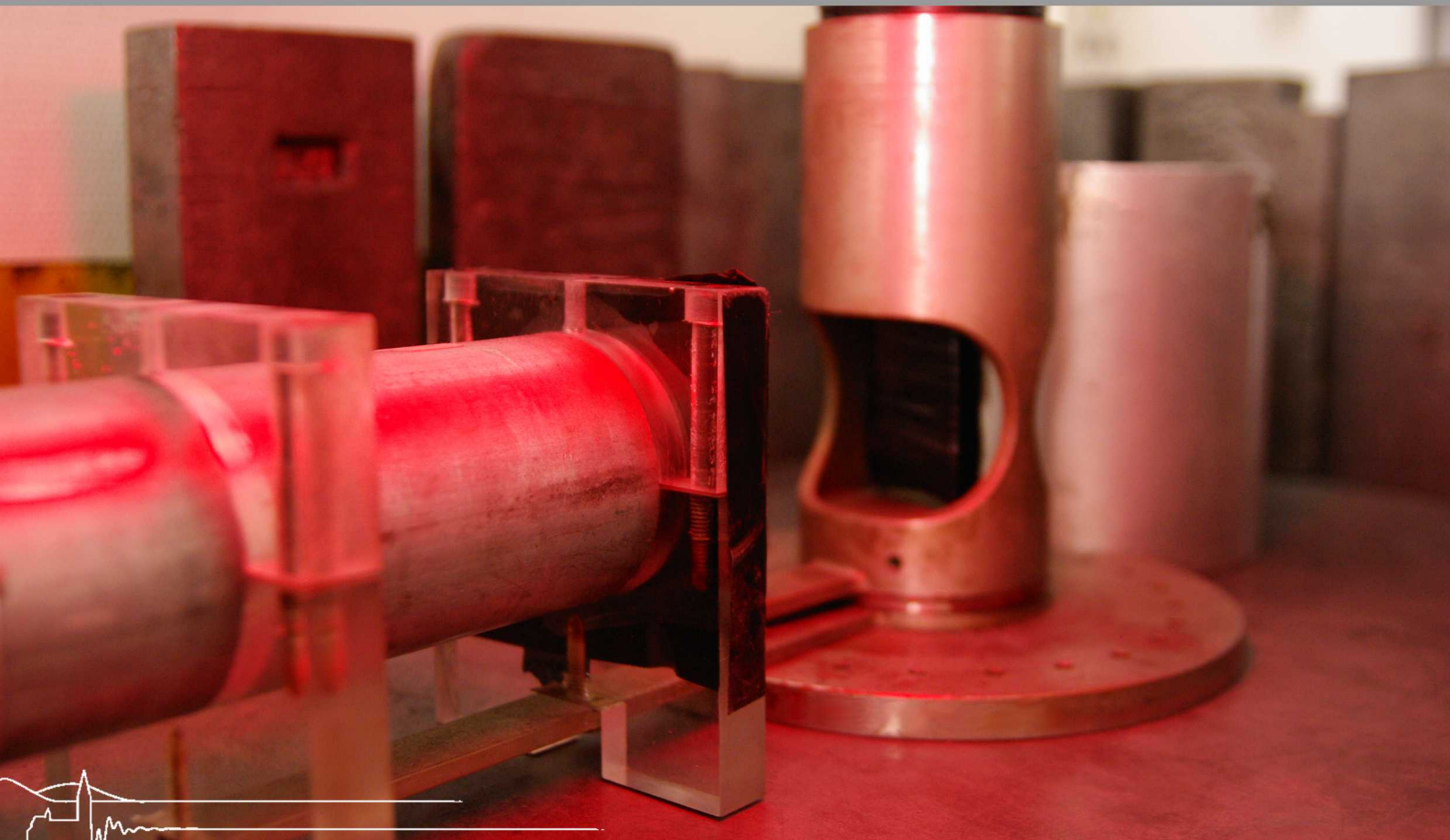




Universität Freiburg

Versuchsanleitung  
**Fortgeschrittenen  
Praktikum**  
Teil II

# Compton-Effekt



# Compton-Effekt

INSTITUT FÜR MATHEMATIK UND PHYSIK  
ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT  
FREIBURG IM BREISGAU

26. JUNI 2012

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Vorwort zum Versuch</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>1</b>
2.1	Präparat . . . . .	1
2.2	Vorkenntnisse zum Versuch . . . . .	1
<b>3</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>3</b>
<b>5</b>	<b>Versuchsbeschreibung</b>	<b>5</b>
5.1	Plastikszintillator (PS) . . . . .	5
5.2	NaJ-Szintillator . . . . .	5
5.3	Verzögerung . . . . .	5
5.4	Energieeichung . . . . .	6
5.5	Energieerhaltungssatz . . . . .	6
5.6	Wirkungsquerschnitt . . . . .	6
<b>6</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>7</b>
<b>7</b>	<b>Geräteliste</b>	<b>7</b>
<b>8</b>	<b>Literatur</b>	<b>9</b>

