

VERSUCH NUMMER 1

Lebensdauer kosmischer Myonen

Maximilian Freiheit
maximilian.freiheit@tu-dortmund.de

Jonas Alexander Minor
jonas.minor@tu-dortmund.de

Durchführung: 05.06.2023

Abgabe: 12.06.2023

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	1
2 Theoretische Grundlagen	1
2.1 Kosmische Myonen	1
3 Versuchsaufbau und Durchführung	2
3.1 Aufbau	2
3.1.1 Szintillatoren	2
3.1.2 Photomultiplier	2
3.1.3 Diskriminator	4
3.1.4 Koinzidenz	4
3.1.5 Monostabile Kippstufe	4
3.2 Zeit-Amplituden-Konverter	4
3.2.1 Vielkanalanalysator	4
3.3 Messverfahren	4
4 Auswertung	5
4.1 Bestimmung der Kanal-Zeit Umrechnung	5
4.2 Bestimmung der Lebensdauer	6
5 Diskussion	7
Literatur	7

1 Zielsetzung

Ziel des Versuches ist es den Experimentellen Aufbau zu verstehen und so zu kalibrieren, dass die Lebensdauer kosmischer Myonen bestimmt werden kann.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Kosmische Myonen

Myonen sind Leptonen, welche unter anderem durch kosmische Strahlung entstehen. Die kosmische Strahlung besteht größtenteils aus Protonen, welche in der oberen Atmosphäre mit den dortigen Teilchen wechselwirken [1]. Dort entstehen unter anderem Pionen und Kaonen, welche wiederum über die Zerfälle

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (2)$$

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (3)$$

$$K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (4)$$

in Myonen und Myon-Neutrinos sowie deren Antiteilchen zerfallen. Diese Zerfälle spielen sich dabei in einer Höhe von etwa 15 km ab [1]. Myonen haben eine Ruhemasse von etwa 110 MeV [2] und eine Lebensdauer von etwa $2,2 \mu\text{s}$ [2]. Trotz dieser kurzen Lebensdauer können die Myonen aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit eine Strecke von mehreren Kilometern zurücklegen, bevor sie zerfallen. Dies kann durch die Zeitdilatation erklärt werden, welche besagt, dass die Zeit in einem bewegten Bezugssystem langsamer vergeht als in einem ruhenden. Auf Meereshöhe entspricht der Fluss der Myonen etwa $1,0 \text{ 1/(cm}^2 \text{ min)}$ [1]. Myonen zerfallen über den Zerfall

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_\mu + \nu_e \quad (5)$$

in ein Elektron, ein Myon-Antineutrino und ein Elektron-Neutrino. Für Antimyonen gilt der entsprechende Zerfall mit den jeweiligen Antiteilchen. Die Zerfälle folgen damit der Leptonenzahlerhaltung, da die entstehenden Neutrinos diese ausgleichen. Myonen können anders als ihr Antiteilchen auch durch Myoneinfang zerfallen. Dies erfolgt analog zum Elektroneneinfang, wobei ein Proton in ein Neutron umgewandelt wird und ein Elektron-Antineutrino entsteht [3]. Die Zerfallsgleichung für Myonen lautet dabei

$$\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu. \quad (6)$$

Somit haben Myonen eine etwas geringere Lebensdauer als ihre Antiteilchen.

Das Zerfallen der Myonen kann dabei über ein Zerfallsgesetz beschrieben werden, welches die Anzahl der Myonen in Abhängigkeit von der Zeit t beschreibt. Dieses lautet

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad [3]. \quad (7)$$

dabei beschreibt N_0 die Anzahl der Myonen zum Zeitpunkt $t = 0$ und λ die charakteristische Zerfallskonstante. $N(t)$ beschreibt die Anzahl der Myonen zum Zeitpunkt t . Die erwartete Lebensdauer der Myonen lässt sich nun über den zeitlichen Erwartungswert der Zeit bestimmen:

$$\tau = \langle t \rangle = \int_0^\infty t \lambda e^{-\lambda t} dt. \quad (8)$$

Das Zerfallsgesetz (7) muss noch um den Hintergrund N_U korrigiert werden, welcher Ereignisse beschreibt, die nicht durch Myonen verursacht werden. Somit ergibt sich für die Anzahl der Myonen

