

Protokoll „Bestimmung der Lebensdauer von Myonen“

**Fortgeschrittenen-Praktikum
JLU Gießen**

**Clemens P. Heil
Nelson B. Gonzalez
Silvan J. Schulz**

25. August 2016

Betreut durch Hans-Georg Zaunick

Inhaltsverzeichnis

Ziel des Versuchs	2
Theorieteil	3
Versuchsaufbau	11
Versuchsdurchführung	12
Auswertung	13
Fazit	19
Quellen	20

Ziel des Versuchs

Ziel des Fortgeschrittenen-Praktikumsversuchs „Bestimmung der Lebensdauer von Myonen“ ist, wie bereits aus dem Titel hervorgeht, die Bestimmung der Lebensdauer kosmischer Myonen, die in einem Szintillationsdetektor gestoppt werden. Dazu wird das Energiespektrum einer ^{60}Co Quelle aufgenommen und eine Energieeichung durchgeführt. Dabei muss die Energiedeposition minimal ionisierender Myonen beachtet werden. Abschließend wird der endgültige Versuchsaufbau aufgebaut, eine Zeiteichung durchgeführt und die einwöchige Datenaufnahme gestartet.

Theorieteil

Charakterisierung der Myonen anhand ihrer Eigenschaften, Platz im Standardmodell der Elementarteilchen

Das Myon ist ein Elementarteilchen und gehört zu den Leptonen. Alle Leptonen besitzen Spin $\frac{1}{2}$ und werden daher den Fermionen zugeordnet. Es besitzt eine negative Elementarladung und unterliegt der elektroschwachen Wechselwirkung, der Gravitation und der elektromagnetischen Wechselwirkung, da es eine elektrische Ladung trägt. Zu jedem Lepton existiert ein Antiteilchen (z.B. Antimyton). Das Formelsymbol des Myons ist μ^- und das des Antimyons μ^+ mit positiver Elementarladung. Die Masse des Myons beträgt ca. 200 Elektronenmassen (105,658 MeV).

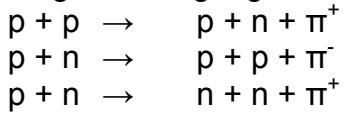
Drei Generationen der Materie (Fermionen)				
	I	II	III	
Masse →	2,3 MeV	1,275 GeV	173,07 GeV	0
Ladung →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
Spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Name →	up	charm	top	Photon
	u	c	t	γ
Quarks	4,8 MeV	95 MeV	4,18 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	down	strange	bottom	Gluon
	d	s	b	g
Leptonen	<2 eV	<0,19 MeV	<18,2 MeV	91,2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	v_e	v_μ	v_τ	Z⁰
	e	μ	τ	Z Boson
Eichbosonen	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	Elektron	Myon	Tau	W [±]
	e	μ	τ	W Boson

Abbildung 1: Übersicht der Elementarteilchen im Standardmodell

Entstehung der Myonen aus der kosmischen Strahlung; Reaktionen und Erhaltungssätze, die bei diesen Prozessen eine Rolle spielen

Kosmische Strahlung ist eine hochenergetische Strahlung, welche von der Sonne, der Milchstraße und fernen Galaxien stammt (Einteilung: Solarstrahlung, galaktische und extragalaktische Strahlung). Die kosmische Strahlung besteht zum größten Teil aus Protonen und ionisierten Atomkernen.

Mögliche Vorgänge, wenn Primärstrahlung in 10km Höhe auf die Atmosphäre trifft:



Geladene Pionen zerfallen durch die elektroschwache Wechselwirkung

$$\begin{aligned} \pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \end{aligned}$$

Anschließend zerfallen die Myonen in Elektronen bzw. Positronen

$$\begin{aligned} \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \\ \mu^- &\rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \end{aligned}$$

Wichtige Erhaltungssätze bei diesen Prozessen sind die Drehimpuls-, Ladungs- und die Leptonenzahlerhaltungssätze (Leptonenzahl: Differenz der Leptonen und der Anzahl der Antileptonen im System).

Zurückgelegte Strecke während der Lebensdauer, relativistische Effekte

Zerfallsgesetz: $N = N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$

Mittlere Lebensdauer: $\tau = \frac{t_{1/2}}{\ln(2)} \approx 2,197 \cdot 10^{-6} s$

Halbwertszeit des Myons: $t_{1/2} \approx 1,523 \mu s$

Myonen bewegen sich mit annähernder Lichtgeschwindigkeit ($0,998c$) und würden mit einer mittleren Lebensdauer von $2,197 \cdot 10^{-6} s$ nur ungefähr 660m zurücklegen können.

$$S = 0,998c \cdot 2,197 \cdot 10^{-6} s \approx 657,33 m$$

Kein Myon könnte also die Erdoberfläche erreichen. Aber Myonen sind hier aufgrund der Zeitdilatation trotzdem detektierbar.

Lorentzfaktor: $\gamma = \frac{1}{(1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2}}$

Beta: $\beta = \frac{v}{c}$

$$\text{Zurückgelegte Strecke mit Zeitdilatation} = \tau \cdot \gamma \cdot 0,998c \approx 10398,45 m$$

Myonen in Materie

Myonen erzeugen aufgrund ihrer hohen Energie durch viele aufeinander folgende Stöße eine Ionisationsspur, die detektiert werden kann. In Wasser z.B. erzeugen sie aufgrund ihrer nahezu Lichtgeschwindigkeit Tscherenkov-Strahlung. Wegen ihrer hohen Masse ist die Bremsstrahlung im Vergleich zu Elektronen stark unterdrückt.

Der Energieverlust pro Wegstrecke lässt sich mit der Bethe-Bloch-Formel beschreiben:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n z^2}{m_e c^2 \beta^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi \epsilon_0} \right)^2 \cdot \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 \right]$$

$$\beta = \frac{v}{c}$$

n = Elektronendichte des Materials

I = mittleres Anregungspotential des Materials

Die Bethe-Formel gibt den Energieverlust schneller geladener Teilchen beim Durchgang durch Materie, aufgrund inelastischer Stöße mit den Elektronen, an. Die übertragene Energie bewirkt Anregung und Ionisation.

