinzidenzmessung

Laden Sie nacheinander Ihre Spektren und integrieren Sie diese innerhalb der von Ihnen festgelegten Grenzen (Kanalnummern besser geeignet als Zeitangaben). Welche der so berechneten Werte sind ein Maß für die Anzahl der koinzidenten Ereignisse und damit für die Aktivität auf der beobachteten LOR?

Stellen Sie diese mit Fehlerangabe über der Position des Wagens graphisch dar! Welche Ortsauflösung bezüglich der Lage zur LOR können Sie erkennen? Welche Halbwertsbreite besitzt dagegen Ihr Peak?

Welche zeitliche Auflösung erreichen Sie in Ihrem „besten“ Spektrum? Vergleichen Sie dazu Halbwertsbreite und Maximalwert des Peaks!

6.4 Auswertung der PET-Analyse

Ziel der Analyse ist es, die Lage der Quellen im Behälter und deren Aktivitätsverhältnis untereinander zu bestimmen. Dazu müssen alle Spektren in den in Abschnitt 6.3 festgelegten Grenzen integriert werden. Dies ist auch schon während der Messung in einem zweiten Fenster des WinTMCA-Programms möglich. Notieren Sie sich die Werte, die ein Maß für die Anzahl der koinzidenten Ereignisse und damit für die Aktivität auf der jeweiligen LOR sind!

Um auf die zweidimensionale Aktivitätsverteilung rückschließen zu können, erstellen Sie aus diesen Werten eine Matrix, indem Sie jeden x-Wert mit jedem y-Wert multiplizieren. Nun ordnen Sie die Diagonalmessungen den richtigen Kreuzungspunkten aus Vertikal- und Horizontalmessung (bzw. x- und y-Richtung) zu (vergleiche Abb. 7) und multiplizieren diese als weiteren Faktor. Damit erhalten Sie eine zweite Matrix zur weiteren Auswertung.

Welche Messergebnisse erwarten Sie für die einzelnen Messungen in den drei Richtungen, wenn sich in Abb. 7 eine starke Quelle an der Position (x2, y4) befindet? Wie sehen dann Ihre zugehörigen Matrizen aus?

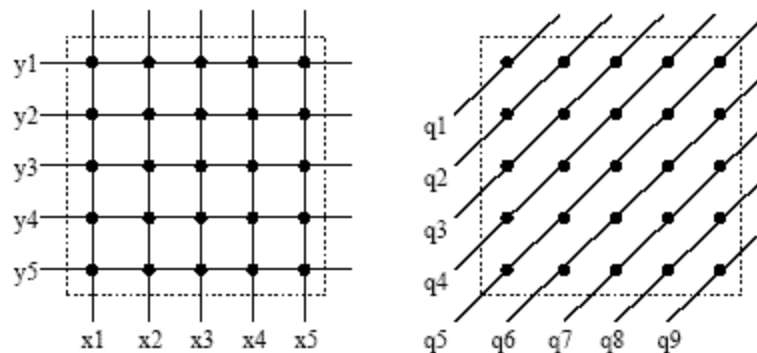


Abb. 7: Aus fünf Messungen in x- und in y-Richtung erhält man durch Multiplikation 25 Messpunkte. Die Messungen in q-Richtung werden in geeigneter Weise multipliziert, um Fehler bei der Rückrechnung zu vermeiden.

Stellen Sie nun die Werte Ihrer Matrizen – also die Verteilung der Koinzidenzzählrate Ihrer Messung – zweidimensional dar, indem Sie verschiedenen Zählwerten verschiedene Farben zuordnen. Mit Hilfe der Angaben zur Geometrie des Behälters und der von Ihnen ermittelten Position des Wagens bezüglich der LOR bei der ersten Messung können Sie die Position der Quellen im Behälter angeben.

Worin liegt der Unterschied zwischen Ihren beiden Auswertungen und woher kommt er? An welchen Stellen waren also die Quellen versteckt? Ordnen Sie den Quellen relativ zu der stärksten eine Aktivität zu. Beachten Sie dabei, dass Sie für jeden Punkt der Matrix die Ergebnisse zweier bzw. dreier unabhängiger Einzelmessungen miteinander multipliziert haben.

Für die Auswertung steht auf dem Bibliotheksrechner eine leistungsstarke Tabellenkalkulation mit der Möglichkeit zur graphischen Auswertung der ermittelten Datensätze zur Verfügung.

Literatur

- [CULLEN 1989] D. E. Cullen, M. H. Chen, J. H. Hubbell, S. T. Perkins, E. F. Plechaty, J. A. Rathkopf, and J. F. Scofield, *Tables and Graphs of Photon-Interaction Cross Sections from 10 eV to 100 GeV Derived from the LLNL Evaluated Photon Data Library (EPDL)*, UCRL-50400, Vol. 6, Parts A+B (1989).

