

Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene, Teil B

Lebensdauer von Positronen in Festkörpern

Versuch 8

Betreuer Henrike Wissling

Gruppe 2

W.Bender (walter.bender@rwth-aachen.de), J.Luckas (c.hihiro@gmx.de)

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel und Zweck des Versuchs	3
2	Positron und Positronium	4
3	Das Nachweisprinzip	5
4	Aufbau des Zeitspektrometers	6
5	Versuchsdurchführung	7
5.1	Schaltung des langsamen Kreises und Kalibration der Diskriminatoren . . .	8
5.2	Schaltung des schnellen Kreises und Kalibration der Diskriminatoren . . .	9
5.3	Zeitkalibration des schnellen Kreises	10
5.4	Bestimmung der Zeitauflösung mit ^{60}Co	10
5.5	Messung der Lebensdauer von Positronium in Polyäthylen	10
6	Versuchsauswertung	11
6.1	Zeitkalibration	11
6.2	Bestimmung der Zeitauflösung mit ^{60}Co	12
6.3	Messung der Lebensdauer von Positronium in Polyäthylen	13

1 Ziel und Zweck des Versuchs

In diesem Versuch soll die Lebenszeit von Positronen in Polyäthylen gemessen werden. Dabei liegen die Lebenszeiten in der Größenordnung von Pikosekunden. Deshalb muss schnelle Elektronik verwendet werden. Das Erlernen des Umgangs mit diesen Geräten ist ein entscheidender Teil des Versuchs.

2 Positron und Positronium

Positronen sind die Antiteilchen der Elektronen. Sie werden z.B. im β^+ -Zerfall emittiert. Durch Wechselwirkung mit den Hüllenelektronen werden sie bis auf thermische Energie abgebremst. Dann annihilieren sie mit einem Elektron unter Aussendung von γ -Quanten.

In Isolatoren kann das Positron jedoch auch ein Elektron einfangen und ein Positronium bilden. Das Positronium ist das Analogon zum Wasserstoffatom. Positron und Elektron besitzen dabei entweder gleichgerichtete Spins (Ortho-Ps, $J=1$) oder entgegengesetzte Spins (Para-Ps, $J=0$).

Das Positronium zerfällt gemäß des Zerfallsgesetz Gl. 1. Dabei sendet Para-Ps zwei Photonen und Ortho-Ps drei Photonen aus.

$$N = N_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1)$$

τ bezeichnet die mittlere Lebensdauer für Positronium. Diese Lebensdauer ist für Ortho- oder Para-Ps sehr unterschiedlich.

$$\tau_{Para} \approx 10^{-10} \text{ s}, \tau_{Ortho} \approx 10^{-7}$$

Das Lebensdauerspektrum bildet sich demnach aus dem spontanen Zerfall des Positrons und den Zerfällen des Para- und Ortho-Ps.

Das verhältnismäßige langlebige Ortho-Ps kann sich jedoch durch Wechselwirkung mit den Hüllenelektronen in Para-Ps umwandeln, welches dann schnell unter Aussendung zweier γ -Quanten zerstrahlt. Diesen Effekt bezeichnet man als "Quenching". Man wird also eine wesentlich kürzere Lebensdauer messen als die erwarteten τ_{Ortho} .

3 Das Nachweisprinzip

Zur Erzeugung von Positronen wird der β^+ -Zerfall des ^{22}Na genutzt. Dieses zerfällt praktisch nur über angeregtes $^{22}\text{Ne}^*$, welches spontan unter Aussendung eines Photons der Energie $E = 1,28 \text{ MeV}$ in den Grundzustand übergeht. Das Positron bzw. Positronium zerfällt dann unter Aussendung von γ -Quanten der Energie $E = 0,511 \text{ MeV}$. Dies legt die Idee nahe, das hochenergetische Photon $E_{\text{Start}} = 1,28 \text{ MeV}$ als Startsignal und das niederenergetische Photon $E_{\text{Stop}} = 0,511 \text{ MeV}$ als Stoppsignal zur Lebensdauerdauer-messung zu nutzen.

Zur Messung wird ein Zeitspektrometer verwendet. Da die zu messenden Lebensdauern sehr klein sind, muss zur Detektion dieser Photonen ein Plastikszintillator verwendet werden.

