
Versuch 2.8a

Messung der Lebensdauer von Positronen in Materie

Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene (Abteilung C)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	2
1.1. Ziel des Versuchs	2
1.2. Themen zur Vorbereitung	2
2. Grundlagen	3
2.1. Positronen und Positronium	3
2.2. Messmethode	3
3. Versuchsaufbau	4
4. Ablauf des Versuchs	6
5. Zur Ausarbeitung	8
A. Fraction Differential Discriminator (CFDD)	9
A.1. Funktionsweise	9
A.2. Einstellung des CFDD	10

1 Einleitung

1.1 Ziel des Versuchs

- Messtechnik: Zeitmessung im ns-Bereich
- Physik: Positronen im Festkörper

1.2 Themen zur Vorbereitung

- Entstehung und Zerfall des Positroniums
- Grundlagen der Szintillations- γ -Spektrometrie
- Wirkungsweise eines Photomultipliers
- Arbeitsweise des „Constant Fraction Discriminators“

2 Grundlagen

2.1 Positronen und Positronium

Das Positron hat als Antiteilchen des Elektrons in Materie nur eine begrenzte Lebensdauer. Beim Stoß mit einem Elektron kann das Positron sofort zerstrahlen oder einen kurzlebigen gebundenen Zustand, das Positronium bilden. Zu 75% entsteht Orthopositronium (Gesamtspin 1h) und zu 25% Parapositronium (Gesamtspin 0).

Da beim Zerfall des Positroniums Energie, Impuls, Drehimpuls, elektrische Ladung und Leptonenzahl erhalten bleiben müssen, kann Parapositronium nur in zwei entgegengesetzt gerichtete γ -Quanten mit der Energie 511 keV zerfallen. Beim Orthopositronium ist auch dieser Zerfall verboten. Es kann im Vakuum nur in 3 γ -Quanten zerfallen. Daher liegt im Vakuum die Lebensdauer von Orthopositronium um mehr als drei Größenordnungen über der Lebensdauer von Parapositronium ($\tau_{3\gamma} = 1.4 \cdot 10^{-7}$ s).

Positronen aus einem β^+ -Zerfall werden in Materie innerhalb weniger ps auf thermische Geschwindigkeiten abgebremst. Während Positronen in Metallen vorzugsweise durch direkten Stoß mit Elektronen zerstrahlen, können sie in Isolatoren Positronium bilden. Das Schicksal des Positroniums hängt dann von der Elektronendichte in seiner Umgebung ab: benachbarte Elektronen können mit dem Positron zerstrahlen oder gegen das im Positronium gebundene Elektron ausgetauscht werden (oder umgekehrt). Insbesondere die Lebensdauer des Orthopositroniums wird durch Umwandlung oder Zerstrahlung mit Elektronen aus der Umgebung begrenzt. Die Lebensdauer von Orthopositronium ist daher ein Maß für die Elektronendichte in der Materie.

2.2 Messmethode

Als Positronenquelle dient der β^+ -Zerfall von ^{22}Na (vgl. Abb. 2.1).

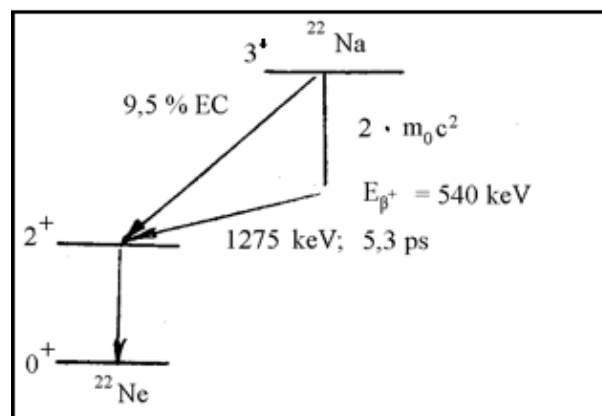


Abbildung 2.1.: Zerfallsschema von ^{22}Na .

