

Betreuer: Sascha Vohl

Fortgeschrittenen-Praktikum am
Institut für Kernphysik

γ - γ -Koinzidenz¹

Oliver Flimm
Oberstraße 74
51149 Köln

Uwe Münch
Schmittgasse 92
51143 Köln

Wintersemester 93/94²

e-mail: flimm@ph-cip.uni-koeln.de
muench@ph-cip.uni-koeln.de

¹Versuch 7

²Durchführung des Versuchs: 20.12.93

Vorwort

Wir wollen hier zunächst ein paar Worte zum Aufbau unseres Versuchsprotokolls verlieren. Denn auf den nächsten Seiten zierte ein „© by Oliver Flimm und Uwe Münch“ die letzte Zeile. Warum dies? Sind diese beiden Praktikanten so eingebildet oder übergeschnappt? Nein, das sind wir nicht, und wir wollen jetzt also begründen, warum wir diese Zeile am Ende jeder Seite für nötig halten.

Viele Praktikanten bereiten ihre Versuche im CIPLAB vor und werten sie auch dort aus. Nur einige davon schützen ihre Arbeit vor Zugriff durch andere. Das bedeutet, daß man sich vielfach die .dvi-Dateien anschauen kann, aber auch daß man direkt auf .tex-Sourcen zugreifen könnte. Dieser Zustand ist ja allgemein bekannt. Wie ist nun unsere Einstellung dazu?

Wir denken, daß es nicht Sinn der Sache (d. h. des FP's) sein kann, sich einfach die Sourcen zu kopieren. Zumeist sind diese Vorlagen auch lückenhaft oder enthalten Fehler. Kurz gesagt, aus diesen Gründen benutzten wir keine solchen Textvorlagen. (Über unser Verfahren, was Bilder angeht, werden wir uns gleich äußern.) Wie sieht das nun mit .dvi-Files aus? Wir denken, daß ein Aspekt des Fortgeschrittenpraktikums ist, daß wir lernen, wie man durchgeführte Versuche protokolliert, beschreibt und (später mal) veröffentlicht. Zu diesem Lernprozeß gehört es sicherlich auch, anhand von Beispielen zu sehen, wie so etwas geschieht. (Allerdings bezweifeln wir, daß dazu die Vorlagen immer so geeignet sind.) Zumindest halten wir es für keinen Frevel, wenn man sich anhand anderer Ausarbeitungen eine Idee holt, wie Versuchsprotokolle anzufertigen sind. Daher beabsichtigen auch wir, unsere .dvi-Dateien im CIPLAB allgemein lesbar zur Verfügung zu stellen. Dies wird *nicht* mit unseren .tex-Sourcen geschehen! Diese halten wir natürlich geschützt. Wir wollen nämlich nicht, daß unsere Mühen *einfach so* von anderen, uns bekannten oder unbekanntem Studenten weiter genutzt werden. Wie oben dargelegt, haben wir aber nichts dagegen, wenn unsere Ausarbeitung als Beispiel und Denkanstoß dient. Für Nachfragen, etc. haben wir unsere vollständigen Normal- und unsere e-mail-Adressen angegeben. Damit niemand auf die Idee kommt, sich das Leben doch zu einfach zu machen und die .dvi-Datei einfach ausdruckt und in der Hoffnung, daß sie keiner wiedererkennt, abgibt, haben wir die Copyright-Zeile eingefügt. Diese dürfte so etwas effektiv verhindern. Außerdem (wovon wir weniger überzeugt sind) dient sie vielleicht als psychologische Sperre, zu wörtlich von uns abzuschreiben.

Nachdem wir uns so ausführlich über diese Vorgehensweise ausgelassen haben, wollen wir dann auch noch ein paar Worte über Bildvorlagen verlieren. Bei manchen Versuchen benutzten wir aus Büchern eingescannte Graphiken. Wir haben dann jeweils die Herkunft vollständig (also am Bild und im Literaturverzeichnis) dokumentiert. Alle sonstigen Bilder sind von uns mittels xfig, gnuplot oder ähnlichen Programmen selbst erstellt worden.

Ein paar abschließende Worte zur benutzten \TeX -Umgebung: Wir erstellten unsere Ausarbeitungen bereits mit der Testversion des neuen Formats $\LaTeX 2\epsilon$. Die benutzten Classes und Packages sind allerdings noch von Hand von uns angepaßt worden. Aber nun in medias res...

Inhaltsverzeichnis

1. Vorbereitung	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Koinzidenzaufbau	1
1.3 Funktionsweise und Zusammenwirken der verwendeten Bauteile	3
2. Auswertung	7
2.1 Eichungen	7
2.1.1 Energieeichung	7
2.1.2 Zeiteichung	7
2.2 Zeitauflösung	9
2.3 Gesamtintensitäten und relative Stärken	9
2.4 Koinzidenzspektrum	12
2.4.1 Generelle Betrachtung	12
2.4.2 Energieschema von Bismut	14
Literaturverzeichnis	15
Index	16

Abbildungsverzeichnis

1.1	Einfaches Beispiel eines Spektrums	2
1.2	Koinzidenzaufbau	3
1.3	Time-To-Amplitude-Converter (TAC)	5
1.4	Pole-Zero-Kompensation	6
2.1	Energie-Kanal-Zusammenhang	8
2.2	Zeit-Kanal-Zusammenhang	8
2.3	Prompte Kurven	9
2.4	Single-Spektrum und Koinzidenz-Spektrum von ^{207}Bi	13
2.5	Single-Spektrum und Koinzidenz-Spektrum von ^{60}Co	13
2.6	Zerfall- und Energieschema von ^{207}Bi	14

1. Vorbereitung

1.1 Einleitung

In diesem Versuch beschäftigen wir uns mit einem der grundlegenden Versuchsaufbauten der Kernphysik. Es ist dies der Koinzidenzaufbau, den wir anhand der γ -Spektroskopie erklären werden. Darüberhinaus beschäftigen wir uns mit elementaren Bausteinen für die Impulsformung.

Ein Großteil des für diesen Versuch notwendigen Vorwissens wurde schon in anderen Versuchen des Fortgeschrittenenpraktikums in der Kernphysik erbracht. Daher sei hier nur kurz auf die entsprechenden Stellen verwiesen. Es sind dies die folgenden Themengebiete:

Wechselwirkung von γ -Strahlung mit Materie	Versuch [FP-5]
Form von γ -Spektren	Versuch [FP-5]
Detektoren für γ -Spektroskopie	Versuche [FP-5] und [FP-17]
Vorverstärker und Hauptverstärker	Versuche [FP-17] und [FP-8a]
Flip-Flops	Versuch [FP-8c]
Fensterdiskriminatoren	Versuch [FP-8a]
Statistik	Versuch [FP-2]

1.2 Koinzidenzaufbau

Prinzip

Wenn wir einen angeregten Kern vorliegen haben, dann versucht dieser, seine Energie abzugeben. Dies kann in Form von γ -Strahlung geschehen, wobei die Kernbestandteile unverändert bleiben. Hierbei geschieht dieses „Abgeben“ portionsweise, da der Kern seine Energie nur gequantelt abstrahlen kann (vgl. z. B. [FP-5]). Mit jedem Abstrahlen von γ -Teilchen mit dem „Ziel“ Grundzustand wird also ein Portiönchen Energie abgegeben. Diese Energien findet man entsprechend der Häufigkeit ihres zeitlichen Auftretens als Peaks in dem zugehörigen *Single-Spektrum* wieder.

Um in den gewünschten Grundzustand zu kommen, kann der Kern nacheinander verschiedene, aber jeweils feste Zwischenstationen anlaufen. Auf diesen Zwischenstationen verweilt er meist sehr kurz, sodaß in erster Näherung gesagt werden kann, daß das Durchlaufen eines Weges über die Zwischenstationen hin zum Grundzustand *instantan* geschieht. Die Wege, auf denen der Kern seine Energie abgeben kann, nennt man *Banden*. Ein beispielhaftes Energieschema eines Zerfalls ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

Anhand dieses beispielhaften Energieschemas werden wir nun noch einmal grundsätzlich das oben schon angesprochene erläutern: Ein Pfeil in der Abbildung 1.1 entspricht einem γ -Zerfall, also einem abgegebenen γ -Quant einer festen Energie. Wenn wir alle hier auftretenden Zerfälle ohne Koinzidenz-Aufbauten mit nur einem Detektor spektroskopieren, dann werden wir jedes dieser Quanten im Single-Spektrum entsprechend der Häufigkeit des zugehörigen Zerfalls als Peak wiederfinden.