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} + N_U. \quad (9)$$

Die Untergrundrate lässt sich durch theoretische Überlegungen bestimmen oder hinterher durch die Auswertung der Messdaten. Die theoretischen Überlegungen werden im Folgenden kurz erläutert. Es wird angenommen, dass im

Suchzeitraum T nachdem ein Myon detektiert wurde noch ein weiteres Teilchen im Detektor detektiert wird, welches nicht das durch den Zerfall entstandene Elektron ist. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist poissonverteilt [4], woraus sich die Untergrundrate N_U aus folgender Rechnung ergibt: Die durchschnittliche Anzahl gemessener Myonen \bar{N} in der Suchzeit T ist gegeben durch

$$\bar{N} = \frac{N_{\text{start}}}{T_{\text{Mess}}}. \quad (10)$$

Hier beschreibt N_{start} die Anzahl der Startsignale, mehr dazu in Kapitel 3, und T_{Mess} die dauer der Messung. Über den Erwartungswert der Messungen innerhalb der Suchzeit $\langle T_{\text{Mess}} \rangle = T \cdot \bar{N}$ ergibt sich dann die Poissonverteilung zu

$$P(k) = \frac{T \cdot \bar{N}^k}{k!} \cdot e^{-T \cdot \bar{N}}. \quad (11)$$

Dabei beschreibt $P(k)$ die Wahrscheinlichkeit, dass im Suchzeitraum k weitere Teilchen detektiert werden. Somit ergibt sich über

$$N_{\text{Stör}} = N_{\text{Start}} \cdot P(1) \quad (12)$$

die Anzahl der Störfälle. Die Untergrundrate pro Kanal ergibt sich dann über

$$N_U = \frac{N_{\text{Stör}}}{N_{\text{kanal}}}. \quad (13)$$

N_{Bins} beschreibt hier die Anzahl der Bins im Histogramm in welcher die Messung aufgelöst wird.

3 Versuchsaufbau und Durchführung

In diesem Abschnitt wird der Versuchsaufbau, sowie die einzelnen Bauteile erklärt. Anschließend wird beschrieben wie die Messungen durchgeführt werden.

3.1 Aufbau

Der Versuch besteht im wesentlichen aus einem Zylinder, der mit einem Szintillator gefüllt ist. An den beiden Enden des Zylinders befinden sich Photomultiplier, die das Licht des Szintillators in elektrische Signale umwandeln. Die entstehenden Signale werden dann entsprechend der Schaltung in Abbildung 1 verarbeitet.

3.1.1 Szintillatoren

Szintillatoren sind Materialien, die durch ionisierende Strahlung angeregt werden und dann Licht emittieren. Es gibt dabei verschiedene Arten von Szintillatoren, die sich in ihren Eigenschaften und damit auch in ihrer Verwendung unterscheiden. Organische und anorganische Szintillatoren sind dabei die beiden Hauptgruppen, welche sich in ihrer chemischen Zusammensetzung unterscheiden. Zu den anorganischen Szintillatoren gehören unter anderem Kristalle, die eine hohe Dichte und damit eine hohe Absorptionswahrscheinlichkeit für ionisierende Strahlung haben. Das Licht wird dabei nicht direkt durch die Strahlung erzeugt, sondern durch die Rekombination von Elektronen und Löchern, die durch die Strahlung erzeugt werden. Das führt zu einer Verzögerung der Lichtemission, die als Nachleuchten bezeichnet wird. Anorganische Szintillatoren eignen sich entsprechend besser für Energiemessungen als für Zeitmessungen. Deshalb wird in diesem Versuch ein organischer Szintillator verwendet. Dieser besteht aus einem organischen Molekül, welches durch die Strahlung angeregt wird und dann Licht emittiert. Nachteilig ist dabei, dass organische Szintillatoren eine geringere Dichte haben und damit eine geringere Absorptionswahrscheinlichkeit.

3.1.2 Photomultiplier

Um das in den Szintillatoren entstehende Licht in elektrische Signale umzuwandeln, werden Photomultiplier verwendet. Diese bestehen aus einer Photokathode, die das Licht in Elektronen umwandelt. Diese werden dann durch eine Spannung beschleunigt und auf eine Anode gelenkt. Dabei werden die Elektronen vervielfacht, sodass ein messbares Signal entsteht.

