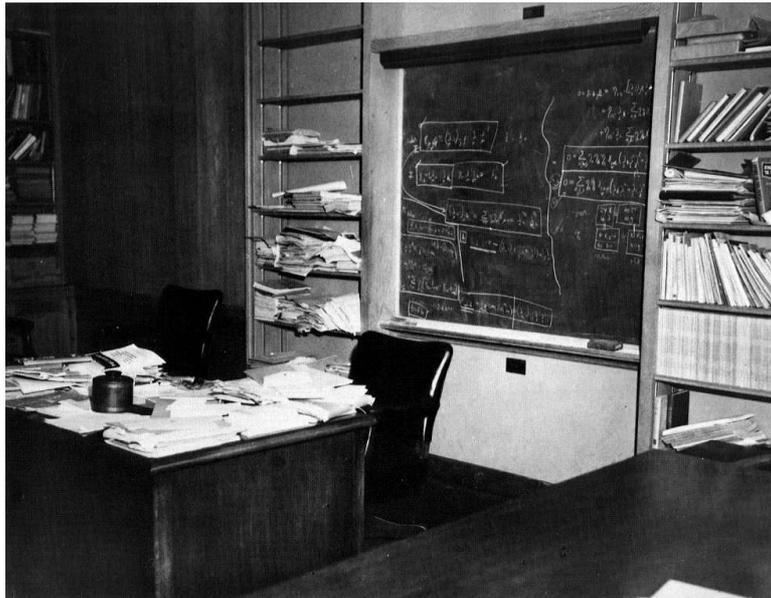


9. Januar 2006

Positronium

Gruppe 36

| | |
|-----------------------------------|---|
| Simon Honc shonc@web.de | Christian Hütter Christian.huetter@gmx.de |
|-----------------------------------|---|



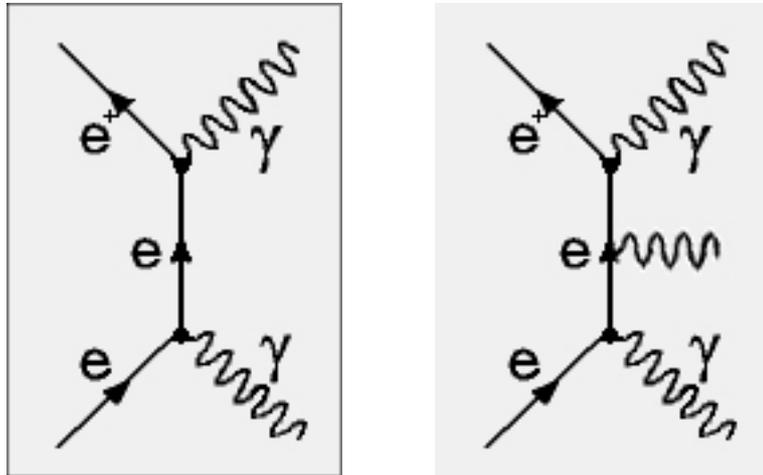
I. Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------|---|----|
| I. | Inhaltsverzeichnis..... | 2 |
| II. | Theoretische Grundlagen | 3 |
| 1. | Paarvernichtung..... | 3 |
| 2. | Positronium | 3 |
| a) | Erzeugung von Positronium..... | 3 |
| b) | Nachweis von Positronium..... | 4 |
| c) | Positronium in Festkörpern | 4 |
| 3. | Szintillator | 4 |
| a) | Photoeffekt | 4 |
| b) | Compton-Effekt..... | 4 |
| c) | Paarerzeugung | 4 |
| III. | Aufbau und Durchführung | 6 |
| IV. | Auswertung | 7 |
| a) | Zeiteichung:..... | 7 |
| b) | Aufbereitung des Spektrums, Bestimmung der Lebensdauern τ_1 und τ_2 | 8 |
| i) | langsamer Zerfall | 9 |
| ii) | schneller Zerfall | 10 |
| c) | Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit..... | 11 |
| V. | Literatur und Quellangaben..... | 13 |

II. Theoretische Grundlagen

1. Paarvernichtung

Unter Paarvernichtung versteht man den Prozess, der ein Elektron und ein Positron in zwei oder drei Photonen überführt.



Der jeweilige Prozess wird durch das Zusammentreffen der Spins des Elektrons bzw. Positrons bestimmt. Sind die Spins entgegengesetzt zueinander, also der Gesamtspin $J=0$ (singulett), führt der Prozess zu zwei Photonen. Sind die Spins parallel zueinander ($J=1$, triplett) entstehen drei Photonen. Der 3-Photonen-Prozess ist von höherer Ordnung, und daher unwahrscheinlicher.

2. Positronium

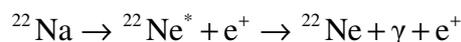
Als Positronium bezeichnet man ein „Atom“, das aus einem Positron und einem Elektron besteht. Vergleicht man es mit dem Wasserstoffatom, ist das Proton durch ein Positron ersetzt. Auf dieser Grundlage kann es analog zum Wasserstoff diskutiert werden.