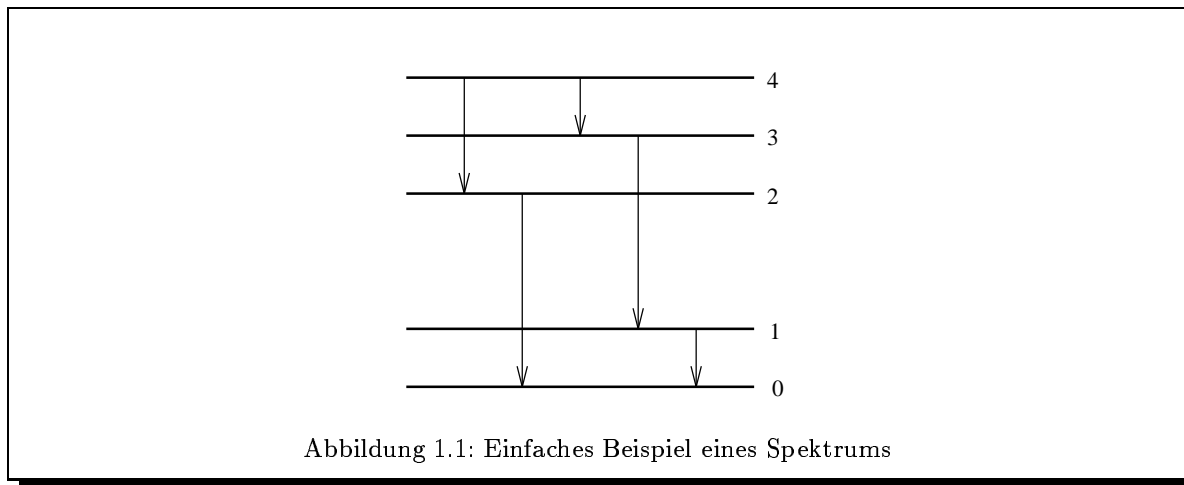


Abbildung 1.1: Einfaches Beispiel eines Spektrums

In der Abbildung erkennen wir auch Banden. Wir müssen ja nur nach aufeinanderfolgenden Zerfällen suchen, die bei 4 beginnen und bei 0 enden. In unserem Beispiel sind das genau zwei Banden: 4-3-1-0 und 4-2-0.

Kurzer Abriss des Versuchsaufbaus

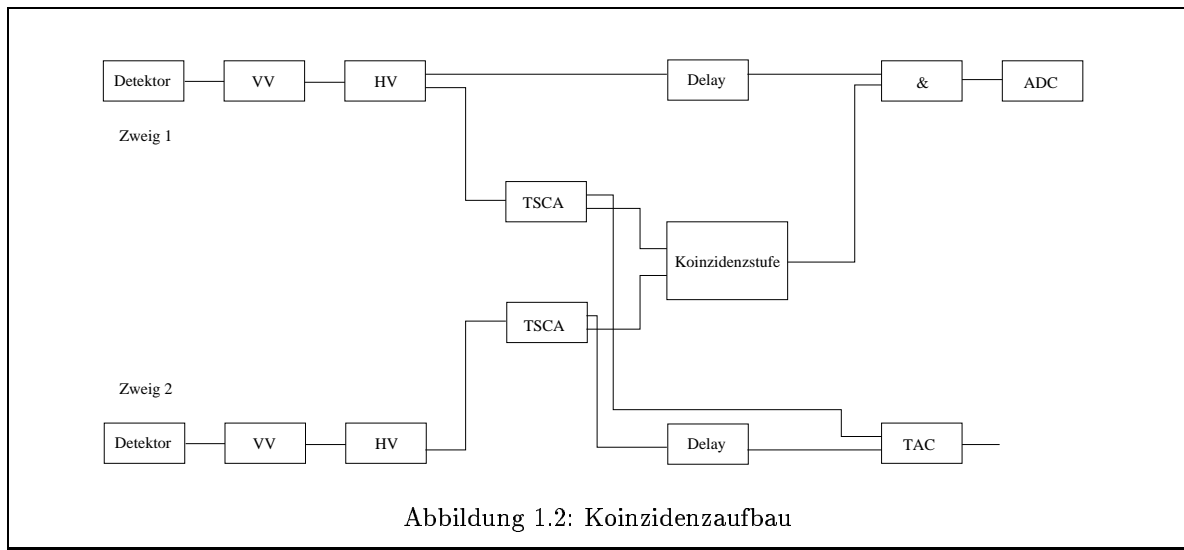
Man versucht nun einen Versuchsaufbau zu konzipieren, mit dem es möglich ist, die genaue Lage der „Zwischenstationen“ untereinander und die Reihenfolge, in denen sie durchlaufen werden, zu ermitteln. Damit kann man nun also herausfinden, welche Banden existieren und welche Energiedifferenzen auf den jeweiligen Banden liegen. Wenn dies gelungen ist, hat man das Energie- oder Zerfallsschema des Kerns gefunden. Dieses Schema ist von besonderer Bedeutung, da mit ihm bestehende Theorien auf Konsistenz mit der Wirklichkeit und diese gegebenenfalls zu neuen Kernmodellen weiterentwickelt werden können.

Wie schon oben angesprochen, verläuft jeder mögliche Zerfallsweg quasi instantan, da die Zwischenzustände sehr kurzlebig sind. Sie liegen bei den Kernen, die wir untersuchen, im Zeitraum einiger Picosekunden.

Der minimale Versuchsaufbau besteht aus mindestens zwei Detektoren. Wenn nun zwei γ -Quanten die Detektoren gleichzeitig erreichen, dann gehören sie entweder zur gleichen Bande, oder sie sind zufällig gleichzeitig angekommen. Der letzte Fall ist ein statistisches Phänomen, so daß daraus ein mehr oder weniger „minimaler“ Untergrund resultiert. Man spricht bei den beiden Fällen von *echter* und *zufälliger Koinzidenz*.

Wir wollen uns nun mit Abbildung 1.2 einen Überblick über den Versuchsaufbau verschaffen. Man erkennt dort links zwei Detektor-Verstärker-Zweige. Der eine Zweig ist der sogenannte *Spektroskopiezweig* (Zweig 1). Mit den Energiequanten, die dort auftreffen, wird eine Spektralanalyse gemacht, jedoch dann und nur dann, wenn gleichzeitig im zweiten Detektor auch ein Quant einer bestimmten, festgelegten Energie eintrifft.

Mit dem ersten Fensterdiskriminator (TSCA oben) kann man den Gesamtbereich einstellen, auf dem Energiequanten spektroskopiert werden. Mit dem Fensterdiskriminator für die Energie (TSCA unten) kann man nun bestimmen, welche Energie das zweite Quant haben muß, damit der Spektroskopiezweig überhaupt arbeitet. Auf diese Weise ist es möglich, die Energie genau auf einen bestimmten Zerfall zu legen. Es werden dann nur noch die Banden weiterverarbeitet, in denen der eingestellte Zerfall vorkommt. Ebenso werden in dem Spektrum nur die Zerfälle als Peaks auftauchen, die auf der eingestellten Bande liegen. Die Energie des eingestellten Zerfalls erscheint natürlich nicht im Spektrum (mit Ausnahme der zufälligen Koinzidenz...). Denn dazu müßte sich das korrespondierende γ -Quant ja teilen, um



gleichzeitig von beiden Detektoren registriert zu werden. Dazu ist es aber natürlich nicht in der Lage. Man sagt in diesem Fall: Das Quant sieht sich nicht selbst.

Durch Einstellen auf verschiedene Zerfälle kann man nach und nach das genaue Energieschema rekonstruieren.

Somit können wir für die praktische Einstellung der TSCA's zusammenfassen: Der obere TSCA wird so eingestellt, daß energiemäßig alle Peaks des Spektrums abgedeckt sind. Der untere TSCA wird auf die Zwischenstufe bzw. den Teilzerfall eingestellt, dessen Bande näher untersucht werden soll.

Zeitauflösung und Gleichzeitigkeit

Der Rest des Aufbaus dient der Festlegung, welche Ereignisse in den beiden Zweigen gleichzeitig sind. Neben den Zeitabständen zwischen den einzelnen Bandensprüngen beim Zerfall sind die Zeitkonstanten der Detektoren bzw. der nachfolgenden Elektronik von besonderer Wichtigkeit. Insbesondere die Vorverstärker/Hauptverstärkerkombinationen sind hierbei von Bedeutung. Bei der Behandlung der Prompten Kurve gehen wir hierauf genauer ein.

