

Anleitung zum physikalischen Praktikum
für Fortgeschrittene Teil II

Versuch: Comptoneffekt

Version 1.03, 24.05.2015

Betreuer:

AR. DR. JENS SÖREN LANGE
ZIMMER HSG 5
TELEFON 99-33242

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	1
1.1	Geschichtlicher Überblick	1
1.2	Wechselwirkung von Photonen mit Materie	1
1.2.1	Photoeffekt	1
1.2.2	Paarbildung	1
1.3	Comptoneffekt	2
2	Versuchsaufbau	3
3	Verwendete Elektronik	4
3.1	Photomultiplier	4
3.2	Szintillationsdetektoren	4
3.3	NIM-Modul	5
3.3.1	Passive Splits	6
3.3.2	Verstärker	6
3.3.3	Constant-Fraction-Discriminator (CFD)	6
3.3.4	AND Logik	6
3.3.5	Hochspannungsmodule	7
3.3.6	NIM-TTL Konverter	7
3.3.7	Zähler	7
3.4	CAMAC-Modul	7
3.4.1	TDC	8
3.4.2	QDC	8
3.4.3	Gate Generator	8
3.4.4	CAMAC Crate Controller	8
3.5	Delay-Box	8
4	Datenaufnahmesoftware	8
5	Versuchsdurchführung	9
5.1	Überprüfung der elektronischen Schaltung	9
5.2	Energieeichung	9
5.3	Messung der 180°-Streuung	9
5.4	Messung der Comptonwellenlänge als Funktion des Streuwinkels	10
5.5	Überprüfung der Energieerhaltung	11
6	Bedienung der Datenerfassungs- und Datenanalysesoftware	11
7	Vorbereitende Fragen zum Kolloquium	13
8	Anhang	14
9	Danksagung	14

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Geschichtlicher Überblick

Der Comptoneffekt wurde erstmals 1923 von Arthur H. Compton nachgewiesen. Er beschreibt die Wellenlängenänderung eines Photons nach der Streuung an einem Elektron. Klassisch war dieser Effekt damals nicht zu erklären, durch die Einführung des Teilchencharakters eines Photons mit Impuls und Energie ist es jedoch möglich gewesen den Effekt theoretisch zu beschreiben. Zusammen mit der Beugung am Spalt ist der Comptoneffekt massgeblich für den Begriff Welle-Teilchen-Dualismus verantwortlich, welcher besagt, dass sich Teilchen in der Quantenmechanik wie Wellen Verhalten können und umgekehrt.

1.2 Wechselwirkung von Photonen mit Materie

Die Wechselwirkung von Photonen mit Materie wird in drei Effekte unterteilt, welche in Abb. 1 schematisch dargestellt sind und im Einzelnen kurz erläutert werden sollen. Abb. 3 zeigt die drei einzelnen Beiträge zum Abschwächungskoeffizienten als Funktion der Photonenenergie sowie die Summe.

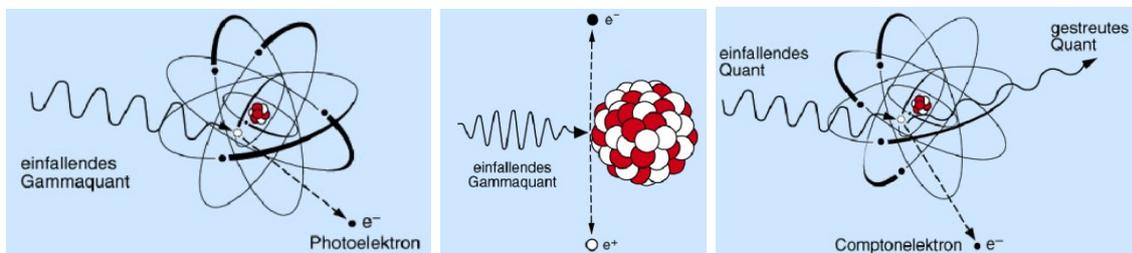


Abbildung 1: Schematische Abbildung der drei Prozesse der Wechselwirkung von Photonen mit Materie: Photoeffekt (links), Paarzerzeugung (hier am Kern, Mitte) und Comptoneffekt (rechts).

1.2.1 Photoeffekt

Der Photoeffekt wurde im 19. Jahrhundert entdeckt und 1905 erstmals von Albert Einstein theoretisch beschrieben, wofür dieser im Jahr 1921 den Nobelpreis in Physik erhielt. Im Zuge seiner Arbeit zum photoelektrischen Effekt führte Einstein erstmals den Begriff des Lichtquants ein. Als Lichtquant wird das kleinstmögliche (unteilbare) Energiepaket bezeichnet welches nur im ganzen absorbiert und erzeugt werden kann. Beim Photoeffekt werden durch Einstrahlen dieser Lichtquanten Elektronen aus einem Material (Photokathode) ausgelöst. Die dabei auf das Elektron übertragene Energie hängt über die Formel $E_{kin} = h\nu - W_a$ mit der Frequenz ν des eingestrahlten Photons zusammen. Mit W_a ist hier die Austrittsarbeit bezeichnet, also die Energie die benötigt wird das Elektron aus dem Material auszulösen. Für die Näherung der K -Schale und $E_\gamma \gg E_K$ mit der Bindungsenergie der J -Schale E_K zeigt der Wirkungsquerschnitt eine Proportionalität

$$\sigma_{Photoeffekt} \propto \frac{Z^5}{E_\gamma} \quad (1)$$

1.2.2 Paarbildung

Als Paarbildung bezeichnet man allgemein die Erzeugung eines Teilchen-Antiteilchen Paares und im engeren, historisch chronologischen Sinn als die Erzeugung eines Elektron-Positron Paares. Der Prozess wurde erstmals 1933 durch Irene Curie und Frederic Joliot experimentell nachgewiesen. Man

unterscheidet zwischen zwei Arten von Paarbildung: Wechselwirkung mit dem Atomkern oder mit einem Hüllenelektron. Bei der Erzeugung im elektrischen Feld des Atomkerns wird nahezu die gesamte Energie des Photons in Ruheenergie des Teilchen-Antiteilchenpaares und deren kinetischer Energie umgewandelt. Es ist also mindestens die zweifache Masse des Elektrons an Photonenenergie nötig, um eine Elektron-Positron Paarbildung auszulösen. Bei der Erzeugung am Hüllenelektron wird dieses aufgrund des hohen Impulsübertrages des Photons aus dem Atomverbund herausgeschleudert. Dieser Prozess wird auch Tripletbildung genannt, da nach der Paarbildung drei freie Teilchen vorliegen. Für $5m_e c^2 \leq E_\gamma \leq 50m_e c^2$ ergibt sich für den Wirkungsquerschnitt in guter Näherung einer Proportionalität

$$\sigma_{\text{Paarbildung}} \propto Z^2 \ln\left(\frac{E_\gamma}{m_e c^2}\right). \quad (2)$$

Z repräsentiert die Kernladungszahl des Materials.

1.3 Comptoneffekt

Der Comptoneffekt die Änderung der Energie eines einfallenden Photons nach dem Stoß mit einem, als frei betrachtetes, Elektron. Wegen $E_\gamma = h\nu = hc/\lambda$ verringert sich Frequenz des Photons im Zuge des Stoßes, und die Wellenlänge erhöht sich. Diese Änderung der Wellenlänge $\Delta\lambda$ soll nun hergeleitet werden, wobei folgende Bezeichnungen gelten.