Entscheidender Unterschied ist dabei jedoch, dass der Positron-Kern dieselbe Masse wie das Elektron hat und zusätzlich einen Spin besitzt. Das Positronium ist kein stabiler Zustand und zerfällt so schon nach wenigen Nanosekunden.

Man spricht von Parapositronium, wenn die beiden Spins in die entgegengesetzte Richtung zeigen (Singulett-Zustand)– sonst vom Orthopositronium (Triplett-Zustand). Die beiden Zustände unterscheiden sich hauptsächlich durch ihre Lebensdauer. Da die entgegengesetzten Spins im Parapositronium eine magnetische Anziehung hervorrufen, zerfällt es signifikant früher ($\sim 10^{-10}$ s statt $\sim 10^{-7}$ s).

a) Erzeugung von Positronium

Positronen entstehen bei natürlichen Zerfällen von ^{22}Na -Atomen.



Das angeregte Neonatom, fällt sofort in seinen Grundzustand und sendet dabei ein charakteristisches Photon (1,27MeV) aus, das als Signal für die Existenz des Positrons verwendet werden kann.

In Festkörpern, werden die Positronen dann sehr schnell abgebremst und können so mit Elektronen ein Positronium bilden. Das Positronium ist dabei fast in Ruhe,

wodurch die Zerfallsprodukte maximal in der Größenordnung der Elektronenmasse sein dürften. Problematisch ist hierbei, wenn Elektron und Positron schon sehr langsam sind und sich dennoch vor der Positroniumbildung vernichten.

b) Nachweis von Positronium

Um sich sicher zu sein, ob sich tatsächlich Positronium gebildet hat betrachtet man das Verhältnis der möglichen Paarvernichtungsprozesse. Also ob es in zwei oder drei Photonen zerfallen ist. Hat sich Positronium gebildet, ist das Verhältnis $V_p = \frac{\sigma_{3\gamma}}{\sigma_{2\gamma}} = 3$, statt der $V_f = \frac{1}{372}$ für den freien Zerfall.

Man filtert also die energiereichen Photonen aus, und überprüft dann die Qualität seiner Messung indem man das Verhältnis betrachtet.

c) Positronium in Festkörpern

In Festkörpern ist eine stark verkürzte Lebensdauer von Orthopositronium bemerkbar. Dies lässt sich durch zwei Prozesse erklären. So kann es durch die Übertragung eines Drehimpulses auf ein Elektron des Festkörpers auch in zwei Photonen zerfallen (Pick-Off-Prozess) oder durch den kompletten Austausch eines Elektrons sich in ein Parapositronium umwandeln (Konversion).

3. Szintillator

Mit einem Szintillator können Photonen und geladenen Teilchen nachgewiesen werden. Für unseren Versuch wird ein Szintillator zum Nachweis von Photonen verwendet. Abhängig von dessen Material und der Energie der Photonen, wird dabei ein Elektron erzeugt, durch welches Lichtblitze entstehen, die in einem Photomultiplier in ein elektrisches Signal umgewandelt werden können. Neben dem Zeitpunkt, wann das Teilchen eingefallen ist, steckt in dem Signal auch Information über die Energie des eingefallenen Teilchens.

Je nach Szintillator werden folgende Effekte zur Detektierung der Photonen ausgenutzt:

a) Photoeffekt

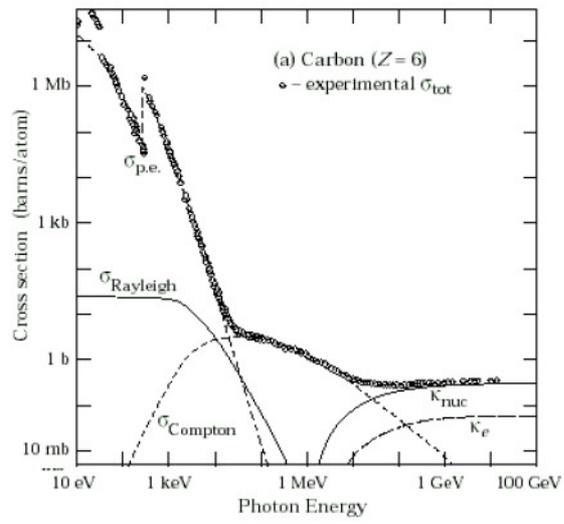
Beim Photoeffekt wird ein Elektron aus der Hülle eines Atoms herausgeschlagen. Das Photon wird dabei vollständig vom Elektron absorbiert. Dazu muss mindestens die Bindungsenergie der Elektronen zur Verfügung stehen.

b) Compton-Effekt

Der Compton-Effekt ist eine Elektron-Photon Streuung. Wegen seiner ausreichend hohen Energie, sieht das Photon das Elektron als quasi-frei. Das Photon wird dabei vom Elektron absorbiert und gleich darauf wieder mit anderer Wellenlänge emittiert. Bei höherer Energie des Photons überwiegt also der Comptoneffekt dem Photoeffekt immer mehr.