4 Aufbau des Zeitspektrometers

Zur Messung der Lebensdauer wird ein Zeitspektrometer verwendet. Das Spektrometer besteht aus einem schnellen und einem langsamen Kreis. Der langsame Kreis wird an die Dynodenausgänge der Szintillatoren geschaltet. Der langsame Kreis dient zur Energie-selektion der eintreffenden Photonen. Durch Einstellen der richtigen Komponenten des Diskriminators wird erreicht, dass im Startzweig (1) nur die Pulse der 1,28MeV-Quanten (Startsignal) weiterverarbeitet werden. Im Stopzweig (2) können nur die Pulse des 0,51 MeV-Quanten passieren. Zur Verstärkung des Signals ist ein "Linear Amplifier" zwischengeschaltet. Start- und Stopzweig werden in einer Koinzidenz zusammengeschaltet. Der Ausgang der Koinzidenzstufe öffnet das Gate, so dass das Zeitsignal vom TAC (Time-toAmplitudeConverter) registriert werden kann. Der schnelle Kreis wird an die Anoden des Szintillators angeschlossen. Das Signalrauschen wird durch Verwendung weiterer Diskriminatoren unterdrückt. Der Startpuls schaltet eine konstante Stromquelle ein, welche einen Kondensator auflädt. Das eintreffende Stoppsignal schaltet die Stromquelle wieder ab. Man erhält somit Spannungspulse, deren Höhe proportional zur Zeitdifferenz zwischen Start- und Stoppsignal sind. Der Ausgang dieses TAC ist über eine eingebaute Verzögerungsstufe an den PC-gesteuerten VKA, welches das Pulshöhenspektrum aufzeichnet, angeschlossen.

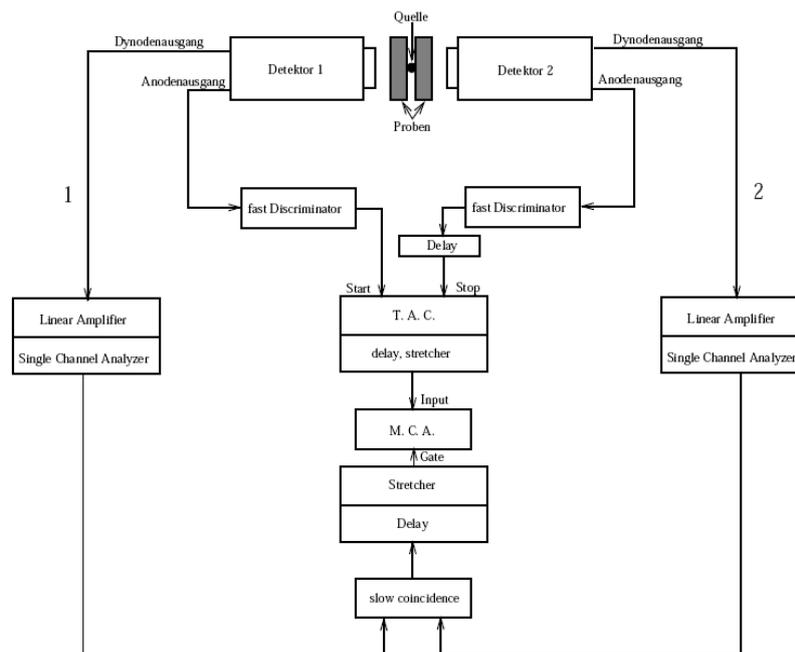


Abbildung 4.1: Schaltung des Zeitspektrometers

5 Versuchsdurchführung

Mittig zwischen die im 180° Winkel stehender Detektoren, wird die ^{22}Na -Probe eingebracht. Dann wird mit der Schaltung der oben geschilderten Kreise begonnen. In Abb 5.1 sind einige der verwendeten Geräte gezeigt. Während des Aufbaus der Schaltung ist darauf zu achten für Start und Stoppsweige Kabel gleicher Längen zu verwenden. Andernfalls könnte dies zu ungewollten Zeitverzögerungen zwischen Start- und Stoppsignal führen.