- \vec{p}_1 Photonenimpuls vor dem Stoß
- \vec{p}_2 Photonenimpuls nach dem Stoß
- \vec{p}_e Elektronenimpuls nach dem Stoß
- m_e Ruhemasse des Elektrons
- θ Winkel, in dem das Photon nach dem Stoß abgelenkt wird
- ϕ Winkel, um den das Elektron gestreut wird

Durch die Tatsache das die Bindungsenergie des Elektrons wesentlich kleiner als die Energie des Photons ($eV \ll MeV$) ist kann man das Elektron als in Ruhe und damit ohne Impuls betrachten. Der Gesamtimpuls vor dem Stoß steckt dann vollständig im Impuls des Photons. Durch Impulserhaltung folgt dann:

$$\vec{p}_e = \vec{p}_1 - \vec{p}_2 \quad (3)$$

Durch quadrieren und Anwenden der Definition des Skalarprodukts

$\vec{a}\vec{b} = |\vec{a}||\vec{b}|\cos\theta$ folgt:

$$p_e^2 = p_1^2 + p_2^2 - 2p_1 p_2 \cos\theta \quad (4)$$

Da im gesamten Prozess auch die Energie erhalten sein muss gilt weiterhin:

$$\vec{p}_1 c + m_e c^2 = \vec{p}_2 c - \sqrt{(m_e c^2)^2 + p_e c^2} \quad (5)$$

$$\Rightarrow -(p_2 - p_1)c + m_e c^2 = \sqrt{(m_e c^2)^2 + p_e^2 c^2} \quad (6)$$

Durch quadrieren und umstellen erhält man einen weiteren Ausdruck für p_e^2

$$p_e^2 = (p_2 - p_1)^2 - 2(p_2 - p_1)m_e c \quad (7)$$

Setzt man nun (2) in (5) ein erhält man:

$$(p_2 - p_1)^2 - 2(p_2 - p_1)m_e c = p_1^2 + p_2^2 - 2p_1 p_2 \cos\theta \quad (8)$$

$$p_2^2 + p_1^2 - 2p_1 p_2 - 2(p_2 - p_1)m_e c = p_1^2 + p_2^2 - 2p_1 p_2 \cos\theta \quad (9)$$

$$-2p_1 p_2 - 2(p_2 - p_1)m_e c = -2p_1 p_2 \cos\theta \quad (10)$$

$$-m_e c(p_2 - p_1) = p_1 p_2(-\cos\theta + 1) \quad (11)$$

$$(p_2 - p_1) = \frac{p_1 p_2}{m_e c}(1 - \cos\theta) \quad (12)$$

Nun wird der Impuls mit Hilfe der DeBroglie Wellenlänge $p = h/\lambda = \frac{h}{c}\nu$ über die zugehörige Frequenz ausgedrückt.

$$(\nu_2 - \nu_1) = \frac{h}{c} \frac{\nu_1 \nu_2}{m_e c} (1 - \cos\theta) \quad (13)$$

$$\frac{(\nu_2 - \nu_1)}{\nu_1 \nu_2} = \frac{h}{m_e c^2} (1 - \cos\theta) \quad (14)$$

$$\frac{1}{\nu_1} - \frac{1}{\nu_2} = \frac{h}{m_e c^2} (1 - \cos\theta) \quad (15)$$

$$\frac{1}{c}(\lambda_1 - \lambda_2) = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta) \quad (16)$$

$$\Rightarrow \Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta) \quad (17)$$

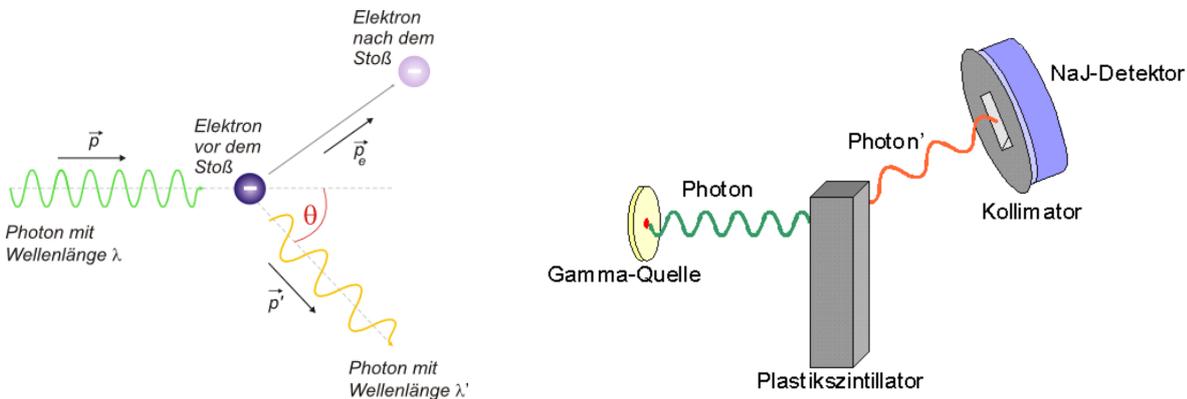


Abbildung 2: Compton-Effekt: Schematische Darstellung der Streuung (links) mit dem Streuwinkel ϑ und Skizze zum Versuchsaufbau (rechts).

Abb. 3 zeigt für die drei Wechselwirkungen den Abschwächungskoeffizienten μ als Funktion der eingestrahnten Photonenenergie, welcher als Maß für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Wechselwirkung gelten kann.

2 Versuchsaufbau

In diesem Versuch wird der Comptoneffekt durch einen Natrium-Iodid-Szintillator und einen Plastikszintillator detektiert. Die Photonenquelle wird durch Gamma-Präparate unterschiedlicher Wellenlänge bereitgestellt. Besonders an diesem Versuchsaufbau (siehe Abb. 2, rechts) ist die Detektion mittels "aktiven Streuer", dem Plastikszintillator, womit sich der Comptoneffekt ereignisweise untersuchen lässt. Dafür wird neben der Energie und dem Streuwinkel des gestreuten Photons auch die Energie des rückgestreuten Elektrons gemessen, welches im Plastikszintillator stecken bleibt und seine

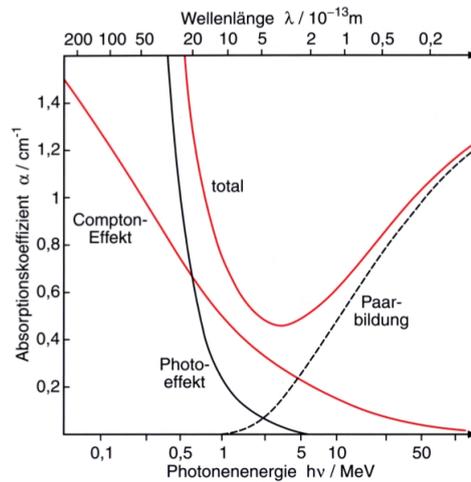


Abbildung 3: Abschwächungskoeffizient μ über der Dichte ρ in Abhängigkeit der eingestrahelten Photonenenergie E_γ . Die durchgezogene Linie ergibt sich als Summe der drei verschiedenen Wechselwirkungen.

Rückstoßenergie dort deponiert. Für die elektronische Auswertung wird hierfür eine sogenannte Koinzidenzschaltung verwendet. Mit ihr lassen sich die detektierten Signale beider Detektoren zu einem Ereignis messen. Um dies zu gewährleisten, müssen die Signale der beiden Detektoren im gleichen Zeitintervall auftreten. Hierfür kommen sogenannte Delay-Boxen zum Einsatz. Diese verzögern ein zu früh am Auslesegerät ankommendes Signal so, dass es mit einem später ankommenden zeitlich interferiert.