^{22}Na zerfällt zu 90,5% durch Emission eines Positrons zum ersten angeregten Zustand des ^{22}Ne . Dieser zerfällt mit einer mittleren Lebensdauer von 5 ps zum Grundzustand, wobei ein γ -Quant mit der Energie 1275 keV emittiert wird. Dieses γ -Quant und eines der 511 keV-Quanten aus der Zerstrahlung des Positrons werden in getrennten Detektoren nachgewiesen und liefern Impulse, deren Zeitabstand elektronisch gemessen wird. Aus dem erhaltenen Zeitspektrum lässt sich die Lebensdauer der Positronen ermitteln. Zur Messung einer sogenannten "prompten Kurve" steht ein ^{22}Na -Präparat in Aluminiumummantelung zur Verfügung.

3 Versuchsaufbau

Die experimentelle Anordnung für Zeitmessungen im ns-Bereich ist in Abb. 3.1 als Blockschaltbild dargestellt. Die γ -Strahlung aus der Quelle Q wird in zwei Detektoren nachgewiesen und liefert Start- und Stoppimpulse für einen Time-to-Amplitude-Converter (TAC = elektronische Stoppuhr).

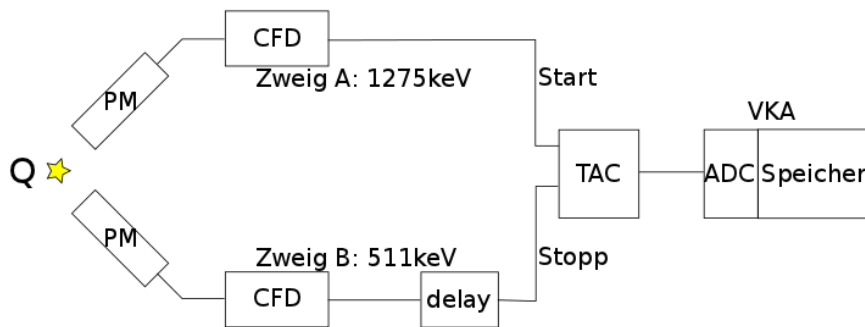


Abbildung 3.1.: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

Kürzel	Erläuterung
Q	Quelle
PM	Photomultiplier
delay	Verzögerungsleitung
CFD	Constant Fraction Discriminator
TAC	Time-to-Amplitude-Converter
ADC	Analog-Digital-Converter
VKA	Vielkanalanalysator

Tabelle 3.1.: Abkürzungen

Als Detektoren dienen Plastiksintillatoren (kurze Abklingzeit), deren Lichtblitze durch Photomultiplier in elektrische Signale umgewandelt werden. Um Rückstreuung aus einem Detektor in den anderen zu vermeiden, sind die Detektoren mit Blei abgeschirmt und stehen in einem Winkel zueinander. Da in Plastik bei γ -Energien oberhalb von 0.1 MeV die Absorption durch Compton-Effekt dominiert, zeigt das Energiespektrum einer ^{22}Na -Quelle (Abb. 3.2) nur Comptonverteilungen.

Aus den Signalen an der Anode des Photomultipliers werden mit *Constant Fraction* Diskriminatoren (CFD) Nadelimpulse gebildet, die eine von der Amplitude der Anodenimpulse unabhängige Zeitmarke darstellen. Zusätzlich können mit den CFDs Impulse unterdrückt werden, deren Amplitude nicht in ein eingestelltes Fenster fällt. Die Fenster werden so eingestellt, dass im Zweig A nur 1275 keV- γ -Quanten und im Zweig B hauptsächlich 511 keV γ -Quanten registriert werden.

