

Koinzidenzmessung und Lebensdauerbestimmung von Positronen

Fortgeschrittenenpraktikum

Rouven Klink & Harald Krüger

13. November 2014

Betreut durch Herrn Dr. Gerrit Marx

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Theorie	2
2.1	Geschichtliches - die Entdeckung des Positrons	2
2.2	Entstehung von Positronen	2
2.3	Positronannihilation	4
2.4	Bestimmung der Positronenlebensdauer	4
2.5	Koinzidenzmessung	4
3	Aufbau	5
4	Versuchsaufbau & Durchführung	5
4.1	Einstellung der Diskriminatoren	5
5	Auswertung	7
5.1	Zeitkalibration des Aufbaus	7
5.2	Bestimmung der zeitlichen Unsicherheit der Messapparatur	7
5.3	Bestimmung der Lebensdauer von Positronium in Teflon	9
6	Quellen	11

1 Einleitung

Als erstes Antiteilchen überhaupt wurde das Positron 1928 von PAUL A. M. DIRAC theoretisch vorhergesagt und schließlich 1932 von CARL DAVID ANDERSON in kosmischer Strahlung experimentell entdeckt. Dieser Versuch dient daher zur Nachvollziehung der historischen Entdeckung und soll veranschaulichen, wie Positronen entstehen und detektiert werden können.

2 Theorie

2.1 Geschichtliches - die Entdeckung des Positrons

Nachdem EINSTEIN die Relativitätstheorie aufgestellt hatte und die Quantenmechanik mehr oder weniger konstruiert war, wurden Versuche unternommen beide miteinander zu vereinen. Die zwei Theorien, eine den Makrokosmos gut beschreibend die andere für den mikroskopischen Bereich, konnten als erstes von PAUL DIRAC mit Erfolg zusammengefasst werden. Dabei stellte er fest, dass die mathematischen Lösungen seines Problems auf den ersten Blick vollkommen widersprüchlich zu bisherigen Annahmen waren. Jedoch vertraute er auf die Richtigkeit seiner Lösungen und postulierte daraus eine Art Anti-Materie.

CARL ANDERSON gelang im Jahre 1932 bei Experimenten mit Höhenstrahlung der Nachweis dieser Neupostulierten Materie. Er ließ dazu die Strahlung durch eine Bleiplatte strahlen und beobachtete sie anschließend in einer Nebelkammer. Er entdeckte dann Spuren die er weder dem Elektron noch dem Proton zuordnen konnte. Von der Richtung der Bahnkrümmung gesehen musste das Teilchen eine positive Ladung tragen und da es vorher die Bleiplatte durchdrungen hatte, musste ebenfalls eine hohe Energie besitzen. Weitere Untersuchungen zeigten, dass das neue Teilchen die gleiche Masse, wie ein Elektron besitzt. Damit war der erste experimentelle Nachweis des Anti-Elektrons - des Positrons - erbracht, wofür ANDERSON 1936 den Nobelpreis erhielt.

2.2 Entstehung von Positronen

In der Regel entstehen Positronen beim β^+ -Zerfall radioaktiver Isotope. Als Präparat wird häufig ^{22}Na , dessen Zerfallsschema in Abb. 1 dargestellt ist, genutzt. Es zeichnet sich durch eine relativ hohe Positronenausbeute aus. Das bedeutet nur ein kleiner Teil des Natrium-22 zerfällt direkt in das stabile Neon-22. Ein weitaus größerer Teil (etwa 90 %) zerfällt unter Emission eines Positrons ($E_{\beta^+} = 546 \text{ keV}$) in ein kurzlebige Neonatom und anschließend unter Aussendung eines γ -Quants mit der Energie $E_\gamma = 1275 \text{ keV}$ in den Neon-22-Grundzustand. Der kurzlebige Zustand des Neon besitzt eine Lebensdauer von etwa 3,7 ps. Es treten also nahezu zeitgleich ein γ -Quant und das Positron auf. Diese Eigenschaft kann man ausnutzen um Positronen nachzuweisen. Neben der guten Ausbeute besitzt Na-22 lediglich eine Halbwertszeit von 2,6 Jahren, wobei die biologische Kontamination bei wenigen Tagen liegt.

Eine weitere Möglichkeit, wie ein Positron entstehen kann bietet die Paarerzeugung (Abb. 2). Dabei wird neben dem Positron aus Gründen der Ladungserhaltung ebenfalls ein Elektron aus einem Photon gebildet. Würde es in der Reaktionsgleichung nur zwei Teilchen geben, so wäre durch die Umwandlung der Energie des Photons (angenommen 1022 keV) in die Ruheenergie der beiden Teilchen zwar die Energieerhaltung erfüllt, aber die Impulserhaltung verletzt, weil das Photon vor dem Prozess einen Impuls verschieden von Null hatte. Daher findet dieser Effekt nur im Coulombfeld eines Atomkern statt, der den Impulsübertrag aufnimmt. Im Umgekehrten

Fall (Positronannihilation) , wenn sich Elektron und Positron vernichten, werden zwei γ -Quanten von je $E_\gamma = m_e c^2$ frei. Findet dieser Prozess in Materie statt, lassen sich durch Untersuchung der Strahlung Rückschlüsse auf die Eigenschaften der Materie gewinnen.