3 Verwendete Elektronik

In diesem Abschnitt sollen die zur Versuchsdurchführung notwendigen Detektoren und Elektronik-Module diskutiert werden.

3.1 Photomultiplier

Ein Photomultiplier dient zur Verstärkung sehr schwacher Lichtpulse. Die auf die Photokathode eintreffenden Photonen schlagen dort via Photo-Effekt Elektronen aus. Diese werden dann durch ein elektrisches Feld zu den Sekundärelektroden hin beschleunigt. Durch die Beschleunigung erhalten die Primärelektronen genug Energie, um weitere Elektronen auszulösen. Dieser Prozess wird nun mehrere Male wiederholt, wobei zwischen jeder Sekundärelektrode eine andere Spannung herrscht. Haben die Elektronen die gesamte Kaskade von Dynoden durchlaufen, realisieren sie einen Verstärkungsfaktor von $k \approx 10^5$ relativ zum einfallenden Elektron. Diese Verstärkung ist nun ausreichend, um ein elektrisches Signal zu detektieren.

3.2 Szintillationsdetektoren

Szintillationsdetektoren werden eingesetzt, um die Energie von einfallenden Photonen zu messen. Hierbei wechselwirkt das Photon mit dem Szintillatormaterial über einen der drei o.g. Prozesse. Das Detektormaterial besteht im Falle von NaI (d.h. einem anorganischen Szintillator) aus einem Kristall mit dotierten Aktivator-Zentren. Die Energie eines γ -Quant's kann zum Beispiel über den Photoeffekt an ein Elektron des Detektormaterials übertragen werden. Da diese Energie meist wesentlich höher als die Bindungsenergie des Elektrones ist, wird dieses aus dem Atom herausgeschlagen

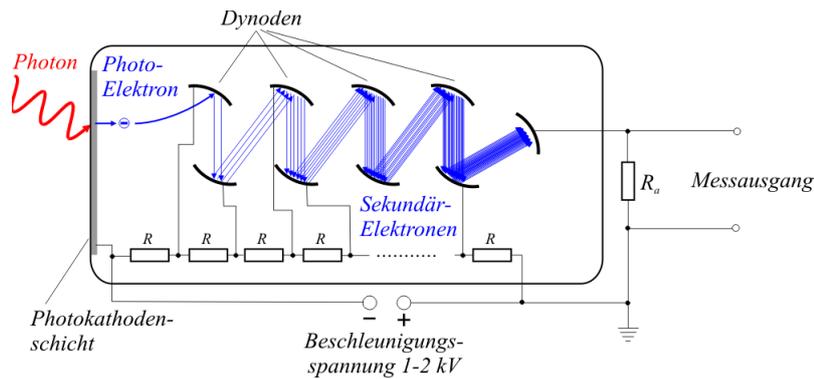


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Photomultipliers.[8]

und regt die Dotierzentren des Materials an welche nach Abregung Photonen freisetzen. Natürlich tritt auch der Compton-Effekt im Szintillatormaterial auf. Hierbei ist es möglich, dass das abgelenkte Gammaquant dem Detektor entweicht und nur die Energie des Elektrons detektiert wird, welche in folgender Formel beschrieben ist und auch im Versuch detektiert wird.

$$E'_e(\theta) = E_\gamma - E'_\gamma = E_\gamma \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos\theta)} \right) \quad (18)$$

Das im Versuch aufgenommene Energiespektrum kann bei genügend hoher Energieauflösung verschiedene Strukturen enthalten (siehe Abb. 5).

- Die Energie des gestreuten Photons ist vom Streuwinkel abhängig. Da im Detektor viele dieser Prozesse statistisch stattfinden, spricht man auch über das Compton-Kontinuum.
- Beim Photopeak wird die gesamte Energie des Photons über den Photoeffekt abgegeben, Die Lage des Photopeaks entspricht der Photonenenergie der radioaktiven Quelle und wird zur Energiekalibration benutzt.
- Im Falle von Paarerzeugung $\gamma \rightarrow e^+ e^-$ gibt es zwei Möglichkeiten:
 - Eines der beiden Leptonen entweicht. Im Detektor wird nur $E_\gamma - 511 \text{ keV}$ registriert. Der im Spektrum auftauchende Peak wird **Single-Escape-Peak** genannt.
 - Beide Leptonen entweichen. Im Detektor wird nur $E_\gamma - 2 \times 511 \text{ keV}$ registriert. Der entsprechende Peak wird **Double-Escape-Peak** genannt.
- Durch die Kinematik der Compton-Streuung gibt es eine maximale Energie des Compton-Kontinuums, welches auch „Compton-Edge“ genannt wird und bei

$$E'_\gamma = \frac{2E^2}{m_e c^2 + 2E} \quad (19)$$

liegt.

3.3 NIM-Modul

NIM steht hier für Nuclear Instrumentation Modul. Dies sind modulare Systeme die speziell für Nuklear- und Hochenergiephysik entwickelt wurden und zur Stromversorgung der eingebauten Geräte dienen. Die einzelnen Bauteile sollen nun kurz erklärt werden.

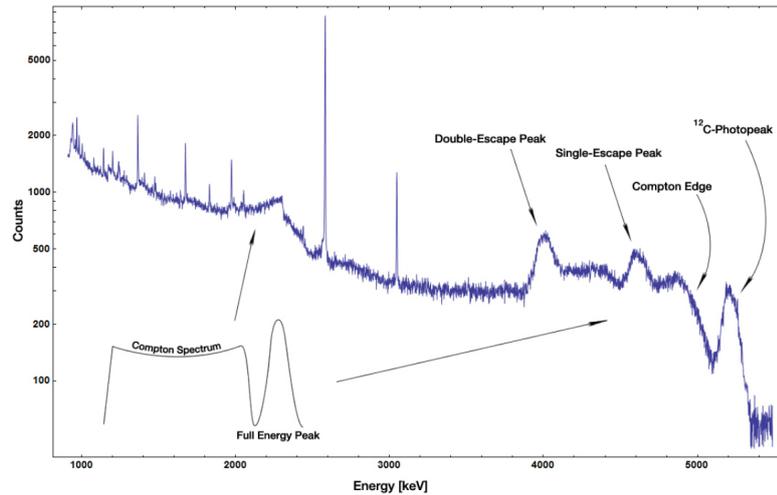


Abbildung 5: Beispiel eines Compton-Energiespektrums. Quelle: Wikipedia.

3.3.1 Passive Splits

Erlauben die Aufteilung eines Eingangssignals in zwei Ausgangssignale realisiert durch eine Sternschaltung. Passiv bedeutet, dass keine zusätzliche Spannung zugeführt wird, und deswegen die Signalamplituden sich um einen Faktor 2 reduzieren.

3.3.2 Verstärker

Verstärkt das Ausgangssignal des NaI-Detektors um Faktor ≈ 15 , bevor es an die restliche Elektronik weitergeleitet wird.

3.3.3 Constant-Fraction-Discriminator (CFD)

Ein Diskriminator dient dazu, analoge Signale in digitale Signale umzuwandeln.