Mit den Impulsen aus dem Zweig A wird ein Time-to-Amplitude-Converter (TAC) gestartet und mit den Impulsen aus dem Zweig B gestoppt. Am Ausgang des TAC tritt dann ein Impuls auf, dessen Amplitude proportional zur

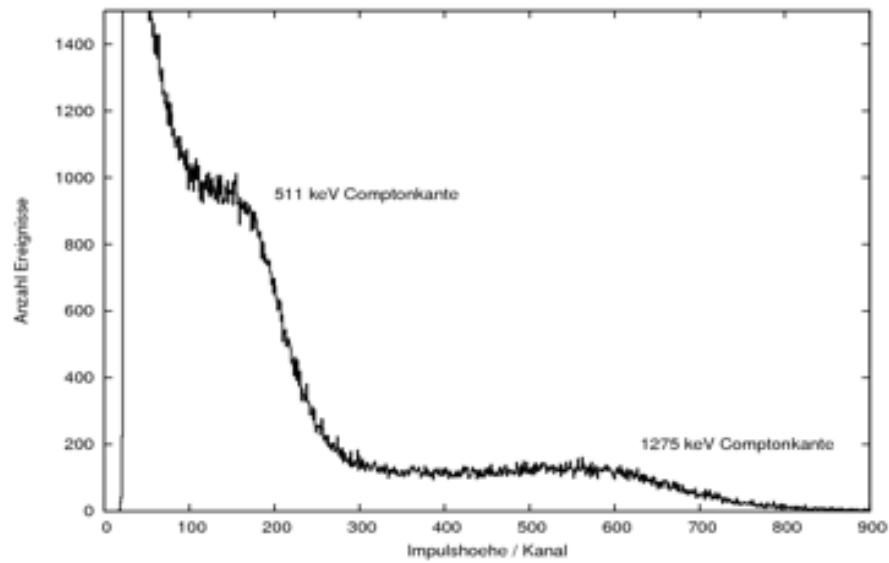


Abbildung 3.2.: Energiespektrum von ^{22}Na , aufgenommen mit einem Plastikszintillator.

Zeitdifferenz zwischen Start- und Stopp-Signal ist. Diese Impulse werden im Vielkanalanalysator als Zeitspektrum registriert.

Die Genauigkeit, mit der Zeitdifferenzen gemessen werden können, hängt vom Auflösungsvermögen (τ_0) ab, das mit zwei prompt aufeinander folgenden Impulsen gemessen wird: *Prompte Kurve*. Dazu dient die Kaskade in ^{22}Ne nach ^{22}Na -Zerfall. Um sicherzustellen, dass das als Startimpuls vorgesehene Signal aus Zweig A vor dem Signal aus Zweig B am TAC eintrifft, ist im Zweig B eine feste Verzögerung ($T_0 > \tau_0$) vorgesehen. T_0 ist so zu wählen, dass die *Prompte Kurve* voll vom zeitlichen Messbereich des TAC erfasst wird.

4 Ablauf des Versuchs

1. Vorbesprechung I (β^+ -Zerfall, ^{22}Na , Wechselwirkung von Photonen im Szintillator, Funktionsweise Photomultiplier, Schaltbild für Energiespektrum)
2. Aufnahme eines Impulshöhenspektrums mit einer ^{22}Na -Quelle
Dazu werden Impulse an der 9. Dynode des Fotovervielfachers abgegriffen und mittels Vorverstärker und Hauptverstärker verarbeitet.
3. Vorbesprechung II (Positronium, für Zeitmessung benötigte Elektronik (CFD, Unterschied zu LED, TAC), Schaltbild für die Koinzidenzmessung)
4. Einstellung der Diskriminatorschwellen und der *Time walk* Kompensation an den CFDs

Quelle: ^{22}Na in Aluminium

Das Oszilloskop wird mit dem Ausgangssignal des CFDs getriggert und gleichzeitig das zweite Signal des Detektors beobachtet. Nun werden die Schwellen so eingestellt, dass das Stoppsignal oberhalb des Rauschens liegt und das Startsignal oberhalb der Comptonkante der 511-keV-Photonen. Das Oszilloskop wird mit dem Ausgangssignal des CFDs („timing output“) getriggert. Das Monitor-Signal des CFDs („CF Mon“) wird gleichzeitig beobachtet. Das mit „walk“ bezeichnete Potentiometer soll so eingestellt werden, dass alle Impulse an der gleichen Stelle die Null-Linie kreuzen.