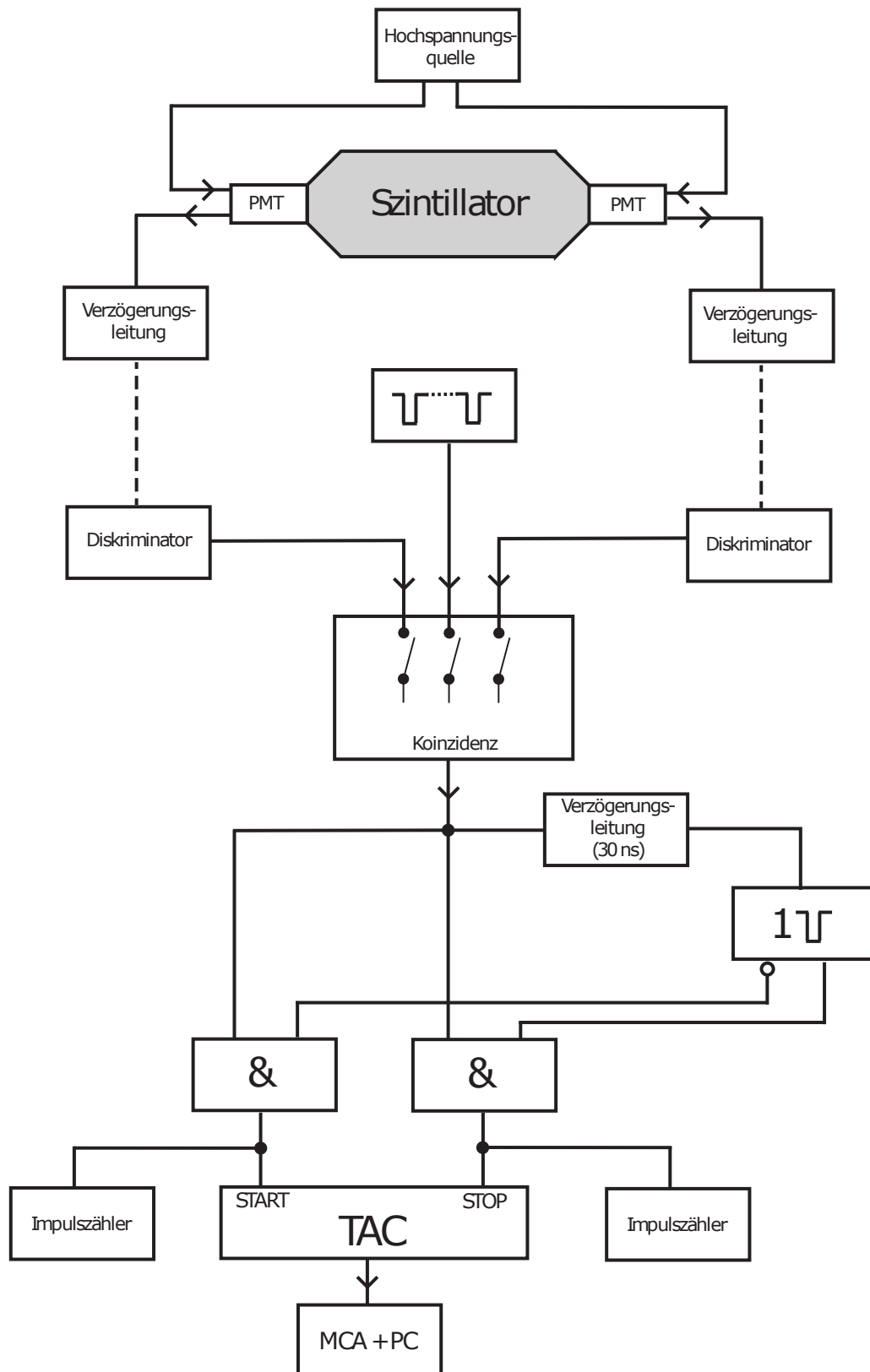


Abbildung 1: Schaltung zur Messung der Lebensdauer kosmischer Myonen. [5]

3.1.3 Diskriminator

Um das von den Photomultiplier generierte Signal verwenden zu können um die Zeitmessung zu starten/stoppen muss das Signal zunächst in ein Rechtecksignal, welches dann als Logiksignal verwendet werden kann, umgewandelt werden. Dies wird durch einen Diskriminator erreicht. Dieser vergleicht das Eingangssignal mit einem einstellbaren Schwellwert. Ist das Eingangssignal größer als der Schwellwert, so gibt der Diskriminator ein Signal mit einer festen Amplitude aus. Ist das Eingangssignal zu schwach, so wird kein Signal ausgegeben.