Der einfachste Ansatz, realisiert in einem sogenannten Leading-Edge-Diskriminator (LED), ist, dass das analoge Signal bei Überschreiten einer bestimmten Schwelle der Anstiegsflanke ein wohldefiniertes logisches Signal einstellbarer Länge erzeugt. Diese Technik führt jedoch zu einer Zeitunschärfe, der „Jitter“ genannt wird, da der Zeitpunkt der Schwellenüberschreitung t_0 für analoge Signale unterschiedlicher Amplituden A unterschiedlich ist. Der Zusammenhang zwischen t_0 und A wird auch „Walk“ genannt (Abb. 6, links).

Um den Jitter zu reduzieren, wird beim sogenannten Constant-Fraction-Diskriminator (CFD) wird das originale, analoge Signal (1) um eine feste Zeit verzögert, (2) in der Amplitude verändert und (3) invertiert (Abb. 6, rechts). Das so erhaltenen Signale wird vom originalen Signal subtrahiert. Der Nulldurchgang des kombinierten Signals hat üblicherweise einen um einen Faktor ≥ 10 kleineren Jitter als ein LED.

3.3.4 AND Logik

Dieser Teil des NIM-Moduls bildet aus zwei Eingangssignalen ein logisches UND d.h. es gibt dem Ausgang eine „1“ wenn beide Eingänge „1“ sind und „0“ sonst. Der Ausgang kann auch invertiert werden, dann spricht man von einem NAND. Das Modul beinhaltet insgesamt vier UND-Schaltungen welche sich alle per Schalter auf OR stellen lassen, also ein logisches ODER welches dem Ausgang eine „1“ gibt wenn einer der Eingänge auf „1“ ist.

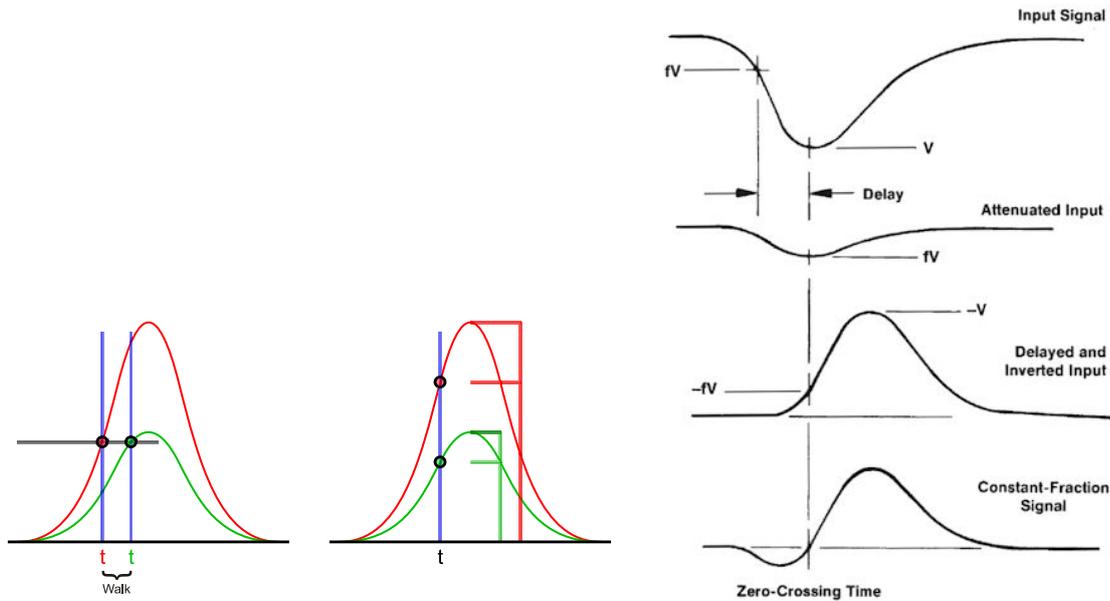


Abbildung 6: Prinzip von Diskriminatoren: LED (links), mit Prinzip des Walk-Effekts bei Detektion per Schwellenwert, und Prinzip der Signal-Detektion CFD (rechts).

3.3.5 Hochspannungsmodule

Diese Module liefern eine einstellbare Hochspannung (bis maximal etwa 1500 V) für die Photomultiplier des Plastikszintillators und des NaI-Detektors (im Versuch jeweils $\simeq 1150$ V und $\simeq 1000$ V).

3.3.6 NIM-TTL Konverter

Dieses Modul wandelt Signale mit NIM-Pegel in TTL-Signale um. TTL steht hier für Transistor-Transistor-Logik, welche die logische "1" oder "0" über Spannungswerte definiert und nicht wie ein NIM über Stromwerte.

3.3.7 Zähler

Das Zählermodul besteht aus zwei einzelnen Zählern, die kaskadiert betrieben werden. Der obere Zähler zählt von 0 bis 999, während der untere den Überlauf des oberen (also die Tausender) zählt. Im Versuch wird die Anzahl der Streuungen im Plastikszintillator gemessen, d.h. vor der Koinzidenz. Der Grund ist, dass auf diese Art und Weise die gemessenen Zählraten auf Totzeit durch die Datenerfassung (s.u.) korrigiert werden können, welches für einen korrekten Vergleich mit der Klein-Nishina-Formel für den Wirkungsquerschnitt notwendig ist.

3.4 CAMAC-Modul

Ein CAMAC-Modul (Computer Automated Measurement And Control) ist ein Bussystem zur Datenerfassung, was vornehmlich in der Kern- und Teilchenphysik eingesetzt wird. Der Datenaustausch zwischen den einzelnen Modulen im CAMAC findet über den Datenbus statt, welcher auch eine Verbindung zum Crate-Controller herstellt. Dieser stellt die Schnittstelle zum PC her, an dem die Daten letztlich angezeigt werden. Auch hier sollen die einzelnen Bauteile kurz erklärt werden.

3.4.1 TDC

Das Time-to-Digital-Converter Modul mißt die Zeit zwischen einem Start Signal und entweder acht einzelnen Stop Signalen oder einem gemeinsamen Stop Signal. In diesem Versuch wird lediglich das gemeinsame Stop Signal verwendet, um den zeitlichen Abstand zwischen den Signalen der beiden Detektoren zu messen.

3.4.2 QDC

Der Charge-to-Digital-Converter (QDC) ist ein ladungintegrierender ADC (Analog-Digital-Converter), wobei Ladung proportional zum freigesetzten Szintillationslicht, und damit zur Photonenenergie E_γ , im NaI-Detektor sein sollte. Das Modul mißt die Ladung an maximal acht Eingängen. Die Integrationszeit wird über ein digitales Signal am sogenannte „Gate“-Eingang vorgegeben.

3.4.3 Gate Generator

Dieses Modul erzeugt aus einem kurzen Eingangspuls ein langes Ausgangssignal von wohldefinierter Länge, die unabhängig von der Dauer des Eingangssignals ist. Dieses Signal wird als VETO auf die Koinzidenzeinheit gesteckt, um sicherzustellen, dass während einer Zeit $\tau=34$ ms keine weiteren Koinzidenzen akzeptiert werden. τ ist dabei jene Zeit, welcher der QDC benötigt, um die Ladung zu integrieren und auf der CAMAC-Backplane die Daten bereit zu stellen und kann somit als Totzeit der Datenaufnahme interpretiert werden. Diese Totzeit muss über den Zähler (auf den dieses Signal nicht nicht als VETO gegeben wird) hinterher korrigiert werden, um die korrekte Zählrate zu erhalten, die mit dem Klein-Nishina-Wirkungsquerschnitt dann übereinstimmt.

