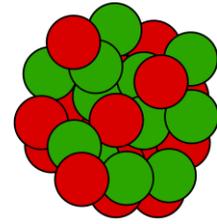




**Praktikum für Fortgeschrittene  
Institut für Kernphysik  
Technische Universität Darmstadt**



## Versuch 2.8-B:

# Grundlagen der Positronen-Emissions-Tomographie (PET)

Stand: Nov. 2022, Dr. M. Duer

Die Positronen-Emissions-Tomographie ist ein in der Medizin verwendetes Verfahren zum Nachweis physiologischer Prozesse. Sie untersuchen das positionsabhängige Verhalten einer radioaktiven Quelle. Dies geschieht durch  $e^+e^-$ -Vernichtung, bei der zwei kollineare Photonen erzeugt werden. Der Prozess wird nach der Reaktion von einem Detektorpaar gleichzeitig (koinzident) gemessen. In diesem Versuch lernst du den Versuchsaufbau zur Koinzidenzmessung kennen.

Sie lernen die im Experiment mit Photomultipliern (PMTs) verwendeten BGO-Detektoren kennen, betrachten die Ausgabe einzelner elektronischer Komponenten des Aufbaus mit einem Oszilloskop und messen und interpretieren das Spektrum der  $^{22}\text{Na}$ -Quelle. Ziel des Experiments ist es, mit PET radioaktive Quellen in einem verschlossenen Behälter zu lokalisieren. Außerdem können Sie die relative Intensität (Aktivität) der Quellen bestimmen.

Stichworte:  $\beta^+$ -Zerfall, Positronen in Materie, Wechselwirkung von  $\gamma$ -Strahlung mit Materie,  $\gamma$ -Spektroskopie, Prinzip der Szintillationszähler, Detektion koinzidenter Ereignisse, Mehrkanalanalysator, Energiekalibrierung, medizinische Anwendungen der Kernphysik (insbesondere PET), bildgebende Verfahren.

# 1. Einleitung

In der medizinischen Diagnostik ist es unerlässlich, in den Körper des Patienten „hineinzuschauen“, um Veränderungen oder Schädigungen des Gewebes frühzeitig zu erkennen. Allgemein bekannte Verfahren sind Röntgen sowie computergestützte Tomographie (z. B. Kernspintomographie und Szintographie). Diese Verfahren geben fast immer nur ein Bild der Schwächung der verwendeten Strahlung durch das untersuchte Gewebe wieder. Dies hängt mit der Dichte und damit der Struktur des Gewebes zusammen, sodass man auf den Bildern die entsprechenden anatomischen Veränderungen erkennen kann.

Einige Krankheitsbilder (z. B. die frühen Stadien der Tumorentstehung) davor sind jedoch bereits durch Veränderungen im Stoffwechsel erkennbar. Hier setzt die Positronen-Emissions-Tomographie (PET) an: Den Patienten werden radioaktiv markierte Substanzen verabreicht, die je nach Stoffwechselaktivität unterschiedlich stark in die Zellen eindringen, um eingebaut zu werden. Zur räumlichen und quantitativen Bestimmung dieser Anreicherung benutzt man eine Koinzidenz-Messanordnung.

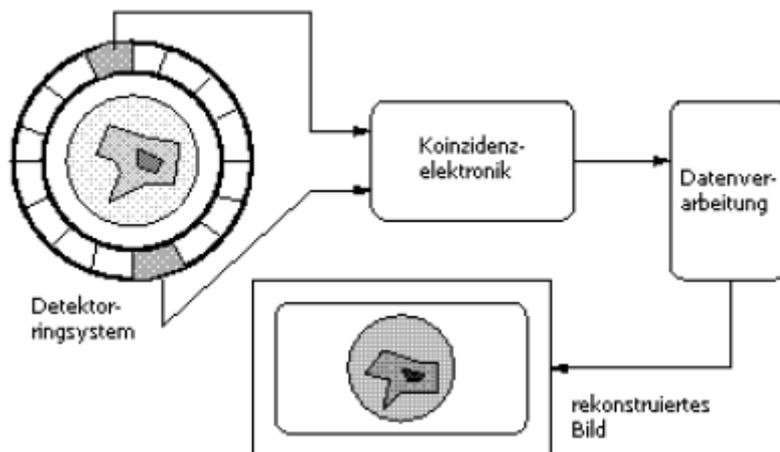


Abbildung 1: Prinzip einer PET-Meßstation. Ein Detektorring besteht aus bis zu 512 BGO-Kristallen. Bis zu acht Ringe sind übereinander angeordnet, getrennt durch Bleisepten, um schneller Ganzkörperfotos zu erstellen.

Dazu nutzt man aus, dass Positronen mit den Elektronen der Materie zu zwei  $\gamma$ -Quanten gleicher Energie zerstrahlen, die in einem Winkel von  $180^\circ$  auseinander fliegen (Kollinearität). Werden in zwei verschiedenen Detektoren einer Ringanordnung gleichzeitig (*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 durch eine solche Anordnung erhalten werden können, kann die Aktivitätsverteilung der Ebene rekonstruiert werden. Die so

gewonnenen Bilder stellen die sogenannten Stoffwechselräume dar. Mit geeigneten Rekonstruktionsverfahren und Messbedingungen kann man Aussagen über die Stoffwechselaktivität des Gewebes treffen und frühzeitig Veränderungen erkennen. Im Vergleich zu anatomischen Bildern wird die Genauigkeit der Diagnose weiter erhöht.

Ein Problem bei PET sind die relativ hohen Kosten für den Aufbau eines Messaufbaus. Auch die Auswahl der verwendeten Quellen (Tracer) will gut überlegt sein. Glücklicherweise stehen mit  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$  und  $^{18}\text{F}$  gleich mehrere (relativ) leicht herstell- und handhabbare Isotope zur Verfügung, die in organische Moleküle wie z.B. Glucose eingebaut werden können. Die räumliche Auflösung der PET ist physikalisch begrenzt, da die Positronen sich nicht am Ort ihrer Emission vernichten, sondern je nach Isotop eine Reichweite von bis zu zwei Millimetern im Gewebe besitzen. Außerdem beeinflussen sogenannte falsche Koinzidenzen die Messung (absorbierte, gestreute, zufällige und verworfene Koinzidenzen). Außerdem liefern die Rekonstruktionsalgorithmen nicht immer eindeutige Ergebnisse: Es kann zu Artefakten kommen, die falsch klassifizierte Aktivitäten usw. beinhalten.