Wenn die Myonen im Material gestoppt werden, gibt es zusätzlich zum Zerfall (siehe vorherige Seite) zwei weitere Zerfallskanäle:

1. Negatives Myon wird von einem Atomkern eingefangen (K-Einfang):

$$N_- = N_0 \cdot e^{\frac{-t}{\tau}} \cdot e^{\frac{-t}{\tau(\text{Zerfallskanal } \mu^-)}}$$

2. Positives Myon (Antimyon) und Elektron bilden Myonium

$$N_+ = N_0 \cdot e^{\frac{-t}{\tau}} \cdot e^{\frac{-t}{\tau(\text{Zerfallskanal } \mu^+)}}$$

Szintillationsdetektor und Wechselwirkung

Ein Szintillator ist ein Körper, dessen Moleküle beim Durchgang von energiereichen Photonen oder geladenen Teilchen durch Stoßprozesse ionisiert werden und die Anregungsenergie (Rekombination) in Form von Licht (meist UV oder sichtbar) wieder abgeben.

Anorganische Szintillatoren sind mit Aktivator-Zentren dotiert (z.B. Thallium).

Ionisierende Strahlung (geladene Teilchen oder Photonen) erzeugt in diesem Festkörper freie Elektronen, freie Löcher oder Elektronen-Loch-Paare. Im Kristallgitter wandern solche Anregungszustände, bis sie auf ein Aktivatorzentrum treffe. Das Aktivatorzentrum ist nun angeregt und zerfällt über Zwischenzustände unter Emission von Licht wieder in den Grundzustand. Der Zerfall über Zwischenzustände ist wichtig, damit die entstandenen Photonen mit einer kleineren Energie als die der Bandlücke emittiert werden und nicht direkt neue Anregungen erzeugen. Dadurch wird der Kristall "durchsichtig" für die entstandenen Photonen.

Die Photonen treffen auf die Photokathode des Photomultipliers und lösen Elektronen heraus, die anschließend über mehrere Dynoden beschleunigt werden (Verstärkung 10^5

$- 10^8$). Die abschließend gemessene Ladung ist direkt proportional zur Anzahl der eintreffenden Photonen und damit zur Myonenenergie.

Im ersten Versuchsteil wird ein Gammaspektrum von ^{60}Co aufgenommen. Bei Gammaquanten müssen bei der Wechselwirkung im Detektor drei Prozesse unterschieden werden.

1. Photoeffekt: Photon gibt seine komplette Energie an ein Elektron ab und löst dieses heraus. Dieses Elektron erzeugt anschließend wie das Myon Anregungen.
2. Compton-Effekt: Photon überträgt nur einen Teil seiner Energie auf Elektron (\rightarrow Compton-Kontinuum) und wird gestreut.
3. Paarbildung: Bei sehr hohen Energien (ab doppelter Elektrischer Ruheenergie) kann Paarbildung eintreten. Es entsteht ein Elektron-Positron-Paar, welches rekombiniert und in zwei Photonen mit je 511keV zerstrahlt.

Treffen geladene Teilchen auf Materie, können sie Bremsstrahlung abgeben (besonders leichte Teilchen), abschließend zerfallen oder mit der Materie kombinieren (siehe Myonenzerfall).

Abschätzungen:

Mittlere Energie, die ein durchfliegendes minimal ionisierendes Myon im Detektor deponiert:

Mittlere kinetische Energie liegt bei 2 GeV

Abstand: 1cm (siehe Abbildung 2), Länge des Szintillators: 10cm

$$\begin{aligned} \text{Abstand}(cm) &= \log(x) \cdot 5,4\text{cm} \mid : 5,4\text{cm} \mid \log^{-1}() \\ x &= \log^{-1}\left(\frac{1\text{cm}}{5,4\text{cm}}\right) \\ x &\approx 1,5 \end{aligned}$$

$$\text{minimal deponierte Energie} \approx 1,5 \cdot \frac{\text{MeV} \cdot \text{cm}^2}{g} \cdot \rho \cdot 10\text{cm} \approx 55,05\text{MeV}$$

Grenzenergie, bis zu der Myonen in 10cm NaI gestoppt werden können

$$y - \text{Achsenwert} = \rho \cdot \text{Länge des Szintillators} = 3,67 \cdot \frac{g}{\text{cm}^3} \cdot 10\text{cm} = 36,7 \frac{g}{\text{cm}^2}$$