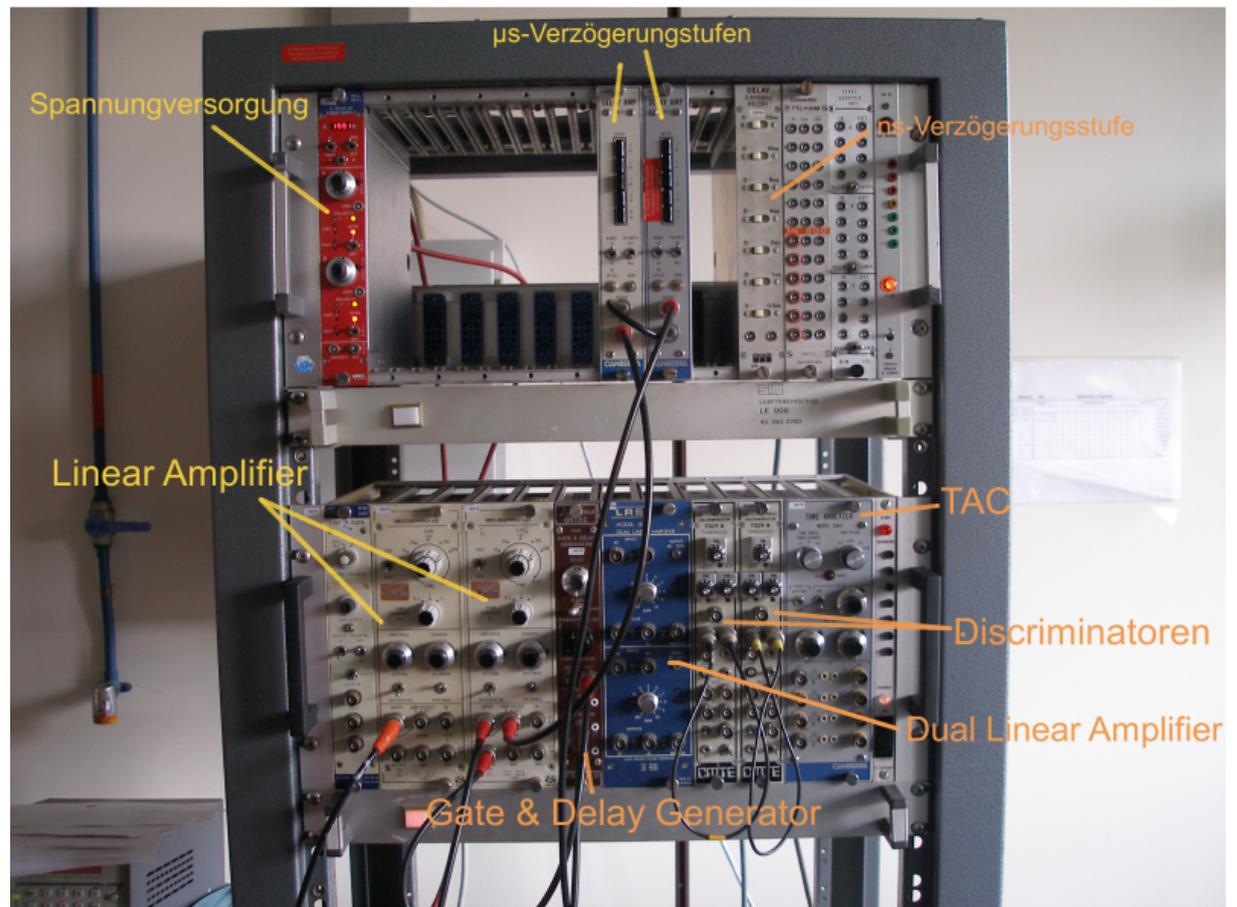


Abbildung 5.1: Verwendete Versuchsaapparaturen

5.1 Schaltung des langsamen Kreises und Kalibration der Diskriminatoren

Zur Energieselektion wird der Stopp- und Startzweig des langsamen Kreises unabhängig voneinander auf die Einstellung Treshold und Window kalibriert. Dazu schaltet man jeweils einen Dynodenausgang an den Input des Amplifier Analysers, welcher zwei Outputs besitzt. Es können nur positive Signale am VKA verarbeitet werden. Am Amplifier können deshalb die vom Detektor kommenden Negativsignale umpolarisiert werden. Am Amp-Output kann das verstärkte Signal abgegriffen werden. Um das Maß der Verstärkung einzustellen, schaut man sich die getriggerten Pulse auf einem Oszilloskop an. Es soll eine möglichst hohe Verstärkung benutzt werden, sodass der Verstärker das Signal gerade nicht übersteuert. Somit werden hohe Zählraten erreicht. Zusätzlich werden die getriggerten Normsignale am L-Output abgegriffen und auf das Oszilloskop gegeben. Mit dem L-Output wird nun ein Gate generiert. Dazu wird der L-Output an den "Gate & Delay Generator" angeschlossen. Zum Aufbau der Schaltung ist es wichtig stets die positiven In- und Outputs zu verwenden. Der L-Output gibt Rechteckpulse aus. Um diese zu erzeugen differenziert er das Signal. Dies benötigt eine gewisse Zeit. Um nun Rechteckpuls und Eingangspuls gleichzeitig auf dem Oszilloskop sichtbar zu machen, muss