3.1.4 Koinzidenz

Um die Lebensdauer der Myonen zu messen, muss zunächst sichergestellt werden, dass die Signale der beiden Photomultiplier tatsächlich von einem Myon stammen. Dazu werden die Signale der beiden Photomultiplier mit einer Koinzidenzschaltung verglichen. Diese gibt nur dann ein Signal aus, wenn beide Eingangssignale gleichzeitig auftreten. So können Störsignale, die nur bei einem der beiden Photomultiplier auftreten, herausgefiltert werden.

3.1.5 Monostabile Kippstufe

Die Monostabile Kippstufe, auch Monoflop genannt, ist ein elektronisches Bauteil, welches ein Eingangssignal in ein Ausgangssignal umwandelt. Dabei ist das Ausgangssignal nur für eine bestimmte Zeit aktiviert. Die Dauer der Aktivierung wird durch die Zeitkonstante RC bestimmt.

3.2 Zeit-Amplituden-Konverter

Zeit-Amplituden-Konverter (englisch Time to Amplitude Converter, kurz TAC) sind elektronische Schaltungen, die eine zeitliche Differenz zwischen zwei Ereignissen in eine proportionale Spannung umwandeln.

3.2.1 Vielkanalanalysator

Ein Vielkanalanalysator (englisch Multi Channel Analyzer, kurz MCA) ist ein elektronisches Gerät, welches die Häufigkeit an Signalen einer gewissen Amplitude zählt und in einem Histogramm darstellt. Dabei sind die Kanäle linear in der Amplitude skaliert. Dadurch kann bestimmt werden welche Zeitdifferenz zwischen zwei Signalen zu welcher Amplitude und damit zu welchem Kanal gehört.

3.3 Messverfahren

Um die Lebensdauer der Myonen zu bestimmen, wird die Zeitdifferenz zwischen dem Startsignal und dem Stoppsignal gemessen. Ein Startsignal ist dabei das Signal, welches von einem Myon im Szintillator erzeugt wird. Das Myon wird im Szintillator gestoppt, wenn es mit einem Atom des Szintillatormaterials wechselwirkt und dabei Energie abgibt. Es bleibt dann in Ruhe bis es gemäß der in Unterabschnitt 2.1 beschriebenen Kanäle in ein Elektron zerfällt, welches dann aufgrund der geringeren Masse wieder kinetische Energie hat und somit Licht im Szintillator erzeugt. Dies ist dann das Stoppsignal. Damit die Signale als Start- und Stoppsignal fungieren können müssen diese konvertiert werden. Dazu werden die Signale der beiden Photomultiplier zuerst mit Verzögerungsleitungen aufeinander abgestimmt, sodass die Signale synchronisiert sind. Danach laufen die Signale durch einen Diskriminator, der die Signale in Rechtecksignale umwandelt. Diese müssen dabei zunächst eingestellt werden. Der Diskriminator sollte dabei so eingestellt werden, dass etwa 30 Impulse pro Sekunde auftreten. Dies lässt sich erreichen, indem die Anzahl an Pulsen über eine gewisse Zeit für verschiedene Schwellen gemessen wird und dann die beste Schwelleneinstellung gewählt wird. Diese Signale werden dann mit einer Koinzidenzschaltung verglichen, sodass nur Signale, die von beiden Photomultipliern gleichzeitig kommen, als Signal interpretiert werden. Die Koinzidenz kann justiert werden indem die Verzögerungsleitung zwischen den Photomultipliern variiert wird. Dabei sollten nie beide Verzögerungsleitungen gleichzeitig verstellt werden. An den Diskriminatoren werden Pulsdauern von etwa 10 ns, 15 ns und 20 ns eingestellt. Es werden jeweils die Verzögerungen erhöht und dabei die Pulsraten über eine hinreichend lange Zeit gemessen. Es sollten sich Messreihen mit Plateaus ergeben, die dann die optimale Einstellung darstellen. Für den restlichen Versuch wird eine Verzögerung gewählt, welche idealerweise circa 20 Impulse pro Sekunde in der Mitte des Plateaus erzeugt. Die restliche Schaltung wird verkabelt und am TAC sowie