In der Apparatur (siehe wieder Abbildung 1.2) kann man mit der Koinzidenzstufe vorgeben, wann zwei Ereignisse gleichzeitig sind. Je größer dieses Zeitfenster gewählt wird, desto mehr zufällige Koinzidenzen treten im allgemeinen auf. Daher ist man bestrebt dieses Zeitfenster so klein wie möglich zu wählen. Dieses Zeitfenster wird *Koinzidenzauflösezeit* genannt.

1.3 Funktionsweise und Zusammenwirken der verwendeten Bauteile

Wie schon in der Einleitung angesprochen, wird hier nicht mehr explizit auf die verwendeten Verstärker oder Vielkanalanalysatoren eingegangen. Wir beschäftigen uns stattdessen genauer mit den anderen, folgenden Elementen:

TSCA

Der TSCA (*Time-Single-Channel-Analysator*, *Fensterdiskriminator*) hat die Aufgabe, nur ein einstellbares Energiefenster¹ aus dem Spektrum herauszufiltern und — eventuell verzögerte — Zeitmarken zu erzeugen.

¹ Bezüglich Aufbau und genauer Funktion eines Fensterdiskriminators sei nochmals auf Versuch [FP-8a] verwiesen.

Liegt das Eingangssignal innerhalb des Energiefensters, so generiert der TSCA Signale an seinen beiden Ausgängen. Sein erster Ausgang liefert dabei ein logisches Digital-Signal, das an die Koinzidenzstufe weitergereicht wird. Der zweite Ausgang liefert ein sehr schnelles negatives Analog-Signal, welches als Zeitmarke an den TAC weitergereicht wird und diesen steuert.

Der TSCA erhält seine Eingangssignale von den *bipolaren* Ausgängen der beiden Hauptverstärker, während das *unipolare* Signal des Hauptverstärkers im Zweig 1 gegebenenfalls als spektroskopisches Signal im Vielkanalanalysator weiterverarbeitet wird. Bei beiden Signalformen ist die Amplitudenhöhe proportional zur detektierten Energie. Durch den Nulldurchgang der bipolaren Signale, deren Amplituden im eingestellten erlaubten Bereich liegen, werden die Zeitmarken ausgelöst. Für die Erzeugung der Zeitmarken verwendet man nämlich einen Nulldurchgangs-Trigger. Er startet exakt dann, wenn das anliegende bipolare Signal seinen Nulldurchgang hat. Zusätzlich kann man i. a. im selben Gerät die an den Ausgängen erzeugten Zeitmarken mittels Delays gegenüber den Zeitmarken des Nulldurchgangs-Triggers verzögern.

Koinzidenzstufe

In der Koinzidenzstufe wird ein Zeitfenster gesetzt, die oben bereits erwähnte Koinzidenzauflösezeit. Wenn nun die logischen Signale der beiden TSCA's innerhalb dieses Zeitintervalls ankommen, dann werden sie als gleichzeitig erkannt und es wird ein logisches Signal an das Tor weitergegeben.

Delays

Das erste Delay ist zwischen dem unipolaren Ausgang des oberen Hauptverstärkers und dem Tor positioniert. Da der andere, bipolare Ast des Hauptverstärkers erst noch durch den TSCA und die Koinzidenzstufe geschickt wird, bevor sich beide Äste wieder vor dem Tor treffen, muß der obere Ast um genau die Zeitspanne verzögert werden, die die Elektronik des unteren Asts verschluckt. Es ist jedoch zu betonen, daß nur der unipolare Zweig gegebenenfalls im Spektrum erscheint, der bipolare ist lediglich zur Zeitmarkengenerierung zuständig bzw. reguliert das Tor.

Genauso wie das erste Delay hat auch das zweite Delay, das vor dem TAC lokalisiert ist, eine Verzögerungsfunktion: gleichzeitige Signale der beiden TSCA's werden durch dieses Delay zu einem festen Zeitabstand verzögert, sodaß der TAC eine feste Amplitudenhöhe für gleichzeitige Ereignisse generiert. In unserem Aufbau wurden beide Delays durch ein sehr langes Kabel realisiert. Für eine genaue Erklärung der Kabellaufzeiten verweisen wir auf [FP-8a].

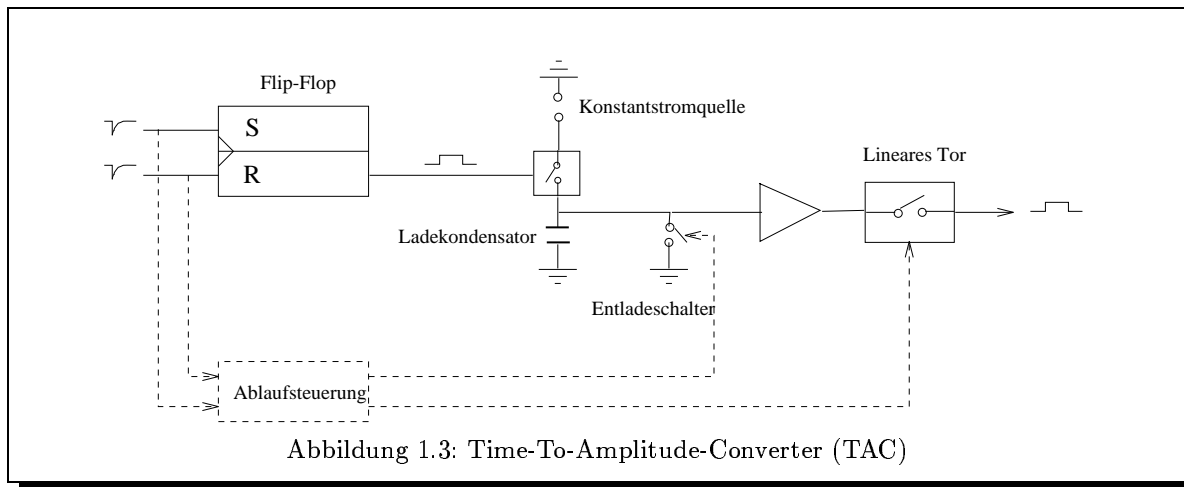
Tor

Das Tor ist ein Baustein mit zwei verschiedenen Eingängen und einem Ausgang. An dem ersten Eingang liegt das analoge Signal an, das wir im Vielkanalanalysator spektroskopieren wollen. An dem zweiten Eingang liegt dagegen nur ein logisches Digital-Signal an, daß dem Tor sagt, ob es das Signal des ersten Eingangs durchlassen soll oder nicht.

TAC

Mit dem TAC (*Time-to-Amplitude-Converter*) wollen wir die Länge des Zeitintervalls zwischen zwei Zeitsignalen auf proportionale Weise in die Amplitudenhöhe eines Stromsignals umwandeln.

Dazu schaltet man ein RS-Flip-Flop (siehe [FP-8c]) so, daß es eine Konstantstromquelle auf ein Start-Signal anschaltet und auf ein Stop-Signal ausschaltet. Durch diese Konstantstromquelle fließt nun, wenn sie eingeschaltet ist, eine Ladung gemäß $Q = I \cdot (t_{\text{stop}} - t_{\text{start}})$ auf einen Kondensator. Die Ladung auf dem Kondensator ist somit der verstrichenen Zeit proportional. Gemäß $Q = C \cdot U$ liegt nun also eine Spannung am Kondensator an, die ebenfalls proportional zur Zeitdifferenz zwischen Start- und Stop-Signal ist. Wenn wir jetzt diese Spannung abgreifen, ist unser Ziel erreicht, Zeitdifferenzen in (Spannungs-)Amplituden umzuwandeln. Die Schaltung eines TAC's muß nun noch um eine Ablaufsteuerung erweitert werden, die es ermöglicht, den Kondensator zwischen zwei Zeitmessungen wieder zu entladen. Eine mögliche Realisierung eines TAC ist in Abbildung 1.3 dargestellt.



Zeitspektrum

Weiter oben haben wir schon mehrmals von Zeitmarken gesprochen. Wofür ist das durch sie generierte Zeitspektrum aber gut?