das Eingangssignal verzögert werden. Aus diesem Grund wird eine manuell regelbare μs -Verzögerungsstufe zwischen Amp-Output und Oszilloskop geschaltet. Um Messwerte an der Koinzidenzstufe aufzunehmen muss das Gate ca. $0,5 \mu\text{s}$ vor und nach Erreichen des Pulses geöffnet sein. Die Rechteckpulslänge muss also mit der Einstellung WIDTH am "Gate & Delay Generator" dementsprechend verändert werden. Nun wird das Eingangssignal über das Multiport auf den Rechner und das Gatesignal auf die Koinzidenzstufe gegeben. Zur Aktivierung des Gates muss die Koinzidenz am Rechner eingeschaltet werden. Nun wird vom VKA ein Energiespektrum aufgezeichnet, siehe Abb. 5.2 .

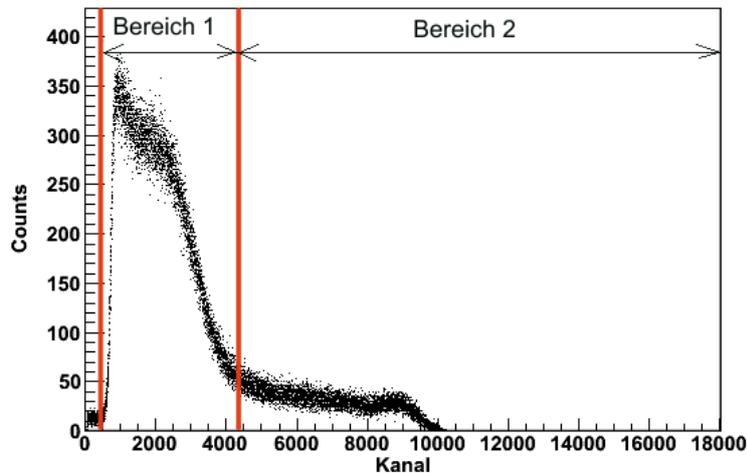


Abbildung 5.2: Pulshöhenspektrum zur Energieselektion

Deutlich sind die Comptonkanten der Photonen $E = 1,28\text{MeV}$ und $E = 0,511\text{MeV}$ zu erkennen. Mit der Einstellung Treshold kann nun eine untere Schwelle, mit der Einstellung Window eine Intervallbreite eingestellt werden. Für das Stoppsignal dient der Bereich 1, für das Startsignal Bereich 2. Zur Bestimmung der Einstellungen wird der Treshold von 0 langsam erhöht und das Window von maximal langsam erniedrigt, bis das gewünschte Energiespektrum vom VKA aufgenommen wird. Für das Stoppsignal werden die Einstellungen Treshold = 0,24 und Window = 1,44 als optimal empfunden. Für das Startsignal wird Treshold = 1,98 und Window = max. gewählt.