# 1 Vorwort zum Versuch

Als Compton-Effekt bezeichnet man einen physikalischen Vorgang, bei dem die Wellenlänge von Photonen nach der Streuung an freien Elektronen um einen Wert  $\Delta\lambda$  vergrößert wird. Der Compton-Effekt wurde zuerst von Arthur Holly Compton gefunden. Er untersuchte in seinen Experimenten die Streuung von Röntgenstrahlen an freien Elektronen. Compton zeigte 1921, dass Elektronen bei der Streuung einen Rückstoß erleiden und damit Energie absorbieren. Ein Photon besitzt nach einer solchen Streuung also weniger Energie wie zuvor.

Der Effekt war zur Zeit seiner Entdeckung ein weiterer wichtiger Hinweis für den Teilchencharakter des Lichtes, er ist von Wichtigkeit bei der Herleitung der Planck Welt.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Präparat

Das Präparat ist in einem Bleizylinder fest eingebaut und ist Bestandteil des Versuchsaufbaus. Es handelt sich um  $^{137}\text{Cs}$ , welches mit einer Halbwertszeit von  $T_{1/2} = 30 \text{ a}$  unter Emission eines Photons der Energie  $h\nu = 0,661 \text{ MeV}$  zerfällt.

### 2.2 Vorkenntnisse zum Versuch

- Aufbau und Wirkungsweise eines Szintillationsspektrometers
- Prinzipielle Funktionsweise der zur Messung benutzten Geräte
- Bedeutung linearer und logischer Pulse
- Unterschiede zwischen organischen und anorganischen Szintillatoren
- Wechselwirkung von  $\gamma$ -Strahlung und Elektronen mit Materie
- Definition und Messung des differentiellen und des totalen Wirkungsquerschnittes

### 3 Aufgabenstellung

Es sollte vor Beginn aller den Compton-Effekt betreffenden Messungen **zuerst** die komplette Beschaltung (siehe Koinzidenzen unter 'Messung' Punkt 1) aufgebaut werden, das heißt es sollen zum einen Verstärkungs- und Delay-Einstellungen gefunden werden und zum anderen der Abgleich beider Szintillatoren gründlich verifiziert werden, da ein nachträgliches Ändern der meisten Einstellungen die Energieeichung wertlos werden lässt.

#### Eichung:

1. Das direkte  $\gamma$ -Spektrum ist mit dem NaJ-Szintillator im Vielkanalanalysator unter dem Winkel  $0^\circ$  aufzunehmen. Man gebe die Lage von Photolinie, Comptonkante und Rückstreulinie an. Das Spektrometer ist mit Hilfe einer weiteren Linie ( $^{22}\text{Na}$ :  $h\nu = 0,511 \text{ MeV}$ ) zu eichen (Abszisse: Impulshöhe, Ordinate: Energie).

*Frage: Wie groß ist das Energieauflösungsvermögen (relative Halbwertsbreite der Photolinie) bei  $0,661 \text{ MeV}$ ?*

2. Das direkte  $\gamma$ -Spektrum ist mit dem Kunststoffsintillator aufzunehmen.

*Frage: Warum tritt in der Impulshöhenverteilung keine Photolinie auf?  
Warum ist die Comptonkante nicht so scharf?*

#### Messung:

1. NaJ-Szintillator und Kunststoffsintillator sind mit Hilfe der variablen Verzögerung in den Einkanalanalysatoren zeitlich abzugleichen.
2. In Koinzidenz mit den  $\begin{cases} \text{Elektronen} \\ \gamma\text{-Quanten} \end{cases}$  nehme man das  $\begin{cases} \gamma\text{-Spektrum} \\ \text{Energie-Spektrum} \end{cases}$  für verschiedene Streuwinkel im Vielkanalanalysator auf.  
Man verifiziere den Energieerhaltungssatz beim Compton-Effekt.
3. Man messe den differentiellen Wirkungsquerschnitt für Compton-Streuung und vergleiche mit der Klein-Nishina-Formel.

