

# Myonenzerfall

Robin Kehr und Gregor Pitsch

25. Juli 2016

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Charakterisierung der Myonen . . . . .	3
2.2 Entstehung der kosmischen Myonen . . . . .	5
2.3 Zurückgelegte Strecke während der Lebensdauer und relativistische Effekte . . . . .	6
2.4 Prozesse bei in Materie gestoppten Myonen . . . . .	6
2.5 Zerfallsgesetz, Halbwertszeit, mittlere Lebensdauer . . . . .	7
2.6 Abschätzungen . . . . .	7
2.7 Funktionsweise eines Szintillationsdetektors . . . . .	10
2.8 Wechselwirkung von Teilchen mit Materie . . . . .	11
2.9 Beschreibung des Messaufbaus und des Messprinzips . . . . .	13
<b>3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung</b>	<b>14</b>
3.1 Aufnahme des Energiespektrums einer $^{60}\text{Co}$ Quelle und Energieeichung . . . . .	14
3.2 Bestimmung der Energiedeposition minimal ionisierender Myonen in dem verwendeten NaI-Szintillationsdetektor . . . . .	15
3.3 Aufbau des endgültigen Versuchsaufbaus, Durchführung einer Zeiteichung . . . . .	15
3.4 Durchführung der Messung . . . . .	17
<b>4 Auswertung</b>	<b>17</b>
4.1 Aufnahme des $^{60}\text{Co}$ -Energiespektrums . . . . .	17
4.2 Energieeichung und Messung minimal ionisierender Myonen . . . . .	18
4.3 Einstellen der Diskriminatorschwelle und Zeiteichung . . . . .	19
4.4 Bestimmung der mittleren Lebensdauer . . . . .	21
<b>5 Literaturverzeichnis</b>	<b>25</b>

# 1 Einleitung

Die Erde ist ständig einer hochenergetischen Strahlung aus dem All ausgesetzt, der kosmischen Strahlung. Diese kosmische Strahlung, auch primäre kosmische Strahlung genannt, wurde 1912 von dem Physiker Viktor Franz Hess postuliert und besteht zu etwa 80 – 85% aus Protonen. Beim Auftreffen der Protonen auf die Erdatmosphäre führen inelastische Stöße zwischen Protonen und Neutronen dazu, dass Teilchenschauer entstehen, in denen verschiedenste Teilchen entstehen. Ein relativ großer Teil, der dadurch auf der Erde ankommenden Teilchen sind die **Myonen**, dessen Zerfall im Experiment untersucht werden soll.

# 2 Theoretische Grundlagen

## 2.1 Charakterisierung der Myonen

Das Myon ist ein Elementarteilchen des Standardmodells (Abbildung 1), gehört wie das Elektron und das Tauon zu den Leptonen und ist wie alle Leptonen ein halbzahliges Spinteilchen, ein Fermion und existiert als Teilchen  $\mu^-$  und Antiteilchen  $\mu^+$ . Außerdem existieren ebenfalls wie in den Familien des Elektrons und des Tauons Neutrino und Antineutrino.

Drei Generationen der Materie (Fermionen)				
I	II	III		
Massen → 2,3 MeV Ladung → $\frac{2}{3}$ Spin → $\frac{1}{2}$ Name → up	1,275 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ charm	173,07 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ top	0 0 1 Photon	125,9 GeV 0 0 Higgs Boson
Quarks				Eichbosonen
4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ bottom	0 0 1 Gluon	
$< 2 \text{ eV}$ 0 $\frac{1}{2}$ V <sub>e</sub> Elektron-Neutrino	$< 0,19 \text{ MeV}$ 0 $\frac{1}{2}$ V <sub>μ</sub> Myon-Neutrino	$< 18,2 \text{ MeV}$ 0 $\frac{1}{2}$ V <sub>τ</sub> Tau-Neutrino	91,2 GeV 0 1 Z <sup>0</sup> Z Boson	
Leptonen				
0,511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e Elektron	105,7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ Myon	1,777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ Tau	80,4 GeV $\pm 1$ 1 W <sup>+</sup> W Boson	

Abbildung 1: Standardmodell der Elementarteilchenphysik.[1]

Der Masse nach geordnet ist das Myon mit einer Masse von  $105,66 \text{ MeV}$  das mittlere Teilchen der Leptonen. Das Elektron weist ein Masse von  $0,511 \text{ MeV}$  auf und das Tauon von  $1777 \text{ MeV}$ .

Im Gegensatz zum Elektron ist das Myon instabil und weist eine mittlere Lebensdauer  $\tau = 2,197 \cdot 10^{-6} \text{ s}$  auf. Da Leptonen nicht an der starken Wechselwirkung teilhaben, zerfallen die Myonen nur über die schwache Wechselwirkung. Zerfälle illgemeinen unterliegen folgenden Erhaltungssätzen:

- Drehimpulserhaltung
- Ladungserhaltung
- Energieerhaltung

- Baryonenzahlerhaltung
- Leptonenzahlerhaltung innerhalb der Familien
- Isospinerhaltung (nur starke Wechselwirkung).

Die möglichen Zerfälle des Myons beschränken sich auf die Entstehung von Elektron bzw. Positron und Neutrinos bzw. Antineutrinos. Außerdem können abhängig von der Energie der Myonen auch Gammaquanten oder sogar Elektron-Positron-Paare entstehen:

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

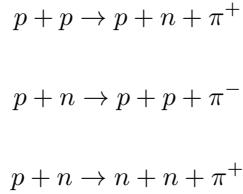
Das Antiteilchen des Myons, das  $\mu^+$  zerfällt in die Antiteilchen der Teilchen des Zerfalls des Myons  $\mu^-$ .

Am Beispiel des ersten Zerfallkanals ergibt sich:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (2.1)$$

## 2.2 Entstehung der kosmischen Myonen

Beim Auftreffen der primären kosmischen Strahlung treten hauptsächlich inelastische Stöße zwischen Protonen und Neutronen auf, also  $p+p$  und  $p+n$ . Bei diesen Stößen kommt es entweder zur Spaltung des Protons oder des Neutrons. Aus dieser Spaltung resultieren hauptsächlich Pionen  $\pi^+$  oder  $\pi^-$  wie folgt:



Die entstandenen Pionen zerfallen dann weiter in Myonen:

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

## 2.3 Zurückgelegte Strecke während der Lebensdauer und relativistische Effekte

Da bei den oben aufgeführten Zerfällen sehr viel Energie frei wird, bewegen sich die Myonen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit ( $0,998c$ ). Bei klassischer Berechnung der zurückgelegten Strecke während der mittleren Lebensdauer von  $\tau = 2,197 \cdot 10^{-6}s$  kommt man auf

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

Da die Myonen in etwa 10-15km Höhe entstehen, kann man sie nach **klassischer** Betrachtung auf der Erde nicht feststellen, jedoch werden regelmäßig Myonen auf der Erdoberfläche registriert.