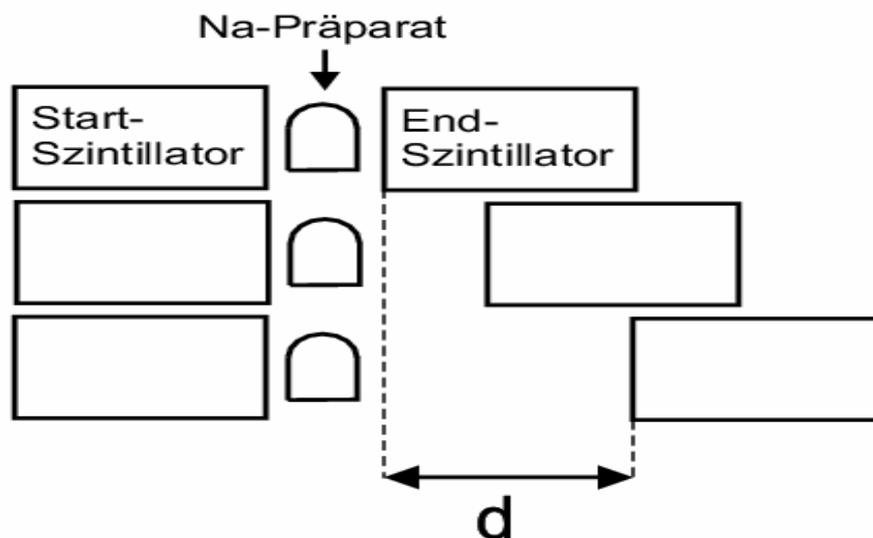
c) Paarerzeugung

Paarerzeugung findet nur bei sehr hohen Energien statt. Dazu muss ein Photon die nötige Energie zur Erzeugung eines Elektron-Positron-Paars besitzen. Je energiereicher das Photon, umso eher kann dieser Prozess stattfinden. Es wird also bei höheren Energien immer unwahrscheinlicher vor Eintritt des Effekts noch an einem Elektron zu streuen.



III. Aufbau und Durchführung

Unser Versuch lebt im hauptsächlich von zwei Zeitmessungen. Diese sind unser Start- und Stoppsignal. Als Startsignal nehmen wir das 1,276 MeV γ -Quant des Neon ^{22}Ne , das beim Übergang vom angeregten Zustand in den Grundzustand ausgesandt wird. Als Stoppsignal würde sich natürlich ein γ -Quant anbieten das max. ein Energie von 511 keV besitzt. Jedoch haben wir hier das Problem das wir diesen Energiebereich nicht einfach ausschneiden können. So nehmen wir als Stoppsignal einfach jedes γ -Quant, was bedeutet, dass wir mehr zufällige Ereignisse mitmessen.



(Abb. 1)

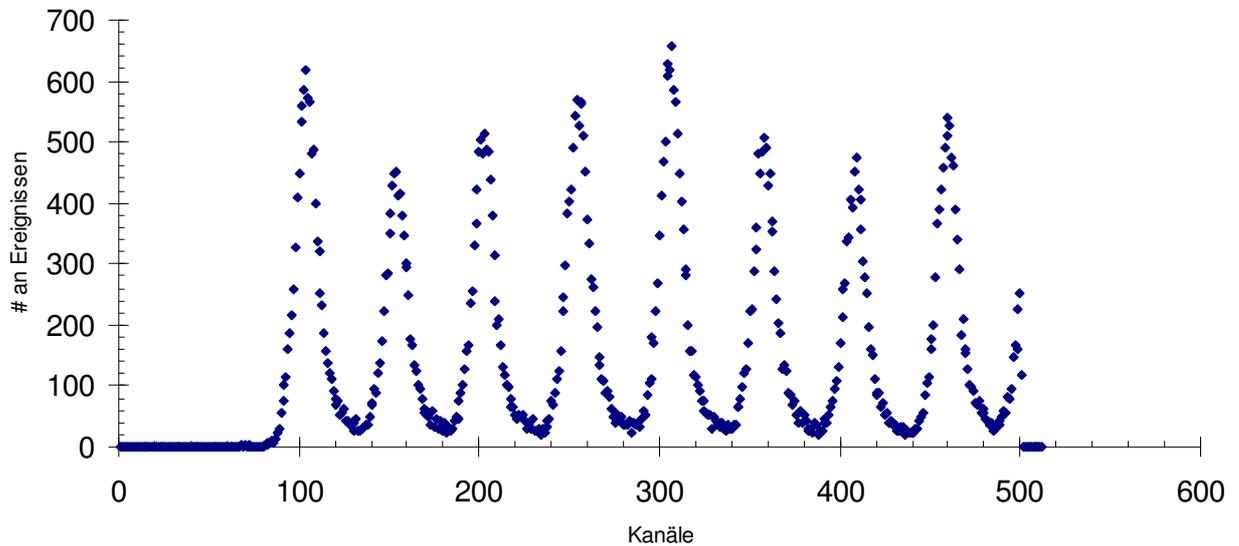
Wir müssen nun jedoch beachten, dass sich die Zerfälle des Ortho-, Parapositronium sowie der freie Zerfall bei unserer Zeitmessung überlagern! Die Zeitauflösung wird jedoch zu schlecht sein, als dass wir die beiden zuletzt genannten Zerfälle zeitlich auflösen könnten. Daher ergibt sich folgender Zusammenhang.

$$N(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau_1}} + Be^{-\frac{t}{\tau_2}} + C$$

In C finden sich die zufälligen Koinzidenzen wieder. Da die zufälligen Ereignisse zeitlich konstant bleiben, ist somit C auch eine Konstante.