## 4 Versuchsdurchführung

Der grundsätzliche Aufbau besteht darin, eine Koinzidenzschaltung zwischen beiden Szintillatoren aufzubauen. Hierzu werden die Signale beider Kanäle entsprechend verstärkt und so verzögert, dass diese die Koinzidenzeinheit gleichzeitig erreichen. Zum Öffnen dieser Einheit werden definierte Normpulse benötigt. Zu diesem Zweck trennt sich der Signalweg nach dem Verstärker auf. Einerseits zu jeweils einem Einkanalanalysator hin, welcher für Signale in einem zu setzenden Fenster einen Normpuls generiert und andererseits durch das Gate jeweils zu einem Multichannelanalyzer, welcher das Spektrum der Szintillatoren erfasst.

Es muss zwischen diesen Zweigen die Verzögerung (Delay) so eingestellt werden, dass letztlich alle Signale gleichzeitig ankommen. Hierzu werden zuerst die Verzögerungen der Einkanalanalysatoren gegeneinander abgeglichen (siehe unten) und mit dem Eingang der Koinzidenzeinheit verbunden (es werden nur zwei von drei Eingängen verwendet). Anschließend werden die Verzögerungen des zweiten Zweiges, die verstärkten Signale der Photomultiplier, mit den Delay-Einheiten gemäß den Verzögerungen des ersten Zweiges eingestellt, sodass das Szintillatorsignal genau dann ankommt, wenn das Gate geöffnet wird.

### 1. und 2. Aufgabe:

Machen Sie sich vor Beginn der Messungen den Aufbau der Nachweiselektronik klar, insbesondere die Funktion der Koinzidenzeinheit und des linearen Gate.

Erstellen Sie anhand des Blockschaltbildes den Versuchsaufbau. Während Sie die Einzelbausteine der Nachweiselektronik zusammenschalten, kontrollieren Sie mit Hilfe eines Oszillographen die Amplitude, Breite und Form der Signale von Vorverstärker, Hauptverstärker, Einkanal- und Koinzidenzstufe, sowie deren Veränderung bei Variation von Verstärkung und Verzögerung.

Messen Sie insbesondere die Signalverzögerung zwischen vorderen und hinteren Ausgang des Hauptverstärkers.

Wählen Sie die Verstärkung so, dass der im Vielkanalanalysator zur Verfügung stehende Kanalbereich voll ausgenutzt wird, wobei die Impulse jedoch nicht übersteuert werden dürfen.

### 3. Aufgabe:

Man benutze ein  $^{22}\text{Na}$ -Präparat, welches zwischen die beiden Szintillationszähler gelegt wird. Die beiden  $\gamma$ -Quanten eines Elektron-Positron-Vernichtungsprozesses mit je 0,511 MeV sind stark richtungskorreliert ( $180^\circ$ ). Man erhält so eine hohe Koinzidenzrate.

Die Verzögerung der Signale zur Schaltung der Koinzidenzeinheit wird mit den Delays in den Einkanalanalysatoren (TSCA) eingestellt. Die analogen Signale aus dem hinteren Hauptverstärkerausgang können, gegebenenfalls, mit den vorhandenen Delayeinheiten weiter verzögert werden.

Die Gleichzeitigkeit der Signale kann qualitativ mit dem Oszilloskop überprüft werden. Zur quantitativen Kontrolle steht ein Hex-Scaler zur Verfügung<sup>1</sup>. Je nach Einstellung der Fenster werden so Koinzidenzraten oberhalb von 60 Ereignissen pro Sekunde erwartet.

Es sollte ebenfalls mit dem Oszilloskop überprüft werden, dass das verzögerte Signal der Verstärker mit dem Maximum innerhalb des Gates liegt. Beachten Sie beim Einstellen der Verzögerung, dass für beide Zweige die Verzögerung zwischen linearem und verzögerten Signal nur so groß ist, dass auch kleine Impulse, die ihre maximale Amplitude zeitlich eher erreichen als höhere Impulse, in voller Höhe registriert werden.

Da die Koinzidenzeinheit nur über ein Gate verfügt, wird das Signal des zweiten Szintillators mit einem weiteren Gate verarbeitet. Hierzu wird der (Gate-)Schaltausgang der Koinzidenzeinheit (unten links) dazu verwendet, das zweite Gate zu öffnen.

<sup>1</sup>Dieser zählt nur Pulse negativer Polarität. Der zusätzliche TSCA kann hier verwendet werden, um aus rein positiven Signale negative zu generieren.