5.2 Schaltung des schnellen Kreises und Kalibration der Diskriminatoren

Als nächstes wird der schnelle Kreis geschaltet. Die Discriminatoren des Stop und Startzweiges werden einzeln mit Hilfe eines Oszilloskops kalibriert. Dazu schließt man den zugehörigen Anodenausgang an den "Dual Linear Amplifier", welcher das Signal zwei Mal ausgibt. Ein Signal wird sofort auf das Oszilloskop, das zweite an den Input des Discriminator weiter geleitet. Der SCA-Output wird ebenfalls auf das Oszilloskop gelegt. Mit der Einstellung Treshold des Diskriminators werden niedrige Pulshöhen unterdrückt und somit Rauschen verhindert. Für das Startsignal ist ein Einstellung der Schwelle optimal, wenn der intensitätsstarke Puls in der Mitte des Spektrums vollständig unterdrückt ist. Dies wurde durch die Wahl Treshold = 0,8 erreicht. Da das Stoppsignal Quanten der geringen Energie $0,511\text{keV}$ verwendet, werden hier nur das stärkste Rauschen rausgefiltert.

5.3 Zeitkalibration des schnellen Kreises

Sind die Discriminatoren des schnellen Kreises eingestellt, wird die Zeitkalibration durchgeführt. Hierzu wird das Eingangssignal von einem Frequenzgenerator geliefert. Über den Discriminator wird der Startzweig sofort an den Start-Input des TAC angeschlossen. Zur Einstellung bekannter Zeitintervalle zwischen Start und Stoppsignal muss das Stoppsignal verzögert werden. Dazu wird im Stoppzweig zusätzlich eine Verzögerungsstufe im ns-Bereich, zwischen Discriminator und TAC geschaltet. Der TAC-Ausgang wird nun mit dem Multiport verkabelt. Zur Zeikalibration muss die Koinzidenz ausgesteckt und am Rechner ausgeschaltet sein. Zu gegebener Zeitverzögerung zwischen Start- und Stoppsignal wird nun vom VKA ein Spektrum aufgezeichnet.

5.4 Bestimmung der Zeitauflösung mit ^{60}Co

Nun werden langsamer und schneller Kreis zusammenschaltet und die Verzögerungsstufe auf 0 ns gesetzt. Zur Bestimmung der Zeitauflösung wird ^{60}Co verwendet. ^{60}Co liefert zwei zeitgleiche γ -Quanten. Das gemessene Zeitintervall sollte demnach bei ca. 0 ns liegen. Jedoch liegt dieses Signal nicht scharf auf einem Kanal, sondern ist über mehrere Kanalnummern verteilt. Die Kanalbreite σ dieser Gaußverteilung ist ein Maß für die Zeitauflösung und gibt damit die Güte der Messung an.

Dazu wird mit dem Programm ROOT ein Gaußfit an die Messpunkte durchgeführt.

5.5 Messung der Lebensdauer von Positronium in Polyäthylen

Zur Hauptmessung wird das ^{60}Co wieder gegen ^{22}Na ausgetauscht. Ansonsten wird die Schaltung vom vorherigen Versuchsteil beibehalten. Über Nacht wird das Zeitspektrum vom VKA aufgenommen.

6 Versuchsauswertung

6.1 Zeitkalibration

Exemplarisch ist das Spektrum in Abb. 6.1 für 10 ns gezeigt.

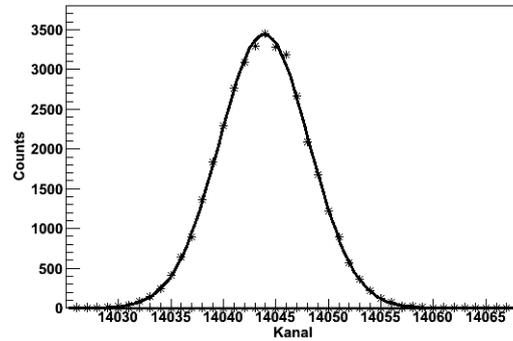


Abbildung 6.1: Spektralaufnahme für 10 ns

Die Spektren stellen also Gaußkurven dar. Der Mittelwert dieser Verteilung wird nun der eingestellten Zeitverzögerung zugeordnet. Offenbar verhält sich die Zuordnung Kanalnummer und Zeitintervall linear. Zur Bestimmung des quantitativen Zusammenhangs wird eine Geradenanpassung durchgeführt. Dazu werden auf die Messpunkte und die aus dem Gaußfit erhaltenen Fehler benutzt. Die zugehörige Geradenanpassung ist in Abb. 6.2 gezeigt.