3.4.4 CAMAC Crate Controller

Der CAMAC Crate Controller ist die zentrale Prozessoreinheit im CAMAC-Überrahmen und kommuniziert mit dem PC über Ethernet. Über ihn wird der Gategenerator programmiert, und das QDC- und TDC-Modul über die CAMAC-Backplane ausgelesen.

3.5 Delay-Box

Es ist an verschiedenen Stellen notwendig die analogen und digitalen Signale zu verzögern, z.B. damit Signale, die direkt an ein bestimmtes Modul gehen, andere Signale, die evtl. durch mehrere andere Module geleitet werden nicht "überholen". Hierfür werden zwei sogenannte Delay Boxen verwendet, in denen Koaxialkabel mit verschiedenen Verzögerungszeiten integriert sind.

4 Datenaufnahmesoftware

Die Software zur Datenaufnahme und Datenanalyse läuft auf einem PC unter den Betriebssystemem Linux und X11 Windowsoberfläche. Der PC ist mit einer ISA-Karte ausgestattet, die zusammen mit dem CAMAC Crate-Controller ein Interface zwischen der Datenaufnahmesoftware und den CAMAC Modulen darstellt. Die Software besteht aus zwei Teilen:

- Datenaufnahme: Empfängt die Daten der TDC- und QDC-Module und inkrementiert damit verschiedene ein- und zweidimensionale Spektren in einem globalen Shared-Memory-Datenpuffer.
- Datenanalyse: liest die Daten auf Shared-Memory-Datenpuffer und erlaubt z.B. die Bestimmung der Energie des Comptonpeaks über den Fit mit einer Gaussverteilungsfunktion.

5 Versuchsdurchführung

5.1 Überprüfung der elektronischen Schaltung

Gehen Sie alle Kabel anhand von Abb. 9 Schritt für Schritt durch, und setzen Sie alle Delay-Werte in die blauen Textboxen in Abb. 9 ein. Bitte dem Protokoll beifügen.

5.2 Energieeichung

Da zunächst nicht bekannt ist welche Energie einer bestimmten Kanalzahl entspricht, muss eine Energieeichung vorgenommen werden. Dies muß allerdings nur für den NaI-Detektor gemacht werden, da dieser die gestreuten (interessanten) Photonen mißt. Dazu wird die Lage der Photopeaks in den Energiespektren von verschiedenen Gammaquellen bekannter Energie bestimmt:

- ^{137}Cs ($E_\gamma=662$ keV)
- ^{22}Na ($E_\gamma=511$ keV, 1275 keV)
- ^{54}Mn ($E_\gamma=835$ keV) (optional)
- ^{60}Co ($E_\gamma=1173$ keV, 1333 keV) (optional)

In Abb. 7 ist die radioaktive ^{137}Cs -Quelle dargestellt. Beim Umgang mit radioaktiven Quellen ist Vorsicht geboten: die Quelle möglichst weit entfernt vom Körper halten (Dosis als Funktion des Abstandes ist $\propto 1/r^2$) und nach der Handhabung die Hände waschen.

Zu diesem Zweck muß die Koinzidenzschaltung ausgeschaltet werden, indem man das AND auf OR stellt und den Eingang des Plastik-CFDs herauszieht. So werden nur Ereignisse im NaI-Detektor gemessen. Die Verstärkung des NaI-Signals soll so eingestellt werden, daß der Photopeak der ^{54}Mn -Quelle am rechten Rand des Spektrums liegt. Dies ist auf den beiden folgenden Abbildungen dargestellt.

Alternativ (weil die ^{54}Mn -Quelle sehr schwach ist) kann auch das Spektrum der ^{60}Co -Quelle betrachtet und die Verstärkung so eingestellt werden, daß die 1173 keV Linie aus dem rechten Rand verschwindet. Es können danach nur noch zwei Photopeaks (Cs, Na-511 keV) gemessen werden. Die übrigen Linien sind jedoch nicht interessant, da ihre Energie in Bereichen liegt, in denen auch Paarbildung möglich ist und diese die Messung verfälschen würde.

Ein dritter Meßpunkt ist das sogenannte "Pedestal", d.h. der Wert, den der QDC liefert, wenn kein Eingangssignal vorliegt. Man erhält diesen Wert am einfachsten aus Ereignissen, bei denen nur der Plastikszintillator ein Signal hatte. Hierbei ist es jedoch keine gute Idee, den Analogeingang des QDC herauszuziehen, da man damit die elektrischen Eigenschaften der Schaltung verändert und einen falschen Wert mißt. Man erhält allerdings auch ein Gate am NaI-QDC, indem man AND auf OR stellt. An jeden gemessenen Peak wird eine Gauss-Funktion angefitet, deren Mitte den Kanal für die Energieeichung angibt. Die Eichpunkte werden in ein Diagramm eingetragen und sollten eine Gerade ergeben.

Leider ist diese Energieeichung nicht langzeitstabil. Temperaturschwankungen können zu Veränderungen der Pulshöhen führen. Daher sollte auf eine möglichst konstante Raumtemperatur achten (Tür zu, Fenster zu).

5.3 Messung der 180° -Streuung

Es wird die Energie der um $\vartheta=180^\circ$ zurückgestreuten Photonen für die ^{137}Cs - und die ^{54}Mn -Quelle gemessen und über