Es stehen zwei Vielkanalanalysatoren zur Verfügung. Bei dem einen handelt es sich um einen USB-MCA (Multiport II, Kanal Nummer 1 verwenden), der zweite befindet sich als Steckkarte im Rechner (schwarzer Eingang).

Für die Messung in Koinzidenzschaltung werden beide TSCA-Kanäle aktiviert (Schalter oberhalb der Eingänge). Da zur Eichung der komplette Signalweg inklusive Koinzidenzeinheit vorhanden sein muss, werden die Spektren der Quellen so erfasst, dass jeweils nur der Kanal der Koinzidenzeinheit aktiviert wird, dessen Szintillatorspektrum erfasst werden soll.

#### 4. und 5. Aufgabe:

Aufgabe 4 und 5 werden zusammen gemessen und sollten möglichst am selben Tag abgeschlossen werden, um nicht Energieverschiebungen in der Elektronik ausgeliefert zu sein.

Man nehme zunächst für jeden Winkel bei offenen Einkanalanalysatoren im Vielkanalanalysator das Elektronen- beziehungsweise  $\gamma$ -Spektrum bei eingeschalteter Koinzidenz auf, notiere sich Lage und Breite des Peaks im NaJ-Spektrum und setze dann die Schranken des (NaJ-)Einkanalanalysators auf diesen Peak.

Erst dann sollte eine Messung beider Spektren mit langer Messdauer stattfinden. Wählen Sie diese in ihrer Dauer so lange, dass die Spektren eine ausreichende Anzahl an Ereignissen enthalten.

Die Intensität des Photopeaks dient zur Berechnung des Wirkungsquerschnittes. Die Intensität wird bestimmt durch Integration im Vielkanalspektrum.

Die Compton-Streuung erfolgt an den Elektronen im Kunststoffsintillator. (Elektronendichte  $n = 3,4 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ , Dicke 10 mm).

Um Streuung an der Halterung und Absorption der gestreuten Quanten klein zu halten, lässt man die Normale des Kunststoffsintillators mit dem halben Streuwinkel zusammenfallen. Bei der Berechnung von

$$\frac{d\sigma}{d\omega}$$

sind dann noch folgende Punkte zu beachten:

- Die durch kosmische Strahlung und Raumuntergrund verursachte zusätzliche Zählrate ist abzuziehen. Zu dieser Messung wird der Bleikollimator mit dem Präparat zur Seite gedreht.
- Zufällige Koinzidenzen können gemessen werden, indem die Koinzidenz zeitlich verstellt wird.
- Eine Korrektur für Absorption von ungestreuten und gestreuten  $\gamma$ -Quanten im Kunststoffsintillator ist durchzuführen. Da diese nur in der Größenordnung 10% liegt, genügt eine grobe Abschätzung.
- Die Variation der Ansprechwahrscheinlichkeit  $E$  des NaJ-Kristalls (38,1 mm im Durchmesser) mit der  $\gamma$ -Energie ist zu berücksichtigen (Siehe Handbuch der Physik, Flüge, Band XLV S. 111 u. 128). Es ist  $E$  das Verhältnis der Anzahl der pro Sekunde im Photopeak nachgewiesenen Quanten zur Anzahl der in der Sekunde auf die Stirnfläche des Kristalls auftreffenden  $\gamma$ -Quanten.
- Die primäre  $\gamma$ -Intensität wird bestimmt, indem man die Zählrate im NaJ-Kristall unter  $0^\circ$  durch den Kunststoffsintillator hindurch misst und die Absorption in diesem korrigiert. Die Ansprechwahrscheinlichkeit des NaJ-Kristalls für die primäre  $\gamma$ -Strahlung ist ebenfalls zu berücksichtigen.

$h\nu$ [MeV]	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,661	0,8	1,0
$\mu$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	0,168	0,151	0,136	0,12	0,108	0,098	0,091	0,089	0,08	0,072