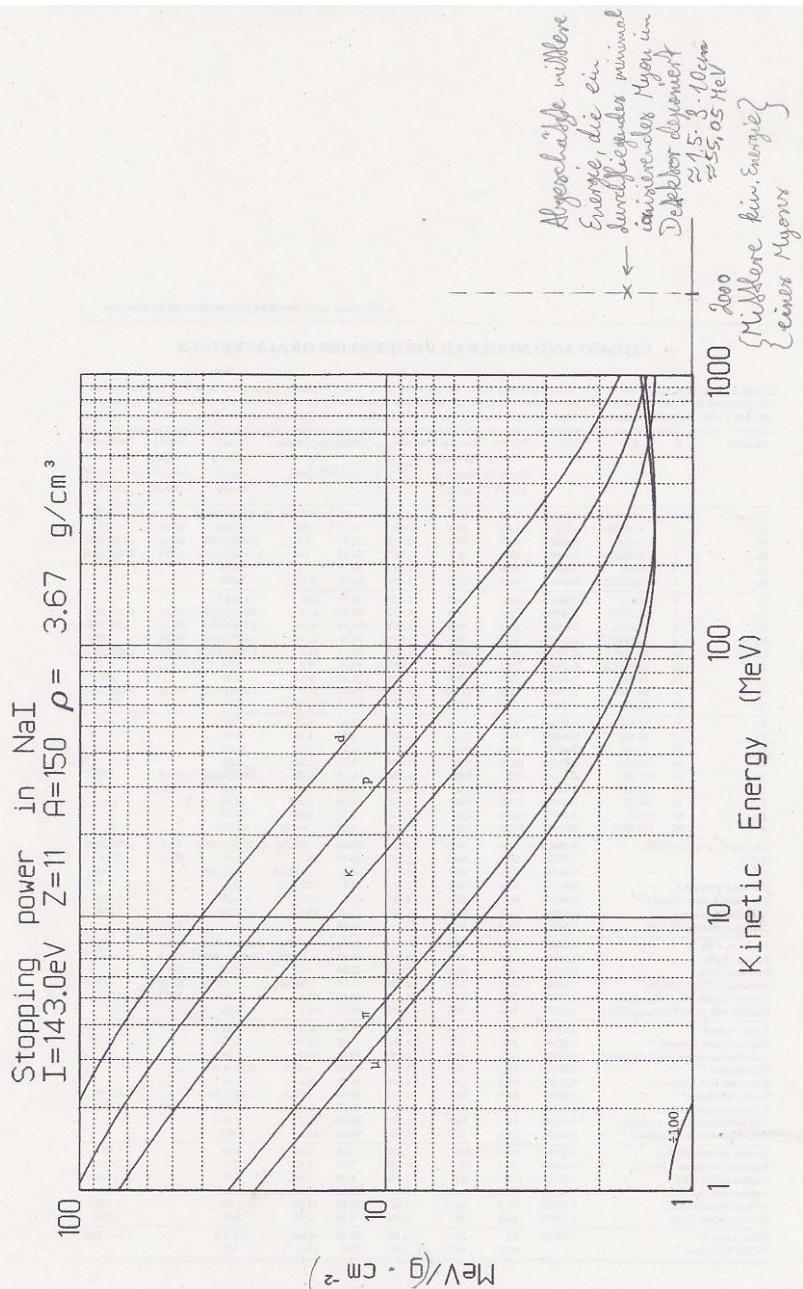
→ Grenzenergie ≈ 75 MeV (siehe Abbildung 3)

Zählrate im Detektor (ca. $12 \cdot 12 \text{ cm}^2$ Fläche) aus der integralen Energieverteilung der Myonen in Meereshöhe

$$\begin{aligned} E &= ((m \cdot c^2)^2 + p^2 c^2)^{1/2} \\ E_{kin} &= 2\text{GeV} \\ E &= E_{kin} + E_0 \\ E &= 2\text{GeV} + m \cdot c^2 \\ ((m \cdot c^2)^2 + p^2 c^2)^{1/2} &= E_{kin} + E_0 \mid (\cdot)^2 \mid - ((m \cdot c^2)^2 \mid : c^2 \mid (\cdot)^{1/2}) \\ p &\approx 2 \frac{\text{GeV}}{c} \end{aligned}$$

→ Integral Intensity (II): $0,005\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ (siehe Abbildung 4)

$$\begin{aligned} \text{Zählrate} &= II \cdot (12 \cdot 12 \text{ cm}^2) \cdot 2\pi \text{ (Halbkugel Raumwinkel)} \\ &= 4,52 \cdot \frac{1}{s} \end{aligned}$$