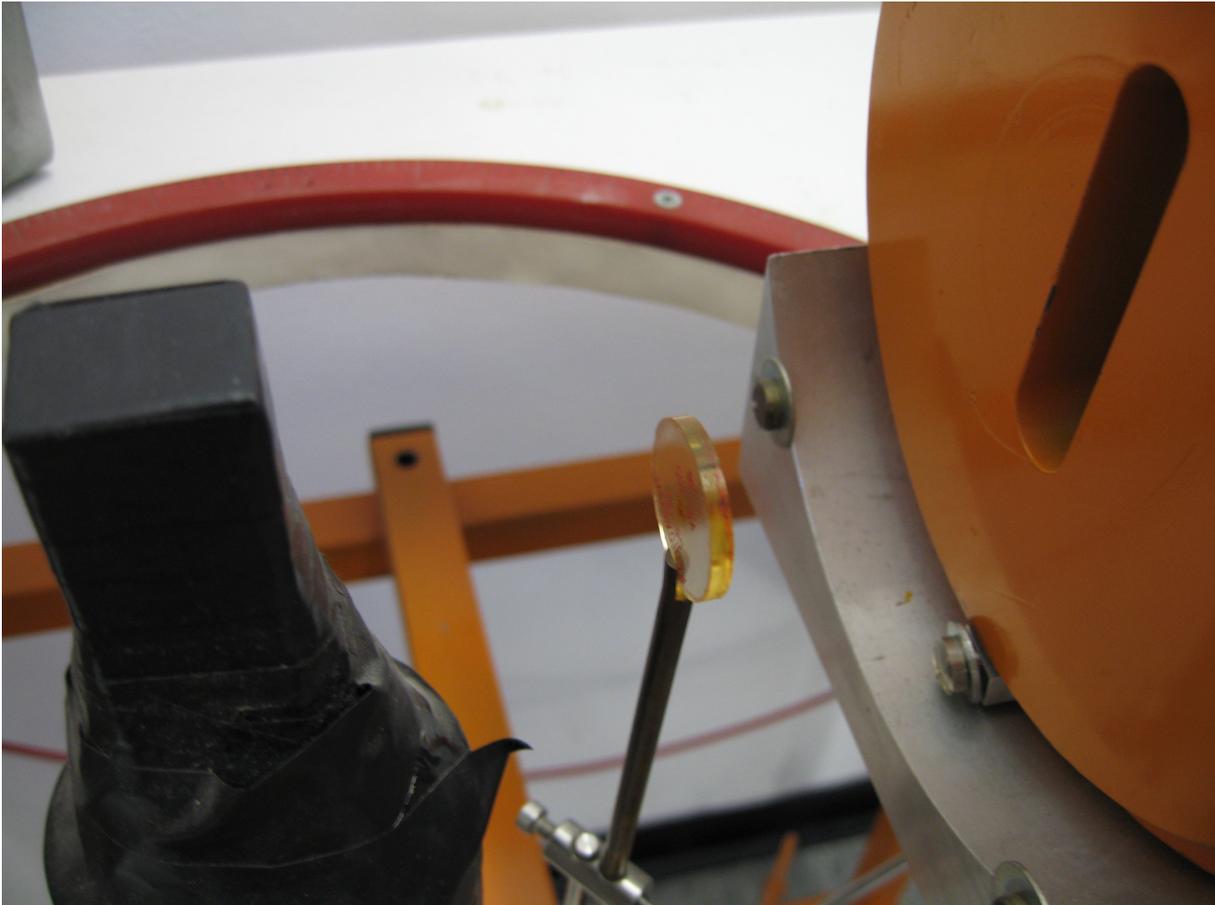


Abbildung 7: Radiaktive Quelle (hier: ^{137}Cs). Die radioaktive Substanz befindet sich in der Mitte, umhüllt von Plastik, welches im Laufe der Jahre durch die Strahleneinwirkung die Transparenz verliert.

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\Theta) \stackrel{\Theta=180^\circ}{=} \frac{2h}{m_e c} \quad (20)$$

die Comptonwellenlänge des Elektrons bestimmt. Da hier der Wirkungsquerschnitt am kleinsten ist, dauert die Messung am längsten. Daher ist es sinnvoll, die Messung über die Mittagspause durchzuführen.

5.4 Messung der Comptonwellenlänge als Funktion des Streuwinkels

Für eine Gammaquelle (^{137}Cs) wird für verschiedene Winkelstellungen ($\vartheta=40^\circ, 60^\circ, 80^\circ, 100^\circ, 120^\circ, 140^\circ, 160^\circ$ und 180°) die Energie der gestreuten Photonen bestimmt. Da bei der Auswertung später die Anzahl der Ereignisse für jeden Winkel verglichen wird, muss entweder die Meßzeit für alle Winkel gleich sein, oder aber die Anzahl der Primärelektronen mit dem Zählermodul gemessen werden. Da die Primärrate der Gammaquelle im Mittel konstant ist, können die gemessenen Ereignisse für jeden Winkel später anhand der jeweiligen Zählerwerte normiert werden. Die Auswertung besteht aus zwei Punkten:

- Die Energie der Photonen soll als Funktion des Streuwinkels aufgetragen werden.
- Es sollte sich eine Gerade ergeben, aus deren Steigung man die Elektronenruhemasse berechnen kann. Die Anzahl der Ereignisse soll als Funktion von Theta aufgetragen werden. Hierbei ist

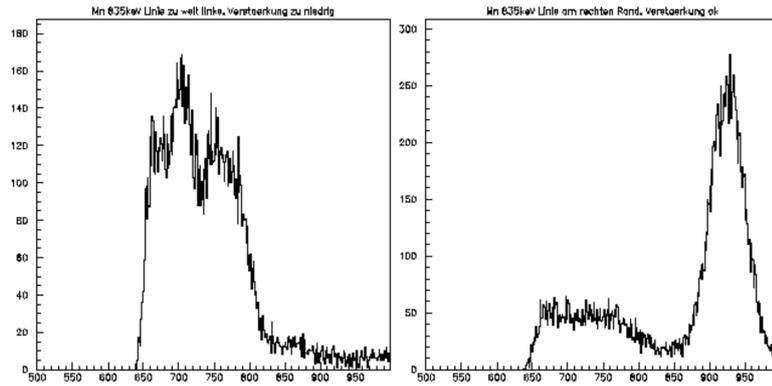


Abbildung 8: Gemessenes ADC Spektrum bei zu niedriger (links) und korrekter Verstärkung (rechts) Photopeak am rechten Rand.

oben angesprochene Normierung zu beachten! Die aufgetragenen Werte sollten dann proportional zum differentiellen Wirkungsquerschnitt sein. Die so gefundene Winkelabhängigkeit soll dann mit der theoretisch erwarteten Klein-Nishina-Formel

$$\frac{d\Omega}{d\sigma} = \frac{r_0^2}{2} \frac{1 + \cos^2\Theta}{(1 + \alpha(1 - \cos\Theta))^3} \left(1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\Theta)^2}{(1 + \cos\Theta)^2(1 + \alpha(1 - \cos\Theta))} \right) \quad (21)$$

verglichen werden (hierbei ist $\alpha = \frac{E_\gamma}{m_e c^2}$).

5.5 Überprüfung der Energieerhaltung

Die Energieerhaltung im einzelnen Ereignis kann dadurch verifiziert werden, daß man für eine Einlinien-Quelle (z.B. ^{54}Mn) ein zweidimensionales Spektrum (QDC-Nal gegen QDC-Plastik) für verschiedene Streuwinkel aufnimmt. Dabei sollten die Meßwerte näherungsweise auf einer Geraden liegen. Der Compton-Effekt liefert hier den Beweis, daß die Erhaltungssätze von Energie und Impuls bei diesen einzelnen atomaren Prozess gelten, und nicht nur im Mittel. In der modernen Physik ist diese Energieerhaltung sehr wichtig, z.B. könnte die Energieerhaltung bei Prozessen mit sogenannter dunkler Materie verletzt sein. Diese Messung ist nur optional.

6 Bedienung der Datenerfassungs- und Datenanalysesoftware

1. auf dem Linux System (PC) die Prozesse (d.h. Datenproduzent und Datenkonsument) starten:

- in Verzeichnis /home/cprak/rootfiles ein Verzeichnis erstellen, in dem die Daten gespeichert werden
- in Verzeichnis /home/cprak/compton/compton:
 - ./producer_loop.sh (startet den Producer-Prozess)
- neue shell öffnen (in Verzeichnis compton/compton), dann in dieser Shell:
 - ./myroot.sh starten (startet root-Umgebung mit Consumer-Prozess)
- neue shell öffnen (in Verzeichnis compton/compton), dann in dieser Shell:
 - ./mygui2.sh starten

Diverse Fenster öffnen sich dann und stellen das sogenannte GUI (Graphical User Interface) zur Steuerung dar.

2. CAMAC Controller initialisieren

Controller Script laden und starten:

in GUI#1:

compton.lua laden dann „start“

Producer muß jetzt Teststring empfangen.