**Tabelle 1:** Absorptionskoeffizient  $\mu$  des Kunststoffsintillators für Photonenergien von 100 keV bis 1 MeV

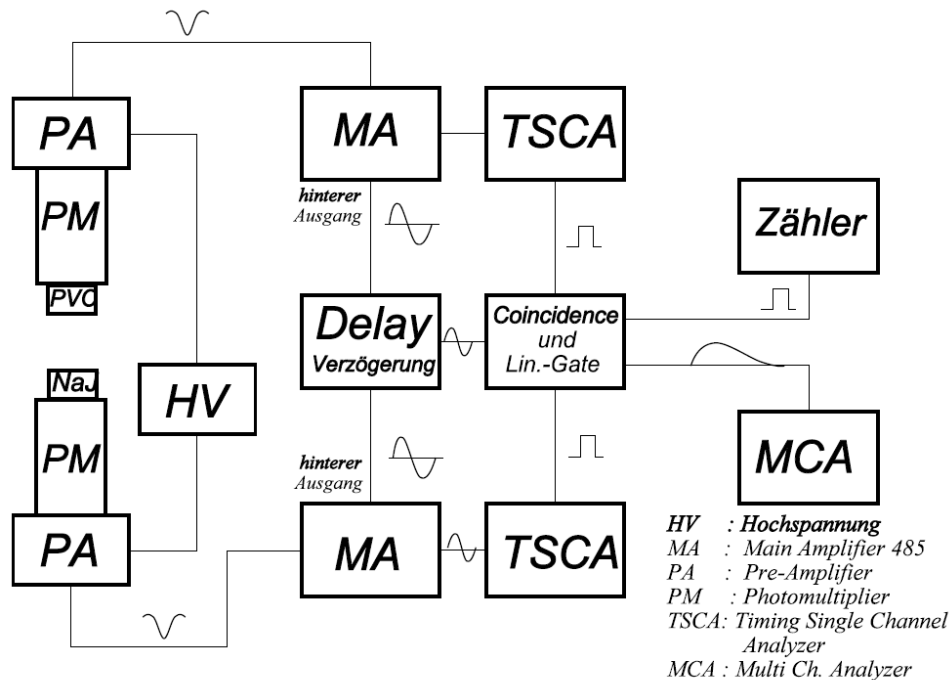


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Elektronik des Compton-Experimentes

## 5 Versuchsbeschreibung

### 5.1 Plastikszintillator (PS)

Hier findet die Comptonstreuung statt. Die Elektronen werden im PS nachgewiesen (wegen seiner kleinen Reichweite müssen sie schon in Target nachgewiesen werden). Das Signal des Elektrons gelangt durch den Photomultiplier in einen Hauptverstärker (zur Einstellung der Gain siehe Energieeichung). Ein Ausgang davon geht zum TSCA (Einkanalanalysator). Man bekommt einen logischen Impuls, der zur Koinzidenz dient. Der andere Ausgang des Hauptverstärkers läuft über ein Delay (analoger Ausgang) in den Gateeingang des Linearen Gates, zur Bestimmung der Elektronenenergie.

### 5.2 NaJ-Szintillator

Dient zum Nachweis der gestreuten Photonen, die durch den PS wegen der geringen Absorptionswahrscheinlichkeit dorthin kommen. Das Signal der gestreuten Photonen geht durch den Photomultiplier in anderen Hauptverstärker (zur Einstellung der Gain siehe Energieeichung). Ein Ausgang davon geht zu einem weiteren TSCA (Einkanalanalysator). Der logische Impuls liefert das zweite Koinzidenzsignal. Der andere Ausgang wird wie bei den PS über das Delay (man kann jeweils nur ein Signal bearbeiten) in den Gateeingang des Linear Gates gesteckt. Der Ausgang des Linear Gates in der Koinzidenzeinheit geht zum Multichannelanalyser (Stecker unten, am Computer), um das Spektrum am Computer abzulesen.

### 5.3 Verzögerung

Sie kommt durch die unterschiedliche Ansprechwahrscheinlichkeit der Szintillatoren und der unterschiedlichen Signalverarbeitungszeiten in der Elektronik zustande. Man stellt die  $^{22}\text{Na}$ -Quelle in die Mitte der beide Szintillatoren ( $\Theta = 0^\circ$ ), so misst man die Photonen, die unter  $180^\circ$  aus der Elektron-Positron Vernichtung entstehen. Man bringt die Ausgänge der TSCA's in ein 2-Kanal- Oszilloskop.