12

Abbildung 2: Bremsvermögen verschiedener Teilchen in NaI

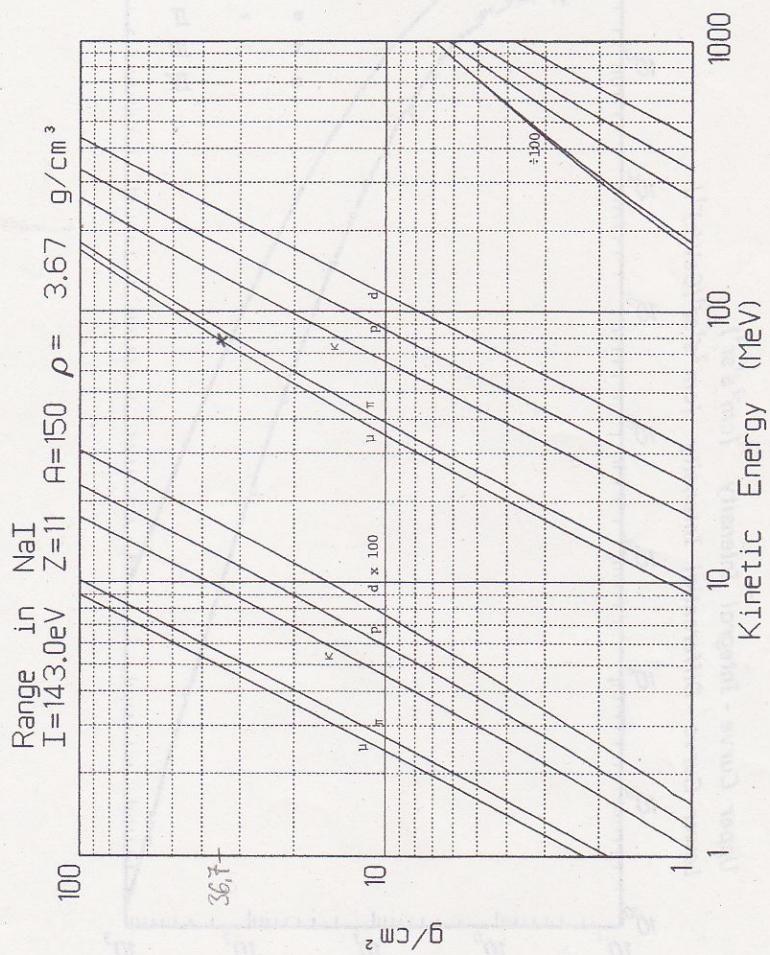


Abbildung 3: Reichweiten verschiedener Teilchen in NaI

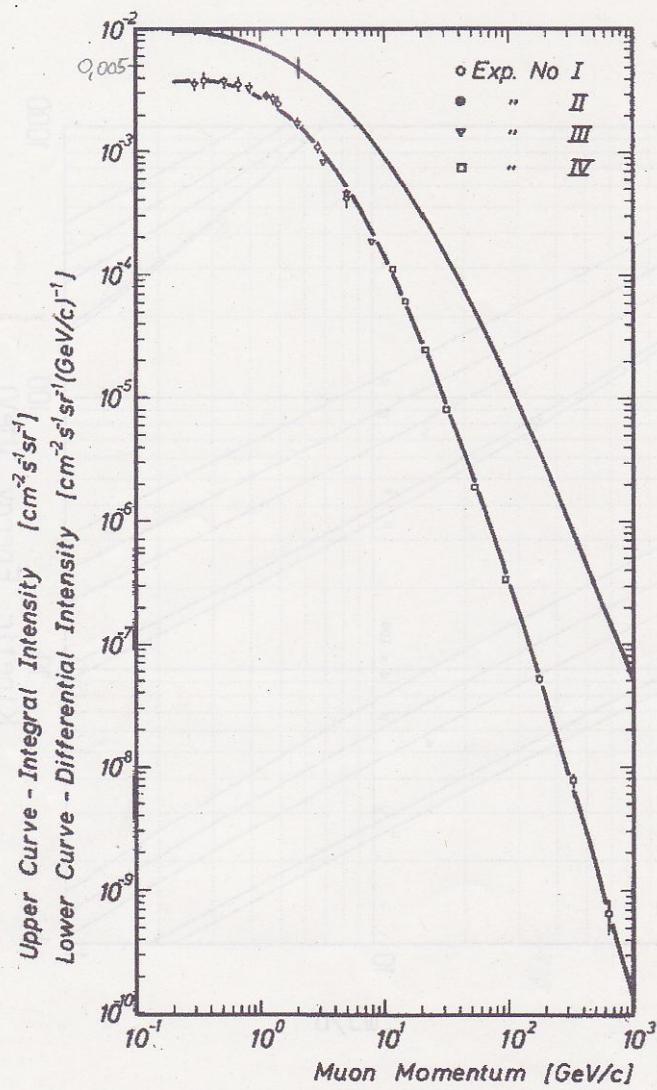


Abbildung 4: Absoluter vertikaler Myonenfluss auf Meereshöhe in Kiel

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau muss jeweils für die einzelnen Teile des Versuchs angepasst werden. Man benötigt jedoch immer den Photomultiplier, dessen Spannungsteiler zwei Eingänge hat, die an die Spannungsversorgung angeschlossen sind und zwei Ausgänge, von denen nur der nicht den Vorverstärker nutzende Ausgang im weiteren Versuchsaufbau verwendet wird.

Als erstes wird der Aufbau zur Energiemessung benötigt, das entsprechende Schema ist in Abbildung 5 zu sehen. Der Ausgang des Photomultipliers ist hier an den Hauptverstärker angeschlossen, dessen Ausgang mit dem ADC verbunden ist. Die ^{60}Co -Quelle liegt auf dem Detektor, um ein möglichst gutes Spektrum zu erhalten.



Abbildung 5: Schematischer Aufbau der Energiemessung

Im nächsten Teil wird alles Notwendige für die Lebensdauermessung aufgebaut, dessen Schema in Abbildung 6 zu sehen ist. Das vom Photomultiplier kommende Signal wird zum TFA geführt und von dort aus weiter zu einem Diskriminator. Dessen eines Ausgangssignal wird direkt mit dem Stopp-Eingang des TPC verbunden, das andere mit einem Delay von 150 ns verzögert, danach wieder durch einen Diskriminatorkanal geführt und dann an den Start-Eingang des TPC angelegt. Der Ausgang des TPC wird an den ADC und der True-Start-Ausgang an den Scaler angeschlossen.

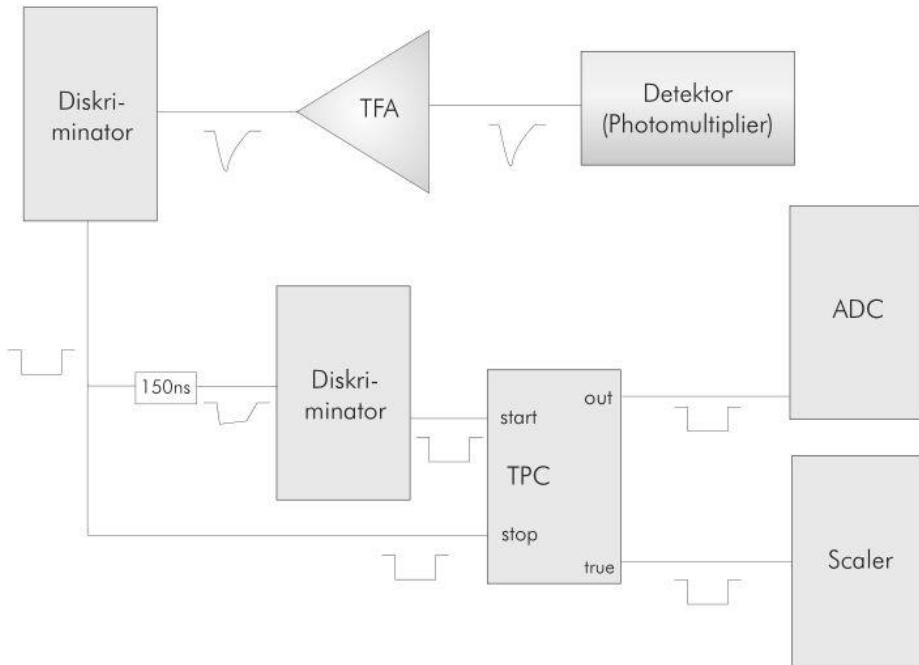


Abbildung 6: Schematischer Aufbau der Lebensdauermessung

Versuchsdurchführung

Zuerst sollte zweimal ein ^{60}Co -Spektrum aufgenommen werden, allerdings musste dabei die Shaping-Time passend eingestellt werden, um den ganzen Kantenanstieg des Signals zu erfassen. Einmal wurde das ^{60}Co -Spektrum aufgenommen, um das Ausgangssignal möglichst den ganzen Akzeptanzbereich abdecken zu lassen und noch einmal, damit man eine Energieeichung durchführen konnte, wobei die vorher abgeschätzte Energiedeposition der minimal ionisierenden Myonen berücksichtigt werden musste. In Abbildung 7 sieht man eine Aufnahme des Spektrums. In der Mitte sind die beiden einzelnen ^{60}Co -Peaks und der kleine Peak rechts ist der Summenpeak.