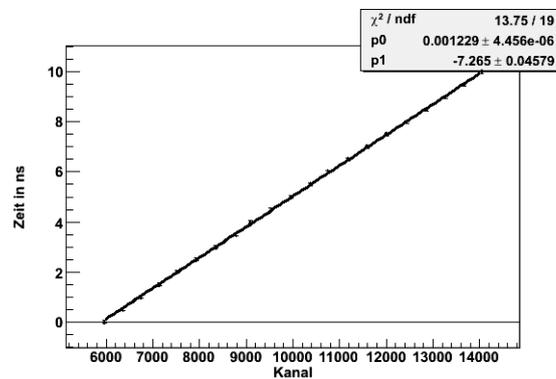


Abbildung 6.2: Zeitkalibration bei verzögerten Startsignal

Das χ^2 /Freiheitsgrad von 0,72 zeigt, dass die Fehler richtig eingeschätzt sind. Zur Umrechnung von Kanalnummer nach Zeit gilt also Gl.2

$$t = (1,229 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Kanalnummer} - 7,625) \text{ns} \quad (2)$$

6.2 Bestimmung der Zeitauflösung mit ^{60}Co

Da die Messung über Nacht läuft, wird vor und nach der Messung das Zeitspektrum des ^{60}Co aufgenommen und anhand dieser Daten die Zeitauflösung bestimmt. Das erste ^{60}Co -Spektrum (v.M) wurde über 10 Minuten, das zweite ^{60}Co -Spektrum (n.M) über 60 Minuten aufgenommen. Das erhaltene Kanal-Counts-Spektrum wird mit der in Gl. 2 in ein Zeit-Counts-Spektrum umgerechnet. Die Messdaten werden in einem Histogramm zusammen gefasst. Dabei beträgt die gewählte Binbreite $\frac{4}{70}\text{ns}$.

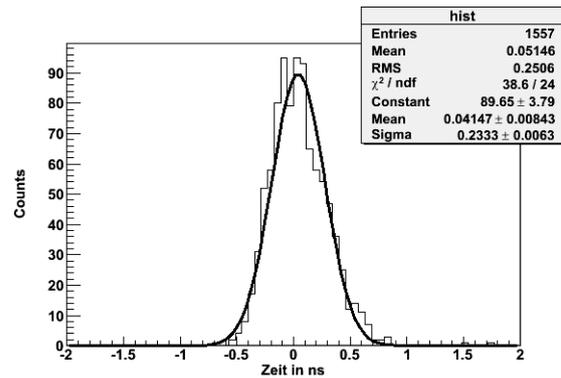


Abbildung 6.3: Zeitspektrum des ^{60}Co v.M.

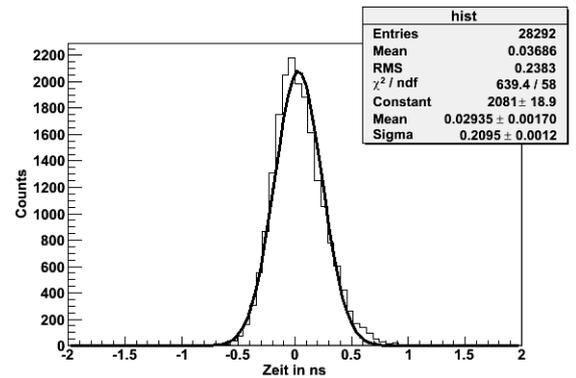


Abbildung 6.4: Zeitspektrum des ^{60}Co n.M.

Die Zeitauflösung hat sich während des Versuchs nicht stark geändert. Sie betrug vor der Hauptmessung $\Delta t_{\text{vorMessung}} = 0,2333\text{ns}$ und nach der Hauptmessung $\Delta t_{\text{nachMessung}} = 0,2095\text{ns}$. Die kleine Differenz erklärt sich sicherlich durch Verwendung unterschiedlicher Messzeiten. Zur weiteren Auswertung wird der Mittelwert $0,2213\text{ns}$ verwendet.