Man steckt das selbe Signal gleichzeitig zum Extern-Triggern, in einen Kanal ein. Man versucht das andere Signal mit den Delays der TSCA so zu bewegen, dass beide Signale gleichzeitig ankommen. So kommen



beide logischen Signale gleichzeitig an, und werden in die Koinzidenzeinheit des Linear Gates gesteckt. Wenn das Signal zu sehr wackelt, kann man versuchen mit der 'walk' Schraube am TSCA es zur Ruhe zu bringen. Wenn beide Signale gleichzeitig ankommen, wird das Gate geöffnet. In dieser Zeit soll der lineare Impuls des Hauptverstärkers auch ankommen um Energieverschiebungen zu vermeiden (wenn z. B. das Maximum des Signals nicht rechtzeitig ankommt, lassen sich so geringere Impulshöhe registrieren). Dafür nimmt man das Koinzidenzsignal-Output und das analoge Signal (Output des Hauptverstärkers über das Delay) am Oszilloskop. Getriggert wird über das Koinzidenzsignal, und man versucht mit dem Delay das analoge Signal in das Gate zu bringen. Das muss für beide Szintillatoren gemacht werden.

## 5.4 Energieeichung

Man nimmt das Energiespektrum der beide Präparate ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ) auf beiden Szintillatoren (NaJ- und Plastikszintillator) auf. Gemessen wird mit vollständig aufgebauter Schaltung (Delay + Gate) aber ohne Koinzidenz. So wird verhindert, dass eine ungewollte Amplitudenabschwächung wegen Delay und Gate bei den Messungen auftritt. Es wird dann nur das Signal des entsprechend zu messenden Szintillators auf ON eingeschaltet, über den Linear Gate und Slow Coincidence, das andere Signal auf OFF. Um die richtige Verstärkung zu bekommen, nimmt man die 1277 keV-Linie des Natrium-Präparates, und versucht, ob es am rechten Rand des MCA-Bildschirmes erscheint. Man kann auch am Oszilloskop beobachten (Ausgang der Hauptverstärker, getriggert über das Signal selbst), dass bei zu großer Verstärkung das Analogsignal abgeschnitten wird.

Es genügt etwa eine Stunde für jedes Spektrum zu messen.

NaJ-Szintillator	
$^{22}\text{Na}$ -511 keV	und 341 keV Comptonkante, nicht gut sichtbar
$^{22}\text{Na}$ -1277 keV	und 1064 keV Comptonkante, kann man sehen
$^{137}\text{Cs}$ -662 keV	und 183 keV Rückstreuelektron, zu sehen und 477 keV Comptonkante, auch sichtbar
Plastik-Szintillator	
$^{22}\text{Na}$ -511 keV	nur 341 keV Comptonkante sichtbar
$^{22}\text{Na}$ -1277 keV	nur 1064 keV Comptonkante sichtbar
$^{137}\text{Cs}$ -622 keV	nur 477 keV Comptonkante sichtbar

**Tabelle 2:** Zerfälle und Energien des Spektrums des  $^{22}\text{Na}$ -, sowie des  $^{137}\text{Cs}$ -Präparates für beide Szintillatoren

## 5.5 Energieerhaltungssatz

Elektronenspektrum aufnehmen (30 min) bei vollständig geöffnetem Fenster am TSCA. Lage und Breite des Peaks notieren (Energiebestimmung durch Eichkurve). Nach Notwendigkeit Energiefenster des Plastikszintillators am TSCA setzen. Dann das Spektrum der gestreuten Gammas am NaJ aufnehmen (bei **Koinzidenzschaltung**). Wiederholung für jeden Winkel.

## 5.6 Wirkungsquerschnitt

Dafür ist eine Messung des direkten Strahls des  $^{137}\text{Cs}$ -Präparats am NaJ (ohne Plastikszintillator) notwendig, um die einfallende Intensität zu bestimmen.

Aus der Messung der Energieerhaltung erhält man die Intensität des gestreuten Strahls, entweder bei Integration des Peaks, oder direkt aus der Zählrate.