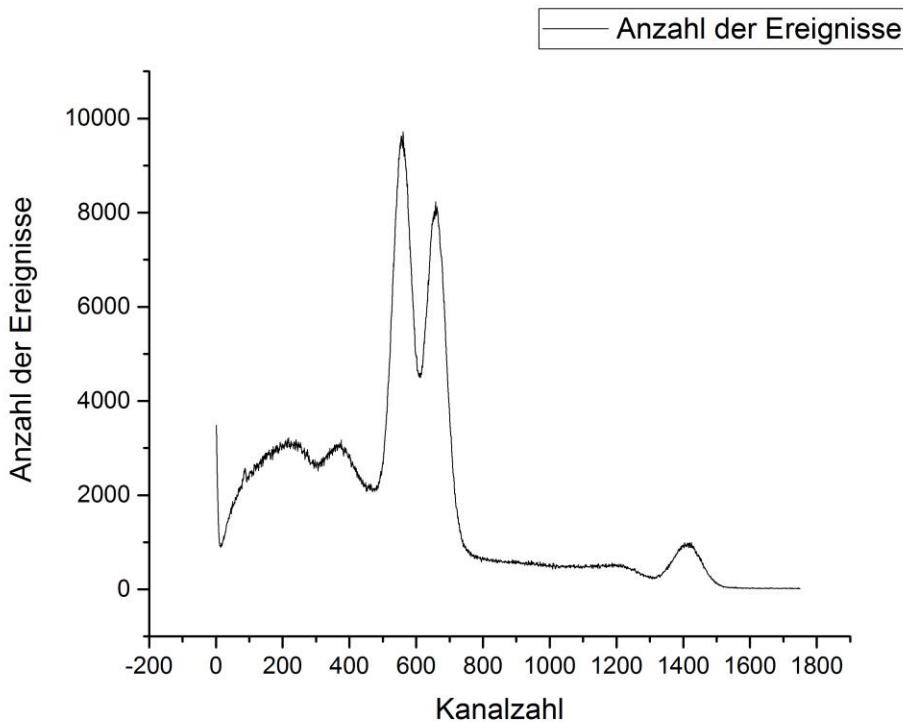


Abbildung 7: Aufgenommenes ^{60}Co -Spektrum

Als nächstes wurde die Zeitmessung aufgebaut und damit die Zeiteichung durchgeführt. Dabei sollte die Verstärkung, Integrations- und Differentiationszeit klein gewählt werden, um unnötige Signalverzerrungen zu vermeiden und der Diskriminatorkanal wurde so angepasst, dass der natürliche radioaktive Untergrund abgeschnitten wird. Um bei der Messung für die Zeiteichung genügend Zählrate zu haben, wurde wieder die ^{60}Co -Quelle auf den Detektor gelegt. Dann haben wir den Stoppeingang nacheinander um bestimmte Delayzeiten verzögert und jeweils eine kurze Zeit lang gemessen, um später die Zeiteichung machen zu können.

Für die eigentliche Messung wurde dann der endgültige Versuchsaufbau genutzt und dafür alles in den Startzustand gebracht. Nach dem Messstart wurde die Uhrzeit aufgeschrieben und danach etwa eine Woche lang gemessen, bis schließlich vom Betreuer die Messung gestoppt und Uhrzeit und Startanzahl notiert wurden.

Auswertung

Um all die gemessenen Daten bearbeiten zu können muss zuerst eine Zeiteichung gemacht werden, die uns helfen wird, den jeweiligen Kanalzahlen eine Verzögerungszeit zuordnen zu können.

Dafür wurde eine Messung durchgeführt und währenddessen sind die Delay-Zeiten ab 300ns in 150ns-Schritten (mit einer Ausnahme) geändert worden. Es ergab sich ein Diagramm, dessen Anzahl an Peaks der Anzahl an Zeit-Schritten entsprach.