IV. Auswertung

a) Zeiteichung:



(Graph 1)

Für die Zeiteichung haben wir eine ^{22}Na -Quelle verwendet. Unsere beiden Detektoren sind in einem Winkel von 180° aufgestellt. D.h. unsere registrierten Start- und Stopp-Quanten fliegen in einem Winkel von 180° auseinander. Um nun die Zeitauflösung zu ermitteln [Zeit/Kanal], haben wir die Zerfälle

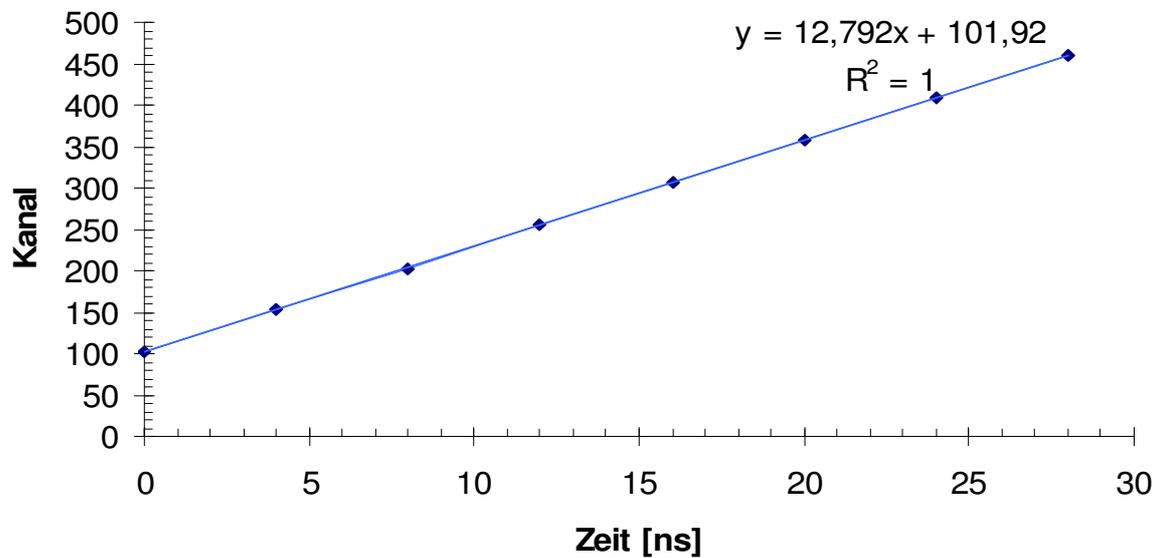
zunächst bei 0 ns aufgenommen, danach haben wir jeweils den festen Wert von 4 ns zugeschaltet und die nächsten Zerfälle aufgenommen. Durch die Peaks und dem Wissen, dass zwischen ihnen jeweils 4 ns liegen, ist es nun möglich die Zeitauflösung zu bestimmen.

| | Verzögerung [ns] | Peaks bei [Kanal] |
|-------|------------------|-------------------|
| | 0 | 102 |
| +4 ns | 4 | 154 |
| +4 ns | 8 | 203 |
| +4 ns | 12 | 255 |
| +4 ns | 16 | 307 |
| +4 ns | 20 | 358 |
| +4 ns | 24 | 409 |
| +4 ns | 28 | 460 |

(Tab. 1)

Tragen wir nun die Kanäle der Peaks über die jeweilige Verzögerung auf, so können wir eine Ausgleichsgerade durch die Messpunkte ziehen. Es ergibt sich folgender Zusammenhang.

$$k = m \cdot t + b$$



(Graph 2)

Damit ergibt sich eine Auflösung von $78,17 \cdot 10^{-2} ns$ pro Kanal.

b) Aufbereitung des Spektrums, Bestimmung der Lebensdauern τ_1 und τ_2

Wie schon vorher erwähnt ergibt sich folgender Zusammenhang für unser Spektrum.