## 6 Versuchsaufbau

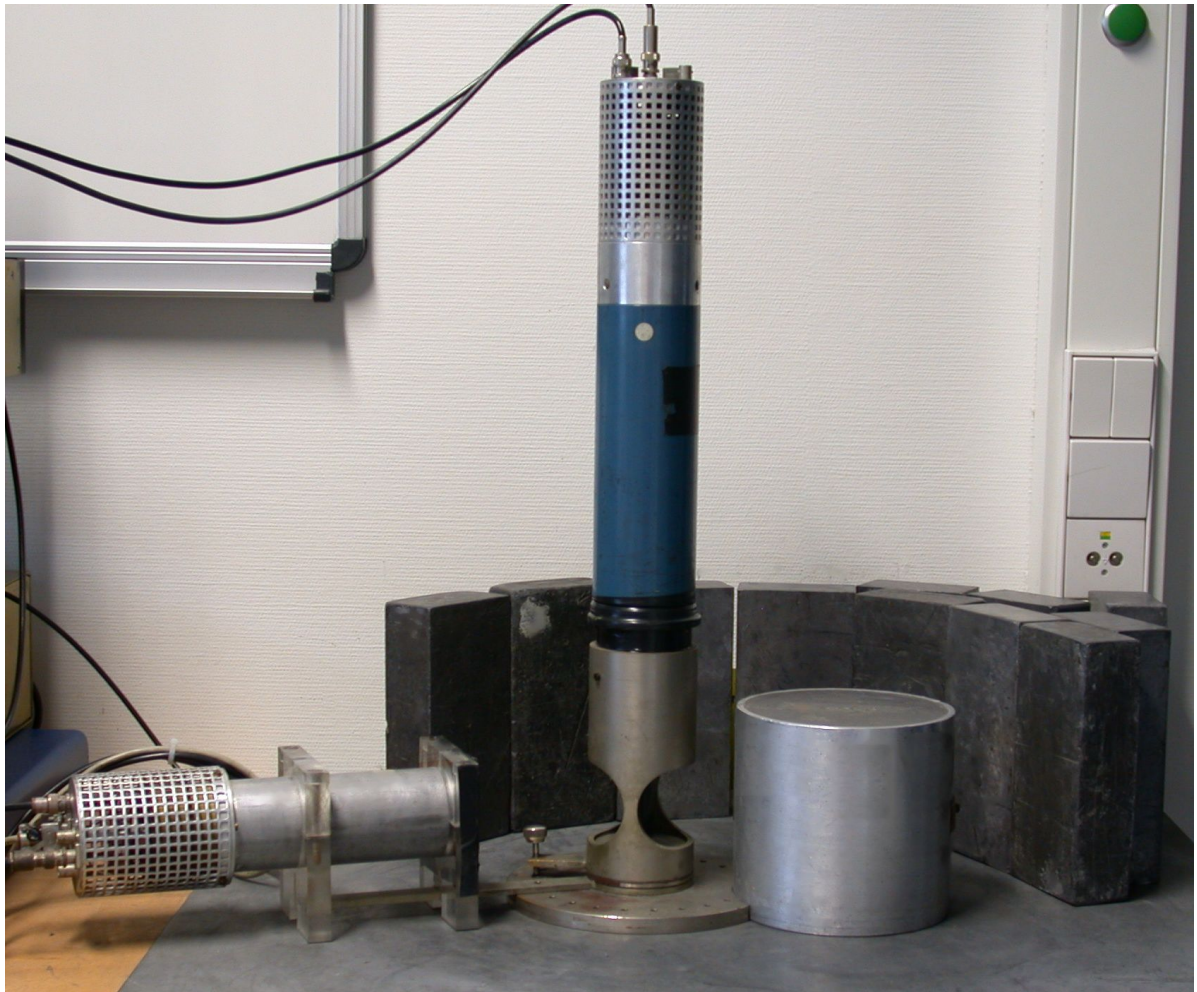
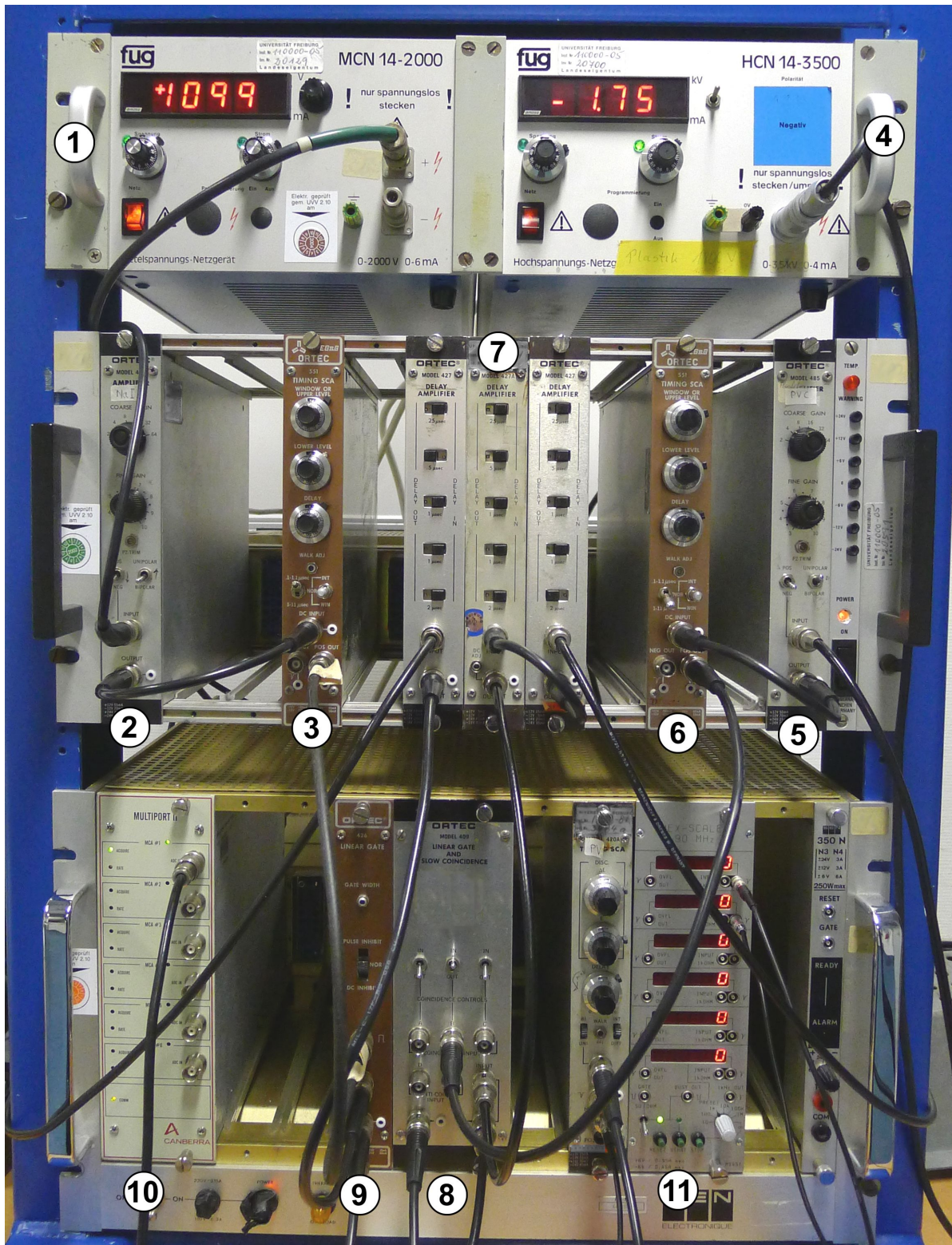