Trotz dieser Nachteile ist die PET ein zunehmend verbreitetes Diagnoseverfahren in der Medizin. Die Bedeutung der PET bei der klinischen Bearbeitung bestehender Befunde etabliert sich im Alltag immer mehr. Neuere Anwendungen von PET finden sich in der Verfahrenstechnik. Da die Reichweite der Positronen stark von der Dichte abhängt des sie umgebenden Mediums kann PET auch zur Bestimmung der Dichte sogenannter „Zweiphasenströmungen“ eingesetzt werden.

### **Anregungen und Fragen**

- Welche Eigenschaften sollte ein Isotop in Bezug auf Lebensdauer, Herstellung, Zerfall in den Grundzustand und chemische Handhabung besitzen, um für die medizinische PET-Messung eingesetzt zu werden?
- Suchen Sie die in der Nuklidkarte [FZK 1995] genannten Isotope. Wie kann 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!

## **2 Versuchsziel**

Ziel des Versuchs ist es, die physikalischen und technischen Grundlagen der PET und mögliche Probleme beim Verfahren zu erläutern. Beispielsweise werden die radioaktiven Quellen in einem Behälter versteckt und ihre Aktivität kann verglichen werden. Die notwendigen Kenntnisse zum Aufbau einer Messung für koinzidente Ereignisse sollen vermittelt werden. Dazu gehören einerseits die physikalischen Grundlagen (z. B. Vernichtung von Positronen, Verhalten von  $\gamma$ -Strahlung in Materie) und andererseits die verwendeten Detektoren, die Elektronik und die Analysesoftware. Um das Wissen in die Praxis umzusetzen, werden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Die Ausgangssignale aller verwendeten elektronischen Bauteile werden auf dem Oszilloskop dargestellt, beobachtet und interpretiert.
- Das  $\gamma$ -Spektrum der  $^{22}\text{Na}$ -Quelle wird aufgenommen und interpretiert.
- Die Ortsauflösung der Koinzidenz-Messanordnung wird ermittelt, um möglichst effektiv in der Behälter-Analyse zu arbeiten.
- Abschließend wird der Behälter „gescannt“ und aus den gewonnenen Daten die zweidimensionale Aktivitätsverteilung im Behälter ermittelt.

### 3 Physikalische Grundlagen

#### 3.1 $\beta^+$ -Zerfall

$\beta$ -Zerfälle umfassen 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 in Kap. 1 beschriebene Positronen-Emissions-Tomographie wird ein sogenannter Positronenstrahler benötigt. Dies sind Isotope, die einen radioaktiven Zerfall darstellen.  $\beta^+$ -Zerfall: Die Umwandlung eines Protons in ein Neutron durch eine schwache Wechselwirkung erzeugt ein Positron und ein Neutrino. Allgemein kann man den  $\beta^+$ -Zerfall wie folgt beschreiben:



Der äquivalente Prozess dazu ist der sogenannte Elektroneneinfang, bei dem jedoch keine Positronen gebildet werden:



Da der  $\beta^+$ -Zerfall ein Drei-Teilchen-Zerfall ist, haben die Positronen ein kontinuierliches Energiespektrum. Die maximale Positronenenergie  $E_{e^+max}$  entspricht genau dem Q-Wert des Zerfalls. Damit überhaupt ein  $\beta^+$ -Zerfall stattfinden kann, muss sich die Masse des Tochternuklids um mindestens zwei Elektronenruhemassen ( $m_0 = 511 \text{ keV}/c^2$ ) kleiner sein als die des Mutternuklids. Aus Gl. 1 ist ersichtlich, dass nur protonenreiche Kerne für diese Art des Zerfalls in Frage kommen.

### Anregungen und Fragen

- Wo findet man in der Nuklidkarte [FZK 1995] den Isotopenzerfall durch Positronenemission?
- Bei welchem Vorgang entstehen auch Positronen? Warum wird es nicht für die PET verwendet?

### 3.2 Annihilation von Positronen

Wenn ein Antimaterie-Teilchen, das selbst stabil sein kann, mit seinem Begleiter-Materie-Teilchen kollidiert, werden beide Teilchen paarweise unter Aussendung elektromagnetischer Strahlung vernichtet (Annihilation). Die Energie der Strahlungsquanten setzt sich aus den Ruheenergien der beteiligten Teilchen und ihrer gesamten kinetischen Energie zum Zeitpunkt der Vernichtung zusammen.

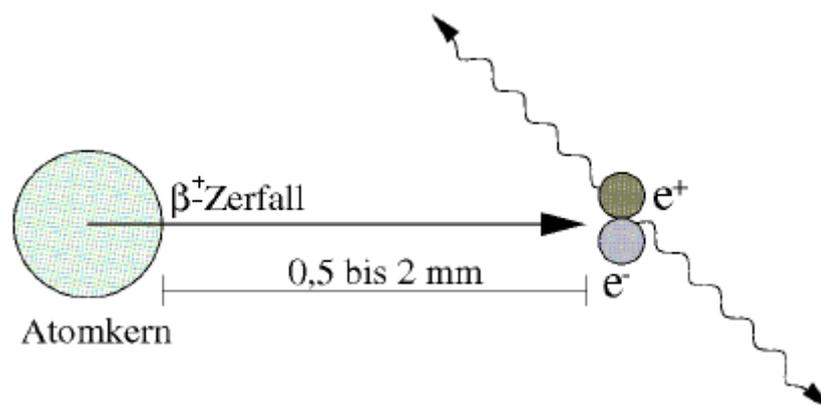


Abbildung 2: Positronenzerfall und Annihilation mit typischer Reichweite von Positronen im Körpergewebe

Da Positronen die Antiteilchen der Elektronen sind, finden sie in der Realität sehr schnell einen Vernichtungspartner. Allerdings ist der Wirkungsquerschnitt für die Vernichtung stark energieabhängig: Nur bei geringer Relativgeschwindigkeit der Teilchen findet der Prozess mit hoher Wahrscheinlichkeit statt. Positronen aus dem  $\beta^+$ -Zerfall haben typischerweise Energien im MeV-Bereich, müssen also erst in der Materie abgebremst werden. Der Energieverlust erfolgt hauptsächlich durch Stöße mit den atomaren Elektronen der umgebenden Materie und gehorcht der 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 Vernichtungsquanten sehr klein sind, nimmt man an, dass die Restenergien von Positron und Elektron im Bereich von einigen Elektronenvolt liegen.