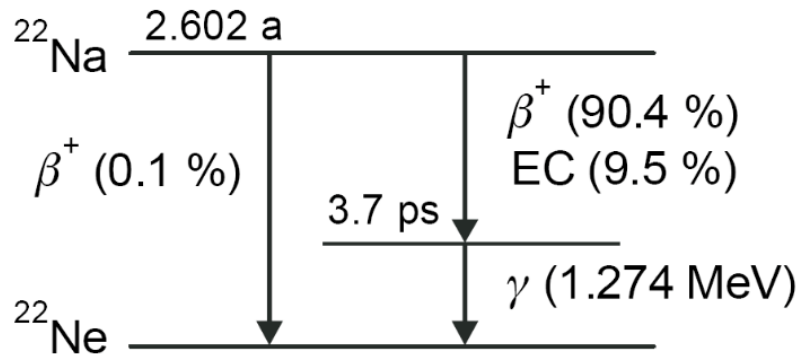


Abbildung 1: Zerfallsschema von Na-22. über 90 % des ^{22}Na zerfällt unter Emission eines Positrons und Neutrinos in das angeregte Ne-22. Nach etwa 3,7 ps geht ^{22}Ne unter Aussendung eines γ -Quants mit der Energie $E_\gamma = 1,27 \text{ MeV}$ in den Grundzustand über. Neben diesem wahrscheinlichen Zerfallsprozess existieren noch der unwahrscheinlichere Elektroneneinfang (EC) und der direkte Übergang von Na-22 in den Neon Grundzustand.[1]

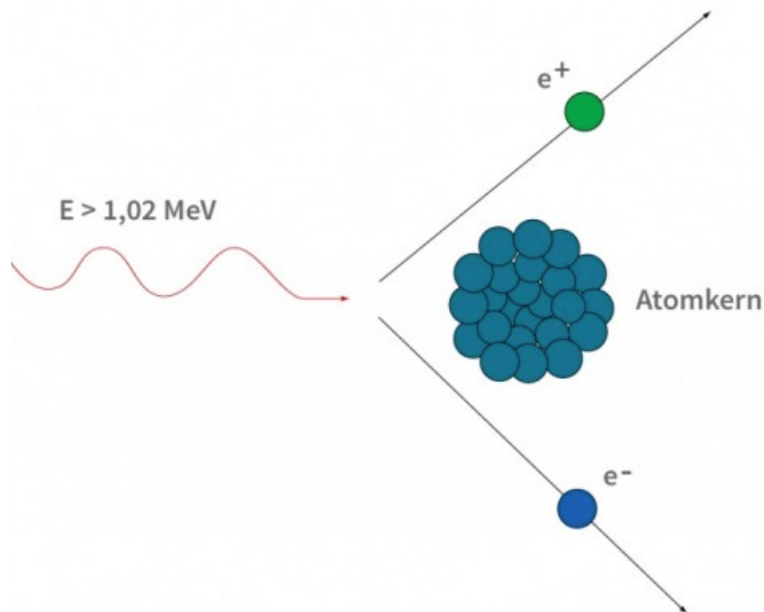
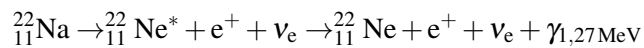


Abbildung 2: Paarherzeugung im Coulombfeld eines Atomkerns (schematische Darstellung). Die Energie des γ -Quants muss dafür mindestens gleich der zweifachen Ruheenergie eines Elektrons sein ($E_{\text{Ruhe,e}} = 511 \text{ keV}$). [2]

2.3 Positronannihilation

Der Prozess bei dem sich je ein Positron und ein Elektronen gegenseitig vernichten, wie oben beschrieben, bezeichnet man als Positronannihilation oder Paarvernichtung. Dabei werden im Falle des Positrons zwei Photonen mit jeweils einer Energie von 511 eV frei, die sich unter einem Winkel von 180° voneinander fortbewegen. Ein anderer Effekt ergibt sich in der Nähe von Oberflächen. In einigen speziellen Fällen kommt es dort zu einer Ausbildung eines gebundenen Zustands zwischen Elektron und Positron - dem sog. Positronium. Je nach Spin der Teilchen (parallel oder antiparallel) wird im Grundzustand zwischen Ortho- oder Parapositronium unterschieden, was entweder in drei oder zwei γ -Quanten zerfällt.