Aufgrund der hohen Geschwindigkeit der Myonen treten sogenannte relativistische Effekte auf, d.h. im Bezugssystem des Myons ist die mittlere Lebensdauer eben  $\tau = 2,197 \cdot 10^{-6}$ , jedoch ist die mittlere Lebensdauer in unserem Bezugssystem aufgrund der Zeitdilatation durch

$$\tau' = \gamma\tau$$

gegeben, wobei  $\gamma$  durch

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{1 - \beta^2}} = \sqrt{\frac{1}{1 - (\frac{v}{c})^2}}$$

definiert ist.

In unserem Fall ergibt sich

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{1 - (\frac{0,998c}{c})^2}} = 15,82$$

und somit die mittlere Lebensdauer im Bezugssystem der Erde

$$\tau' = 15,82 \cdot 2,197 \cdot 10^{-6} = 3,48 \cdot 10^{-5}.$$

Die zurückgelegte Strecke berechnet sich somit zu

$$s = 0,998c \cdot \tau' = 10411,9m \approx 10,4km.$$

Da der Zerfall ein statistischer Prozess ist, erreichen auch Myonen die Erde, die in größeren Höhen entstanden sind.

## 2.4 Prozesse bei in Materie gestoppten Myonen

Je nach Ladung der Myonen können bei Wechselwirkung der Myonen mit Materie verschiedene Effekte auftreten.

Bei Eindringen eines negativ geladenen  $\mu^-$  in Materie kann das  $\mu^-$  von einem

Atom eingefangen werde und sich anstelle eines Elektrons um den Kern bewegen, was dazu führt, dass aufgrund der großen Masse der Myonen die Wahrscheinlichkeit eines Myoneneinfangs durch den Kern, ähnlich dem K-Capture eines Elektrons, steigt. Somit sinkt die mittlere Lebensdauer solcher sogenannter **myonischen Atomen** im Gegensatz zu der Lebensdauer freier Myonen.

Wenn ein positiv geladenes  $\mu^+$  in Materie eindringt, kann es ein freies Elektron einfangen und **Myonium** bilden. Da aber der Zerfall des  $\mu^+$  dadurch nicht beeinflusst wird, ändert sich hier die Lebensdauer des Myons nicht. Das Myonium existiert nach dem Zerfall nicht mehr.

## 2.5 Zerfallsgesetz, Halbwertszeit, mittlere Lebensdauer

Wie sämtliche Zerfälle ist auch der Myonenzerfall ein statistischer Prozess und ist durch das Zerfallsgesetz

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

beschrieben.

Nach verstrichener Zeit  $t = \tau$  (mittlere Lebensdauer) sind noch  $\frac{1}{e}$  der Anzahl der Anfangsteilchen  $N_0$  vorhanden.

Die Halbwertszeit, also die Zeit, nach der nur noch die Hälfte der Anfangsteilchen vorhanden ist, lässt sich herleiten, indem man  $N(t) = \frac{N_0}{2}$  setzt:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\frac{T_{1/2}}{\tau}} \Leftrightarrow T_{1/2} = \ln(2)\tau$$

## 2.6 Abschätzungen

Im Folgenden werden folgende Abschätzungen gemacht:

- Zählrate im Detektor der Myonen auf Meereshöhe:

Aus Abbildung 2 lässt sich die integrale Intensität der Myonen auf Meereshöhe ablesen. Diese beträgt  $10^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$  (Zählrate pro Fläche pro Raumwinkel). Dieser Wert muss also noch mit der Detektorfläche von  $144 \text{ cm}^2$  und dem Raumwinkel von  $2\pi$  multipliziert werden. Daraus ergibt sich eine Zählrate von  $9,048 \text{ s}^{-1}$  auf Meereshöhe.

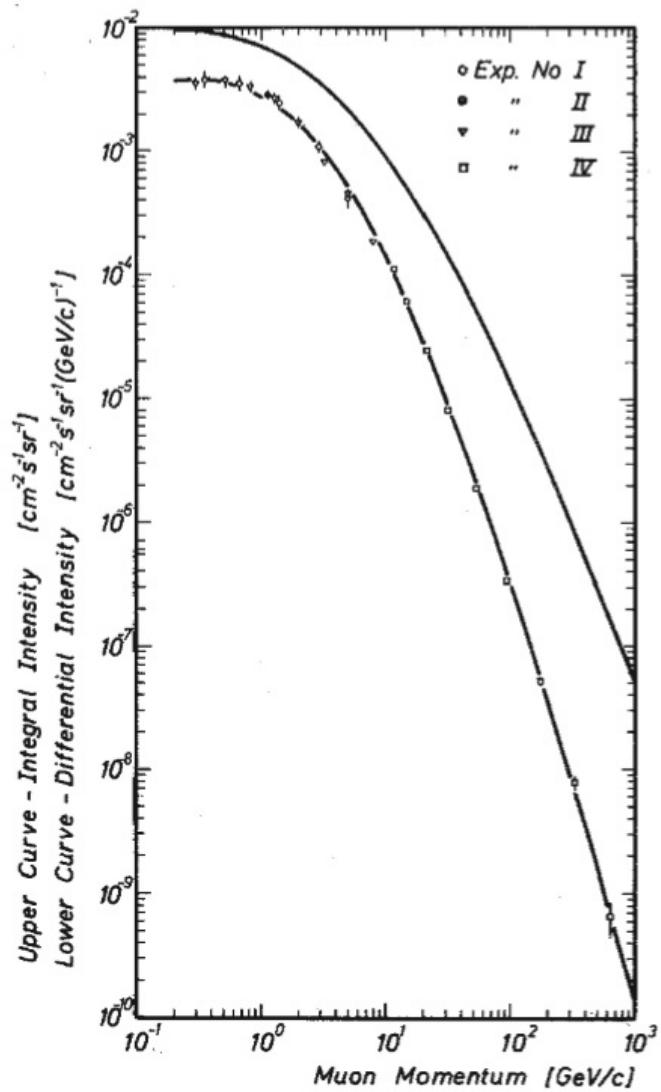


Abbildung 2: Absoluter vertikaler Myonenfluss auf Meereshöhe in Kiel.[2]

- Grenzenergie, bis zu der Myonen in 10cm Natriumiodid (NaI) gestoppt werden können:  
Für eine 10cm dicke Natriumiodidschicht ergibt sich eine Reichweite von  $36,7 \frac{g}{cm^2}$ , womit sich aus Abbildung 3 eine Grenzenergie von etwa  $80 MeV$  ablesen lässt.