### **Anregungen und Fragen**

- Welche Reichweite haben Positronen in Luft, Wasser und Plastik? Schätzen Sie sie mit Hilfe von Abb. 2 (Körpergewebe besteht im Wesentlichen aus Wasser).
- Welche Energie haben die Vernichtungsquanten einer  $e^+e^-$ -Vernichtung? Was ergibt sich unter sonst gleichen Bedingungen für eine Proton-Antiproton-Vernichtung?
- Verdeutlichen Sie anhand einer Skizze den Einfluss der Restenergien von Elektron und Positron auf die Eigenschaften der Annihilationsquanten.

### **3.3 Szintillationszähler**

Szintillationszähler bestehen im Wesentlichen aus einem Szintillationskristall, an dem ein Photomultiplier (PMT) zur Elektronenvervielfachung angeschlossen ist. Szintillationskristalle zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Atome oder Moleküle durch energiereiche Strahlung unter Emission von Lichtblitzen in den Grundzustand übergehen. Dieses Licht wird an einer Photokathode gesammelt und in einige wenige Elektronen umgewandelt. Die erzeugten Elektronen werden über ein Dynodensystem beschleunigt, so dass pro Elektron etwa  $10^7$  Sekundärelektronen erzeugt werden. Diese können dann mit Hilfe einer geeigneten Elektronik erfasst und ausgewertet werden. Ab einer bestimmten Mindestenergie ist die Lichtausbeute proportional zur deponierten Energie im Kristall, so dass das elektrische Signal bei richtiger Einstellung des PMT ebenfalls proportional dazu ist. Daraus ergibt sich die Möglichkeit der Energiespektroskopie. Aufgrund der kurzen Reaktionszeit des Kristalls ergeben

sich kurze Totzeiten des Systems, so dass auch sehr hohe Zählraten gut verarbeitet werden können.

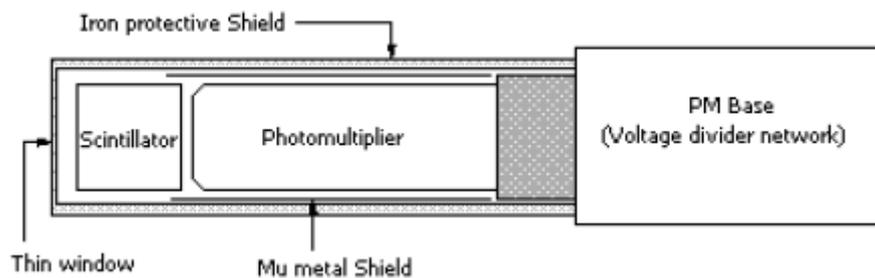


Abbildung 3: Prinzip eines Szintillationszählers (aus [LEO1987], S. 157 Abb. 7.1).

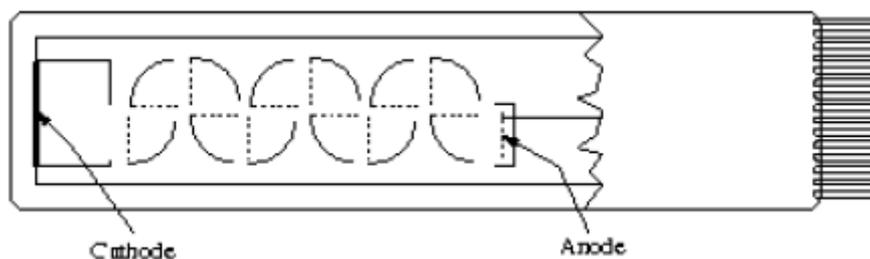


Abbildung 4: Schnitt durch einen PMT mit sogenannter Box- und Grid-Anordnung der Dynoden (aus [LEO1987], S. 182 Abb. 8.4b).

### Anregungen und Fragen

- Nicht jedes Szintillatormaterial ist für den Bau von Detektoren geeignet. Welche Eigenschaften müssen erfüllt sein?
- An welchen Stellen im Detektorsystem kann es zu einer Verletzung der Proportionalität zur deponierten Energie kommen?

### 3.4 $\gamma$ -Spektroskopie

Um ein  $\gamma$ -Spektrum zu verstehen, muss man wissen, wie sich  $\gamma$ -Strahlung in Materie verhält. Die drei wesentlichen Prozesse (die hier nicht näher erläutert werden) sind: Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung.

- Photoeffekt: Das  $\gamma$ -Quant überträgt seine gesamte Energie auf ein atomares Elektron, das dadurch aus dem Atomverbund herausgeschlagen wird. Dessen Energie kann dann im Detektor gemessen werden. Der Photoeffekt dominiert vor allem bei kleinen  $\gamma$ -Energien  $E_\gamma < 100$  keV.
- Compton-Effekt: Das  $\gamma$ -Quant wird an einem (quasi) freien Elektron gestreut. Es hat dann weniger Energie und einen in eine andere Richtung gerichteten Impuls. Im Detektor wird wiederum die Energie des gestreuten Elektrons gemessen. Der Compton-Effekt tritt vor allem bei mittleren  $\gamma$ -Energien  $E_\gamma \approx 1$  MeV auf.
- Paarbildung: Im elektrischen Feld eines Atomkerns (seltener auch eines Elektrons) bildet das  $\gamma$ -Quant ein  $e^+e^-$ -Paar. Man weist die kinetische Energie

von Elektron und Positron im Detektor nach. Außerdem annihiliert das Positron mit einem Elektron in zwei  $\gamma$ -Quanten mit  $E_\gamma = 511 \text{ keV}$ . Aufgrund der Ruhemassen ist die Paarbildung Elektron und Positron erst bei  $E_\gamma \geq 1022 \text{ keV}$  möglich und tritt hauptsächlich bei hohen  $\gamma$ -Energien  $E_\gamma \geq 5 \text{ MeV}$  auf.

### Anregungen und Fragen

- Skizzieren Sie das  $\gamma$ -Spektrum einer  $^{22}\text{Na}$ -Quelle bei einer  $2\pi$ -Geometrie eines BGO-Detektors. Beachten Sie das Termschema für  $^{22}\text{Na}$  (Anhang Abb. 8) und die Wirkungsquerschnitte von Photonen in BGO (Anhang Abb. 9).
- Erfüllt  $^{22}\text{Na}$  die Anforderungen für einen PET-Tracer (siehe Anregungen und Fragen zu Punkt 1)?