Wenn nicht: reset Controller, warten und script neu laden

3. Messungen start/stop

- Neue Messung START:

Im GUI#1 (./myroot.sh):

stop script (insbesondere, falls Messung vorher lief)

reset (insbesondere, falls Messung vorher lief)

load lua file: compton.lua

dann ca. 5 Sekunden warten

Anzahl der Events setzen (z.B. 10000)

Anzahl der Events für Histogram-Draw setzen (z.B. 100)

dann start und read data ganz schnell hintereinander klicken
und checken, ob der Zähler für die Normierung läuft

- Messung STOP

Im GUI#2 (./mygui2.sh):

pause lua

redraw=100000

- Messung speichern:

im GUI#1 (myroot.sh):

save rootfile

- neues Fenster geht auf
- Dateiauswahl: Ordner mit Datum von heute
- .root an den Dateinamen anhängen!
- click "save"

Im GUI#1 (myroot.sh):

reset

4. Messungen

- **Teil A:** Eichmessungen

Am Anfang: Cs (180°), Na (180°), Pedestal (Cs bei 0°)

An Ende: Cs (180°)

für jede Probe:

stop

(zwischen stop und start etwas warten (2 Sek))

Koinzidenz ausschalten!

dann Probe einsetzen

start

Wenn in Producer Fenster kein „hello from Jenet“:
Producer mit Strg-C beenden und neu starten,
dann „reset camac controller“
read data (beim ersten mal nur 10 daten lesen)
(Wenn Name des Spektrums (NaI, Plastic) nicht erscheint,
wird er angezeigt nachdem man mit linker Maustaste das Histogramm anklickt)
dann
read data mit höherer Anzahl (zeichnen braucht viel Zeit)

- **Teil B: Winkelmessungen**

in GUI:

stop

reset (reset Plastic-NaI vor erster Winkelmessung (und nur da) abhaken)

Koinzidenz einschalten!

Counter NIM Modul: reset counter,

time base auf „extern“ stellen, auf „count“ stellen

in GUI: start (Counter muß jetzt loslaufen)

read data (erstmal 10, um zu sehen, ob die Messung korrekt startet)

wenn genug Daten:

save root file (.root an dateiname anhängen)

- **Fitten und Zählrate eintragen – von vorher gespeicherten Histogrammen:**

in neuer Shell:

`./root.sh`

`.x fit.C`

in „fit“ Fenster:

Browser

Histogramm öffnen

Histogramm (5-3) mit mittlerer Maustaste anklicken

fitten

dann Fenster mit Fitparameter größer ziehen

bei Winkelmessung: Zählrate und Winkel in Textfeld eingeben, und auf Text klicken.

als .ps speichern: File- \rightarrow Save As

ACHTUNG! Zählrate auf dem Plot kann nicht mit rootfile gespeichert werden
(nur als .ps-Datei)

Vorsicht: sie verschwindet, wenn danach nochmals gefittet wird !

- **Troubleshooting:**

Wenn Producer keine Daten empfängt:

(„Script running“ , aber kein „Hello from Jenet“) : Producer mit Strg-C beenden

in compton Verzeichnis: “unlock 1”

einige Sekunden warten

dann in compton Verzeichnis: “unlock 0”

7 Vorbereitende Fragen zum Kolloquium

Zur Durchführung des Versuches ist es ratsam, die eigenen Kenntnisse über die Wechselwirkung von Strahlung und Materie, sowie über Detektoren für die Kern- und Teilchenphysik aufzufrischen. Als Literatur bieten sich u.a. folgende Bücher an:

- W. R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiment, S.50 ff, S. 149 ff
- D. H. Perkins, Hochenergiephysik, S. 39 ff
- B. Povh, Teilchen und Kerne

Mit hinreichender Vorbereitung sollten Sie in der Lage sein folgende Fragen zu beantworten:

- Was ist die typische Reichweite von Photonen mit einer Energie von etwa 1 MeV in Luft, in organischem Material, in Blei?
- Was ist ein MeV?
- Worin unterscheiden sich Elektronen und Photonen bezüglich ihrer Wechselwirkung mit Materie?
- Bis zu welchen Energien kann man Elektronen oder Photonen aus radioaktiven Quellen erhalten?
- Wie erzeugt man Teilchen höherer Energie?
- Was ist ein Wirkungsquerschnitt? Was ist ein differentieller Wirkungsquerschnitt?
- Was ist Szintillation? Wie unterscheiden sich ein organischer und ein kristalliner Szintillator?
- Was ist ein Photomultiplier?
- Wieso nimmt man in diesem Versuch Plastik als Streumedium und NaI zum Photonennachweis, und nicht umgekehrt?
- Was ist gemeint, wenn man sagt ein Kabel hat 50 Ohm Wellenwiderstand ?
- Wie schnell breiten sich Signale in Koaxialkabeln aus ?

8 Anhang

Auf den folgenden Seiten sind das Schema der Koinzidenzschaltung (Abb. 9), der Aufbau der Elektronik (Abb. 10) und einige wichtige Signale innerhalb der Schaltung, visualisiert mit dem Oszilloskop (Abb. 11), dargestellt.

9 Danksagung

Wir danken Sören Fleischer, Klemens Lautenbach, Markus Rink und Milan Wagner für Mitarbeit und Material, welches in dieser Anleitung verwendet wurde.

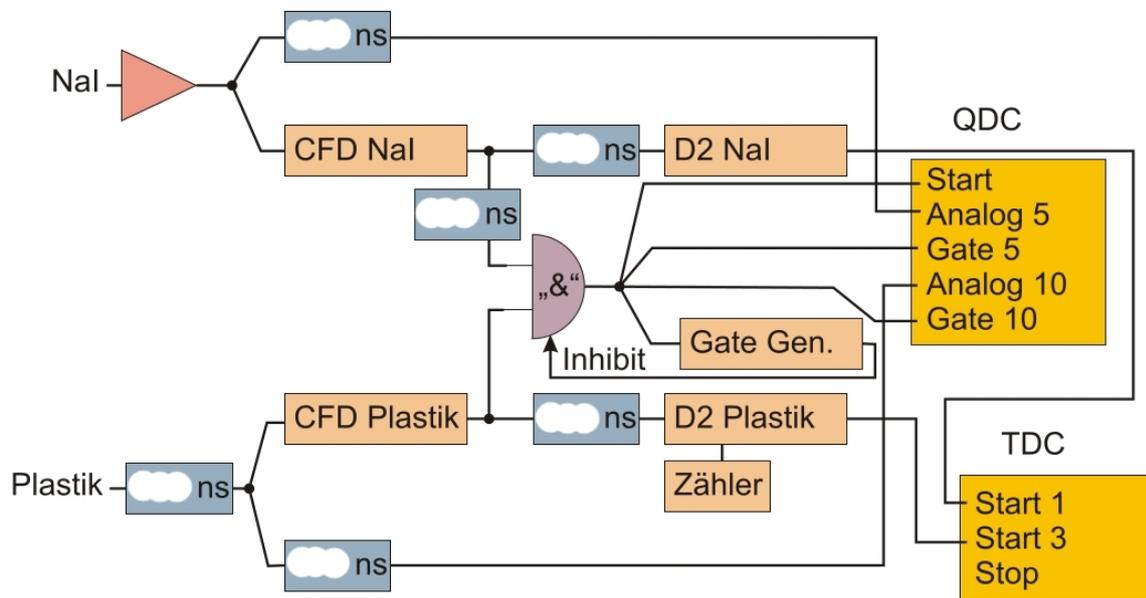


Abbildung 9: Schema der Koinzidenzschaltung.