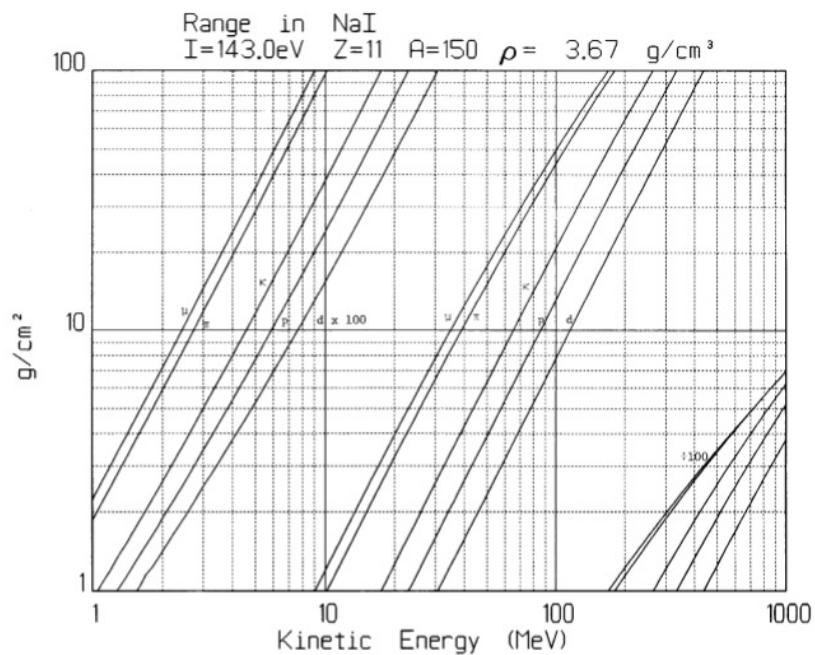


Abbildung 3: Reichweiten verschiedener Teilchen in NaI.[2]

- mittlere Energie, die durch ein minimal ionisierendes Myon im Detektor deponiert wird:

In Abbildung 4 entspricht das Bremsvermögen bei minimal ionisierenden Myonen etwa  $1,4 \frac{\text{MeV}}{\text{cm}^2 \text{g}}$ . Multipliziert mit der Dichte von NaI ( $\rho = 3,67 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ) und mit der Dicke der Natriumiodidschicht ergibt sich damit eine mittlere deponierte Energie von etwa  $50\text{MeV}$ .

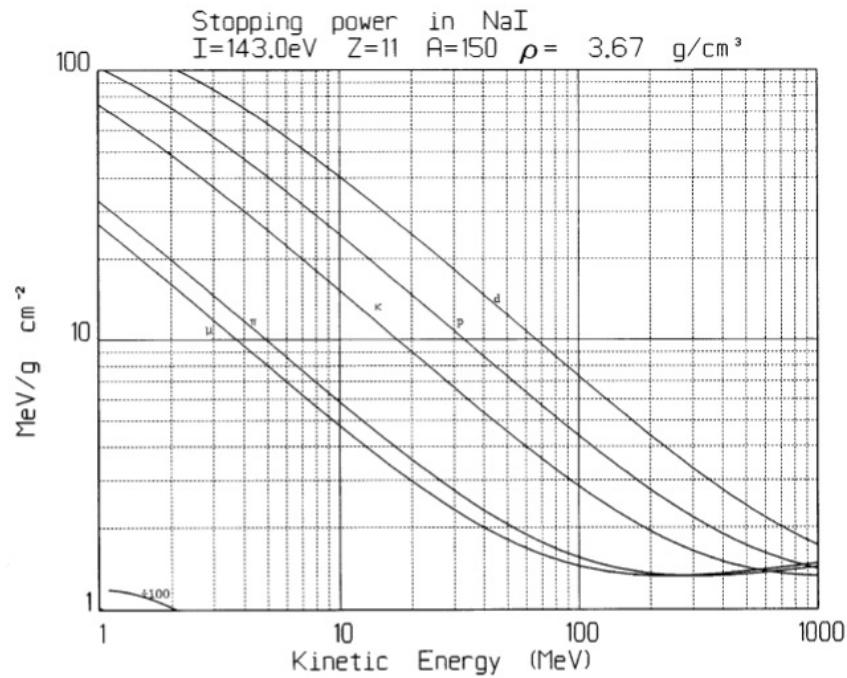


Abbildung 4: Bremsvermögen verschiedener Teilchen in NaI.[2]

## 2.7 Funktionsweise eines Szintillationsdetektors

Bei Szintillationsdetektoren wird zwischen anorganischen und organischen Szintillationsdetektoren unterschieden. Jedoch ist der Aufbau äußerlich gleich (Abbildung 5).

Im Kopf des im Experiment verwendeten anorganischen Szintillationsdetektors befindet sich Natriumiodid (NaI) als Szintillationsmaterial, dessen Elektronen durch eintreffende Strahlung angeregt werden und einen Teil der Anregungsenergie dann wieder durch Zurückfallen auf niedrigere Energieniveaus abgibt. Diese vom Szintillationsmaterial emittierten Photonen setzen aus der Photokathode des dahinter angebrachten Photomultipliers Elektronen mittels Photoeffekt frei, welche dann wiederum durch Stöße aus weiteren Kathoden Elektronen heraus schlagen, wodurch ein großer Verstärkungsfaktor erzielt wird. Das Lichtsignal wurde somit in einen Ladungsimpuls umgewandelt und kann dann gemessen werden.

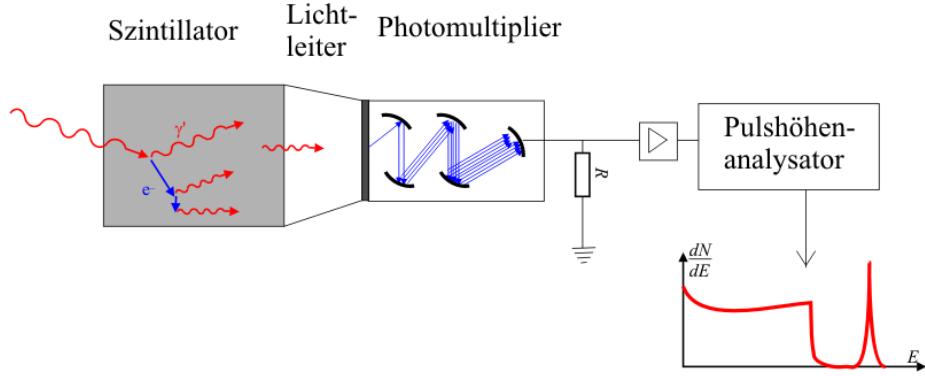


Abbildung 5: Aufbau des Szintillationsdetektors.[3]

## 2.8 Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

Die interessante Größe bei der Wechselwirkung von Teilchen mit Materie ist der Energieverlust. Dieser tritt bei

- Ionisation:

Bei der Ionisation wird mittels Photo- oder Comptoneffekt ein Elektron aus dem Atom herausgeschlagen, wodurch freie Elektronen und Ionen entstehen.

Der aus der Ionisation geladener Teilchen, deren Energien größer als  $100\text{keV}$  sind, resultierende Energieverlust ist wesentlich stärker als bei Photonenstrahlung und neutralen Teilchen und in guter Näherung durch die **Bethe-Bloch-Formel**

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

beschrieben, wobei gilt:

- $n_e$ : Elektronendichte des Materials
- $Z$ : Ladungszahl des Teilchens
- $m_e$ : Masse des Elektrons
- $c$ : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
- $\beta$ : Geschwindigkeitsverhältnis  $\frac{v_{Teilchen}}{c}$
- $e$ : Elementarladung
- $\epsilon_0$ : Elektrische Feldkonstante
- $I$ : mittleres Anregungspotential des Materials.