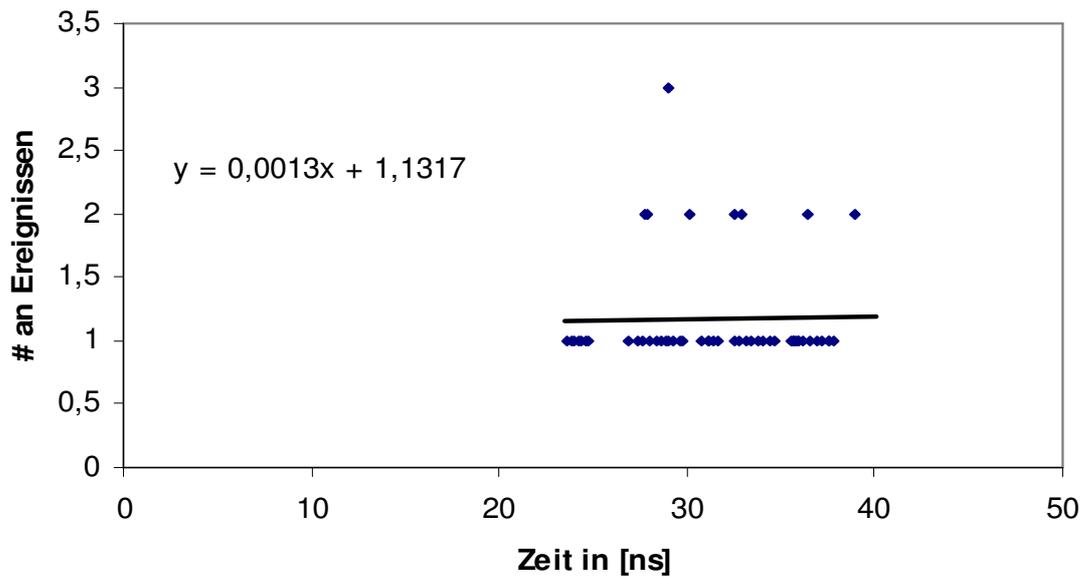
$$N(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau_1}} + Be^{-\frac{t}{\tau_2}} + C$$

Als erstes legen wir nun unser Augenmerk auf die Konstante C.

Dies sind die zufälligen Ereignisse die mit aufgenommen wurden und bilden den Untergrund. Um unser Spektrum von dem Untergrund zu bereinigen, betrachten wir das Spektrum für große Zeiten. Hier sind die beiden e-Funktionen bereits abgeklungen. Um nun einen Wert für den Untergrund zu bekommen, haben wir den Mittelwert für die Ereignisse von Kanal 300 bis 512 gebildet.

Es ergab sich ein Untergrund von $N_{UG}(t) = 1,173$ mit einer Standardabweichung $\sigma_{UG} = 0,43$.

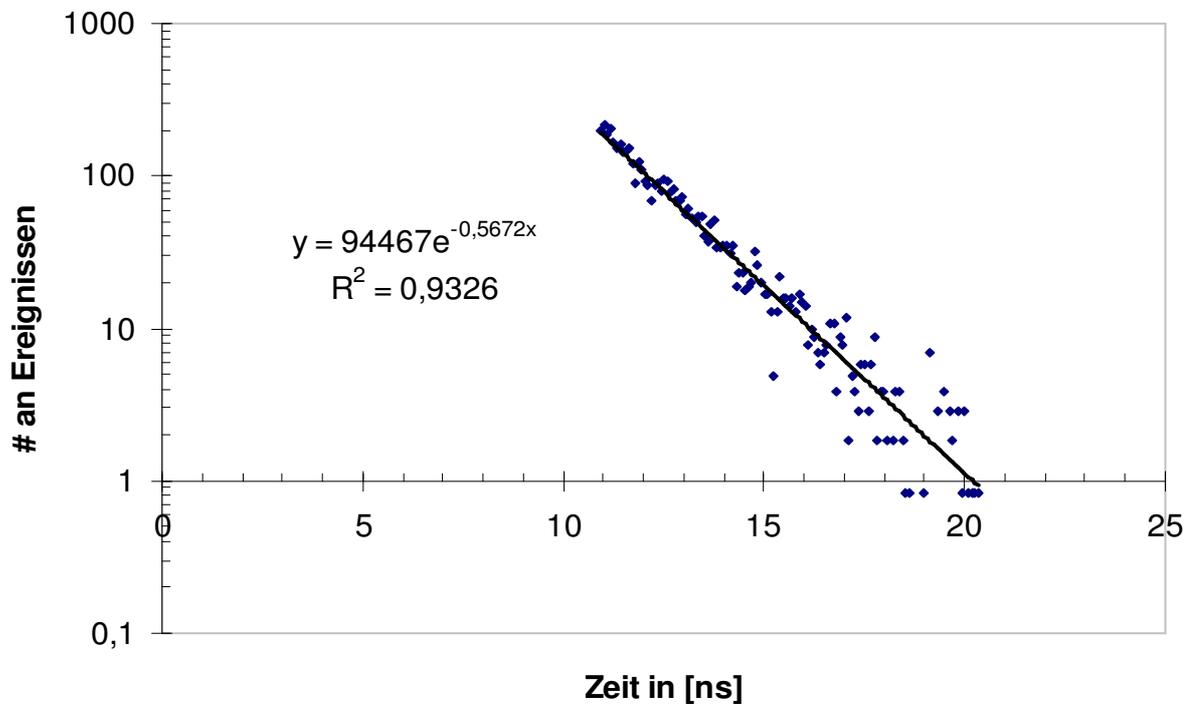
Eine Ausgleichsgerade durch den "hinteren" Teil des Spektrums bestätigt dies nochmals.