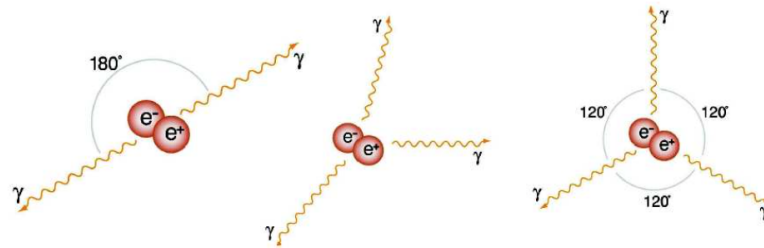


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Zerstrahlung von Parapositronium (links) und Orthopositronium (mitte, rechts).[3]

2.4 Bestimmung der Positronenlebensdauer

Die Lebensdauer eines Positrons ist die Zeit zwischen seiner Entstehung und der Vernichtung in zwei 511 keV γ -Quanten. Bei Verwendung der oben angesprochenen radioaktiven Quelle, entsteht beim β^+ -Zerfall von ^{22}Na neben einem Positron fast gleichzeitig ein γ -Quant aus der Relaxation des angeregten Neonkerns. Dieses Photon kann als eine Art Startsignal der Messung genutzt werden. Das Messvolumen beschränkt sich in der Regel auf den μm -Bereich nach der Positronenquelle, wie es in der Positronenlebensdauerspektroskopie der Fall ist.

2.5 Koinzidenzmessung

Für die Bestimmung der Positronenlebensdauer wird in diesem Versuch die Koinzidenzmessung angewendet. Das bedeutet, dass innerhalb einer bestimmten vorgegebenen Zeitspanne zwei oder mehr Ereignisse zusammentreffen müssen um ein gültiges Ausgangssignal zu produzieren. In unserem Fall werden zwei Eingangssignale aus zwei Szintillationszählern verwendet und miteinander verglichen. Ein schematischer Aufbau ist in Abb. ?? zu sehen. Wie man erkennen kann gelangt das Signal der beiden Detektoren zunächst in je einen Diskriminator. Diese sind vonnöten um nur einen ausgewählten Teil des Energiespektrums, dass der Detektor liefert, auszuwählen. Dazu können an den Diskriminatoren ein *upper-level* bzw. *lower-level* eingestellt werden. Dieser Schritt ist notwendig, da sonst neben der charakteristischen Strahlung des angeregten Neonatoms noch weitere, energieärmere Signale dargestellt würden und so das Startsignal verfälschen würden. Gleiches gilt für das Stoppsignal aus der Positronenzerstrahlung. Anschließend gelangt das Signal in einen sog. *Fast-Coincidence-Kontroller*. Dieser entscheidet ob die ankommenden Signale gleichzeitig

entstanden sind oder nicht. Je nach Gültigkeit des Signals und eingestellter Vergleichszeit wird ein - ja - oder - nein - an den *time to analog converter* weitergeleitet. Der TAC ist vergleichbar mit einer Stoppuhr. Die Start- und Stoppsignale werden ebenfalls von den Diskriminatoren an die Eingänge des TAC weitergeleitet. Beim Eintreffen des Startsignals startet die Zeitmessung und endet nach Eingang des Stoppsignals. Zusätzlich wird das Ausgangssignal des *Fast-Coincidence*-Kontroller auf den StartgateEingang des TAC geschaltet. Somit ist gewährleistet, dass nur gültige Signale an den Computer und somit zur Auswertungssoftware weitergeleitet werden. Als letzten Schritt wird das analoge Signal mittels einem ADC *analog to digital converter* digitalisiert und an den Computer gesendet.

3 Aufbau

4 Versuchsaufbau & Durchführung

Das Wesen der Positronenlebensdauerermessung ist die Koinzidenzmessung. In unserem Fall ist damit die gleichzeitige Messung von Signalen gemeint. Um die Lebensdauer eines Positrons zu bestimmen muss man also geeignete Signale für das Starten und Stoppen einer Zeitmessung finden. Wie bereits erwähnt bietet es sich an, als Startsignal das beim Zerfall von Na-22 entstehende γ -Quant zu verwenden. Das Stopp-Signal stellen dann die bei der Annihilation des Positron entstehenden γ -Quanten dar. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass das Spektrum dieser Photonen kontinuierlich und nicht diskret verteilt ist. Zusätzlich finden noch weitere Zerfallsprozesse statt und emittieren ebenfalls Photonen. Es stellt sich nun die Frage, welche Signale zusammengehören.

Ein anderes Problem ist, dass die Strahlung isotrop in den Raum abgestrahlt wird, und so vielleicht das Start-Quant gemessen wird, aber die entsprechenden Stopp-Signale nicht auf den Detektor treffen, weil sie in eine andere Raumrichtung ausgestrahlt wurden. Aus dem detektierten Gesamtsignal müssen also zusammengehörige Signale entsprechend herausgefiltert werden.