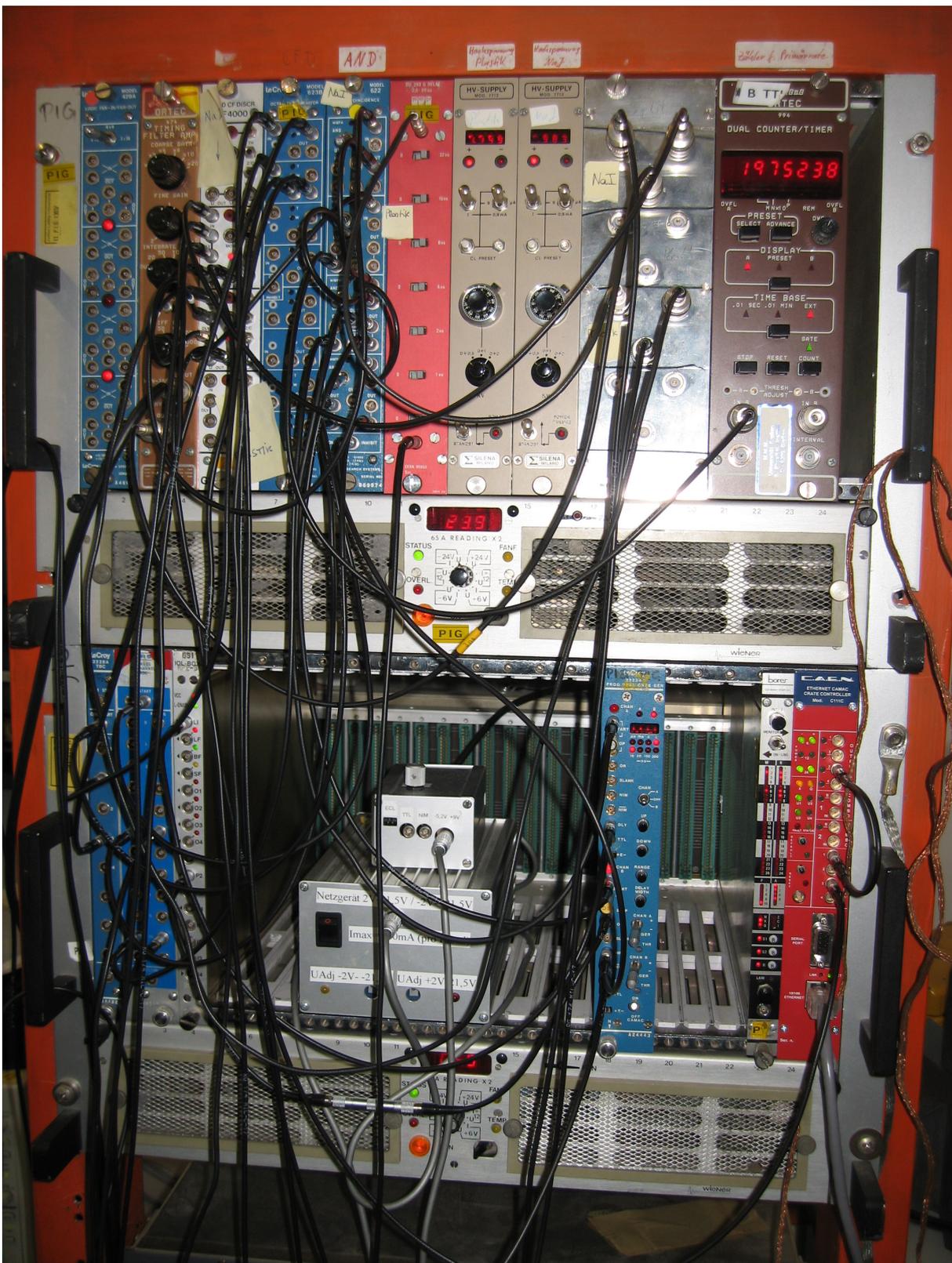
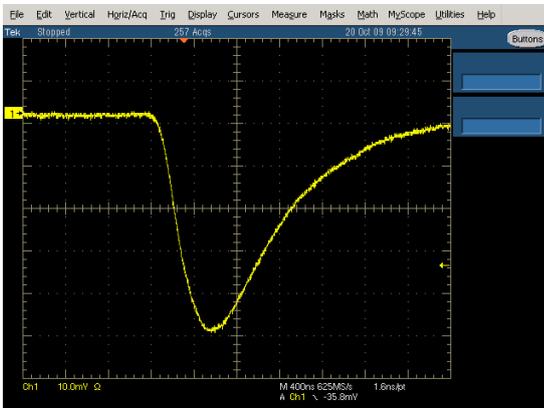
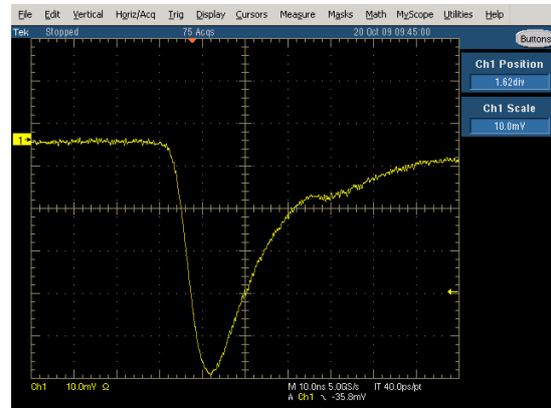


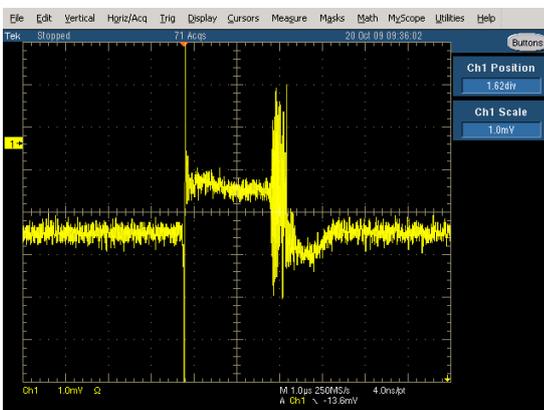
Abbildung 10: Aufbau der Elektronik (mit Koinzidenzschaltung).



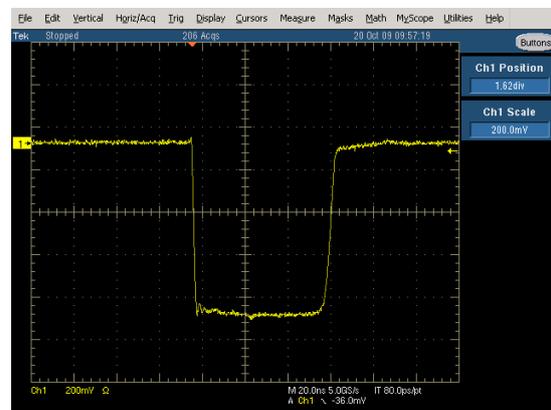
(a) Analogsignal des NaI-Detektor



(b) Analogsignal des Plastikszintillator



(c) Digitalsignal an der Ausgabe des CFD des NaI-Detektors



(d) Digitalsignal an der Ausgabe der ersten Stufe der AND-Logik.

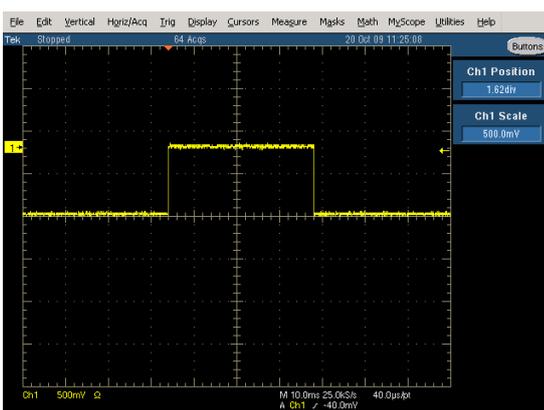
(e) Langes Digitalsignal des Gate-Generators ($\tau=34$ ms).

Abbildung 11: Wichtige Signale innerhalb der Schaltung, visualisiert mit dem Oszilloskop.