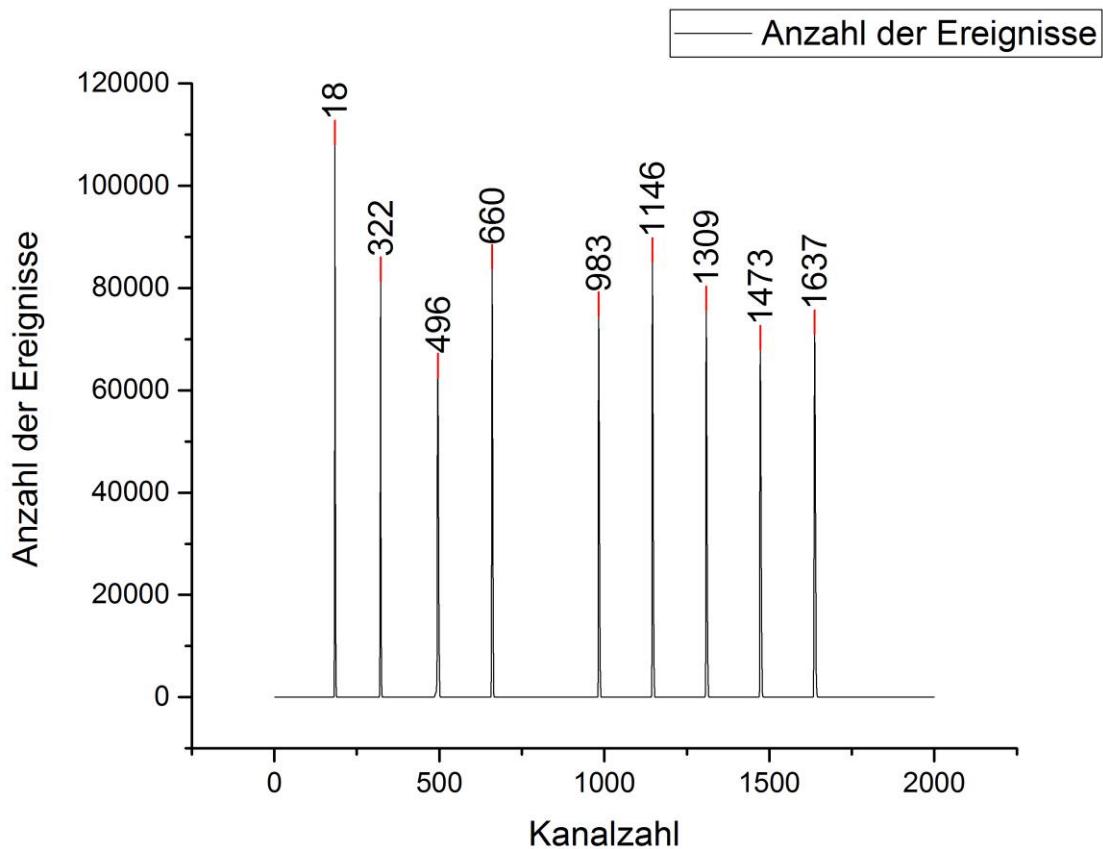


Abbildung 8: Darstellung der Delayzeiten als Kanalzahlen

Die einzelnen Peakpositionen wurden dann in eine Tabelle gegen die dazu gehörigen Delay-Zeiten eingetragen und in ein neues Diagramm geplottet, dessen Fit den gesuchten Kanalzahl-Zeit-Zusammenhang liefert.

Kanalzahl	Delay-Zeit [ns]
184	300
322	450
496	600
660	750
983	1050
1146	1200
1309	1350
1473	1500
1637	1650

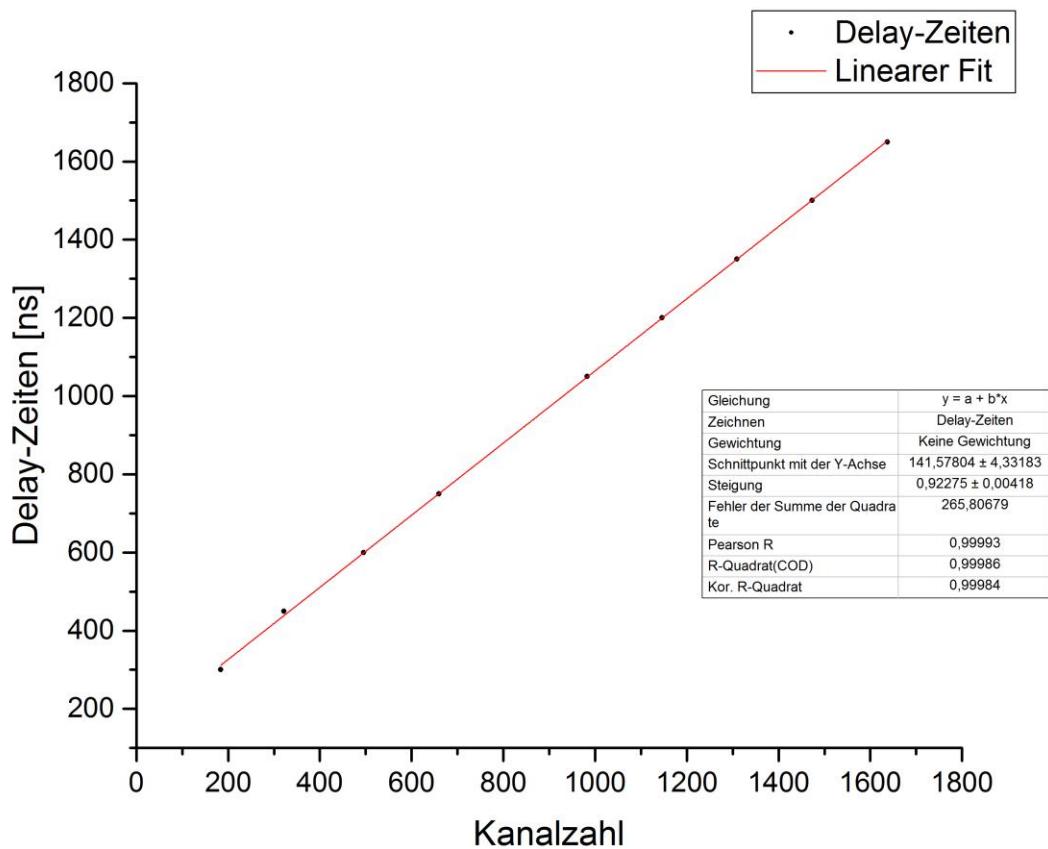


Abbildung 9: Fit der Kanalzahl-Zeit-Abhangigkeit

Man sieht, dass der Fit linear ist. Das heißt, dass der Zusammenhang zwischen den Delay-Zeiten und den Kanalzahlen durch eine lineare Funktion dargestellt werden muss. Die Parameter dieser Funktion kann man dann aus dem Informationskasten ablesen. Somit folgt:

$$t = 0,92275 \cdot K + 141,57804$$

wobei K der Kanalzahl entspricht.

Für die Bestimmung der mittleren Lebensdauer der Myonen wurde eine Woche lang gemessen (Start: 25.7.16 13:40 Uhr, Ende: 1.8.16 17:00 Uhr, E = 2313917 Ereignisse). In Abbildung 10 ist diese Messung dargestellt, allerdings wurden zur besseren Veranschaulichung je 128 Channels zu einem Bin zusammengefasst.