Um alle Effekte auszublenden und die richtigen Signale auszuwerten wird ein komplizierter Aufbau benötigt, an der vor der eigentlichen Lebensdauerermessung noch eine Vielzahl von Einstellungen und Kalibrierungen durchgeführt werden müssen. Wie genau im weiteren dabei Vorgegangen wurde und was gemessen wurde, wird im weiteren Verlauf dieses Protokolls beschrieben.

4.1 Einstellung der Diskriminatoren

Damit die Lebensdauern von Positronium in Teflon bestimmt werden können, müssen vorerst einige Einstellungen an den Diskriminatoren vorgenommen werden. Die Abb. 4 zeigt das Comptonpektrum von Natrium-22. Der linke Abschnitt des Diagramms bis etwa Kanal 160 ist zu vernachlässigen, weil dieser nicht relevant für die Messung ist. Die hohe Zählrate entsteht zum größten Teil durch Photonen deren gesamte Energie im Detektor deponiert wurde, beispielsweise durch den Photoeffekt. Daher wird dieses Signal auch als Photopeak bezeichnet. Etwa um Kanal 210 findet man ein Maximum im Spektrum. Dieses Maximum ist typisch für den β^+ -Zerfall von Natrium-22. Genauer gesagt zeigt dieser Peak die Paarvernichtung zwischen Elektron und Positron. Die dabei freiwerdende Energie beträgt 511 eV und ist für den betrachteten Prozess maximal. Daher fällt die Zählrate nach dem charakteristischen Peak schnell ab. Dieser Bereich wird als Comptonkante bezeichnet. Verfolgt man das Spektrum weiter, beobachtet man etwa bei

Kanal 750 wieder einen Anstieg der Zählrate. Dieser zweite Peak kann mittels des Zerfallschemas von Na-22 als hochenergetisches γ -Photon des Ne-22 Zerfalls identifiziert werden. Diese zwei spezifischen Signalpeaks können genutzt werden um einen Start- bzw. Stopppunkt zu definieren. Dazu werden die Diskriminatoren benötigt mit denen ein Teil des Spektrum, wie in Abb. 5a bzw. Abb. 5b, abgeschnitten werden kann. So wird sichergestellt, dass mit einer hohen Wahrscheinlichkeit ein koinzidentes Signal detektiert wird. Würde das Spektrum durch den Diskriminator nicht eingeschränkt werden, so würden beiden Detektoren das gleiche Signal aufnehmen. D. h. Start- und Stoppsignal werden gleichzeitig gemessen und es kann keine Lebensdauerbestimmung durchgeführt werden.

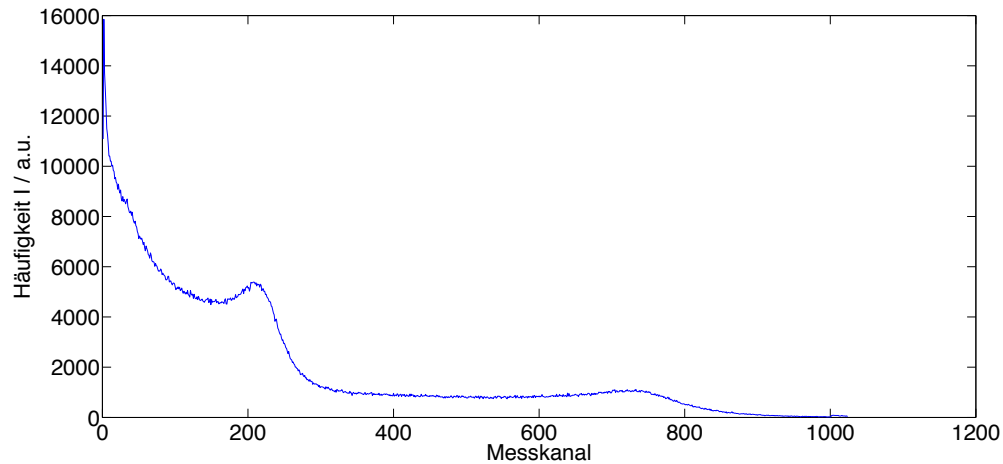


Abbildung 4: Dargestellt ist das Comptonspektrum von Na-22. Bei Messkanal 210 findet sich der charakteristische 511 keV γ -Peak. Weiter rechts im Spektrum findet sicher der hochenergetische 1,27 MeV Peak des Ne-22.