- Bremsstrahlung:

Bremsstrahlung entsteht durch Abbremsung von negativ geladener Strahlung an den Atomhüllen des Targetmaterials. Der Energieverlust des Teilchens wird zu ca. 1% in Form von Photonen (Röntgenquanten) abgestrahlt. Der Energieverlust durch Bremsstrahlung ist in guter Näherung durch

$$\left( \frac{dE}{dx} \right)_{\text{Bremsstrahlung}} = E \cdot N_A \left( \frac{h}{2\pi c} \right)^2 \frac{a^3 Z_A^2}{A} \frac{1}{(mc^2)} \ln \left( \frac{183}{\sqrt[3]{Z_A}} \right)$$

beschrieben, wobei gilt:

- $N_A$ : Avogadrokonstante
- $h$ : Planck'sches Wirkungsquantum
- $\alpha$ : Feinstrukturkonstante ( $\alpha = \frac{1}{137}$ )
- $Z_A$ : Ladungszahl des Bremsmaterial
- $A$ : Massenzahl des Bremsmaterials
- $m$ : Masse des gebremsten Teilchens.

- Cherenkovstrahlung:

Cherenkovstrahlung wird innerhalb eines Mediums kegelförmig emittiert, wenn sich ein Teilchen innerhalb des Mediums schneller als mit der Mediumslichtgeschwindigkeit bewegt. Cherenkovstrahlung wird im Falle eines vorher beschleunigten Teilchen direkt mit Eintritt in das Medium erzeugt. Der Winkel  $\Theta$  unter dem die Cherenkovphotonen emittiert werden, wird in Abhängigkeit des Brechungsindex  $n$  durch

$$\cos(\Theta) = \frac{1}{\beta n}$$

berechnet. Daraus lässt sich direkt die Mindestenergie bzw. der Energieschwellwert zur Erzeugung von Cherenkovstrahlung ermitteln, da der  $\cos(\Theta) < 1$  sein muss, also muss gelten:

$$\beta = \frac{v_{\text{Teilchen}}}{c} > \frac{1}{n}$$

- elastische Streuung an Atomkernen:

Bei Energien, die kleiner als 100keV sind und somit nicht die Bethe-Bloch-Formel gilt, trägt die elastische Streuung am Atomkern mehr zum Energieverlust bei, als die Streuung an den Elektronen.

- Kernreaktionen:

Kernreaktionen treten bei Teilchen, die der starken Wechselwirkung unterliegen (Hadronen), auf. Bei thermischen Energien kann es so auch zur Kernspaltung kommen.

Für neutrale oder hochenergetische Teilchen ist dieser Effekt wichtig.

auf.

Da Myonen Leptonen sind und hochenergetisch verlieren sie den Großteil ihrer Energie mittels der Ionisation theoretisch gemäß der Bethe-Bloch-Formel.

## 2.9 Beschreibung des Messaufbaus und des Messprinzips

Für die Bestimmung der Lebensdauer der Myonen wird folgendes Messprinzip verwendet:

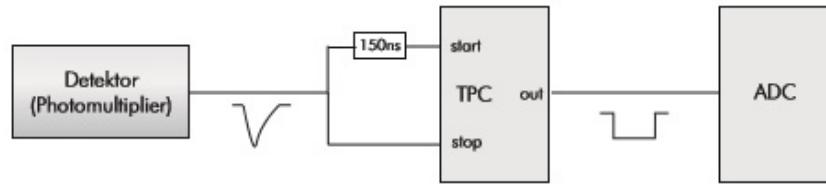


Abbildung 6: Aufbau zur Lebensdauermessung.[2]

Jedes vom Detektor einkommende Signal wird als Stopp- sowie als Startsignal für den TPC verwendet, wobei das Startsignal leicht zeitverzögert wird. Durch dieses Prinzip wird ein durchfliegendes Myon nicht detektiert, da das Stoppsignal zeitlich vor dem Startsignal liegt. Ein im Detektor gestopptes Myon zerfällt jedoch im Detektor und durch die Zerfallsteilchen entsteht ein neues Signal, welches ebenfalls wieder die Messung stoppt und danach startet. Die Messzeit entspricht dann unter Berücksichtigung der Zeitverzögerung von Stopp- und Startsignal der Lebensdauer des Myons.

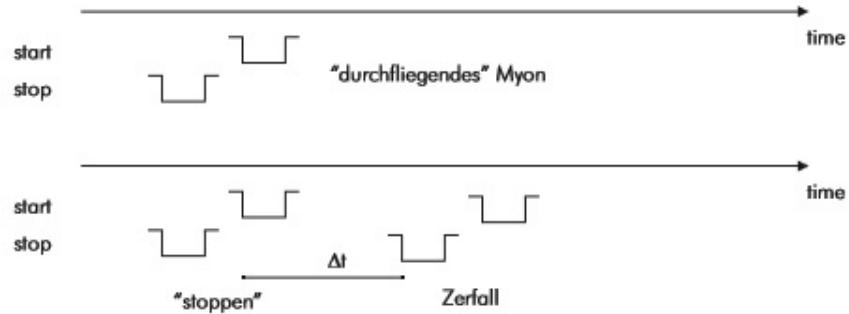


Abbildung 7: Prinzip der Zeitverzögerung.[2]

Diese wird dann vom TPC in eine Pulshöhe umgewandelt, anschließend vom Hauptverstärker invertiert und verstärkt und dann an ADC weitergeleitet, welcher das analoge Signal dann in ein digitales Signal umwandelt.

### 3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

#### 3.1 Aufnahme des Energiespektrums einer $^{60}\text{Co}$ Quelle und Energieeichung

Um das Energiespektrum der  $^{60}\text{Co}$ -Quelle aufzunehmen und die Energieeichung durchzuführen, wird das Detektorsignal mittels eines Hauptverstärkers verstärkt und an einen Analog-Digital-Wandler (ADC) weitergegeben, der das Signal analysierbar macht (Abbildung 8).

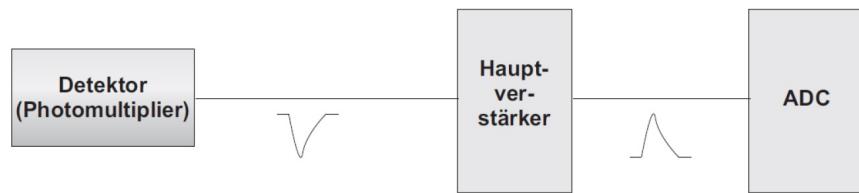


Abbildung 8: Aufbau für die Aufnahme des  $^{60}\text{Co}$ -Energiespektrums und für die Energieeichung.[2]

Die Signale werden separiert betrachtet, ein Mal ohne und ein Mal mit Hauptverstärker (Abbildung 9 und 10).