5. Signale am Ausgang des TAC kontrollieren

Quelle: ^{22}Na in Aluminium

Entsprechend dem Blockschaltbild in Abb. 3.1 wird der TAC von den *timing*-Impulsen der CFD gestartet und gestoppt. Der Einfluss unterschiedlicher Verzögerungskabel, Messbereiche oder Verstärkungen auf die Signale am Ausgang des TACs wird auf dem Oszilloskop beobachtet.

6. Test der Zeitauflösung und Zeiteichung

Quelle: ^{22}Na in Aluminium

Es werden drei prompte Kurven mit unterschiedlichen Verzögerungszeiten aufgenommen. Dazu werden an der delay-Einheit jeweils 32s, 40s und 48s eingestellt. Die Zeitauflösung (FWHM = Breite der prompten Kurve in halber Höhe des Maximums) sollte besser als 1.5 ns sein.

Wichtig ist: Zwischen der letzten Eichmessung und der Lebensdauermessung darf an der Messelektronik nichts mehr umgeschaltet werden!

Laufzeit von Impulsen in Kabeln: ca. 5 ns / m

7. Messung der Lebensdauer von Positronen in Aluminium (Promptmessung)

Quelle: ^{22}Na in Aluminium

Die Messung wird unter den gleichen Bedingungen durchgeführt wie die letzte Teilmessung der Zeiteichung. Dauer der Messung: mindestens 2 h. Diese Messung kann dazu dienen die prompten Ereignisse in Messung 8 zu subtrahieren.

8. Messung der Lebensdauer von Positronen in Teflon

Quelle: ^{22}Na in Teflon

Die Messung wird unter den gleichen Bedingungen durchgeführt wie die letzte Teilmessung der Zeiteichung.

Dauer der Messung: über Nacht.

5 Zur Ausarbeitung

1. Beschreiben Sie kurz die theoretischen Hintergründe, die in der Vorbesprechung diskutiert wurden.
2. Energiespektrum
Plotten Sie das Energiespektrum und erklären Sie die Strukturen, die im Spektrum zu sehen sind.
3. Beschreiben Sie den Aufbau der Koinzidenzschaltung für die Zeitmessung und wie Sie die Schwellen gewählt haben.
4. Zeiteichung Plotten Sie die prompten Kurven und ermitteln Sie durch Anfitten von Gauß-Kurven die Schwerpunkte dieser. Die Zeiteichung soll eine Eichgerade der Form

$$t = \frac{\Delta t}{\Delta k} \cdot (k - k_0) \quad (5.1)$$

liefern (k: Kanalzahl). Bestimmen Sie $\frac{\Delta t}{\Delta k}$ und k_0 inklusive Fehlerabschätzung. Zeichnen Sie die Eichpunkte mit Fehlerbalken, sowie die Eichgerade.

5. Zeitauflösung Bestimmen Sie aus den Fits die FWHM und geben Sie diese in ns an.
6. Bestimmen Sie aus den Kanalgehalten am Anfang und am Ende des Spektrums die mittlere Zahl der zufälligen Koinzidenzen pro Kanal. Subtrahieren Sie diese, wenn nötig.
7. Bestimmen Sie die Halbwertszeit von Ortho- und Parapositronium, indem sie zwei Zerfallskurven in die rechte Flanke der mit Teflon aufgenommenen Verteilung fitten. Plotten Sie die Datenpunkte und die angepassten Exponentialkurven in halblogarithmischer Darstellung. Geben Sie Fehler an (Zeitachse in ns).
8. Bestimmen Sie anhand der Verhältnisse unter den verschiedenen Kurven den Anteil, zu dem Ortho- bzw. Parapositronium gebildet wurde.
9. Diskutieren Sie, ob die Zeitauflösung ausreichte, um die Lebensdauer von Parapositronium zu bestimmen.