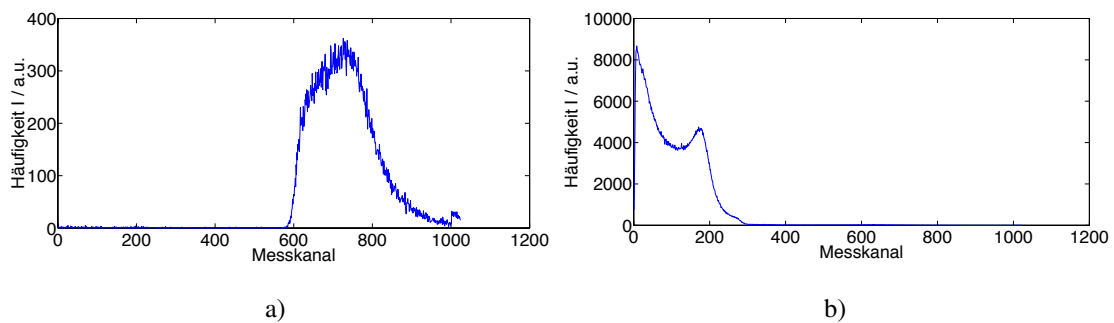


Abbildung 5: In Abb.a) wurde der Diskriminator auf den Bereich des 1,27 MeV Peaks eingestellt, der im weiteren Verlauf der Messung als Startpuls genutzt wird. Entsprechend wurde der Diskriminator für den Stopppuls, Abb. b), auf das 511 keV Signal eingestellt.

5 Auswertung

5.1 Zeitkalibration des Aufbaus

Wie oben schon einmal erwähnt ordnet der ADC einer Spannung einen Messkanal zu. Um einen Zusammenhang zwischen Messkanal und Zeit zu bekommen, wird mit einer Delaybox zwischen dem Start- bzw Stoppsignal eine definierte Zeitdifferenz eingestellt. Messungen für verschiedene aber bekannte Zeitdifferenzen liefern dann Signale in den unterschiedlichen Kanälen (s. Abb 6). Somit kann die Zeit zwischen zwei Kanälen bestimmt werden. Die Umrechnung der Messkanäle in eine Zeit bildet die Basis für die weiteren Messungen.

In diesem Versuch liegen zwischen zwei Signalen in Abb. 6 etwa 4 ns. Dies entspricht im Mittel etwa 645 Kanälen woraus folgt, dass die zeitliche Differenz zwischen zwei Kanälen etwa 8,8 ps beträgt.

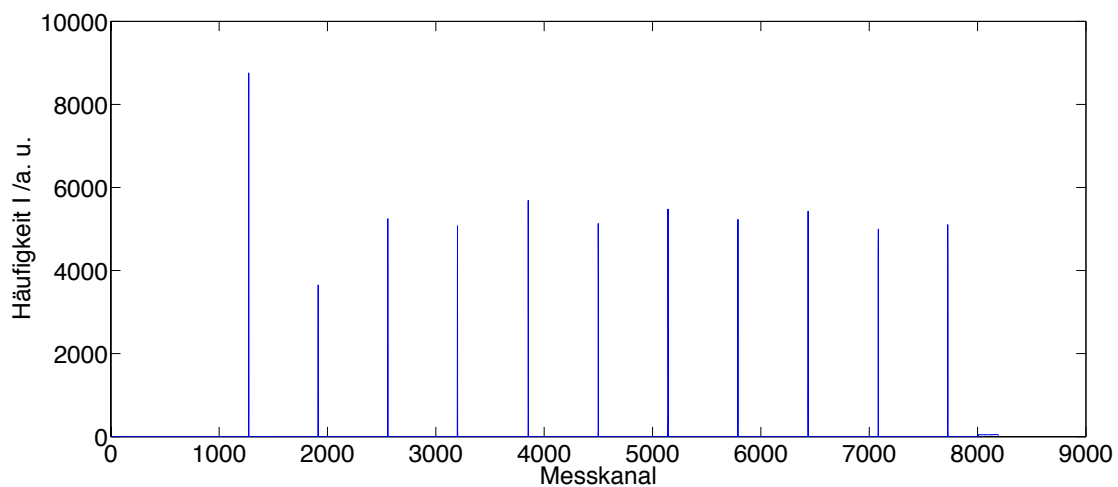
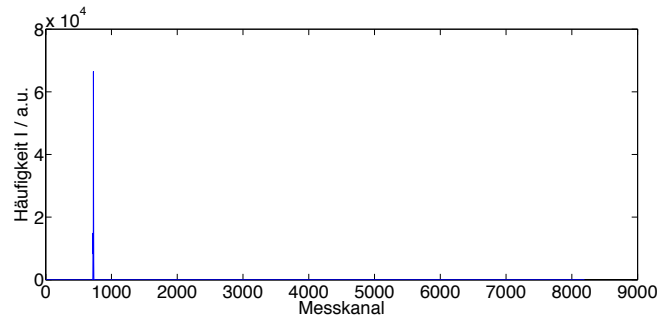


Abbildung 6: Ein Signalpeak entspricht einer Messdauer von etwa 5 s. Die unterschiedlichen Signale, werden aufgrund einer zeitlichen Verzögerung von 4 ns zwischen Start- und Stoppsignal in unterschiedlichen Kanälen dargestellt. Damit kann jedem Kanal eine Zeit zugewiesen werden.