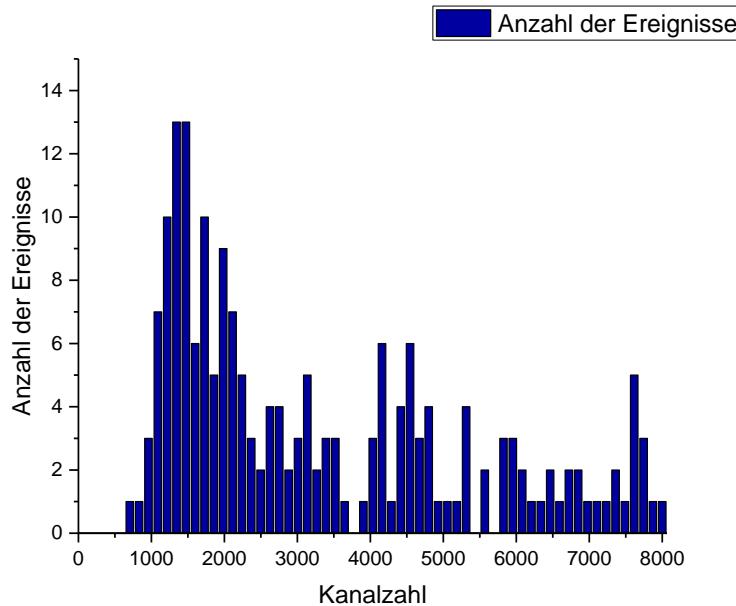


Abbildung 10: Anzahl der Ereignisse

Mithilfe der zuvor durchgeföhrten Zeiteichung und der gefitteten Funktion

$$y = a + b \cdot x \quad \text{Zeit } [\mu\text{s}] = a + b \cdot \text{Kanalzahl}$$

$$a = 141,57804\text{ns} \pm 4,33183\text{ns}, b = 0,92275\text{ns} \pm 0,00418\text{ns}$$

erhält man die zeitabhängige Darstellung (Abbildung 11).

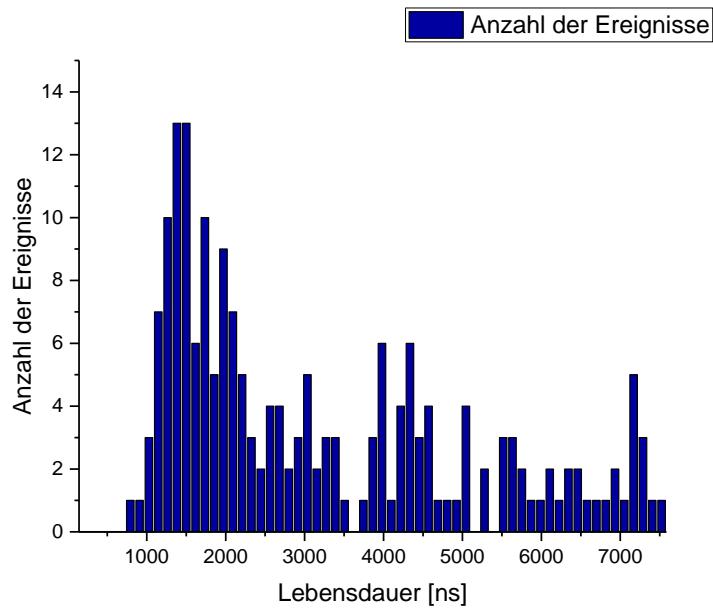


Abbildung 11: Zeitabhängige Darstellung

Zur Bestimmung der exakten Anzahl an Myonenzerfällen muss die Untergrundstrahlung abgezogen werden, welche durch eine Poisson-Verteilung beschrieben werden kann:

$$P(n) = \frac{(\mu \cdot \Delta t)^n}{n!} \cdot e^{-\mu \cdot \Delta t}$$

$\mu \cdot \Delta t \triangleq$ Ereignishäufigkeit

$\mu \triangleq$ Ereignisrate

$\Delta t \triangleq$ betrachtetes Zeitintervall

$$\mu = \frac{2313917}{(10 \cdot 60 + 20) \cdot 60s + (7 \cdot 60) \cdot 60s + (6 \cdot 24 \cdot 60) \cdot 60s} \approx 3,984 \cdot \frac{1}{s}$$

Das Zeitintervall erhält man, indem man die Steigung der Zeiteichung mit 128 (128 Channels \triangleq 1 Bin) multipliziert:

$$\Delta t = 128 \cdot 0,92275ns = 118,112ns$$

Wahrscheinlichkeit für mindestens ein Ereignis pro Zeitintervall:

$$\begin{aligned} P(n \geq 1) &= 1 - P(0) \\ &= 1 - e^{-\mu \cdot \Delta t} \\ &= 5,01102487 \cdot 10^{-7} \end{aligned}$$

→ Untergrundcounts pro Bin

$$\begin{aligned} Z &= E \cdot P(n \geq 1) \\ &= 2313917 \cdot 5,01102487 \cdot 10^{-7} \\ &= 1,15950956341 \end{aligned}$$

Um nun die mittlere Lebensdauer der Myonen zu bestimmen, wird ein linearer Fit ohne den Untergrund gemacht (siehe Abbildung 12).