Hierzu betrachten wir wieder unseren Versuchsaufbau in Abbildung 1.2. Der für das Zeitspektrum verantwortliche Teil ist unten rechts zu finden. In Abänderung der dort dargestellten Schaltung muß man hinter den TAC noch den Analog-Digital-Wandler ADC und den Vielkanalanalysator schalten. Wie schon bei dem Koinzidenzspektrum liefern die Detektoren in den beiden Spektroskopieäzweigen ihre Signale an die TSCA's. Zweig 1 liefert nun ein Startsignal, Zweig 2 das Stoppsignal für den TAC, das jedoch mit einem Delay verzögert wird. Als Ergebnis erhält man im Vielkanalanalysator ein Spektrum, das Auskunft über die zeitliche Verteilung koinzidenter Signale gibt. Dieses Zeitspektrum wird *Prompte Kurve* genannt. Bei der Prompten Kurve handelt es sich natürlich um eine Verteilung (im Sinne von [FP-2]) der gemessenen (mit dem Delay beeinflussten) Zeitdifferenzen zwischen Zweig 1 und Zweig 2. Die Verteilung ist durch verschiedene Faktoren bestimmt:

- Einmal durch die *natürliche* Verteilung des Kernzerfalls. Unser Kernzerfall läßt sich als Intervallverteilung (siehe [FP-2]), die annähernd asymptotisch normalverteilt ist und durch eine Gaußverteilung approximiert werden kann, beschreiben.
- Zum anderen durch die Verteilungen unserer *Apparatur*. Hier wirken sich zeitliche Ungenauigkeiten
 - der Detektoren (Totzeiten, ...) und
 - der Auswerteelektronik (Zeitkonstanten der Vor- und Hauptverstärker, TSCA's, ...)

besonders aus. Auch diese Verteilungen lassen sich als Gaußverteilungen beschreiben (sie sind asymptotisch normalverteilt ([FP-2])).

Da die Lebensdauern der bei uns auftretenden Zerfälle der angeregten Zustände im Bereich einiger Picosekunden liegen, die zugehörige Verteilung also praktisch vernachlässigbar ist (die Breite der zugehörigen Gaußverteilung ist sehr schmal), wird die Gesamtstatistik en gros von der Meßapparatur bestimmt.

Wie sieht die gesamte, aus allen Phänomenen zusammengesetzte Zeitverteilung aus, die wir ja messen werden? Da alle Zeitverteilungen gleichzeitig auftreten, müssen wir für die Gesamtverteilung eine Faltung der verschiedenen Gaußverteilungen vornehmen. Diese ist wieder gaußverteilt und ergibt unser Zeitspektrum, die Prompte Kurve. Eigentlich müßten wir noch den durch die zufällige Koinzidenz

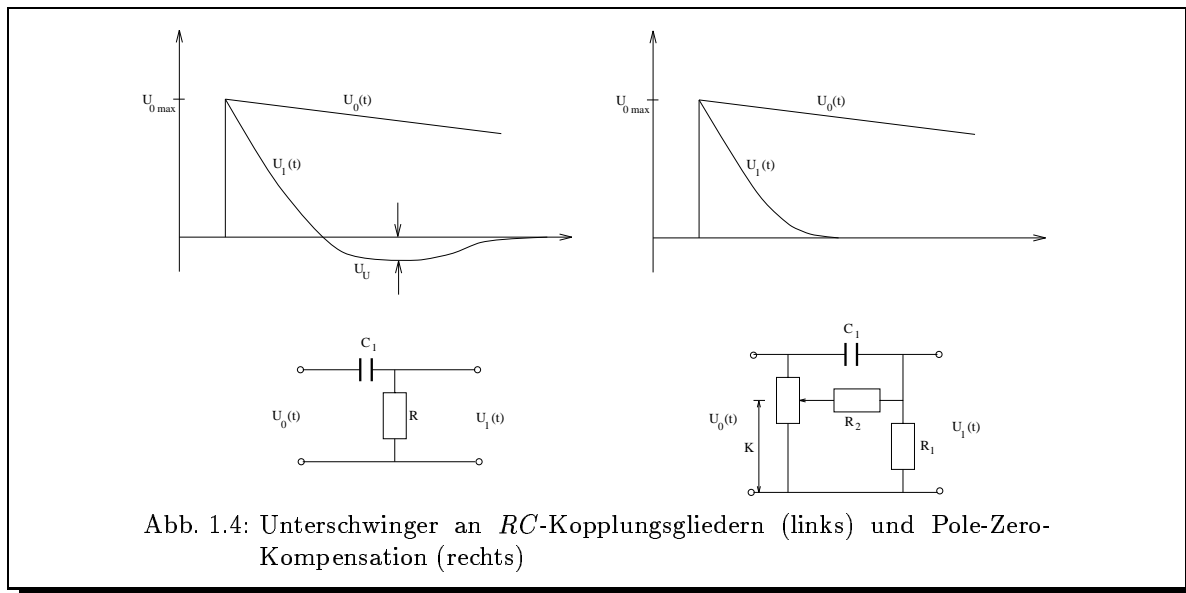


Abb. 1.4: Unterschwinger an RC-Kopplungsgliedern (links) und Pole-Zero-Kompensation (rechts)

erzeugten Untergrund berücksichtigen. Dieser ist jedoch sehr gering und kann somit vernachlässigt werden.

Natürlich entspricht die Breite der Prompts Kurve einer Zeit. Wir nennen diese Zeit die *Auflösungszeit der Apparatur*.

Wir möchten hier nochmal betonen, daß der Delay vor dem TAC im Stopzweig notwendig ist: Ohne Delay würde Amplitude Null, was idealerweise Kanal Null im Vielkanalanalysator entsprechen würde, Gleichzeitigkeit der Signale in beiden Zweigen entsprechen. Aufgrund der Zeitverteilungen erzeugen aber gleichzeitige Ereignisse vor den Detektoren nicht notwendigerweise gleichzeitige Ereignisse in den beiden Detektorzweigen. Wir würden also die Hälfte der Signale abschneiden, nämlich die, bei denen das Stoppsignal vor dem Startsignal ankommt. Das Delay garantiert nun, daß wir das komplette Zeitspektrum auf dem Rechner sehen. Indem man verschiedene Verzögerungen einstellt, kann man die Zeitachse eichen.

Pole-Zero-Kompensation

Verstärkerstufen in Hauptverstärkern und meist auch in Vorverstärkern werden meist über Kondensatoren wechsellspannungsgekoppelt, um Gleichspannungs-Driften und Offset-Spannungen nicht mitzuverstärken. Das durch die Koppelkapazität C_1 und dem Widerstand R zwischen den Eingängen gebildete RC-Glied wirkt wie eine Differenzierstufe mit der Zeitkonstanten $\tau_1 = R \cdot C_1$ und erzeugt bei einem typischen Vorverstärker-Ausgangssignal mit exponentiellem Abfall τ_0 einen Unterschwinger am nächsten Verstärkereingang. Dieses Unterschwingen kann bei hohen Anforderungen an die Energieauflösung sehr störend sein, wenn ein zweiter Impuls nicht auf der Null-Linie, sondern auf diesem (veränderlichen) Unterschwinger aufsetzt. In modernen Verstärkern, wie dem unseren (hihi!), wird daher dieses Unterschwingen in einer speziellen Schaltung (*Pole-Zero-Kompensation*) kompensiert. Dazu wird auf den nachfolgenden Verstärker-Eingang zusätzlich zu dem kapazitiv gekoppelten Signal über einen Widerstand R_2 ein einstellbarer Bruchteil K des Gleichspannungsanteils des Signals gegeben (vgl. Abbildung 1.4). Man kann nun mit Hilfe der Theorie der Laplace-Transformation nachweisen, daß sich durch Hinzufügen des Bruchteils K zunächst die Übertragungsfunktion des Differenziergliedes und damit die Ausgangsamplitude dahingehend verändern, daß bei einer bestimmten Einstellung der unerwünschte Unterschwinger beseitigt ist (zur Laplacetransformation und Übertragungsfunktionen: siehe [FP-8a]). Diese bestimmte Einstellung ergibt sich gerade, wenn $K = \frac{R_2 \cdot C_1}{\tau_0}$ gilt. Für die genaue Rechnung sei auf [Schm] verwiesen.

2. Auswertung

2.1 Eichungen

In diesem ersten Auswertungsteil werden wir eine Energie- und eine Zeiteichung der jeweils zugehörigen Spektren vornehmen. Wir erhalten somit einen Energie-Kanal- bzw. einen Zeit-Kanal-Zusammenhang.