### 3.5 Nachweiswahrscheinlichkeit

Die Nachweiswahrscheinlichkeit eines Detektors ergibt sich aus dem Quotienten der detektierten und der insgesamt emittierten Quanten bzw. Teilchen. Unten ist die geometrische Ansprechwahrscheinlichkeit und die intrinsische Ansprechwahrscheinlichkeit eines Detektors, die erfüllt werden müssen. Die geometrische Ansprechwahrscheinlichkeit  $\epsilon_{\text{geom}}$  ergibt sich aus dem durch die Detektoroberfläche abgedeckten Raumwinkelbereich  $d\Omega$ . Für einen Abstand  $a$  zum Detektor mit wirksamer Fläche  $A$ :

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

Die intrinsische Ansprechwahrscheinlichkeit  $\epsilon_{\text{int}}$  ist Tabellen zu entnehmen. Sie ergibt sich als Quotient aus der Anzahl der detektierten und der den Detektor erreichenden Quanten oder Teilchen. Sie lässt sich aus der im Detektor zurückgelegten Strecke  $x$  und der mittleren freien Weglänge  $\lambda$  berechnen:

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

Für ein homogenes Detektormaterial kann die Nachweiswahrscheinlichkeit angenähert werden als

$$\epsilon = \epsilon_{\text{geom}} \cdot \epsilon_{\text{int}} \quad (5)$$

Bei Koinzidenzmessungen ist zu beachten, dass ein Signal nur registriert wird, wenn beide Detektoren ein Signal erhalten haben. Die Wahrscheinlichkeit einer Koinzidenzmessung ist:

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

### Anregungen und Fragen

- Was können Sie ändern, um die geometrische Ansprechwahrscheinlichkeit in Gl. 3 zu halbieren bzw. zu verdreifachen?
- Vereinfachen Sie Gl. 6 unter der Annahme, dass mit zwei identischen Detektoren  $\gamma$ -Quanten aus einer Positronenannihilation in Koinzidenz registriert werden sollten.
- Betrachten Sie die Line of Response (LOR) eines Detektorpaares mit einem gegebenen Abstand  $R$ . An welcher Stelle der LOR müssen Sie einen Positronenstrahler platzieren, um die maximale Koinzidenzzählrate zu erhalten?

### 3.6 Besonderheiten von PET

Entscheidend für die Koinzidenzmessung in der PET ist die Kollinearität der beiden Vernichtungsquanten: Man kann davon ausgehen, dass die geometrische Ansprechwahrscheinlichkeit für den zweiten Detektor 100 % beträgt, wenn im ersten Detektor ein Vernichtungsquant registriert wurde. Die Detektoren, die paarweise die Koinzidenzereignisse messen, sind identisch, d.h. sie bestehen aus dem gleichen Material und haben die gleichen Abmessungen. Daher sind in Gl. 6 die intrinsischen Ansprechwahrscheinlichkeiten identisch.

Da die räumliche Auflösung der PET bereits physikalisch begrenzt ist (s. Kap. 1), kann die bestmögliche Auflösung durch Verwendung möglichst kleiner Raumwinkel erreicht werden: Man vermindert die Detektoroberfläche durch Kollimatoren aus Blei, muss aber dafür eine geringere Zählrate in Kauf nehmen. Bei Anwendungen hat es sich hingegen als vorteilhaft erwiesen, möglichst kleine Detektoroberflächen zu verwenden. Dies führt zu einer großen Anzahl von Detektoren in einem System (siehe Abb. 1) und damit zu hohen Kosten der Messanordnung.

## 4 Technische Grundlagen

Die für diesen Versuch benötigten elektronischen Bauteile und deren Funktion werden kurz beschrieben. Nähere Informationen und technische Daten finden Sie in den aufgeführten Referenzen und der Literatur.

## 4.1 Verstärker (engl.: *amplifier*)

Ein Verstärker hat die Aufgabe, ein ankommendes Signal zu verstärken, also seine Amplitude zu erhöhen. Es wird zwischen Vorverstärkern und Hauptverstärkern unterschieden. Ein Vorverstärker (engl.: *preamplifier*) wird direkt hinter einen Detektor geschaltet und verstärkt das Signal so, dass die Folgeverluste im Kabel so gering wie möglich sind. Für die BGO-Detektoren ist dies jedoch nicht erforderlich. Ein Hauptverstärker sollte entweder ein Signal mit möglichst kurzer Anstiegsflanke erzeugen (engl.: *Timing Filter Amplifier – TFA*) oder das Signal möglichst proportional zum Eingangssignal verstärken (engl.: *spectroscopy amplifier*). Es ist normalerweise nicht möglich, aber in den meisten Anwendungen auch nicht notwendig, sowohl die kürzesten Anstiegsflanken als auch eine möglichst proportionale Verstärkung zu erreichen. Beide Optionen stehen Ihnen während des Praktikums zur Verfügung.

## 4.2 Diskriminator (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 ausgewählt werden. Beginnt die Ausgabe genau beim Überschreiten der Schwelle (engl.: *Leading Edge Discrimination*), werden Signale mit gleicher steigender Flanke, aber unterschiedlicher Amplitude zu unterschiedlichen Zeitpunkten registriert. Es gibt einen Zeitversatz für zeitgleich ankommende Signale. 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*).