6.3 Messung der Lebensdauer von Positronium in Polyäthylen

Die Messung ergab das in Abb.6.5 gezeigte Zeitspektrum.

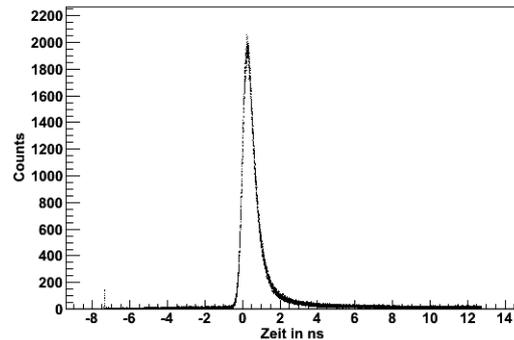


Abbildung 6.5: Aufgenommenese ^{22}Na -Spektrum

Aus diesen Messdaten wird ein Histogramm erzeugt. Es werden aufgrund der Zeitauf-
 lösung der Apparatur Intervalle der Größe 0,2213 ns gewählt. Zur weiteren Auswertung
 wird zunächst der Untergrund von der Messung abgezogen. Dann wird die Messkurve
 normiert. Nach dem Zerfallsgesetz Gl.1 erhält man die reziproke Lebensdauer, wenn man
 die Counts logarithmisiert gegen die Zeit aufträgt. Diese halblogarithmische Auftragung
 ist in den Abb. 6.6, 6.7 zu sehen.

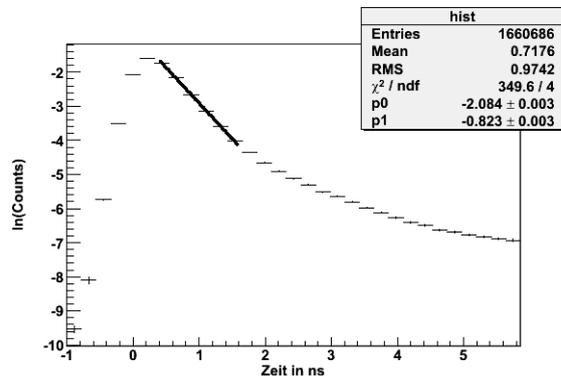


Abbildung 6.6: Lineare Regression

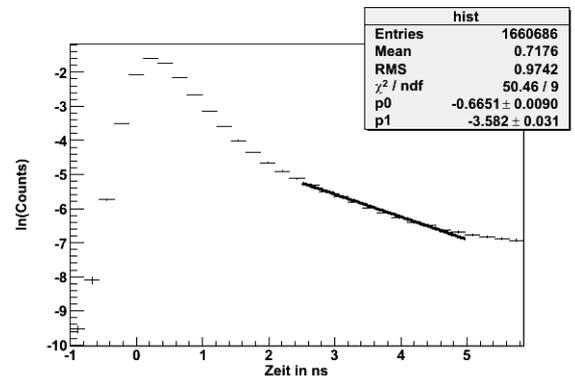


Abbildung 6.7: Lineare Regression

Deutlich erkennt man die zwei Geraden, deren Steigungen m_i die Lebenszeit von Para-
 bzw. Orthopositronium angeben. In den Kästchen sind jeweils die Daten des zugehörigen
 Fits angegeben. Auf einen Bineintrag der Höhe N wird vor der Normierung ein Fehler
 \sqrt{N} angenommen. Wir gehen also von einer Poissonverteilung der gemessenen Zählrate
 aus. Der Fehler nach erfolgter Normierung ergibt sich durch Fehlerfortpflanzung.

Die Lebenszeiten ergeben sich demnach zu $\tau_{Ortho} = (1504 \pm 20)ps$ und $\tau_{Para} = (480 \pm 0,79)ps$. Die Fehler auf τ_{Para} sind relativ klein. Dies begründet sich jedoch schon aus der zugehörigen Geradenanpassungen. Das viel zu hohe $\chi^2/\text{Freiheitsgrad}$ von 100 zeigt, dass der Fehler für diese Anpassung unterschätzt ist.