2.1.1 Energieeichung

Die Energieeichung führen wir mit den beiden Präparaten ^{60}Co und ^{207}Bi durch. Wir orientieren uns dabei an den entsprechenden Single-Spektren. Für diese hatten wir gemessen:

Präparat	Energie [keV]	CTRD
^{60}Co	1172	2275,92
	1333	2562,37
^{207}Bi	569	1212,84
	1064	2192,19

Eine graphische Darstellung dieser Meßergebnisse ist in Abbildung 2.1 gegeben.

Durch lineare Regression wurde folgender Energie-Kanal-Zusammenhang gefunden:

$$E(K) = (0,559 \pm 0,036) \cdot K - (117,125 \pm 75,686) \text{ keV}.$$

Dieser Zusammenhang ist ebenfalls in Abbildung 2.1 als Gerade eingezeichnet.

2.1.2 Zeiteichung

Der Schwerpunkt der Prompten Kurve des Zeitspektrums ließ sich durch Einstellung verschiedener Delayzeiten am entsprechenden Verzögerungselement nach links und rechts verschieben. Unsere Meßergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefaßt:

Delay [nsec]	Kanal
50	2888
32	2268
16	1634

Eine graphische Darstellung dieser Meßergebnisse ist in Abbildung 2.2 gegeben.

Wiederum wurde durch lineare Regression eine Eichgerade angepaßt. Es ergab sich folgender Zeit-Kanal-Zusammenhang:

$$T(K) = (0,027 \pm 0,002) \cdot K - (28,684 \pm 2,542) \text{ nsec}.$$

Auch hier wurde diese Gerade in die entsprechende Abbildung 2.2 eingezeichnet.

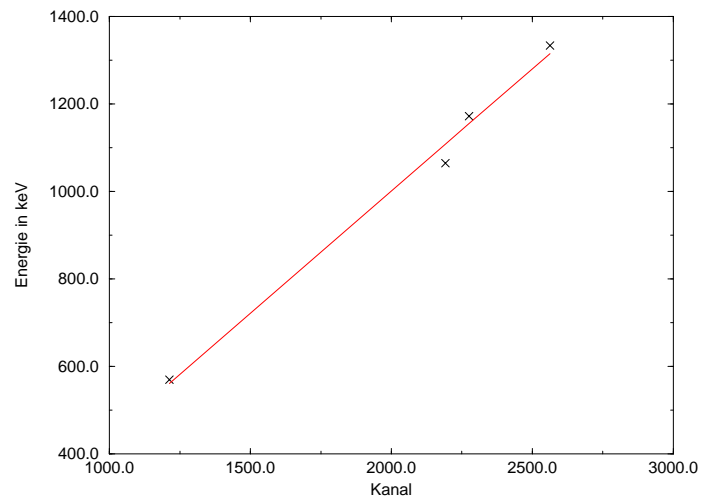


Abbildung 2.1: Energie-Kanal-Zusammenhang

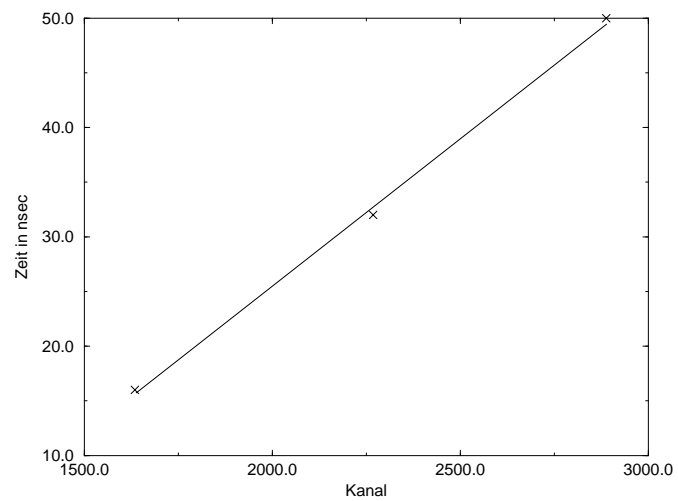


Abbildung 2.2: Zeit-Kanal-Zusammenhang

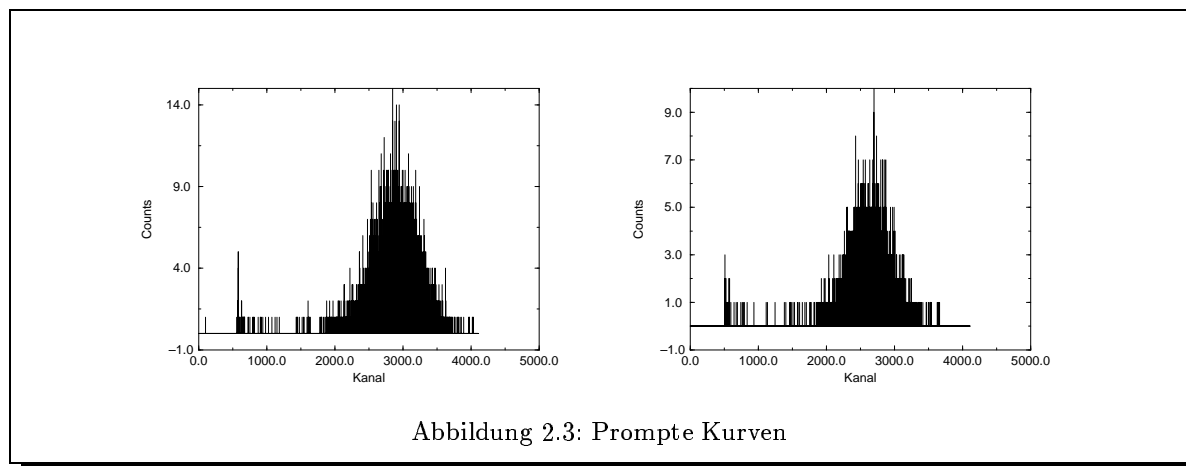


Abbildung 2.3: Prompte Kurven

2.2 Zeitauflösung

Die Zeitauflösung unseres Meßaufbaus ist durch die Breite der Prompten Kurve, die wir bei einem Delay von 50 nsec gemessen haben, gegeben. Hier zeigt sich unser erstes Problem mit dem Versuchsaufbau: Da wir beim Einstellen der TSCA-Delays Schwierigkeiten hatten (siehe S. 12), haben wir die Prompte Kurve nach einer halben Stunde nochmal nachgemessen. Ohne daß wir also etwas an dem Versuchsaufbau geändert hatten, ergab sich eine gewanderte Prompte Kurve. Beide Prompte Kurven sind in Abbildung 2.3 dargestellt (links: die zuerst gemessene, rechts: die nach einer halben Stunde gemessene Prompte Kurve). Die Wanderung der vom TAC gemessenen Delayzeiten erklärt sich vermutlich durch

Schlechte Delays: An den Schaltern für die verschiedenen Delay-Zeiten können Wackelkontakte vorhanden sein (so, wie diese Schalter aussahen. . .). Die Delays selbst dehnen sich aus und ändern damit ihren Induktivitäts- bzw. Kapazitätsbelag (vgl. [FP-8a]) und ihren Widerstand, was alles die Delayzeiten beeinflusst.

Zeitkonstanten der Detektoren: Die Zeitkonstanten der Detektoren, Vor- und Hauptverstärker können sich im Laufe der Zeit ändern. Wir haben insbesondere einen unserer Vorverstärker im Verdacht. Die damit zusammenhängenden Abenteuer, die wir erleben durften, beschreiben wir auf Seite 13 im Abschnitt 2.4.1, in dem wir die Koinzidenzspektren auswerten.

Nun also zur Zeitauflösung. Da wir hierbei nur die Breite der Prompten Kurve benötigen, die sich bei der Wanderung nicht groß geändert hat, benutzen wir unsere zuerst gemessene Prompte Kurve (die linke), bei der wir folgende Meßwerte ablesen bzw. berechneten:

Fußpunkt 1 [Kanal]	Fußpunkt 2 [Kanal]	Breite [Kanal]
2102	3689	1587

Unter Berücksichtigung der Zeiteichung ergibt sich somit für die Breite der Prompten Kurve und für die Zeitauflösung der Apparatur $42,8 \pm 3,2$ nsec.

2.3 Gesamtintensitäten und relative Stärken

In diesem Versuchsteil wollen wir nun die Gesamtintensität der γ -Quelle und die relativen Stärken bei den verschiedenen Energien bestimmen.