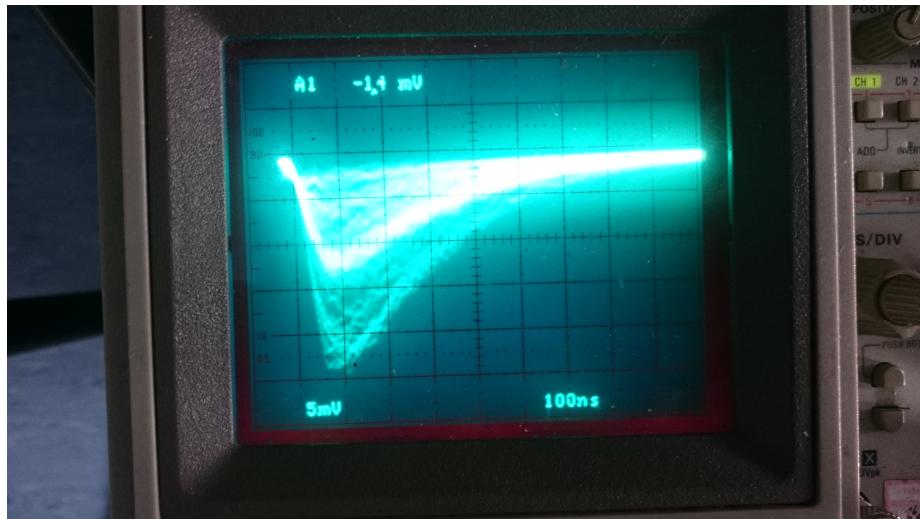


Abbildung 9: Reines Detektorsignal für  $^{60}\text{Co}$ .



Abbildung 10: Signal mithilfe des Hauptverstärkers für  $^{60}\text{Co}$ .

Das Detektorsignal wird bevor es in den Hauptverstärker gelangt von einem Timing-Filter-Amplifier (TFA) geglättet, da der Hauptverstärker nur geglättete Signale verarbeiten kann. Der Hauptverstärker invertiert das Signal außerdem, da der ADC nur positive Signale verarbeiten kann.

Das Signal des ADC wird nun an einen sich am Arbeitsplatz befindenden Computer gegeben und über ein Oszilloskop ausgegeben. Außer den charakteristischen Linien des  $^{60}\text{Co}$  (dicke Linien in Abbildung 10) ist am hochenergetischen Ende des Spektrums ein weiterer Peak kleinerer Amplitude zu sehen. Dies ist die Folge zweier gleichzeitig aufeinander in den Detektor eintreffender Photonen, die somit den doppelten Energiewert zugeordnet bekommen.  
Mithilfe der  $\gamma$ -Quelle  $^{60}\text{Co}$  wird dann die Energiedeichung durchgeführt.

### 3.2 Bestimmung der Energiedeposition minimal ionisierender Myonen in dem verwendeten NaI-Szintillationsdetektor

In Abschnitt 2.6 wurde bereits die mittlere Energiedeposition minimal ionisierender Myonen aus Abbildung 4 bestimmt. Diese beträgt etwa  $50\text{MeV}$ . Der Verstärkungsfaktor wird nun so eingestellt, dass das Tal der beiden Kobaltlinien, welches einer Energie von  $1,25\text{MeV}$  entspricht, bei einer Kanalzahl von 100 liegt, sodass  $50\text{MeV}$  bei einer Kanalzahl von 4000 liegen.

### 3.3 Aufbau des endgültigen Versuchsaufbaus, Durchführung einer Zeiteichung

Der endgültige Versuchsaufbau beinhaltet nun hinter dem TFA einen Diskriminator, der allen Signalen, die über einem Grenzwert liegen, die gleiche logische

Form, also gibt der Diskriminatior ein "Kastensignal" weiter. Der Grenzwert wird über den Threshold des Diskriminators so eingestellt, damit die Summenlinie von  $^{60}\text{Co}$  verschwindet. Die Amplitude bzw. die integrierte Fläche des Signals ist somit unerheblich, weswegen kein Hauptverstärker verwendet werden muss. Dieses durch den Diskriminatior weitergegebene Kastensignal wird nun gesplittet. Ein Teil des Signals läuft direkt in den Stopeingang des TPC, wobei der andere Teil durch Delayboxen, die aus langen Kabeln bestehen und somit die Durchlaufzeit des Signals verlängern, geführt wird. Die Verzögerungszeit beträgt (entgegen der Abbildung 11) ca. 300ns. Das verzögerte Signal wird dann erneut durch einen Diskriminatior geschickt, da der Tiefpass die Form des Signals verändert hat.

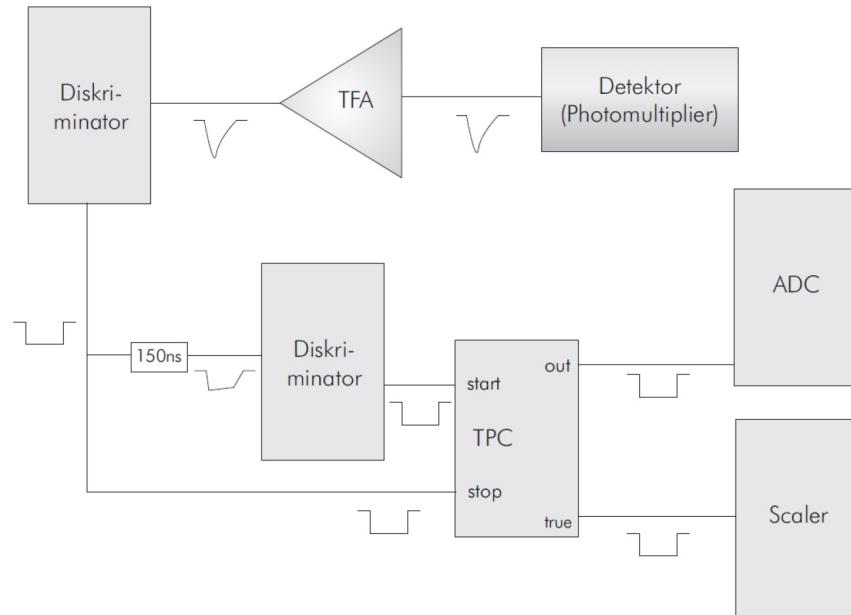


Abbildung 11: Endgültiger Versuchsaufbau zu Bestimmung der Lebensdauer der Myonen.[2]

Um den Kanalzahlen eine Zeit zuordnen zu können, ist anschließend noch eine Zeiteichung notwendig. Dabei wird diesmal das Stoppsignal um unterschiedliche Zeiten verzögert. Somit wird genau diese eingestellte Zeit gemessen, wodurch mehreren Kanalzahlen eine Zeit zugeordnet wird. Diese Punkte werden anschließend mit einer Geraden gefüttet, die dann die Zeit in Abhängigkeit von der Kanalzahl angibt.

### 3.4 Durchführung der Messung

Nach diesen Vorbereitungen wird die Messung gestartet, welche ca. eine Woche dauern sollte, um eine ausreichende Zahl von gemessenen Zerfällen zu gewährleisten.