(Graph 3)

i) langsamer Zerfall

Nach all dieser Vorarbeit können wir nun die Lebensdauer der langlebigen Komponente (Orthopositronium) ermitteln. In unseres, um den Untergrund $N_{UG}(t) = 1,173$, bereinigtes Spektrum, können wir durch logarithmisches Auftragen eine Ausgleichsgerade ziehen.



(Graph 4)

Die kurzlebige Komponente aus $N(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau_1}} + Be^{-\frac{t}{\tau_2}} + C$ spielt hierfür keine Rolle, da sie in diesem Teil des Spektrums bereits zum größten Teil abgeklungen ist.
Damit ergibt sich:

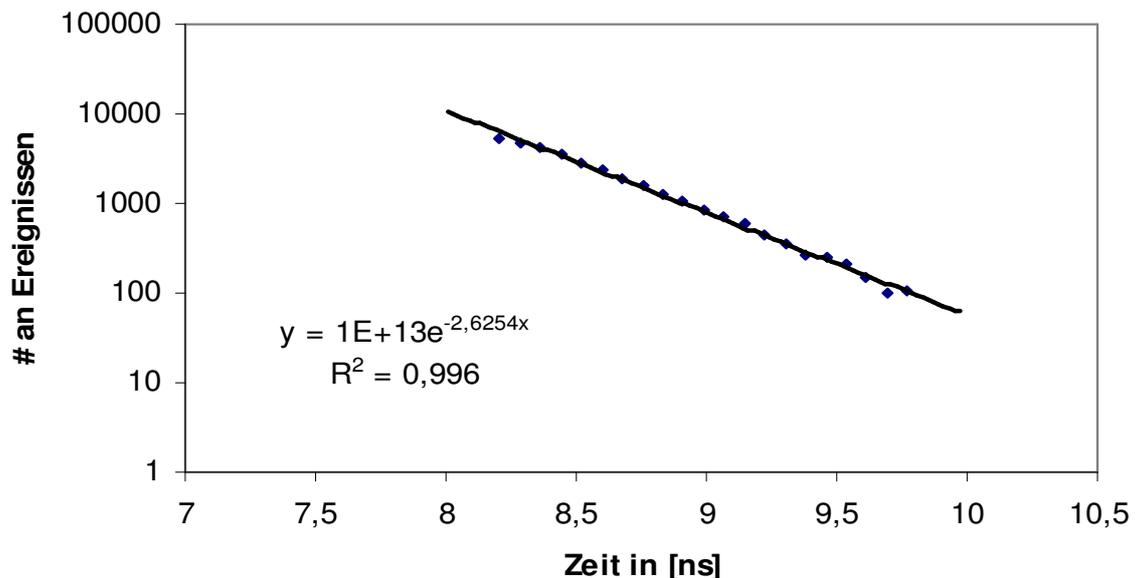
$$N_{langl.}(t) = Be^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad d.h. \quad N_{langl.}(t) \propto e^{-\frac{t}{\tau_2}}$$

Somit erhalten wir die Lebensdauer τ_2 aus dem Exponenten der e-Funktion für die langlebige Komponente (siehe dazu Graph 4).

$$e^{-\frac{t}{\tau_2}} = e^{-0,5672 \cdot t} \Rightarrow \tau_2 = 1,764ns$$

ii) schneller Zerfall

Unser Vorgehen hier, ist analog den Schritten zuvor. Wir haben das von dem Untergrund bereinigte Spektrum, nun auch von dem langsamen Zerfall bereinigt.
Wieder tragen wir das Spektrum logarithmisch auf, und tragen eine Ausgleichsgerade ein.



(Graph 5)

Für die kurzlebige Komponente ergibt sich:

$$N_{kurzl.}(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad d.h. \quad N_{kurzl.}(t) \propto e^{-\frac{t}{\tau_1}}$$

(bereinigt von langlebiger Komponente und Untergrund!)