an der Monostabilen Kippstufe wird die Suchzeit auf $T = 15 \mu\text{s}$ eingestellt. Schließlich wird noch der MCA für verschiedene Impulslängen mit Hilfe des Doppelimpulsgenerators ausgemessen. Dadurch lassen sich am Ende die Kanäle des MCA in Zeit umrechnen.

4 Auswertung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der in Abschnitt 3 beschriebenen Messungen ausgewertet. Die ersten Schritte der Auswertung, also das Einstellen der Diskriminatoren und der Koinzidenz wurden aufgrund von technischen Problemen nicht durchgeführt. Zur Auswertung werden die Pakete numpy [6], scipy [7], iminuit [8] und uncertainties [9] verwendet.

4.1 Bestimmung der Kanal-Zeit Umrechnung

Das Ausmessen der Kanäle des Vielkanalanalysators mit dem Doppelimpulsgenerator ergab die in Tabelle 1 dargestellten Werte.

Tabelle 1: Messwerte zur Kalibrierung des Vielkanalanalysators.

$t / \mu\text{s}$	Channel
1,3	23
2,3	46
3,3	69
4,3	91
5,3	110
6,3	140
7,3	160
8,3	180
9,3	210

Die Zeiten aus der Tabelle werden nun gegen die Kanäle aufgetragen und es wird ein linearer Fit der Form $f(x) = a \cdot x + b$ durchgeführt. So lässt sich errechnen welcher Kanal welchem Zeitintervall entspricht.

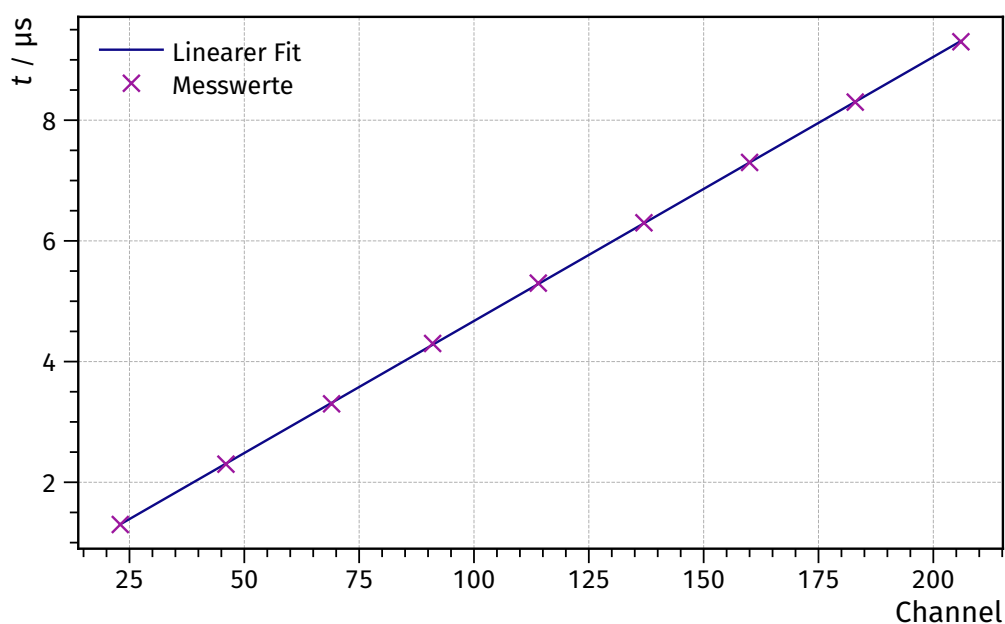


Abbildung 2: Plot.