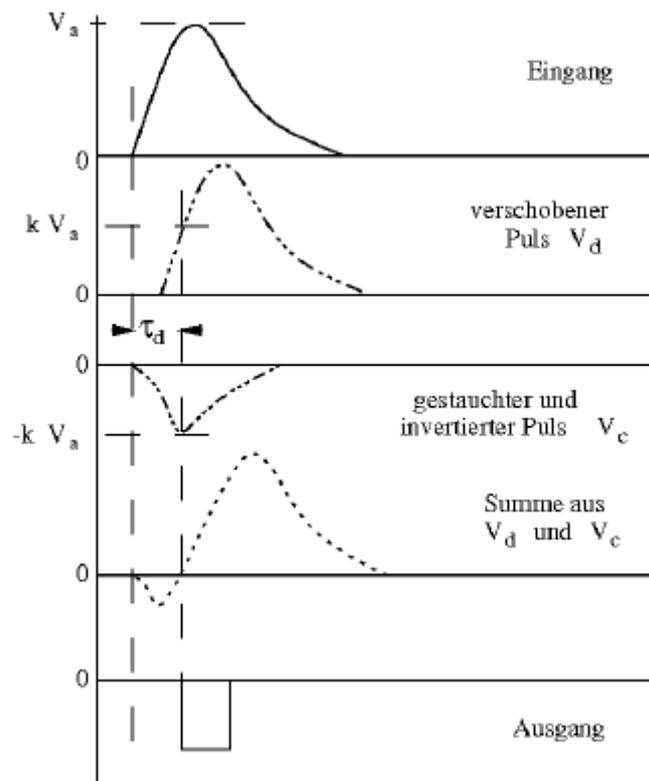


Abbildung 5: Funktionsweise eines Constant Fraction Discriminators: Das Eingangssignal wird zunächst durch die Zeit  $\tau_d$  (Puls  $V_d$ ) bestimmt. Es wird auch invertiert und die Amplitude um einen Faktor  $k$  komprimiert (Puls  $V_c$ ). Der Nulldurchgang des Summenpulses von  $V_d$  und  $V_c$  startet das logische Ausgangssignal (aus [LEO 1987], S. 327 Abb. 17.14 und S. 328, Abb. 17.5).

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

Ein Zeit-Amplituden-Wandler (engl.: *Time-to-Amplitude-Converter – TAC*)

Time-to-Amplitude-Converter (TAC) hat zwei Eingänge: einen für das "Start"- und einen für das "Stopp"-Signal. Der Ausgang liefert einen Puls, dessen Höhe proportional zur Zeitdifferenz zwischen dem Eintreffen der Signale "Start" und "Stopp" ist. Dies geschieht in der Regel durch ständiges Entladen eines Kondensators während dieser Zeit. Auch die Entladegeschwindigkeit und damit die Pulshöhe sind wählbar.

### 4.4 Verzögerung (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 koinzidente Ereignisse nicht zu verlieren, verschiebt man sein "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 über 1  $\mu$ s kann zur Vermeidung von Verlusten eine elektrische Schaltung verwendet werden.

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

Die Aufgabe eines Analog-Digital-Wandlers (engl.: *Analog-to-Digital Converter* - ADC) besteht darin, ein analoges Signal in ein digitales umzuwandeln, damit es beispielsweise von einem Computer ausgelesen und weiterverarbeitet werden kann. Wichtig ist, 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 Verfahren zum Umwandeln 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 Entladung des Kondensators (engl.: *run down*). Beim Entladevorgang werden die Pulse eines Frequenzgenerators gezählt und als digitales Signal verwendet. Diese Methode wird im Praktikum verwendet. Die *Approximationsmethode* hingegen vergleicht die Pulshöhe des Eingangssignals nacheinander mit vorgegebenen Werten, die sich aus dem vorherigen Vergleich ergeben. Je nachdem, ob sie größer oder kleiner sind, wird eine 1 oder eine 0 an die entsprechende Stelle im Binärkode geschrieben.

#### **4.6 Vielkanalanalysator (engl.: *multi channel analyser*)**

Ein Multi-Channel-Analyser (MCA) sortiert eingehende Signale nach ihrer Pulshöhe in einen Speicherkanal und gibt die Anzahl der Signale in jedem Kanal in tabellarischer oder grafischer Form zurück. Dies geschieht im vorliegenden Versuch durch "MAESTRO", ein Programm zur Aufnahme, Darstellung und Auswertung von  $\gamma$ -Spektren.

#### **Anregungen und Fragen**

- Welche elektronischen Komponenten sind notwendig, um ein Energiespektrum bzw. eine Koinzidenzmessung aufzunehmen? Skizzieren Sie den Aufbau jeder Messanordnung.
- Was passiert mit dem Peak im Spektrum einer Koinzidenzmessung, wenn Sie einen anderen Delay verwenden?

## 5 Versuchsdurchführung

### 5.1 Aufbau des Versuchs

Abbildung 6 zeigt eine Skizze des Aufbaus. Bevor Sie mit der Messung beginnen, vergewissern Sie sich, dass der Versuchsaufbau richtig justiert ist. Justieren Sie ggf. den Aufbau unter Anleitung des Betreuers neu. Die später benötigten Kabel und Stecker stellt Ihnen Ihr Betreuer auf Anfrage zur Verfügung.

### 5.2 Detektorsignal auf dem Oszilloskop

Schließen Sie die beiden BGO-Detektoren an die Hochspannungsversorgung an. Verbinden Sie den Detektorausgang eines der Detektoren mit einem der Kanäle 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. Zuerst die niedrige Skala auf 100 V, 200 V und dann die große Skala um weitere 500 V erhöhen. Alle weiteren Verkabelungen nehmen Sie ebenfalls unter Aufsicht des Betreuers vor!**

Platzieren Sie die Quelle in der Halterung und stellen Sie sicher, dass sie sich ungefähr in der Mitte der Detektoroberfläche befindet.