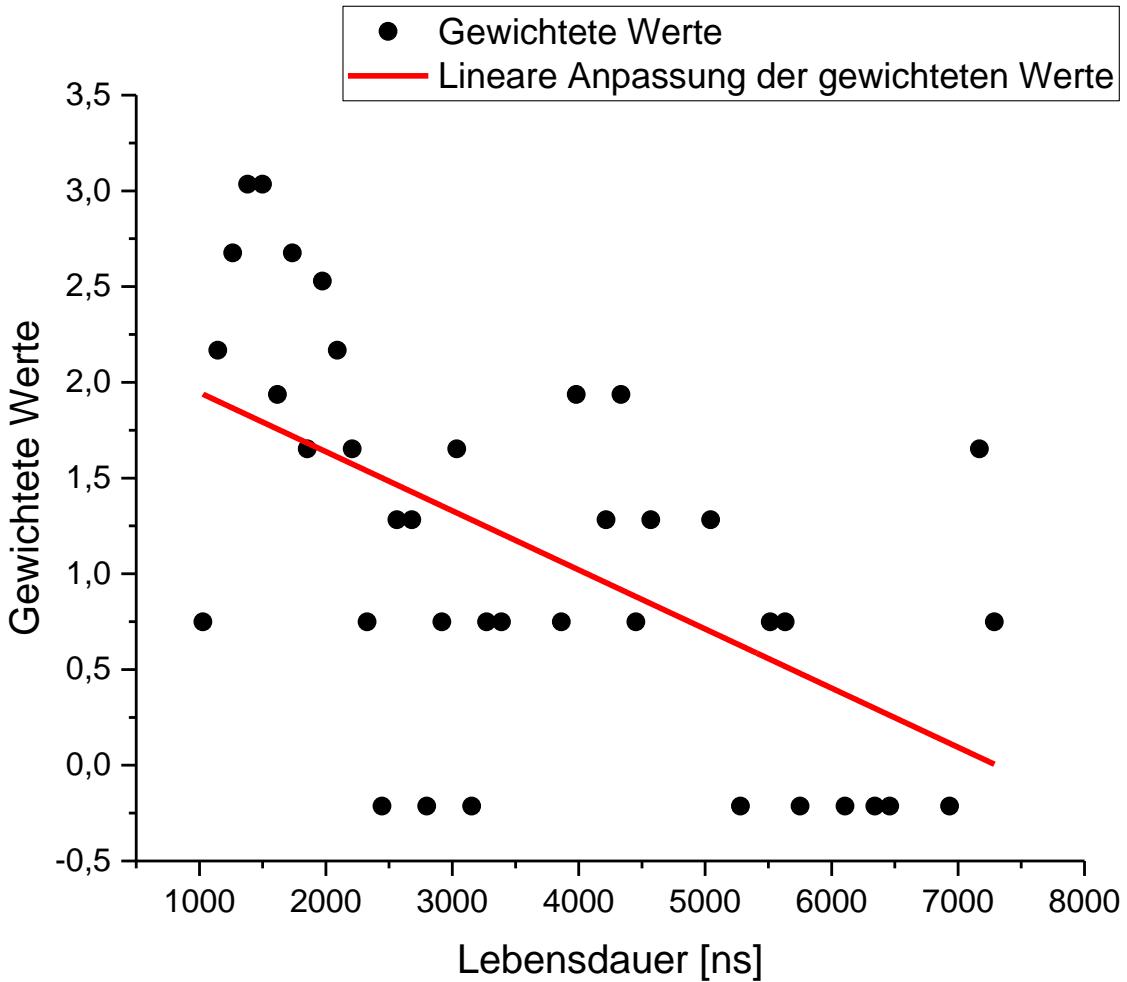


Abbildung 12: Lineare Anpassung ohne Untergrund

Die Messergebnisse ($\ln(\text{Anzahl der Ereignisse ohne Untergrund})$) wurden mit dem Kehrwert der Unsicherheit gewichtet.

$$\text{Gleichung: } y = a + b \cdot x$$

$$\text{Schnittpunkt mit der y-Achse: } 2,25548 \pm 0,29654$$

$$\text{Steigung: } -3,08798 \cdot 10^{-4} \pm 7,21693 \cdot 10^{-5}$$

$$y = a + b \cdot x = 2,25548 - 3,08798 \cdot 10^{-4} \cdot x$$

	Estimate	Standard Error
a	2,25548	0,29654
b	$-3,08798 \cdot 10^{-4}$	$7,21693 \cdot 10^{-5}$

Die Zerfallskonstante λ entspricht dem Betrag der Steigung (b)

$$\lambda = 3,08798 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{ns} \pm 0,721693 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{ns}$$

Mittlere Lebensdauer:

Fehler:

$$\begin{aligned}\Delta\tau &= \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2} \\ &= \frac{0,721693 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{ns}}{(3,08798 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{ns})^2} \\ &= 756,83905571053771402988816459147132ns \\ &\approx 756,839ns\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{1}{\lambda} = 0,3238362942765173 \cdot 10^4 ns \\ &\approx 3238ns \pm 756,839ns\end{aligned}$$

$$\text{Literaturwert (Wikipedia)} = 2196,9811ns$$

$$\begin{aligned}\text{Abweichung vom Literaturwert} &= \left(\frac{3238,362942765173ns}{2196,9811ns} - 1 \right) \cdot 100 \\ &= 47,40058268\% \\ &\approx 47,40\%\end{aligned}$$

Die ermittelte mittlere Lebensdauer (3238 ns) weicht um ca. 47,40 % vom Literaturwert ab und der Fehler dieser Zeitmessung beträgt 756,839 ns. Der Literaturwert (2196,9811 ns) liegt folglich nicht mehr im Fehlerbereich der ermittelten Lebensdauer (3238 ns \pm 756,839 ns). Die große Abweichung vom Literaturwert könnte an der relativ kurzen Messzeit und den daher verhältnismäßig wenigen Ereignissen liegen.

Fazit

Bei der Vorbereitung und Durchführung des Versuchs hatten wir keine größeren Schwierigkeiten und auch die einwöchige Datenaufnahme verlief problemlos. Unsere in der Auswertung ausgerechnete Lebensdauer liegt leider nicht sehr nahe am Literaturwert, demzufolge liegt der Literaturwert auch nicht mehr im Fehlerbereich unserer ermittelten Lebensdauer. Immerhin hat unser Endergebnis die richtige Größenordnung, allerdings sind wir mit den Resultaten insgesamt nicht wirklich zufrieden.

Quellen

Versuchsanleitung

https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Standard_Model_of_Elementary_Particles-de.svg

<https://de.wikipedia.org/wiki/Szintillator>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Myon>