Der Fit liefert die Parameter:

$$a = (0,044 \pm 0,006) \mu\text{s}$$

$$b = (0,30 \pm 0,07) \mu\text{s}$$

Daraus folgt, dass ein Kanal einem Zeitintervall von $(0,044 \pm 0,006) \mu\text{s}$ entspricht. Die Kanäle lassen sich also mit der Formel $t = 0,044 \mu\text{s} \cdot K + 0,30 \mu\text{s}$ in Zeiten umrechnen. Dies wird im Folgenden für die Auswertung verwendet.

4.2 Bestimmung der Lebensdauer

Zuerst werden die Daten aus Abbildung 3 betrachtet. Dabei wurden die Kanäle bereits in Zeiten umgerechnet. In der Grafik sind außerdem die Grenzen der Daten die für die weitere Auswertung verwendet werden eingezeichnet.

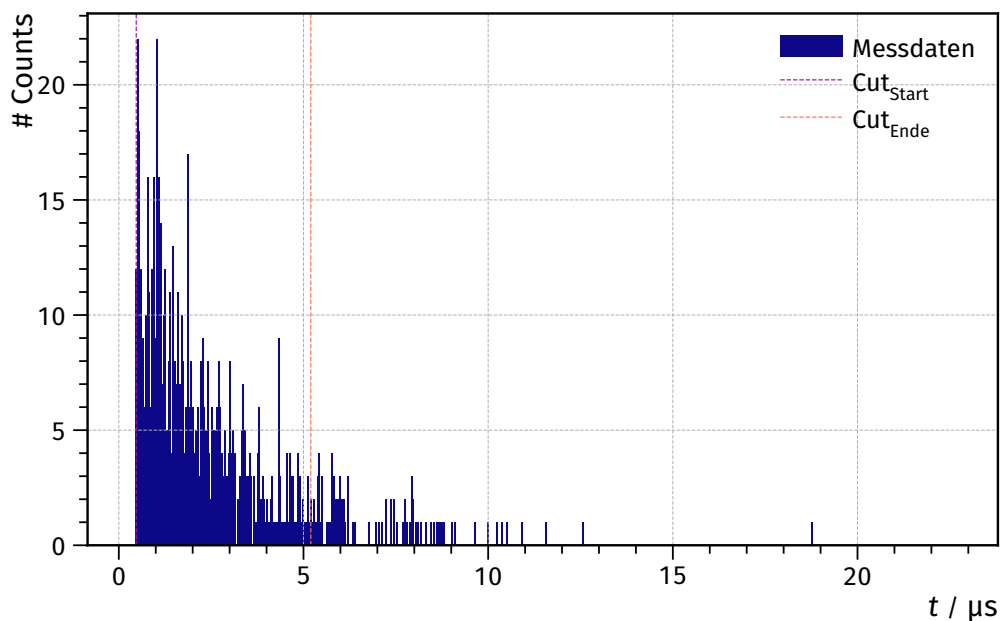


Abbildung 3: Messdaten mit Cutoff.

Jeder Messwert erhält den Fehler \sqrt{N} , da die Zählrate Poissonverteilt ist. Den Bins mit $N = 0$ wird der Fehler $\sqrt{1}$ zugewiesen, da diese somit den gleichen Fehler wie die Bins mit $N = 1$ erhalten, welche als Hintergrundrauschen betrachtet werden. Für die Auswertung werden nur die Daten zwischen den Cuts betrachtet, da davor keine Werte vorhanden sind und die Daten hinter Cut_{Ende} werden als Hintergrundrauschen betrachtet und nicht weiter beachtet. Es wird ein exponentieller Fit der Form $f(x) = a \cdot e^{-b \cdot x} + c$ durchgeführt.