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

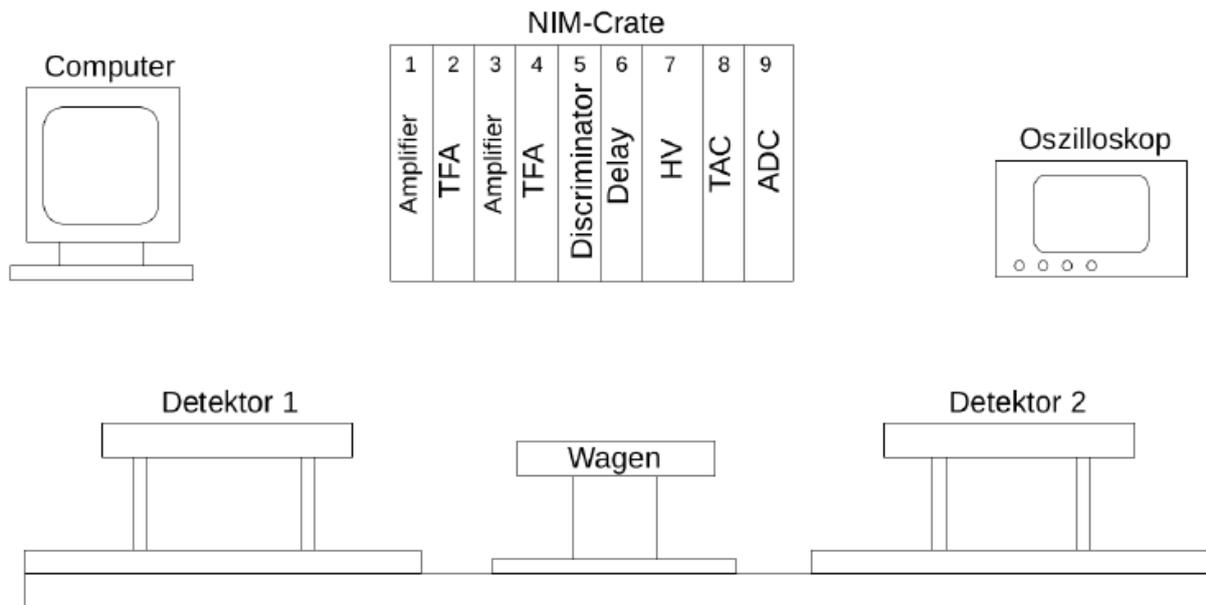


Abbildung 6: Eine Skizze der wesentlichen Bauteile des Versuchs. Die für die Messung erforderliche Einzelverkabelung ist nicht dargestellt. Die folgenden elektronischen Komponenten befinden sich im NIM-Crate: 1/3-Verstärker, 2/4-TFA, 5-Diskriminator, 6-Delay, 7-Hochspannungsversorgung für die Detektoren, 8-TAC und 9-ADC.

Sobald sich die Quelle in der Halterung befindet, beginnen Sie mit den folgenden Einstellungen am Oszilloskop:

Spannung: 50 mV, Zeit: 10  $\mu$ s,

und stimmen Sie sie ab, um ein klares Signal zu sehen. Stellen Sie sicher, dass die negative Signaltriggerung richtig eingestellt ist (Flanke: negativ).

Wiederholen Sie dies für den zweiten Detektorausgang und machen Sie Bilder der Signale.

### 5.3 Verstärkersignal am Oszilloskop

Verbinden Sie den Ausgang des BGO-Detektors mit einem Verstärker und stellen Sie eine geeignete Verstärkung ein. Nehmen Sie das Signal vom unipolaren Ausgang und verbinden Sie es mit dem Oszilloskop, beginnen Sie mit den folgenden Einstellungen:

Spannung: 1 V, Zeit: 2,5  $\mu$ s.

Betrachten Sie das Signal sowohl mit positiver als auch mit negativer Flankentriggerung. Wiederholen Sie dies für den zweiten Detektorausgang und machen Sie Bilder der Signale.

## 5.4 Spektrum der $^{22}\text{Na}$ -Quelle

Starten Sie das Programm „MAESTRO“ auf dem PC. Die Bedienung des Programms ist Windows-konform (für weitere Fragen existiert eine Anleitung im Labor). Erstellen Sie im Ordner /FP\_PET\_2022 ein Unterverzeichnis, in dem Sie Ihre gemessenen Spektren ablegen können. Definieren Sie dieses Verzeichnis als Arbeitsverzeichnis des Programms (*File* → *Settings* → *Directories* → *Spectra*). Sie sollten die Länge des Spektrums entsprechend der Einstellung  $2^3 \cdot 2^{12}$  am ADC anpassen. Stellen Sie 1024 Kanäle ein (*Acquire* → *MCB Properties* → *Conversion Gain*). Für diese Messung sollte GATE aus sein: *Acquire* → *MCB Properties* → *ADC* → *Gate* → *Off*. Messen Sie das Spektrum etwa zweieinhalb Minuten lang (*Acquire* → *MCB Properties* → *Presets* → *Live Time*). Bestimmen Sie die Messzeit so, dass die Unsicherheit des kleinsten Peaks kleiner als ein Prozent ist (wie viele Counts sind das?). Speichern Sie dieses Spektrum vom ADC (*File* → *Save As* → *Dateityp: ASCII SPE*).

## 5.5 TFA-Signal auf dem Oszilloskop

Sie benötigen jetzt beide BGO-Detektoren und beide TFAs. Stellen Sie zunächst sicher, dass beide Detektoren den gleichen Abstand zur Quelle haben.

Beobachten Sie die Signale beider TFAs nacheinander auf dem Oszilloskop, beginnen Sie mit folgenden Einstellungen:

Spannung: 0,5 V, Zeit: 500 ns und negative Flanke.

Vergleichen Sie beide Signale und machen Sie ein Foto.

## 5.6 Diskriminatorsignal auf dem Oszilloskop

Verbinden Sie die Ausgänge der TFAs mit einem Eingang des Diskriminators. Betrachten Sie nacheinander die Ausgangssignale auf dem Oszilloskop, beginnen Sie mit den Einstellungen:

Spannung: 1 V, Zeit: 250 ns und negative Flanke.

Vergleichen Sie beide Signale und machen Sie ein Foto.

## 5.7 TAC-Signal auf dem Oszilloskop

Verbinden Sie einen der Diskriminatorausgänge mit dem "Start"-Eingang des TACs, verbinden Sie den anderen Diskriminatorausgang über ein Delay mit dem "Stopp"-Eingang. Sie können das Ausgangssignal des TAC auf dem Oszilloskop beobachten, beginnen Sie mit den Einstellungen:

Spannung: 0,5 V, Zeit: 5  $\mu$ s und eine positive Flanke.

Machen Sie auch ein Bild von dem Signal. Verbinden Sie zusätzlich ein Verstärkersignal für einen der Detektoren mit dem Oszilloskop. Stellen Sie die Parameter des verstärkten Signals und den Bereich des TAC ein. Verbinden Sie dann das verstärkte Signal mit ADC IN und den TAC-Ausgang mit GATE. Ändern Sie in MAESTRO das GATE auf „Coincidence“ und starten Sie eine Messung. Jetzt sollten Sie nur noch den Koinzidenzbereich sehen. Um Informationen für eine bestimmte Region im Programm anzuzeigen, wählen Sie sie mit der Maus aus, klicken Sie dann mit der rechten Maustaste und wählen Sie „Mark RIO“, erneut mit der rechten Maustaste klicken und „Peak Info“ wählen.