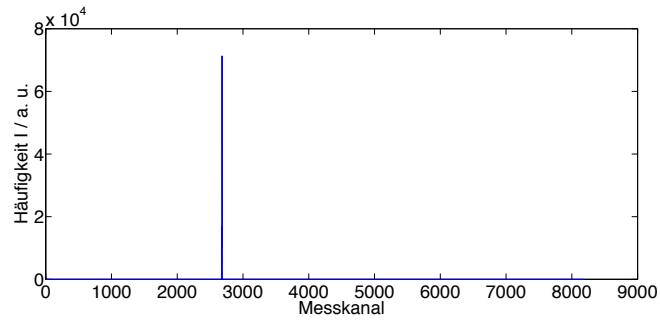
5.2 Bestimmung der zeitlichen Unsicherheit der Messapparatur

Der erste Schritt zur Bestimmung der Lebensdauer von Positronium, besteht darin die Zeitunsicherheit der Messapparatur zu bestimmen. Diese kommt durch die zum Teil langen Signalwege und Rechenzeiten des TAC bzw. ADC zustande. Um diese Totzeit zu bestimmen, wurde der Versuch entsprechend Abb. Fig. 10 der Versuchsanleitung verkabelt. Um zu gewährleisten, dass der TAC sauber und rauscharm arbeitet, wurde dem Startsignal zusätzlich eine Verzögerung von 34 ns aufgeschaltet. Die Abb. 7 zeigt die gemessenen Signale.

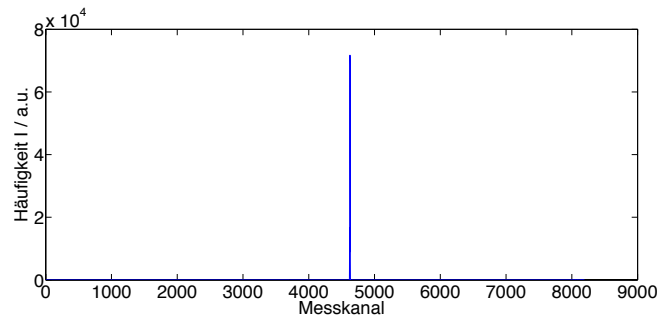
Die Zeitunsicherheit kann nun über eine geeignete Regression mit einer Gaußfunktion der Art, $f(x) = a_0 \cdot \exp(-(x-\mu/\sigma)^2)$, bestimmt werden. Darin enthalten ist ein Amplitudenfaktor a_0 sowie eine Verschiebung μ und eine Breite der Glockenkurve σ . Dann erhält man die Totzeit der Apparatur über die Beziehung (1).



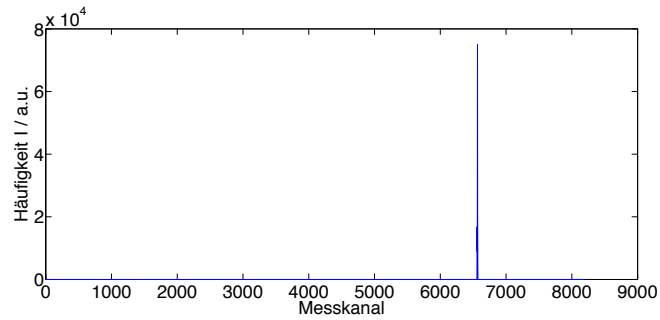
a)



b)



c)



d)

Abbildung 7: Bestimmung der zeitlichen Unsicherheit der Messapparatur durch Bestimmung der Halbwertsbreite eines Signals. Die Messdauer beträgt 300 s. Die Abbildungen a) bis d) zeigen verschiedene Verzögerungen zwischen Start- und Stoppsignal beginnend bei 6 ns über 18 ns, 30 ns bis hin zu einer Differenz von 42 ns. Die Form des Peaks ändert sich dadurch jedoch nicht.

$$FWHM = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \ln 2} \cdot \sigma \quad (1)$$

Mittelt man den Wert für $FWHM$ über alle vier in der Abb. 7 aufgenommenen Peaks ergibt sich eine systembedingte Zeitunsicherheit von 0,2 ns. D.h alle Ereignisse, die kürzer als 0,2 ns dauern werden von dem Messaufbau nicht erfasst.

5.3 Bestimmung der Lebensdauer von Positronium in Teflon

Nachdem die Appartur kalibriert und deren Totzeit bestimmt wurde, kann die Messung der Positroniumlebensdauer durchgeführt werden. Hierzu wurde der Aufbau entsprechend Abb. Figure1 der Versuchsanleitung verkabelt und in Betrieb genommen. Nach einem Messzeitraum von 12h wurde die Messung beendet, da ausreichend viele Annihilationsprozesse beobachtet wurden. Das Messspektrum ist in Abb. 8 zu sehen.