- [DATA BASE BNL] Data base *Photo-Atomic Cross Sections*, Brookhaven National Laboratorium, WWW-Adresse: <http://www.bnl.gov>.
- [FIRESTONE 1996] R. B. Firestone, V. S. Shirley, C. M. Baglin, S. Y. Frank Chu, J. Zipkin, *Tables of Isotopes – Eighth Edition*, John Wiley & Sons, 1996
- [FZK 1995] G. Pfennig, H. Klewe-Nebenius, H. Seelmann-Eggebert, *Karlsruher Nuklidkarte*, 6. Auflage, Forschungszentrum Karlsruhe, 1995.
- [LEO 1987] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag, 1987

Grundlegende Literatur

In den nachfolgend angegebenen Literaturstellen finden Sie die Antworten zu den Anregungen und Fragen der Abschnitte 1, 3 und 4, sowie viele weitere nützliche Informationen rund um den Versuch.

Besonders wichtige Teile der genannten Quellen liegen in den Praktikumsmappen in der Bibliothek des IKP aus.

- Firma crismatec, *Scintillation Detectors*, HARSHAW/QS scintillation detector catalog, 1992.
- G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley & Sons, 1979.
- W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag, 1987.
- M. A. Mandelkern, *Nuclear Techniques for Medical Imaging: Positron Emission Tomography*, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 1995, Band 45, Seite 205-254.
- T. Mayer-Kuckuck, *Kernphysik*, Teubner Studienbücher, 1992.
- G. Schatz, A. Weidinger, *Nukleare Festkörperphysik*, Teubner Studienbücher, 1992.

A Datenmaterial

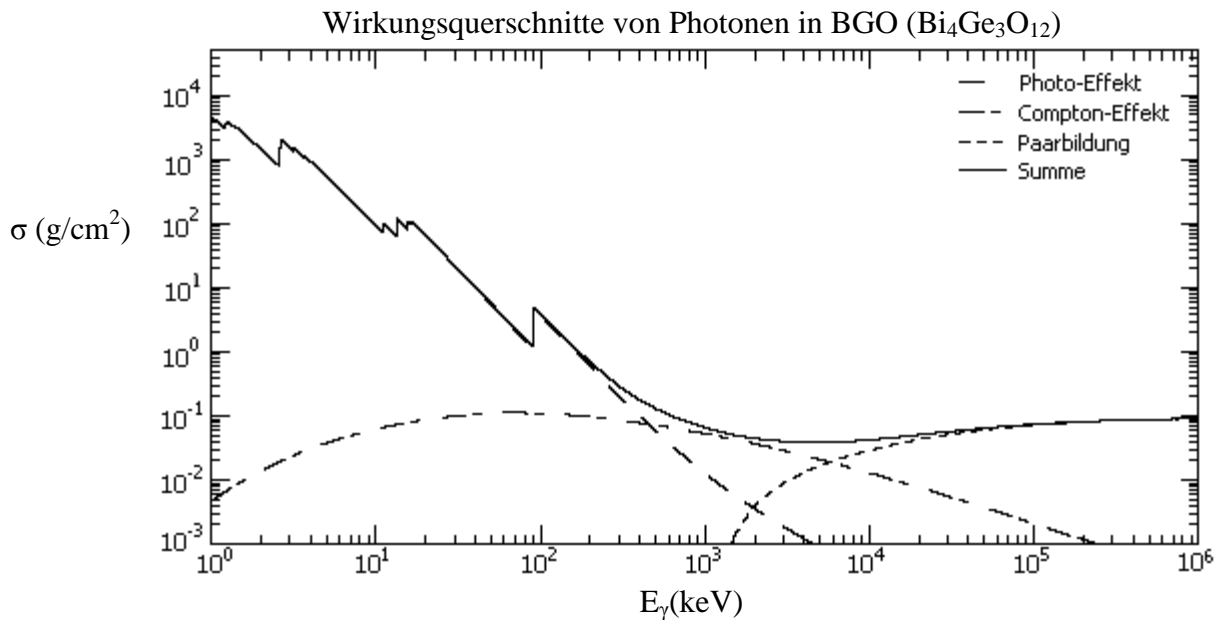


Abb. 8: Energieabhängigkeit von Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung in einem BGO-Kristall – $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) von keV bis 1000 MeV. Beachten Sie den doppelt-logarithmischen Maßstab! *Quelle:* [DATA BASE BNL] basierend auf der Zusammenstellung von [CULLEN 1989]

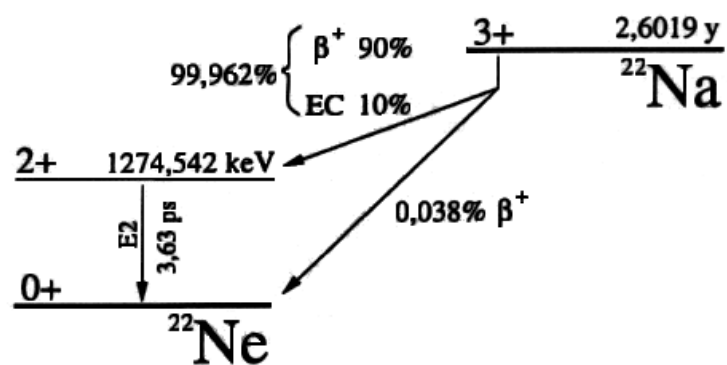


Abb. 9: Termschema für ^{22}Na . Beachten Sie die Verzweungsverhältnisse! *Quelle:* [FIRESTONE 1996], S. 43