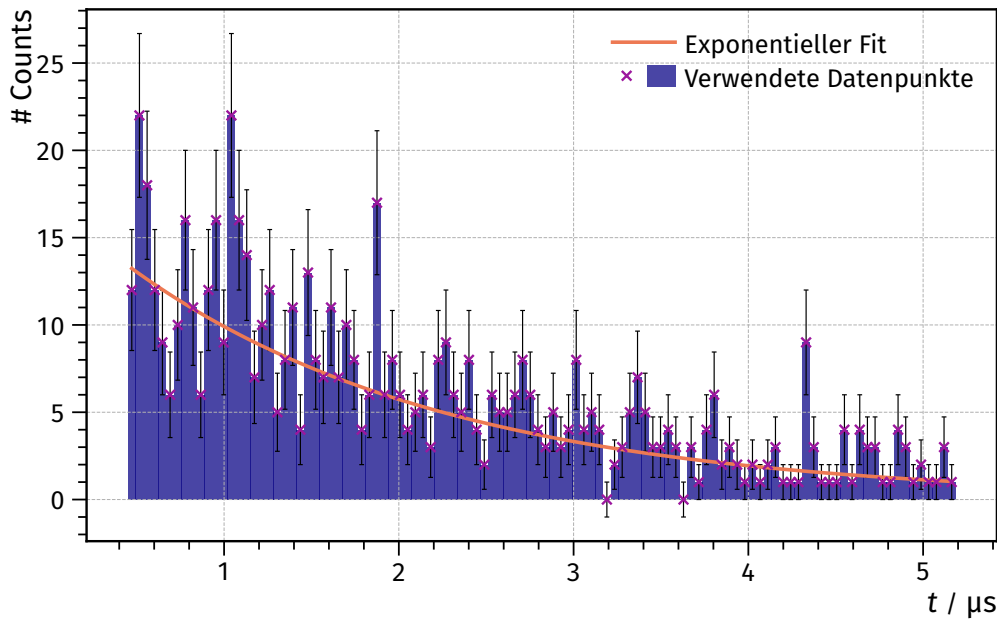


Abbildung 4: Zur Auswertung verwendete Daten mit Exponentiellem Fit und Poisson-Fehler.

Es ergeben sich die Parameter:

$$a = (17,0 \pm 1,6) \frac{1}{\mu s}$$

$$b = (0,55 \pm 0,11) \frac{1}{\mu s}$$

$$c = (0,0 \pm 0,7) \frac{1}{\mu s}$$

Die Lebensdauer τ ergibt sich aus dem Parameter b zu:

$$\tau = \frac{1}{b} = (1,8 \pm 0,4) \mu s$$

5 Diskussion

Die Lebensdauer des Myons wurde in diesem Versuch zu $\tau = (1,8 \pm 0,4) \mu s$ bestimmt. Dieser Wert stimmt im Rahmen der Messungenauigkeiten mit dem Literaturwert von $2,2 \mu s$ [2] überein. Die Abweichung von $(17 \pm 16) \%$ ist vermutlich unter anderem auf die geringe Anzahl an Messwerten, insgesamt nur 720, zurückzuführen. Ein Grund für die geringe Datenmenge könnten die technischen Probleme, sowie die dadurch fehlenden präzisen Einstellungen der Geräte sein. Mit einer größeren Datenmenge wäre es vermutlich möglich gewesen, die Lebensdauer präziser zu messen. Insgesamt ist der Versuch aber gut geeignet, um die Lebensdauer des Myons zu bestimmen.

Literatur

- [1] Claus Grupen. Einstieg in die Astroteilchenphysik. Dez. 2017, S. 441. ISBN: 978-3-662-55271-1. DOI: 10.1007/978-3-662-55271-1.
- [2] R. L. Workman u. a. „Review of Particle Physics“. In: PTEP 2022 (2022), S. 083C01. DOI: 10.1093/ptep/ptac097.
- [3] Wolfgang Krieger Hanno und Petzold. Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz. März 2013, S. 376. ISBN: 978-3-322-94129-9. DOI: 10.1007/978-3-322-94129-9.
- [4] Norbert Kolanoski Hermann und Wermes. Teilchendetektoren. Feb. 2016, S. 921. ISBN: 978-3-662-45349-0. DOI: 10.1007/978-3-662-45350-6.

- [5] Versuch Nr. 1. Lebensdauer kosmischer Myonen. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2023.
- [6] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: Computing in Science & Engineering 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [7] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. SciPy: Open source scientific tools for Python. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [8] Hans Dembinski und Piti Ongmongkolkul et al. „scikit-hep/iminuit“. In: (Dez. 2020). DOI: 10.5281/zenodo.3949207. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3949207>.
- [9] Eric O. Lebigot. Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.