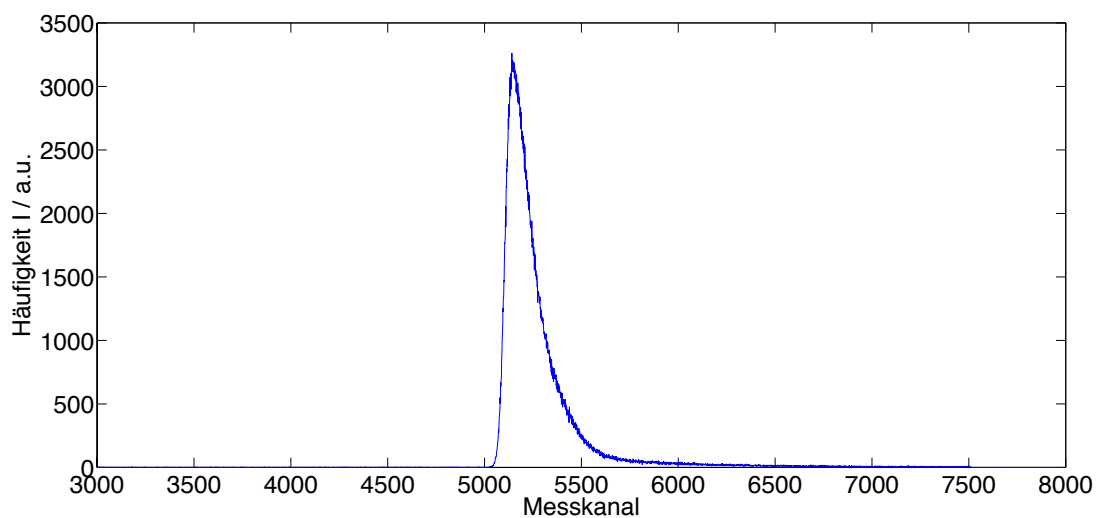


Abbildung 8: Erhaltenes Messspektrum nach einer Dauer 12 h. Erkennbar ist der nicht symmetrische Kurvenverlauf und die exponentiell abfallende linke Flanke. Dies ist ein Zeichen für den Zerfall von Positronium.

Die exponentiell abfallende rechte Flanke des Spektrum kann durch eine Regression mit einer Exponentialkurve der Form $h(x) = b_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot x)$ angenähert werden (s. Abb. 9). Darin bezeichnen b_0 einen Amplitudenfaktor und λ die Zerfallskonstante von Positronium. Um einen detaillierteren Überblick über den Zerfallsprozess des Positronium zu erhalten, wurde der exponentielle Verlauf durch Gl. (2) linearisiert. Es sind deutlich zwei Bereiche unterschiedlicher Steigungen zu erkennen (s. Abb. 10). Dies lässt vermuten, dass es zwei verschiedene Arten gibt, mit der ein Positron zerfallen kann. Mit Rückblick auf die Theorie ist diese Vermutung auch begründet. Eine Zerstrahlung von Positronen kann nur mit Hilfe eines Elektrons erfolgen. Beachtet man zusätzlich den Spin der beiden Teilchen, so kann es zur Bildung des Ortho- oder Parapositroniums kommen. Beide besitzen eine unterschiedliche Lebensdauer, die gut erkennbar in Abb. 10 zum Ausdruck kommt. In der Tab. 1 sind die beiden Lebensdauern $\tau = 1/\lambda$ dargestellt und auch ihre Literaturwerte.

Dabei ist zu beachten, dass sich die Literaturwerte auf die Lebensdauern im Vakuum beziehen und daher um eine Vielfaches von dem gemessenen Wert abweichen. Diese Abweichung ist damit zu erklären, dass der β -Strahler in diesem Versuch von zwei Teflonplättchen verdeckt war. Es ist daher sehr viel wahrscheinlicher, dass ein Positron früher mit einem Elektron ein Positronium formt als im Vakuum. Daher zerstrahlt es auch zeitnaher.

$$g(x) = \ln(h(x)) = -\lambda \cdot x + \ln b_0 \quad (2)$$

Tabelle 1: Vergleich der Lebensdauern des Positroniums

	Orthopositronium	Parapositronium
gemessen	3,55 ns	0,8 ns
Literatur	142 ns	0,125 ns