Eigentlich sollten wir dies anhand des Koinzidenzspektrums von ^{207}Bi machen. Leider konnten wir dem aus folgenden Gründen nicht nachkommen:

Anzahl der gemessenen Peaks: Selbst im Single-Spektrum, mit dem die Energieeichung durchgeführt wurde, konnten nur 2 Peaks ausgemacht werden. Da wir die Koinzidenz auf einen dieser Peaks eingestellt haben, sollte dieser Peak wiederum beim Koinzidenzspektrum fast(!) verschwinden. Aus dem einen verbleibenden Peak kann man natürlich keine *relativen* Stärken berechnen.

Wanderung des Spektrums: Die Peaks des Koinzidenzspektrums stimmen kanalmäßig nicht mit denen des Singlespektrums überein. Erneut vermuten wir den Vorverstärker als Hauptschuldigen (siehe unten (Seite 13)): Offensichtlich ändern sich nicht nur dessen Zeitkonstanten, sondern auch seine Verstärkung.

Neuer Peak: Es ist ein neuer Peak hinzugekommen. Nach unserer Energieeichung liegt er bei 1485,5 keV; aufgrund unserer nächtlichen Spektrumwanderung scheint dies der erwartete 1771 keV-Peak zu sein. Da wir aber die ganze Nacht über gemessen haben, die Wanderung des Spektrums also vermutlich während der Messung stattfand, und der Peak extrem schwach ist, ist zu vermuten, daß die Counts dieses neuen Peaks verschmiert sind, die Net-Area aus dem Peakreport des Programmes *nucleus* also zu klein ist. Es erschien uns nicht sinnvoll, mit Werten weiterzurechnen, die offensichtlich von großen systematischen Fehlern belastet sind.

Da eines unserer Ziele die Bestimmung der relativen Stärken der Peaks war, und diese bei Single- und Koinzidenz-Spektren den gleichen Wert haben (sofern nicht einer der Peaks herausgefiltert wird, weil er in einer anderen Bande liegt...), werden wir diesen Aufgabenteil stattdessen mit den Single-Spektren durchführen. Diese wurden in kürzerer Zeit aufgenommen als die Koinzidenzspektren, die systematischen Fehler der Koinzidenzspektren sind hier also nicht wesentlich. Wir haben nicht nur das Single-Spektrum von Bismut, sondern auch das von Kobalt betrachtet.

Die zur Auswertung nötigen Meßwerte waren:

Präparat	Energie [keV]	Net-Area [counts]
^{207}Bi	569	100 525
	1 064	38 128
^{60}Co	1 172	108 828
	1 333	98 411

In der Net-Area waren die Anzahl der Counts bei der entsprechenden Energie gegeben, wobei jeweils der Untergrund nicht mitgezählt wurde. Sie wurde dem Peak-Report des Programmes *nucleus* entnommen.

Nun müssen wir die gezählten Counts, die Net-Area NA , auf die Gesamtanzahl der γ -Quanten GZ bei den gegebenen Energien hochrechnen. Dazu bedienen wir uns der detektorspezifischen Größe *Peak-to-Total-Ratio PTR*, die für unsere Szintillationszähler in Form eines Diagramms bei unseren Versuchunterlagen beilag. Die *PTR* gibt energieabhängig das Verhältnis der γ -Quanten, die im Photo-Peak landen, zu den insgesamt auftreffenden γ -Quanten an. Die anderen Quanten ergeben counts im Compton-Kontinuum, Single-Escape-Peak, usw. Die Wahrscheinlichkeit, daß ein γ -Quant nicht vollständig im Detektor absorbiert wird, also nicht im Photopeak erscheint, steigt natürlich mit seiner Energie an und ist von der Geometrie des Detektors abhängig.

Es gilt nun:

$$GZ_{\gamma} = \frac{NA}{PTR}$$

und für die Fehler:

$$\Delta GZ_{\gamma} = GZ_{\gamma} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta NA}{NA}\right)^2 + \left(\frac{\Delta PTR}{PTR}\right)^2}.$$

Damit erweitert sich unsere Tabelle von oben wie folgt:

Präparat	Energie [keV]	NA [counts]	PTR	GZ_{γ}
^{207}Bi	569	100 525	$0,59 \pm 0,03$	$170\,381,36 \pm 8\,519,07$
	1 064	38 128	$0,41 \pm 0,03$	$92\,995,12 \pm 6\,509,66$
^{60}Co	1 172	108 828	$0,39 \pm 0,03$	$279\,046,15 \pm 22\,323,69$
	1 333	98 411	$0,34 \pm 0,03$	$289\,444,12 \pm 26\,049,97$

Aus der GZ_{γ} und der *Efficiency* EFF können wir nun endlich die Gesamtzahl der von der Strahlungsquelle ausgesandten γ -Quanten, also die gesuchte Gesamtintensität I_{ges} , berechnen. Dabei ist die *Efficiency* EFF das Verhältnis der Zahl der auf den Detektor treffenden zu der Zahl der dort tatsächlich registrierten γ -Quanten. $1 - EFF$ gibt also an, wieviel Prozent der γ -Quanten im Detektor überhaupt nicht registriert werden. Die Registrierbarkeit der γ -Quanten hängt natürlich mit dem Gesamtwirkungsquerschnitt für eine Reaktion mit Materie zusammen; da diese von der Ordnungszahl Z des Detektormaterials abhängt (vgl. [FP-5]), ist auch die *Efficiency* eine detektorspezifische Größe. Die Werte für EFF unserer Detektoren wurden dem dem Versuch beiliegenden *Efficiency*-Diagramm entnommen.

Es gilt:

$$I_{ges} = \frac{GZ_{\gamma}}{EFF}$$

und für die Fehler:

$$\Delta I_{ges} = I_{ges} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta GZ_{\gamma}}{GZ_{\gamma}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta EFF}{EFF}\right)^2}.$$

Hiermit komplettiert sich unsere Tabelle zu:

Präparat	Energie [keV]	GZ_{γ}	EFF	I_{ges}
^{207}Bi	569	$170\,381,36 \pm 8\,519,07$	$0,023 \pm 0,002$	$7\,407\,885,2 \pm 743\,061$
	1 064	$92\,995,12 \pm 6\,509,66$	$0,018 \pm 0,002$	$5\,166\,395,6 \pm 678\,466$
^{60}Co	1 172	$279\,046,15 \pm 22\,323,69$	$0,017 \pm 0,002$	$16\,414\,479 \pm 2\,335\,282$
	1 333	$289\,444,12 \pm 26\,049,97$	$0,016 \pm 0,002$	$18\,090\,258 \pm 2\,786\,428$

Als relative Stärken erhalten wir nun für ^{207}Bi :

$$\frac{I_{1064}}{I_{569}} = 0,697 \pm 0,12 \quad (17\%).$$

Und für ^{60}Co :

$$\frac{I_{1333}}{I_{1172}} = 1,102 \pm 0,23 \quad (20\%).$$

Vergleich mit den Literaturwerten

Zu einem Vergleich mit den Literaturwerten wurde [Led] herangezogen. Um die relativen Stärken abschätzen zu können, müssen wir dort in dem Termschema die Wahrscheinlichkeiten für die zugehörigen Zerfälle herausuchen und durcheinander teilen.

Im Fall von ^{207}Bi hatte der 1063,64 keV-Zerfall eine Wahrscheinlichkeit von 74% und der 569,65 keV-Zerfall eine Wahrscheinlichkeit von 97%. Damit ergibt sich für die theoretische relative Stärke ein Wert von 0,757. Experimentell haben wir einen Wert von $0,697 \pm 0,12$ bestimmt. Wir haben also ziemlich gut gemessen und sind bis auf 8% an den theoretischen Wert herangekommen.

Im Fall von ^{60}Co haben beide Zerfälle trivialerweise eine Wahrscheinlichkeit von 100% (es gibt nur eine Zerfallsbande). Somit erhalten wir eine theoretische relative Stärke von 1. Mit unserem experimentell bestimmten Wert von $1,102 \pm 0,23$ liegen wir hier auch wieder im Rahmen unserer Fehlergrenzen relativ gut und haben uns diesmal bis auf 11% dem theoretischen Wert genähert.

2.4 Koinzidenzspektrum

In diesem letzten Aufgabenteil werden wir die gemessenen Koinzidenzspektren besprechen und bei ^{207}Bi versuchen, anhand der uns vorliegenden (wenigen) Daten Rückschlüsse auf das Energieschema zu ziehen.