## 5.8 Ortsauflösung der Koinzidenzmessung

Ziel dieser Aufgabe ist es, den Einfluss der Lage der Quelle, der LOR der beiden Detektoren auf die Koinzidenzzählrate zu bestimmen. Außerdem sollten Sie die Integrationsgrenzen für den Rest des Versuchs festlegen. Schieben Sie dazu den Wagen mit der Quelle mit fester Schrittweite durch die entsprechende Achse. Messen Sie jeweils zwei Minuten lang das Spektrum und speichern Sie es unter Angabe der Position des Schlittens. Stellen Sie die Integrationsgrenzen im geeignetsten Spektrum ein (Welches ist das?). Versuchen Sie es mit einer noch kleineren Erhöhung im relevantesten Bereich. Die Gesamtzahl der Messungen sollte nicht größer als zehn sein.

## 5.9 PET-Analyse der „Schatzkiste“

Sie erhalten nun von Ihrem Betreuer eine verschlossene Kiste, in der sich zwei verschiedene radioaktive  $^{22}\text{Na}$ -Quellen befinden. Durch mehrere Koinzidenzmessungen sollten Sie die Lage der Quellen im Behälter und

ungefähr das Aktivitätsverhältnis der Quellen bestimmen. Beachten Sie bei der ersten Messung (sowohl in x- als auch in y-Richtung) die Lage der Behälterkante bezüglich der LOR der Detektoren. Messen Sie dann an verschiedenen Positionen mit einer festen Zeit von 120 s. Überlegen Sie sich eine sinnvolle Schrittweite (die Versuchsdauer soll endlich bleiben...). Wenn Sie die x-Richtung gemessen haben, gehen Sie genauso in y-Richtung vor, indem Sie den Behälter vom Wagen nehmen und um 90° gedreht wieder einsetzen. Führen Sie abschließend die Messungen in der Diagonale durch. Überlegen Sie sich die Position der Kante bezüglich der LOR und die Schrittweite anhand Ihrer vorherigen Messungen. Die Abbildung 7 in Kap. 6.4 gibt einen Überblick über die geometrischen Verhältnisse. Speichern Sie die Spektren für eine spätere Analyse.

## **5.10 Versuchsende**

Wenn Sie die Messung beendet haben, informieren Sie bitte Ihren Betreuer. Kopieren Sie alle Spektren, die Sie für die weitere Analyse benötigen, auf einen USB-Stick. Regulieren Sie die Hochspannung langsam herunter und schalten Sie sie dann aus. Schalten Sie auch das NIM-Crate aus.

## **6 Auswertung der Messungen**

### **6.1 Analyse verschiedener Signale auf dem Oszilloskop**

Präsentieren Sie die Bilder für die auf dem Oszilloskop beobachteten Signale. Geben Sie auch die jeweiligen Einstellungen des untersuchten Bauteils an und beschreiben Sie die Bedeutung von Signalhöhe und -breite. Welche Bauteile liefern logische Signale? Wie erkennt man das?

### **6.2 Kalibrierung und Interpretation des $^{22}\text{Na}$ -Spektrums**

Führen Sie zunächst eine Energiekalibrierung des Spektrums mit den beiden bekannten  $\gamma$ -Linien durch. Um die genaue Kanalnummer der Peaks zu erhalten, integrieren Sie diese. Nach der Kalibrierung sollten Sie sich das Spektrum im logarithmischen Maßstab ansehen, um auch kleine Effekte zu erkennen. Interpretieren Sie alle Peaks und finden Sie ihre zugehörigen Compton-Kanten.

Präsentieren Sie eines der Spektren. Welche Probleme könnten bei der Koinzidenzmessung auftreten?

### 6.3 Analyse der Ortsauflösung

Laden Sie nacheinander Ihre Spektren und integrieren Sie diese innerhalb der von Ihnen festgelegten Grenzen (Kanalnummern sind besser geeignet). Welche der berechneten Werte sind ein Maß für die Anzahl der koinzidenten Ereignisse und damit für die Aktivität auf dem LOR? Stellen Sie dies grafisch mit Fehlerangaben dar. Können Sie die Ortsauflösung im Verhältnis zum LOR bestimmen? Welche Halbwertsbreite hat Ihr Peak?

### 6.4 PET-Analyse

Das Ziel der Analyse ist es, die Lage der Quellen im Behälter und deren Aktivitätsverhältnis zu bestimmen. Dazu müssen alle Spektren in dem von Kap. 6.3 spezifiziertem Bereich liegen (wurde bereits während der Messung durchgeführt). Notieren Sie die Messwerte für die Anzahl der koinzidenten Ereignisse und damit für die Aktivität auf dem jeweiligen LOR. Um Rückschlüsse auf die 2D-Aktivitätsverteilung ziehen zu können, erstellen Sie eine Matrix dieser Werte, indem Sie jeden x-Wert mit jedem y-Wert multiplizieren. Ordnen Sie die diagonalen Messungen den richtigen Schnittpunkten der vertikalen und horizontalen Messungen zu (vgl. Abb. 7). Welche Messergebnisse erwarten Sie für die Einzelmessungen in den drei Richtungen, wenn sich an Position  $(x_2, y_4)$  in Abb. 7 eine starke Quelle befindet? Wie sehen Sie dann die zugehörigen Matrizen aus?

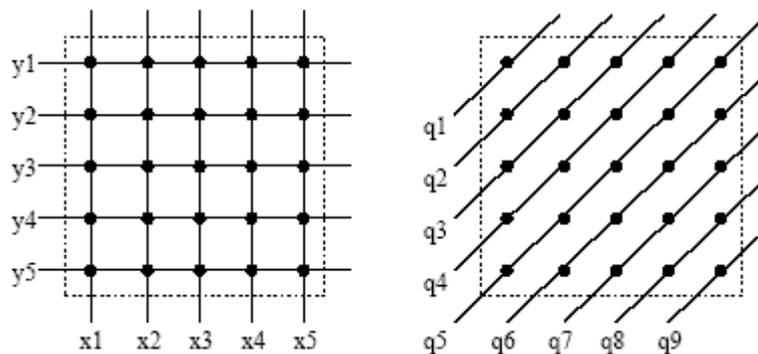


Abbildung 7: Durch Multiplikation von fünf Messungen in x- und y-Richtung erhält man 25 Messpunkte. Die Messwerte in q-Richtung werden in geeigneter Weise multipliziert, um Fehler bei der Rückrechnung zu eliminieren.