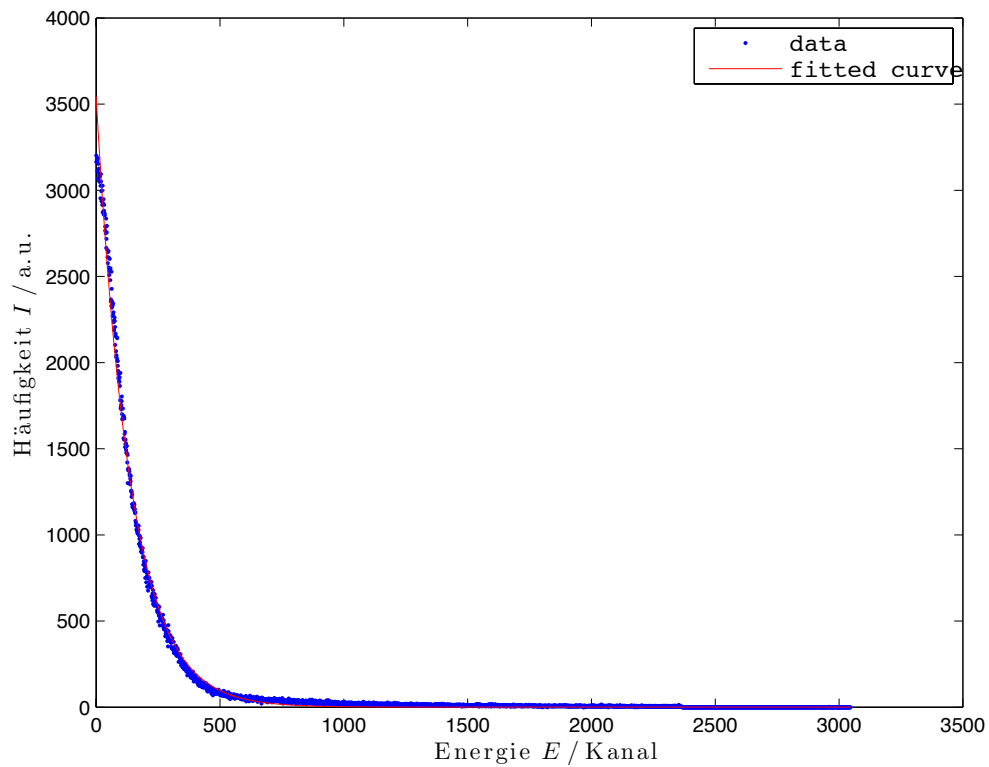


Abbildung 9: Dargestellt ist das Messspektrum über einen Messzeitraum von 12 h mit angefiteter Exponentialfunktion (rot).

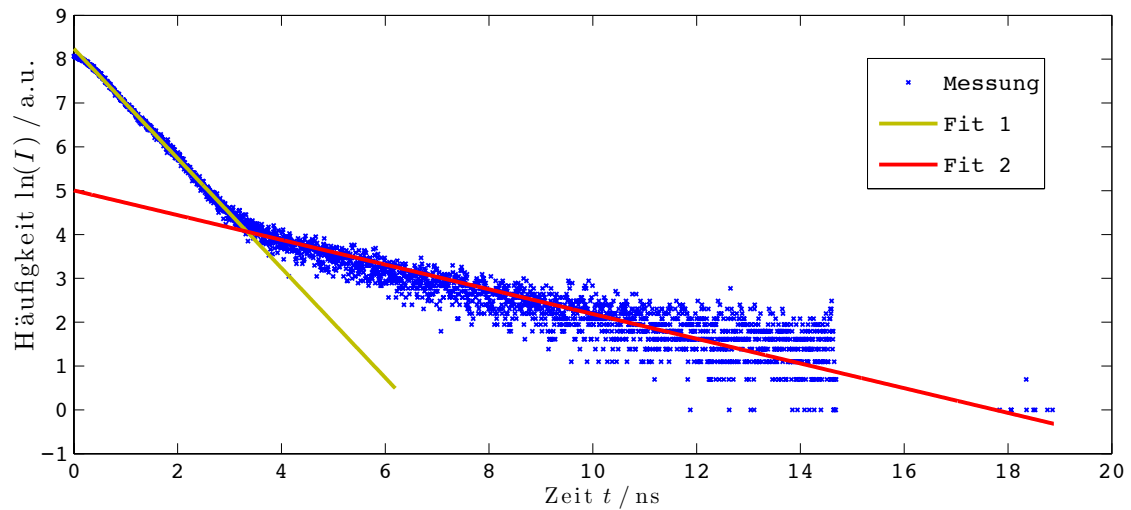


Abbildung 10: Dargestellt ist das Messspektrum über einen Messzeitraum von 12 h in logarithmischer Darstellung. Deutlich erkennbar die zwei verschiedenen Regressionsbereiche (gelbe und rote Gerade).

6 Quellen

- 1) Versuchsanleitung
- 2) Schülerlabor Station 7 Gammastrahlungen - Koinzidenz [Gesellschaft für Schwerionenforschung] (<http://www-alt.gsi.de/documents/DOC-2007-Jan-127-1.pdf>)
- 3) Positronium, Versuchsprotokoll von Alexander Fromm und Martin Hörner (<http://www.physik.uni-freiburg.de/~fromm/uni/Positronium.pdf>)
- 4) Charakterisierung mikro- und mesoporöser Gläser mit Hilfe der ortho-Positronium Lebensdauer-Spektroskopie [Dissertation von Stefan Thränert] (<http://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/08/08H200/t4.pdf>)
- 5) Demtröder Band 4 Kern- Teilchen- und Astrophysik