## 4 Auswertung

### 4.1 Aufnahme des $^{60}\text{Co}$ -Energiespektrums

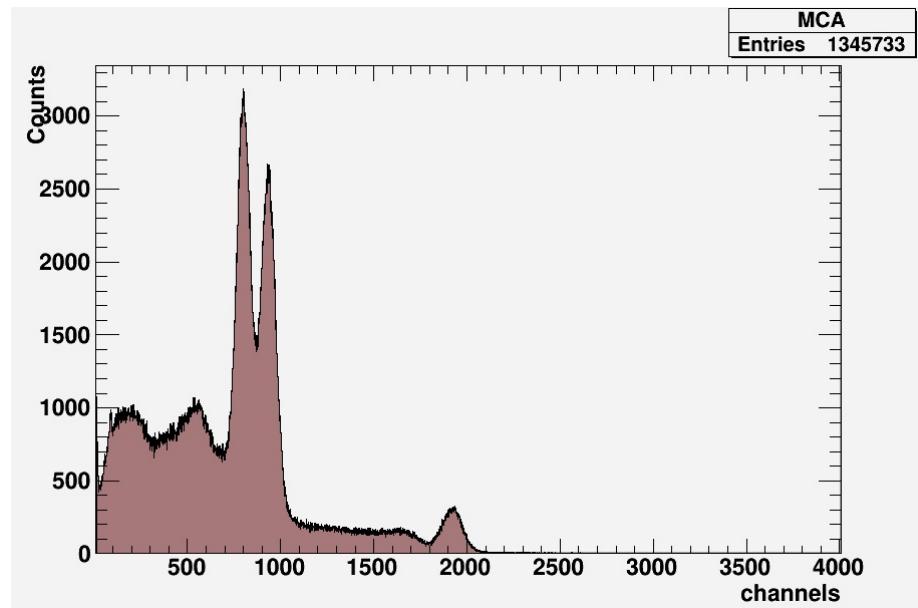


Abbildung 12: Energiespektrum der  $^{60}\text{Co}$ -Quelle.

Im aufgenommenen Energiespektrum sind gut die beiden Kobaltpeaks zu erkennen, welche laut Karlsruher Nuklidkarte bei  $1,173\text{MeV}$  und  $1,332\text{MeV}$  liegen. Das Peak bei einer Kanalzahl zwischen 1900 und 2000 entspricht der Summenpeak, welches dadurch zustande kommen, dass die Photonen beider Peaks zur gleichen Zeit gemessen werden. Auf der linken Seite der Peaks ist das Compton-Spektrum zu erkennen.

## 4.2 Energieeichung und Messung minimal ionisierender Myonen

Anschließend wurde der Verstärkungsfaktor ,wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, so gewählt, dass  $50\text{MeV}$  bei einer Kanalzahl von etwa 4000 liegen. In Abbildung 13 ist das Myonenspektrum zu sehen.

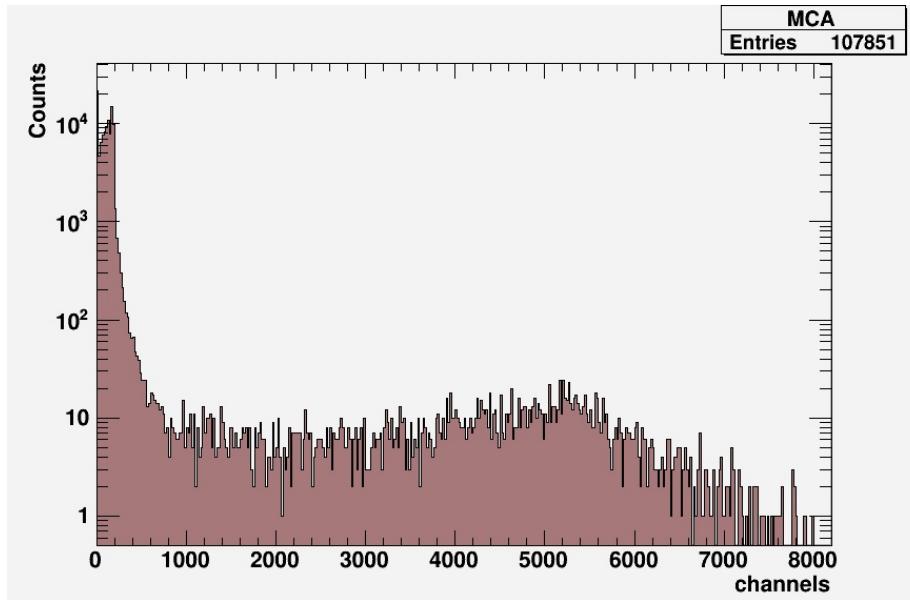


Abbildung 13: Energiespektrum von minimal ionisierenden Myonen.

### 4.3 Einstellen der Diskriminatorschwelle und Zeiteichung

Die Diskriminatorschwelle wurde wie in Abschnitt 3.3 beschrieben eingestellt.

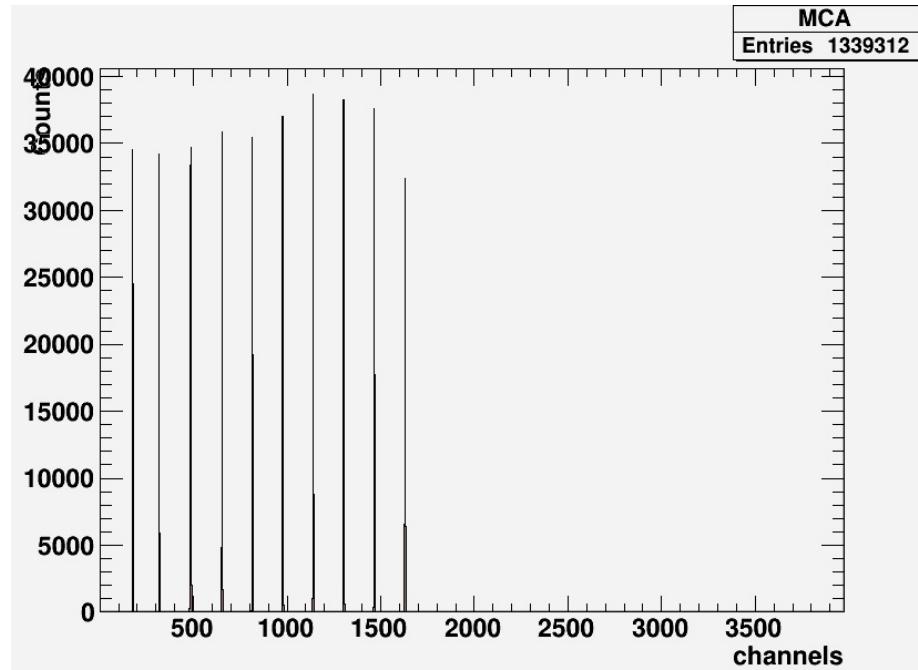


Abbildung 14: Zeitmessung.

Channel	$t$ in ns
176	150
317	300
486	450
653	600
814	750
976	900
1139	1050
1302	1200
1466	1350
1630	1500

Tabelle 1: Werte Zeitmessung.

In Abbildung 14 sind die gemessenen Peaks der Zeitmessung zu sehen, dessen Positionen in Tabelle 1 mit zugehöriger Zeit eingetragen sind, welche aus der entsprechenden Textdatei bestimmt wurden.