Stellen Sie nun die Werte Ihrer Matrizen ein, d. h. die Verteilung der Koinzidenzzählrate Ihrer Messung in 2D, indem Sie verschiedenen Zählwerten verschiedene Farben zuweisen. Mit Hilfe der Informationen über die Geometrie des Behälters und die Position des Schlittens in Bezug auf das LOR können Sie die Position der Quellen im Behälter bestimmen. Ordnen Sie den Quellen relativ zu der stärksten eine Aktivität zu. Beachten Sie dabei, dass Sie für jeden Punkt der Matrix die Ergebnisse zweier unabhängiger Einzelmessungen miteinander multipliziert haben.

## Literatur

[1] D. E. Cullen, et al., Tabellen und Grafiken von Photon-Wechselwirkungs-Querschnitten von 10 eV bis 100 GeV, abgeleitet von der LLNL Evaluated Photon Data Library (EPDL). UCRL-50400 6, Teile A+B (1989).

[2] Datenbank Photo-Atomic Cross Sections, Brookhaven National Laboratorium, WWW-Adresse: <http://www.bnl.gov>.

[3] R. B. Firestone et al., Isotopentabellen. Achte Ausgabe, John Wiley Sons (1996).

[4] G. Pfennig, et al., Karlsruher Nuklidkarte. Auflage, Forschungszentrum Karlsruhe (1995).

[5] W. R. Leo, Techniken für kern- und teilchenphysikalische Experimente. Springer-Verlag, (1987).

## Grundlegende Literatur

In den folgenden Verweisen finden Sie die Antworten auf die Anregungen und Fragen von Kap. 1, 3 und 4, sowie viele weitere nützliche Informationen zum Experiment.

- G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, John Wiley Sons, 1979.
- W. R. Leo, Techniken für kern- und teilchenphysikalische Experimente, Springer-Verlag, 1987.
- M. A. Mandelkern, Nuclear Techniques for Medical Imaging: Positron Emission Tomography, Annu. Rev.

Nukl. Teil. Wissenschaft. 1995, Band 45, Seite 205-254.

- T. Mayer-Kuckuck, Kernphysik, Teubner Studienbücher, 1992.
- G. Schatz, A. Weidinger, Nukleare Festkörperphysik, Teubner Studienbücher, 1992.

## Anhang

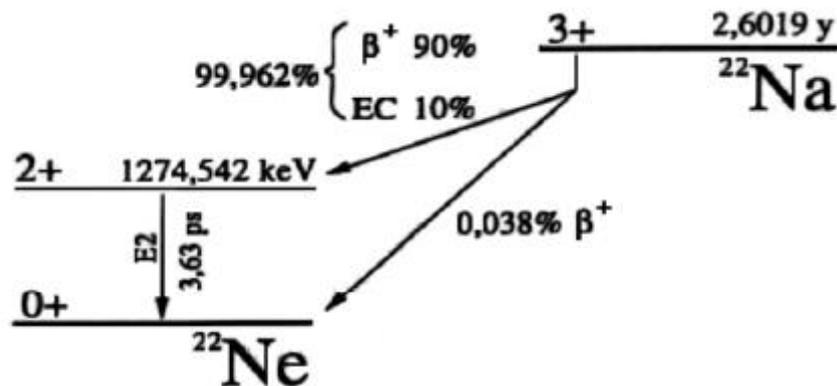


Abbildung 8: Zerfallsschema für  $^{22}\text{Na}$ . Beachten Sie die Verzweungsverhältnisse. Quelle: [FIRESTONE1996], p. 43.

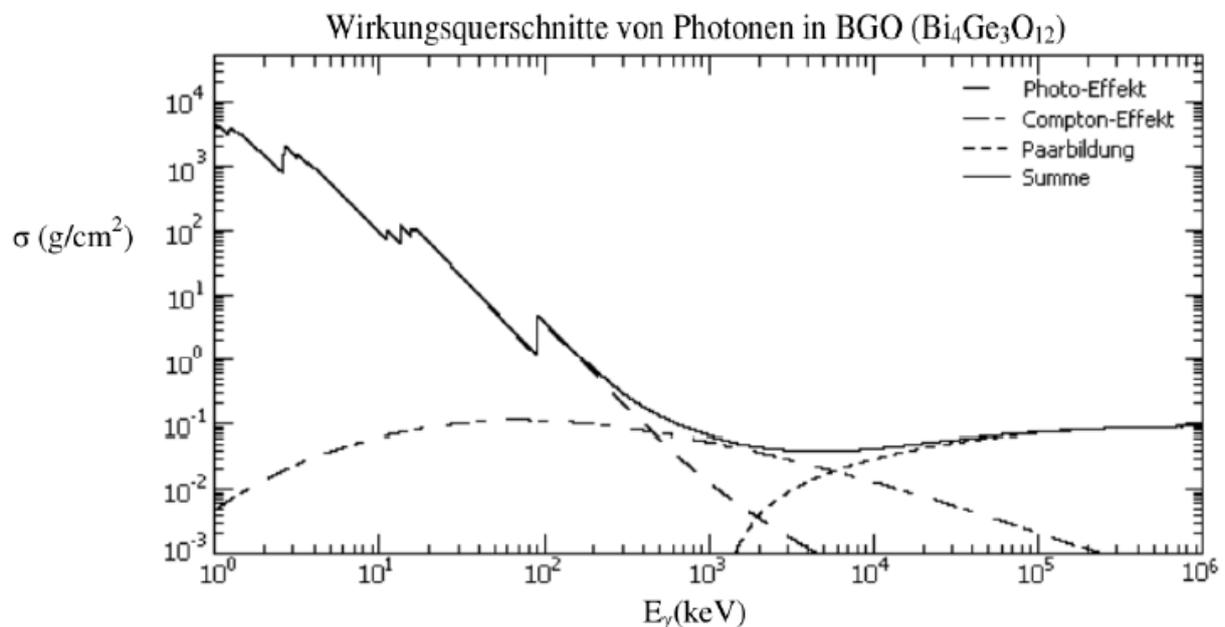


Abbildung 9: Energieabhängigkeit von Photoeffekt, Compton-Effekt und Paarbildung in einem BGO-Kristall  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  von keV bis 1000 MeV. Beachten Sie die doppelt logarithmische Skala. Quelle: [DATABASE BNL], basierend auf der Zusammenstellung von [CULLEN89].