Für Ausarbeitungen gelten grundsätzlich auch immer die im „Anleitungsblatt“ zum Fortgeschrittenenpraktikum angegebenen Grundsätze:

- Stellen Sie die allgemeinen Grundlagen knapp aber treffend dar.
- Stellen Sie die für Auswertung und Verständnis nötigen Grundlagen und Formeln so knapp wie möglich und so ausführlich wie nötig dar. Versuchen Sie hierbei, eine grobe Übersicht über die Grundlagen zu geben, die auch ohne Verwendung von Sekundärliteratur (Anleitungsblatt, weitere Quellen, ...) verständlich ist. Auf dezidierte Herleitungen kann hierbei verzichtet werden (zitieren Sie verwendete Quellen!).
- Schildern Sie das Messprinzip / die Messidee.
- Diskutieren Sie eingehende Fehlerquellen für Messwerte und Abschätzungen ausführlich und führen Sie eine sorgfältige Fehlerabschätzung durch. Wichtig ist hierbei, dass Sie von Fehlerquellen einen Eindruck erhalten und deren Einfluss auf das Gesamtergebnis abschätzen lernen.
- Abgabetermin: Nach dem Versuch haben Sie **drei Wochen Zeit** eine Versuchsausarbeitung anzufertigen und abzugeben.

A Fraction Differential Discriminator (CFDD)

A.1 Funktionsweise

Die Impulse an den Anodenausgängen der Messköpfe sind wegen ihrer zu langen Anstiegszeiten von 5-8 ns nicht direkt zur Messung von Zeiten unter 5 ns geeignet. Man braucht Trigger, die zeitlich besser definierte Signale liefern.

Leading Edge Trigger sprechen an, sobald die Spannung am Eingang einen Schwellenwert überschreitet. Das geschieht z.B. beim Trigger eines Oszilloskops. Wie Abb. A.1 zeigt, hängt der Triggerzeitpunkt von der Amplitude der Impulse am Eingang des Triggers ab. Diese Erscheinung nennt man „time walk“.

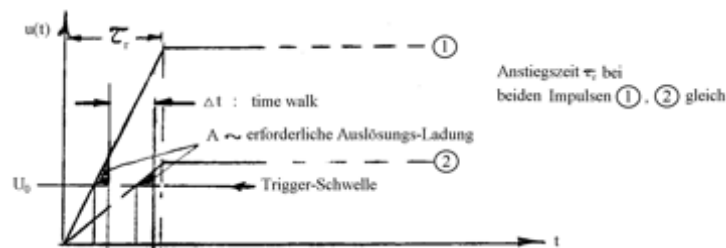


Abbildung A.1.: Leading edge trigger (Vorderflanken-Trigger).

Die Unsicherheit des Triggerzeitpunkts lässt sich vermindern, wenn man

- die Triggerschwelle sehr niedrig wählt (dann spricht der Trigger aber auch auf Rauschimpulse an)
- mit einem Fensterdiskriminator einen sehr kleinen Bereich von Impulshöhen ausblendet (dann wird die Zählrate leider auch sehr klein)
- einen Trigger verwendet, bei dem kein *time walk* auftritt.

Mit einem Constant Fraction Trigger (CFT) lässt sich der *time walk* fast völlig unterdrücken. *Constant Fraction* bedeutet: Der Trigger spricht an, wenn ein Impuls einen fest eingestellten Bruchteil seiner maximalen Höhe erreicht hat.