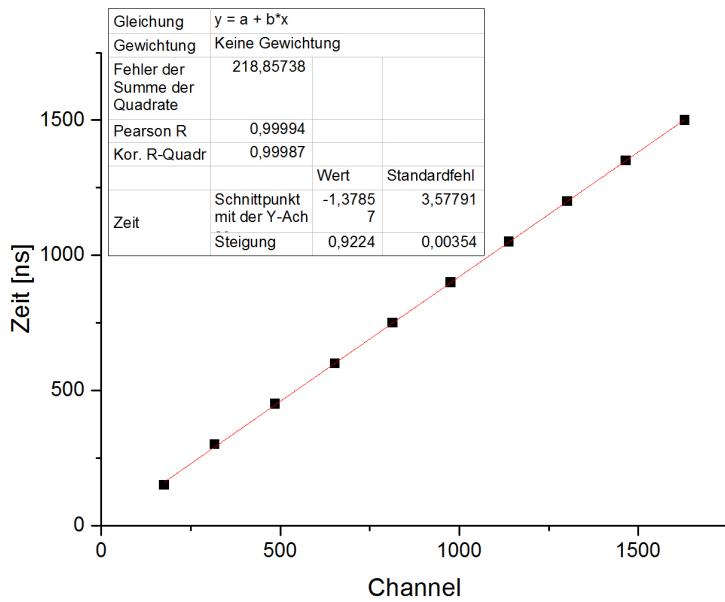


Abbildung 15: Geradenfit der Zeiteichung.

Aus dem Geradenfit in Abbildung 15 ergibt sich für die Abhängigkeit der Zeit  $t$  in  $ns$  von der Channelzahl  $x$ :

$$t = 0,9224x - 1,37857$$

#### 4.4 Bestimmung der mittleren Lebensdauer

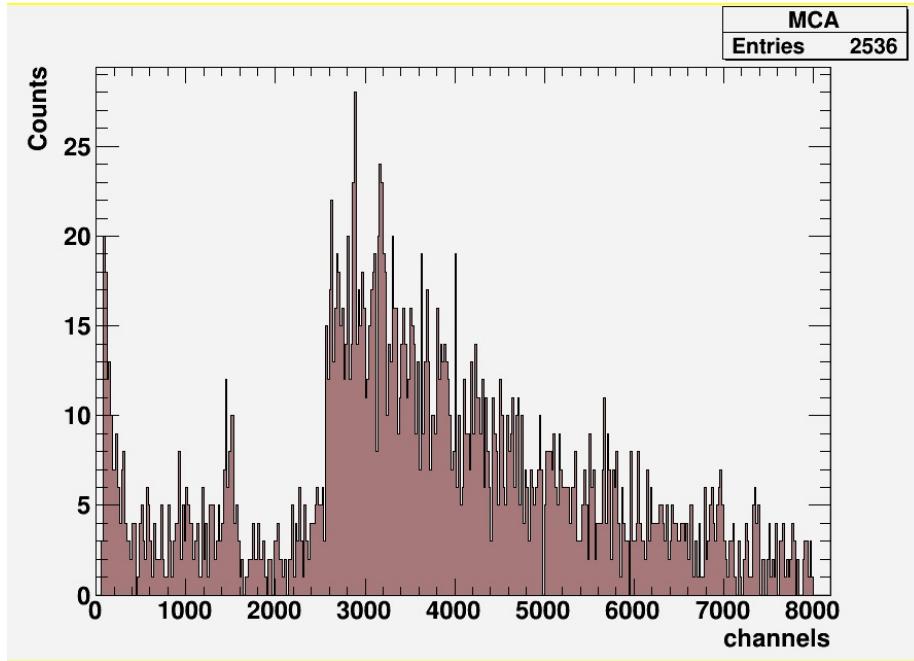


Abbildung 16: Rohdaten der Lebensdauermessung.

Von den gemessenen Rohdaten (Abbildung 16) muss der zeitzufällige Untergrund abgezogen werden. Der Untergrund genügt einer Poissonverteilung

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

wobei  $t$  dem betrachteten Zeitintervall,  $n$  der Anzahl der Ereignisse im betrachteten Zeitintervall und  $\mu$  die Ereignisrate darstellen. Die Anzahl an Ereignissen beträgt 2946445. Da der Startzeitpunkt der Messung nicht notiert wurde, wird hier mit einer Messzeit  $T$  von einer Woche abzüglich einer halben Stunde gerechnet mit einem Fehler von  $\pm 30$  Minuten. Damit ergibt sich für die Zählrate

$$\mu = \frac{2946445}{7 \cdot 86400s - 30 \cdot 60s} = 4,886 Hz$$

mit einem Fehler von

$$\Delta\mu = \frac{2946445}{T^2} \Delta T = 0,015 Hz.$$

Die Rohdaten wurden mittels Rebinning bearbeitet, sodass 20 Channels in einem Bin enthalten sind. Somit folgt für das Zeitintervall mithilfe der Steigung

$$m = 0,9224 \frac{ns}{Channel} \text{ (Abbildung 15)}$$

$$t = 20 \frac{Channel}{Bin} \cdot m = 18,448 \frac{ns}{Bin}.$$

Daraus folgt der Untergrund für ein Ereignis innerhalb von  $t$  mithilfe der Poissonverteilung:

$$U_{Channel} = P(n \geq 0) \cdot 2946445 = (1 - P(n = 0)) \cdot 2946445 = (1 - e^{-\mu t}) \cdot 2946445 = 0,266$$

mit einem Fehler von

$$\Delta U_{Channel} = \left| \frac{\partial U_{Channel}}{\partial \mu} \right| \Delta \mu = t e^{-\mu t} \Delta \mu \cdot 2946445 = 0.001$$

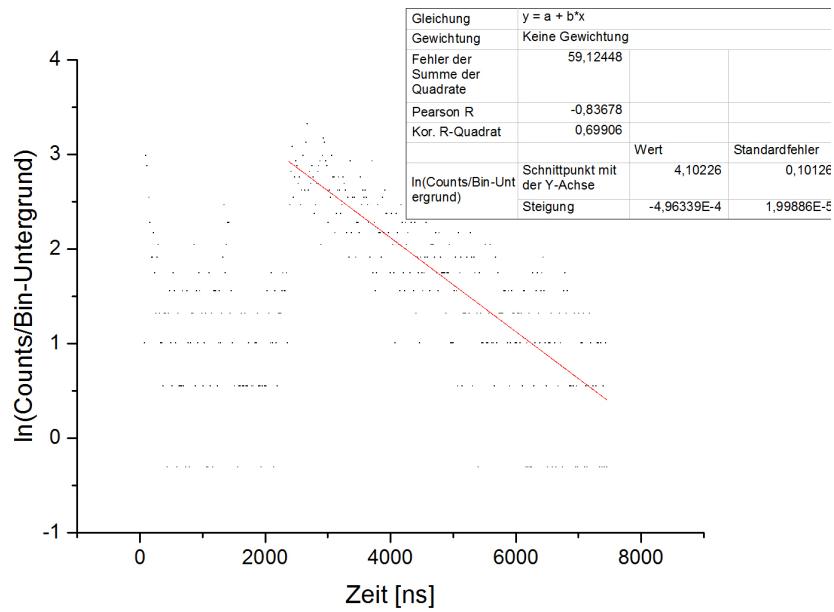


Abbildung 17: Linearer Regressionsfit zur Bestimmung der Zerfallskonstanten mit  $U=0,266$ .