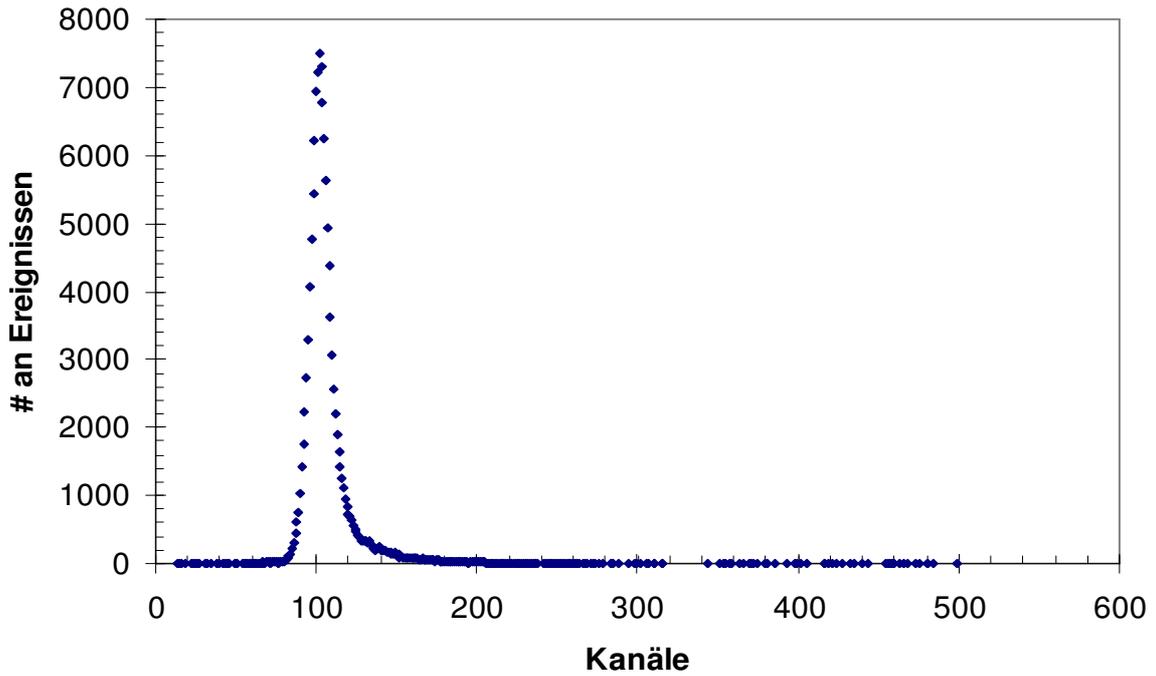
Damit erhalten wir die Lebensdauer τ_1 analog zu i):

$$e^{-\frac{t}{\tau_1}} = e^{-2,6254t} \Rightarrow \tau_1 = 0,3809ns$$

c) Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit

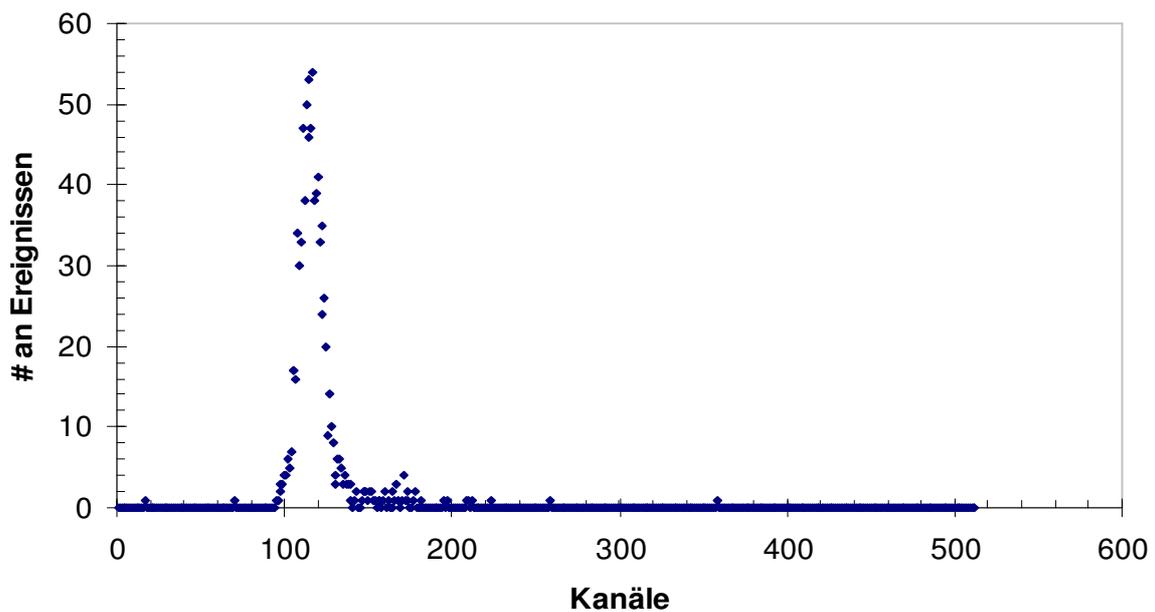
Hierfür verschieben wir unseren rechten Detektor um $\Delta x = 30$ cm, sowie um $\Delta x = 60$ cm nach rechts. Unser rechter Detektor ist derjenige Detektor, der für das Stoppsignal zuständig ist. D.h. unser γ -Quant hat nun, nach Verschieben des Detektors, einen längeren Weg zurückzulegen uns ist somit auch länger unterwegs. Als wir nun das Spektrum jeweils erneut aufnahmen hatte dies zur Folge, dass sich das Spektrum nach rechts verschoben hatte.