2.4.1 Generelle Betrachtung

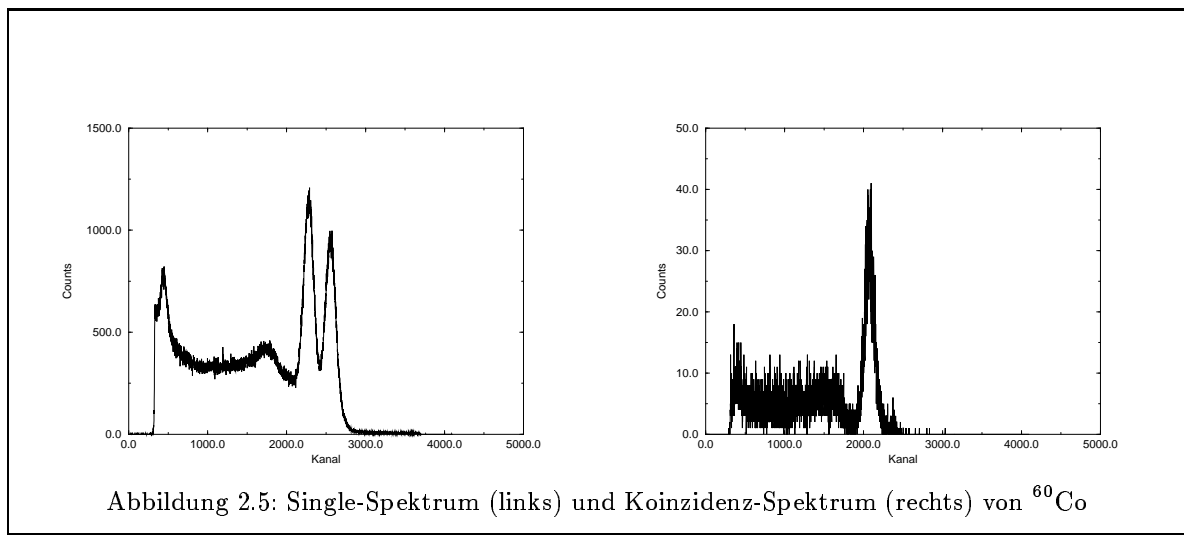
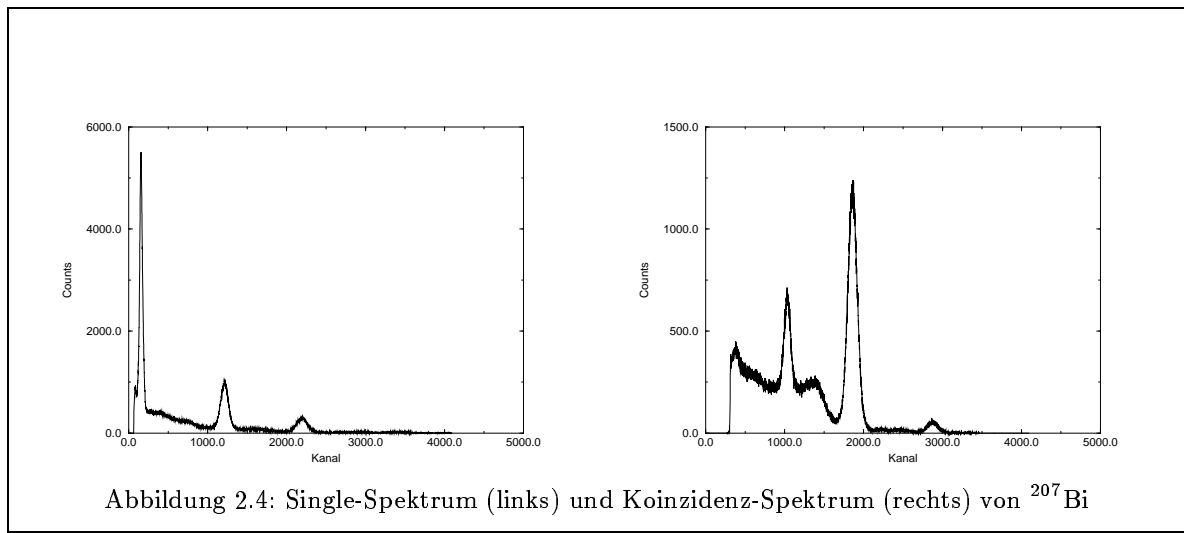
Wir wiederholen nochmal unsere Erwartung: Im Vergleich des Koinzidenzspektrums mit dem Singlepektrum verschwindet der festgehaltene Peak mehr oder weniger und nur noch die Peaks auf derselben Bande wie der festgehaltene Peak tauchen auf. Daneben erwarten wir natürlich noch einen Untergrund der anderen Peaks, der durch die zufälligen Koinzidenzen zustande kommt, und das Comptonkontinuum, welches wir ja immer im Spektrum haben.

Die gemessenen Koinzidenzspektren und Singlespektren von Bismut und Kobalt sind in den Abbildungen 2.4 und 2.5 angegeben. Wenn wir diese Koinzidenzspektren mit den entsprechenden Singlespektren vergleichen, so können wir die dargelegte Erwartung bei Bismut nur erahnen. Bei Kobalt hingegen bestätigen sich unsere Erwartungen. In den Spektren erkennen wir sehr gut das Compton-Kontinuum und auch der Untergrund ist näherungsweise zu erkennen. In dem Kobalt-Spektrum erkennen wir sehr gut den verbleibenden 1172 keV-Peak. Wir hatten dort den zweiten TSCA ja auf den 1333 keV-Peak eingestellt.

Beim Bismut hingegen ist der 569 keV-Peak, auf den die Koinzidenz eingestellt war, noch viel zu deutlich vertreten. Der 1771 keV-Peak ist nur sehr schwach angedeutet, insbesondere im Vergleich mit dem 569 keV-Peak so gut wie nicht vorhanden. Dieser Versuchsteil ist also keineswegs zufriedenstellend und wir sehen ihn gewissermaßen als gescheitert an.

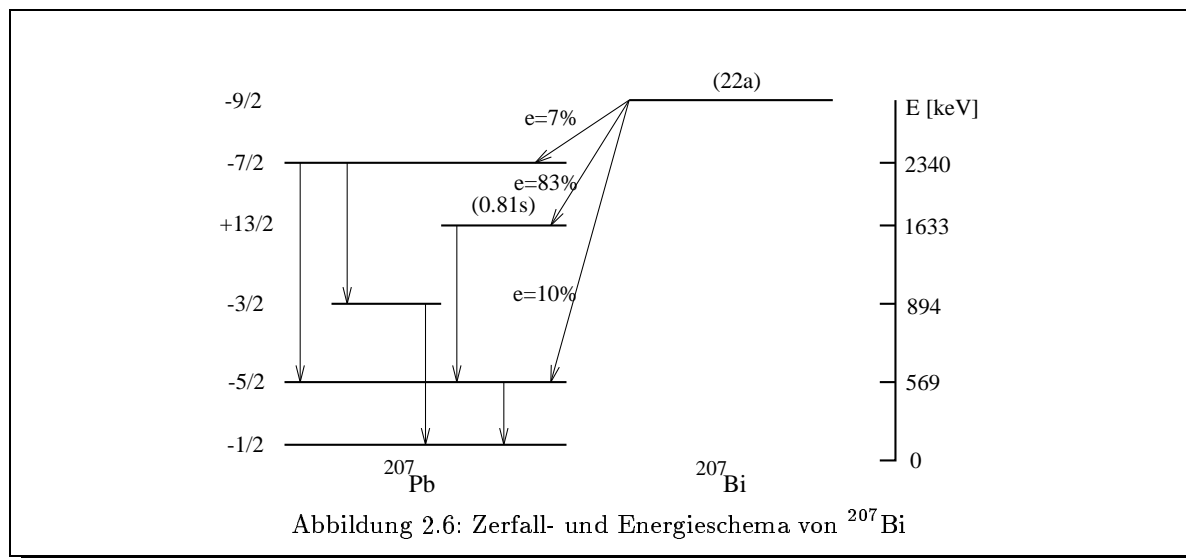
Auch bei den Kobaltspektren sind Probleme erkennbar, sie wirkten sich allerdings nicht so dramatisch aus wie beim Bismut, da wir beim Kobalt deutlich kürzer als eine Nacht spektroskopiert haben. Wir wollen nun Gründe für die Schwierigkeiten beim Bismut angeben und die Probleme des Versuchsaufbaus darstellen:

TSCA-Einstellungen: Beim Abgleich der Zweig-Laufzeiten nach der Methode, bei der man den Aufbau zum Zeitspektrum und die Prompte Kurve selbst benutzt, hatten wir Schwierigkeiten: Sowohl bei vernünftigen als auch bei extremen Delay-Einstellungen an den TSCA's konnten wir die erwarteten Ausbeulungen durch die geeignet eingestellten Zweige nicht in die Mitte der Prompten Kurve legen. Dies führte dazu, daß wir eine zweite Prompte Kurve aufnahmen. Es änderten sich offensichtlich Zeitkonstanten (wie wir bereits auf Seite 9 darlegten). Unser Problem konnten wir damit aber nicht lösen. Deshalb haben wir die andere Methode benutzt, bei der man die Signale auf dem Oszilloskop übereinanderlegt. Wir wurden dabei auch vom Assistenten Sascha Vohl unterstützt, der mit seiner Erfahrung die Einstellung verfeinerte. Möglicherweise war beim Bismutpektrum die Einstellung nicht ideal; wir haben allerdings keinen Hinweis, der diese Vermutung bestätigen könnte.



Vorverstärker: Mit einem der Vorverstärker hatten wir zu Anfang des Versuchs mehrfach Schwierigkeiten. So lieferte er nicht das Signal, das zu erwarten war, wie wir mit dem Oszilloskop nachprüfen konnten. Dieser Vorverstärker wurde fortan mehrfach ausgetauscht, wobei wir nicht ausschließen können, daß er über Nacht sein Signalverhalten nicht geändert hat. So wechselte er, zumindest zu Beginn unseres Versuches mehrfach seine Polarität. Nachdem wir einen anderen Assistenten zur Hilfe gerufen hatten, der dann einen neuen Vorverstärker einbaute, hatten wir plötzlich ein tripolares Signal, was diesen Assistenten aber im Gegensatz zu uns nicht aus der Ruhe zu bringen schien. Zitat: „Unipolar, bipolar, tripolar. Ist doch alles egal“. Nach einem weiteren Vorverstärkerwechsel, wir bekamen wieder den ursprünglichen, hatten wir beim Nachmessen endlich das gewünschte Verhalten gefunden.

Wir vermuten dennoch, daß ein Wackelkontakt (das war die Ursache der anfänglichen Schwierigkeiten) die Kapazitäten, Widerstände, etc. im Laufe der Zeit geändert hat. Dies resultierte dann in Schwankungen der Zeitkonstanten und der Verstärkung.



Wanderung der Spektren: Letzteres führte dazu, daß unsere Eichung im Laufe der Zeit gestaucht wurde. Die Peaks wanderten zu niedrigeren Kanälen hin, also ließ die Verstärkung immer weiter nach.

Sonstiges: Schließlich können noch unvorhersehbare Ereignisse in der Nacht eingetreten sein. Wir spekulieren frei: ein Stromausfall legte unser Experiment mitten in der Nacht kurzzeitig lahm, böse Menschen sabotierten unser Experiment, ... :-)

Alles in allem sehen wir in dem Vorverstärker die größte Fehlerquelle.

2.4.2 Energieschema von Bismut

Da unser Bismut-Koinzidenzspektrum nicht allzu gut gelungen ist, könnten wir im Prinzip nichts zum Zerfallsschema rekonstruieren. Wenn unser Spektrum gelungen wäre, hätten wir zwei Peaks bei 1064 keV und 1771 keV spektroskopiert. Aus diesen Daten hätten wir die Zerfälle 2340 keV \rightarrow 569 keV, 1633 keV \rightarrow 569 keV und natürlich 569 keV \rightarrow 0 keV rekonstruiert, wie sie in Abbildung 2.6 eingezeichnet sind. Wenn wir das gesamte Spektrum analysieren hätten wollen (was nicht Aufgabe dieses Versuchs ist), wäre der nächste Schritt gewesen, die Koinzidenz zwischen den Singlespektrumslinien bei 864 keV und 1446 keV zu untersuchen (diese Linien haben wir gar nicht in unserem Singlespektrum gesehen, da wir dieses Spektrum nicht allzu lange aufgenommen haben). Mit solch einer Messung wäre es möglich, die restlichen γ -Zerfälle im Schema zu rekonstruieren. Für einen letzten Überblick müßten nun noch die β -Zerfälle analysiert werden.

Das vollständige Zerfalls- und Energieschema von Bismut, das sich nach solchen Untersuchungen ergibt, ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

Literaturverzeichnis

Im folgenden wollen wir auf die Versuchsprotokolle der anderen Experimente im Fortgeschrittenenpraktikum, die von uns durchgeführt wurden und das vorliegende Protokoll hinsichtlich der theoretischen Grundlagen ergänzen, verweisen. Außerdem stellen wir eine Liste der Literatur auf, die wir am stärksten (nicht als einzige) zur Vorbereitung und Auswertung nutzten.

- [FP-2] O. Flimm, U. Münch: *Zählrohr und Statistik*, Versuch 2 im Fortgeschrittenenpraktikum am Institut für Kernphysik. Versuchsprotokoll. Köln, 1994
- [FP-5] O. Flimm, U. Münch: *Gamma-Szintillation*, Versuch 5 im Fortgeschrittenenpraktikum am Institut für Kernphysik. Versuchsprotokoll. Köln, 1994
- [FP-8a] O. Flimm, U. Münch: *Analoge Elektronik*, Versuch 8a im Fortgeschrittenenpraktikum am Institut für Kernphysik. Versuchsprotokoll. Köln, 1994
- [FP-8c] O. Flimm, U. Münch: *Digitale Elektronik*, Versuch 8c im Fortgeschrittenenpraktikum am Institut für Kernphysik. Versuchsprotokoll. Köln, 1994
- [FP-9] O. Flimm, U. Münch: *α -Reichweite*, Versuch 9 im Fortgeschrittenenpraktikum am Institut für Kernphysik. Versuchsprotokoll. Köln, 1994
- [FP-11] O. Flimm, U. Münch: *β -Szintillation*, Versuch 11 im Fortgeschrittenenpraktikum am Institut für Kernphysik. Versuchsprotokoll. Köln, 1994
- [FP-17] O. Flimm, U. Münch: *Ge(Li)- γ -Spektroskopie*, Versuch 17 im Fortgeschrittenenpraktikum am Institut für Kernphysik. Versuchsprotokoll. Köln, 1994
- [Anl] Institut für Kernphysik der Universität Köln: *Versuch 7: γ - γ -Koinzidenz*. Anleitung zum Versuch 7 des Fortgeschrittenenpraktikums. Köln, 1993
- [Schm] H. U. Schmidt: *Meßelektronik in der Kernphysik*. Stuttgart: Teubner Verlag, 1986
- [Led] C. Michael Lederer, Virginia S. Shirley: *Table of Isotopes*. 7. Auflage, Wiley & Sons.

Index

- Auflösungszeit, 6
- Banden, 1
- bipolare Signale, 4
- Bismutspektrum, 13, 14
- Delay, 4
- echte Koinzidenz, 2
- Efficiency, 11
- Energieschema, 2, 14
- Kobaltspektrum, 13
- Koinzidenz
 - echte, 2
 - zufällige, 2
- Koinzidenzauflösezeit, 3
- Koinzidenzspektrum, 12
- Koinzidenzstufe, 4
- Kurve
 - Prompte, 5, 9
- Nulldurchgang, 4
- Peak-to-Total-Ratio, 10
- Pole-Zero-Kompensation, 6
- Prompte Kurve, 5, 9
- relative Stärken, 11
- Schema
 - Energie-, 2, 14
 - Zerfalls-, 2, 14
- Single-Spektrum, 1
- Spektroskopiezwweig, 2
- Spektrum
 - Koinzidenz-, 12
 - Single-, 1
 - Zeit-, 5
- Stärke
 - relative, 11
- TAC, 4
- Time-Single-Channel-Analysator, 3
- Time-to-Amplitude-Converter, 4
- Tor, 4
- TSCA, 3
- unipolare Signale, 4
- Zeitauflösung, 9
- Zeitmarken, 4
- Zeitspektrum, 5
- Zerfallsschema, 2, 14
- zufällige Koinzidenz, 2