Abbildung 2:  $^{137}\text{Cs}$ -Quelle (Zylinder), NaI-Szintillator (links) und Plastik-Szintillator (stehend)

## 7 Geräteliste





**Abbildung 3:** Rack: 1) 2) und 3), sowie 4) 5) und 6) Hochspannungsversorgung des Photomultipliers, Verstärker und Einkanalanalysator mit Delay für NaJ, respektive Plastik-Szintillator 7) Delay-Einheiten 8) Koinzidenz- und Gate-Einheit 9) Linear Gate (zweiter Szintillator, zu Multichannelanalyzer B hin) 10) Multichannelanalyzer A

## 8 Literatur

### Wissenschaftliche Arbeiten

- *Properties of Nuclear Radiation*
- *Thomson and Compton Scattering of Gamma-Radiation*

### Weiterführende Literatur

- FÜNFER, E.; NEUERT, H.: *Zählrohre und Szintillationszähler*, Kapitel II D und III E (KE 13), Braun, 1954
- *Handbuch der Physik, Band XLV*, S. 107ff
- RICCI, R.A.: *Physika, Band 24*, 1958, S. 389 ff. (ZB 150)
- PRINCE, W.J.: *Nuclear Radiation Detection*, Kapitel 7 und 10 (KE 33), McGraw-Hill Inc., 1964
- EVANS, R.D.: *The Atomic Nucleus*, Kapitel 21, 23, 24 u. 25, S. 821 ff. (KA 19) und S.49 ff. (K46), Krieger Publishing Company, 1982
- *Handbuch der Physik, Band XXXIV*, S. 218ff.
- SIEGBAHN, K.: *Alpha-, Beta- and Gamma-ray Spectroscopy, Vol. I*, S. 37 ff. (KB 8a), Elsevier Pub. Co., inc, 1968
- MARMIER, P.: *Kernphysik, Band I*, S. 20-41 (K 42, 43), Verlag der Fachvereine Zürich, Zürich, 11. Auflage, 1985
- SEGRÉ, E.G.: *Experimental Nuclear Physics*, S. 318 ff. (K 17), Wiley and Sons, New York, 1959