Eine Beschreibung findet man in der Firmenschrift AN-41 von Ortec (s. Bibliothek) Seite 7-10. Die Impulse am CFT (s. Fig. 7 in AN-41) werden im oberen Zweig abgeschwächt und invertiert und im unteren Zweig verzögert (Zeit $t_d = t_v$). Die Verzögerung wird durch die Laufzeit in einem Kabel bewirkt, das die *delay*-Buchsen des Gerätes miteinander verbindet. Anschließend werden die beiden Teilimpulse addiert. Man erhält einen Impuls mit einem Nulldurchgang, dessen Zeitpunkt nicht von der Amplitude des Eingangsimpulses abhängt. An dem Monitor-Ausgang kann man die Summensignale mit einem Oszilloskop beobachten. Die Summensignale werden einem Detektor zugeführt, der auf den Nulldurchgang anspricht.

Damit der Nulldurchgangsdetektor nicht bereits auf das den Eingangsimpulsen überlagerte Rauschen anspricht, ist ein *arming trigger* eingebaut. Sobald der Impuls am Eingang des CFT eine einstellbare Schwelle überschreitet, aktiviert der *arming trigger* den Nulldurchgangsdetektor. Bei zu kleinen Signalen spricht der *arming trigger* nicht an; der Nulldurchgangsdetektor ist dann blockiert. Wenn den Impulsen am Eingang des CFT eine Gleichspannung überlagert ist, muss die Schwelle am Nulldurchgangsdetektor verschoben werden. Mit dem *walk adjust* Potentiometer lässt sich diese Triggerschwelle einstellen.

Der Constant Fraction Differential Discriminator enthält zusätzlich zum CFT noch einen Fensterdiskriminator und eine Blockiereinrichtung. Mit den Potentiometern *lower level* und *upper level* lässt sich der Fensterdiskriminator auf den gewünschten Bereich von Impulshöhen einstellen. Die Blockiereinrichtung bewirkt, dass innerhalb einer einstellbaren Zeit von bis zu $1.5\mu s$ nach einem Impuls keine weiteren Impulse vom CFDD akzeptiert werden. Damit lässt sich verhindern, dass bei dicht aufeinanderfolgenden Impulsen, wo der zweite Impuls durch Ausläufer des ersten Impulses verfälscht sein könnte, der zweite Impuls vom CFDD ausgewertet wird.

A.2 Einstellung des CFDD

Nach der Anleitung des Herstellers soll das Verzögerungskabel für den CFT so lang gewählt werden, dass für die Impulsverzögerung t_v gilt:

$$t_v = 1.1 \cdot t_r - 0.7ns \quad (A.1)$$

(t_r = Anstiegszeit der Impulse von 10% bis 90% der Amplitude)

Die 0.7 ns entsprechen der Verzögerung in der internen Verkabelung des Geräts. Diese Empfehlung ist aber nur als Faustregel zu betrachten. Es lohnt sich, mit längeren oder kürzeren Kabeln zu experimentieren. Die Monitorsignale (Buchse *CF Mon*) werden auf einem Oszilloskop beobachtet, das von den Ausgangssignalen des CFDD extern getriggert wird. Das *walk adjust* - Potentiometer wird nun so eingestellt, dass alle Impulse möglichst gleichzeitig die Null-Linie kreuzen.

Quellenverzeichnis

- [knoXX] G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement
- [Neu66] Neuert, Kernphysikalische Messverfahren
- [Bel66] R.E. Bell in Siegbahn, α -, β -, γ -Spektroskopie
- [Wöl75] K. Wölfinger, Staatsexamensarbeit, Inst. f. Kernph. 1975
- [AN-41] ORTEC Application Note 41, Techniques for Improved Time Spectroscopy (1982)
- [Boc81] Einführung aus dem Phys. Prakt. der Ruhruniversität 1981

Beachten Sie auch die Hinweise zum Versuch im Internet:

www.ikp.tu-darmstadt.de > Lehre > F-Praktikum > Versuch 2.8a

Urversion von 197X? Von?

überarbeitet von C. Bauer, November 2011