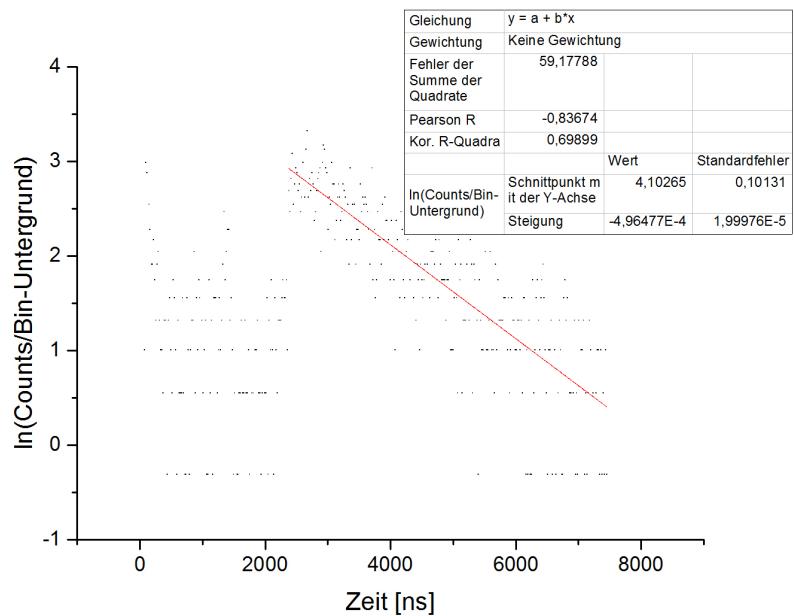


Abbildung 18: Linearer Regressionsfit zur Bestimmung der Zerfallskonstanten mit U=0,267.

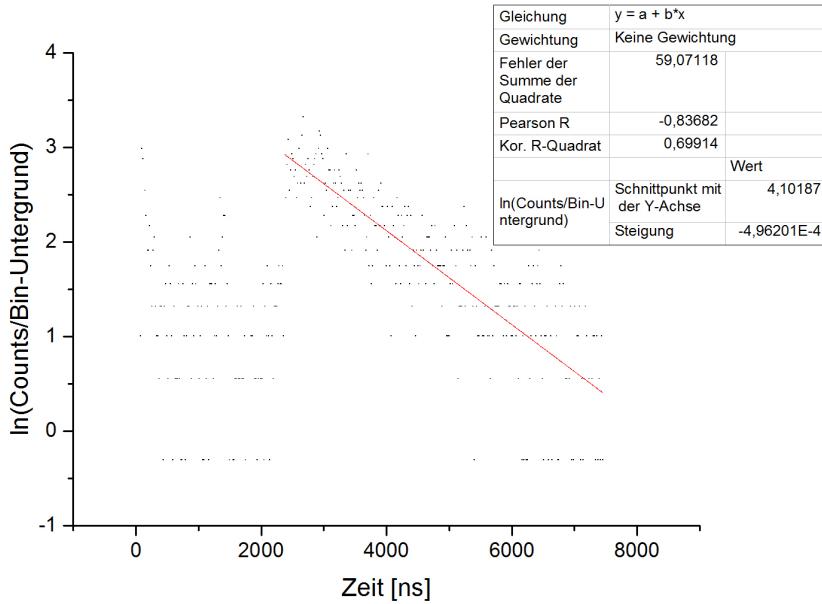


Abbildung 19: Linearer Regressionsfit zur Bestimmung der Zerfallskonstanten mit  $U=0,265$ .

Die linearen Regressionsfits beinhalten als Punkte den Logarithmus der Differenz der Anzahl der Einträge und des Untergrunds, wobei die Fits auf das Intervall  $[2379, 8; 7453]ns$  beschränkt ist, da die Werte innerhalb der ersten Millisekunden sehr stark abweichen.

Der Regressionsfit (Abbildung 17) ergibt für die Zerfallskonstante  $\lambda$  der Myonen

$$\lambda = (4,96339 \cdot 10^{-4} \pm 1,99886 \cdot 10^{-5})ns^{-1}.$$

Der Regressionsfit (Abbildung 18) ergibt für Zerfallskonstante  $\lambda$  der Myonen

$$\lambda = (4,96477 \cdot 10^{-4} \pm 1,99976 \cdot 10^{-5})ns^{-1}.$$

Der Regressionsfit (Abbildung 19) ergibt für die Zerfallskonstante  $\lambda$  der Myonen

$$\lambda = (4,96201 \cdot 10^{-4} \pm 1,99796 \cdot 10^{-5})ns^{-1}.$$

Als Fehler wird der von Origin berechnete Standardfehler verwendet.

Nun wird der Mittelwert vom größtmöglichen und vom kleinstmöglichen Wert für  $\lambda$  gebildet und als neue Zerfallskonstante  $\bar{\lambda}$  betrachtet:

$$\bar{\lambda} = \frac{(4,96477 \cdot 10^{-4} + 1,99976 \cdot 10^{-5})ns^{-1} + (4,96201 \cdot 10^{-4} - 1,99796 \cdot 10^{-5})ns^{-1}}{2} = 4,96348 \cdot 10^{-4} ns^{-1}$$

Als Fehler für  $\bar{\lambda}$  wird die Abweichung zu größtmöglichem und kleinstmöglichem Wert betrachtet:

$$\Delta\bar{\lambda} = (4,96477 \cdot 10^{-4} + 1,99976 \cdot 10^{-5}) ns^{-1} - 4,96348 \cdot 10^{-4} ns^{-1} = 2,01266 \cdot 10^{-5} ns^{-1}$$

Somit folgt für die mittlere Lebensdauer

$$\tau = \bar{\lambda}^{-1} = 2014,715482 ns.$$

Der Fehler der mittleren Lebensdauer ergibt sich mithilfe des Maximalfehlers zu

$$\Delta\tau = \left| \frac{\partial\tau}{\partial\bar{\lambda}} \right| \Delta\bar{\lambda} = \tau^2 \Delta\bar{\lambda} = \pm 81,695449 ns.$$

Der Literaturwert für die Lebensdauer beträgt  $\tau = 2196,9811 \pm 0,0000022 ns$ . Somit liegt der Literaturwert nicht im Fehlerbereich des Messwerts, was an fehlender Statistik liegt. Trotz einer Woche Messzeit treten nur sehr wenige Ereignisse auf. Daher ist ein stärkeres Rebinning notwendig, was natürlich automatisch zu einer Abweichung führt. Für eine genauere Messung sind somit noch deutlich längere Messzeiten notwendig. Jedoch ist der Wert der Lebensdauer in einem zufriedenstellenden Bereich.

## 5 Literaturverzeichnis

### Literatur

- [1] [https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell#/media/File:Standard\\_Model\\_of\\_Elementary\\_Particles-de.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell#/media/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles-de.svg).  
Stand: 21/07/2016.
- [2] <http://www.uni-giessen.de/fbz/fb07/fachgebiete/physik/lehre/fprak/anleitungen/myonen>.  
Stand: 21/07/2016.
- [3] <https://de.wikipedia.org/wiki/Szintillationsz%C3%A4hler#/media/File:Szintillationsz%C3%A4hler.png>.  
Stand: 21/07/2016.