$\Delta x = 0$ cm



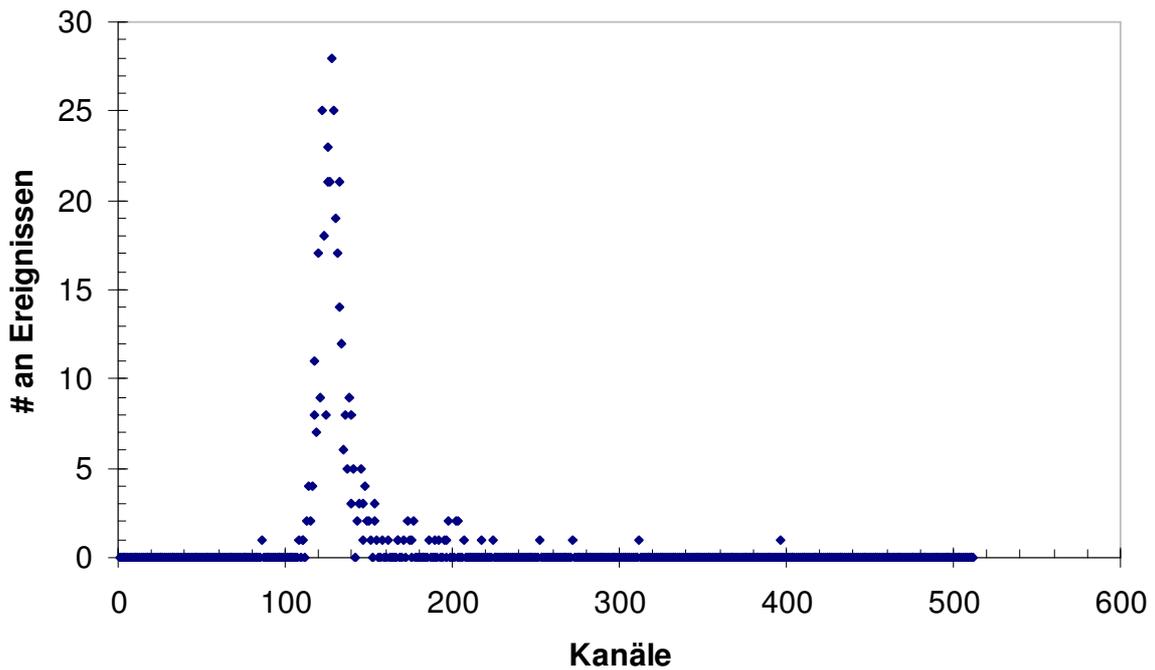
(Graph 6)

$\Delta x = 30$ cm



(Graph 7)

$\Delta x = 60 \text{ cm}$



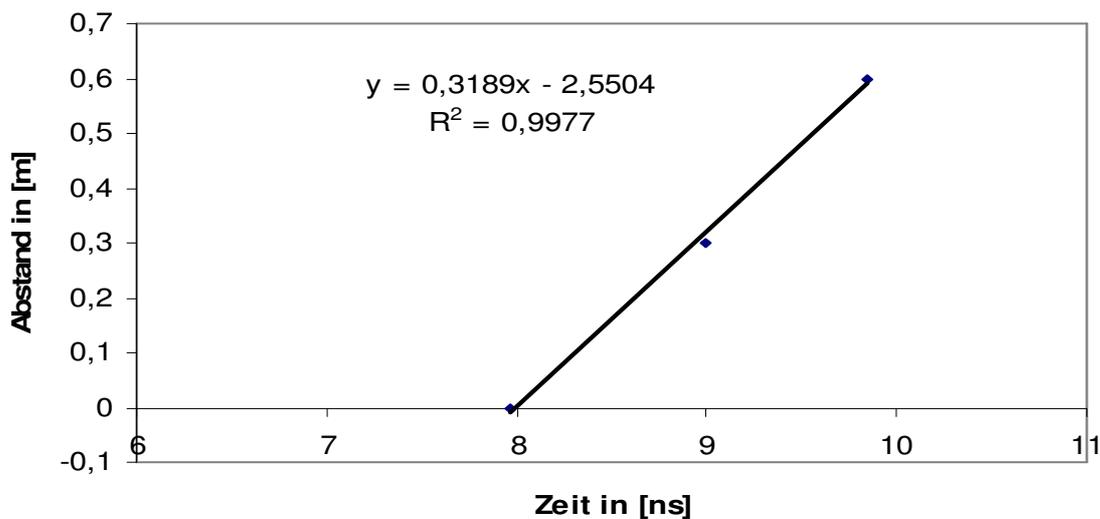
(Graph 8)

Es ergaben sich folgende Werte:

| | Messung 1 | Messung 2 | Messung 3 |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|
| Δx [m] | 0 | 0,3 | 0,6 |
| Peaks bei Kanal | 102 | 115 | 126 |
| Peaks [ns] | 7,973 | 8,99 | 9,85 |

(Tab. 2)

Tragen wir diese Punkte in einen Graphen ein und ziehen eine Ausgleichsgerade hindurch, so können wir aus der Steigung die Lichtgeschwindigkeit c bestimmen.



(Graph 9)

Wir kommen auf einen Wert von $c = 3,189 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

V. Literatur und Quellangaben

- <http://www.wikipedia.de>

VI. Anhang

Datenblätter