

Myonenlebensdauer

Robin Hoffmann*, Arik Bürkle†, Valentin Ertl‡

10. Juni 2025

Kurzfassung

In diesem Experiment wurden Myonen, die in der Atmosphäre entstehen, mittels eines Myonen-detektors erfasst, der bereits von Franz Hess verwendet wurde. Anhand der gemessenen Myonen wird sowohl der Myonenfluss an der Erdoberfläche, speziell in Innsbruck, als auch die Halbwertszeit der Myonen mit einem Wert von $2,15(5) \mu\text{s}$ bestimmt.

*robin.hoffmann@student.uibk.ac.at

†arik.buerkle@student.uibk.ac.at

‡valentin.ertl@student.uibk.ac.at

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Theorie	2
2.1 Exponentialverteilung	2
2.2 Binomial- und Poissonverteilung	3
2.3 Räumlichkeit des Myonendetektors	3
3 Versuchsaufbau und -durchführung	6
3.1 Experimenteller Aufbau und Funktionalität	6
3.2 Versuchsdurchführung	7
3.2.1 Einführende Messungen	7
3.2.2 Messung von registrierten Teilchen in bestimmten Zeitintervall	7
3.2.3 Messung der Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Myonenpulsen	8
3.2.4 Messung der mittleren Lebensdauer der Myonen	8
3.2.5 Auswertung der Hauptmessung	8
4 Ergebnisse	9
4.1 Vorbereitende Messungen	9
4.2 Messung des Myonenflusses	11
4.3 Zeitabstand zwischen Myonensignalen	12
4.4 Mittlere Lebensdauer des Myons	13
4.5 Konzeptionelle Fragen	15
5 Diskussion und Ergebnisse	16

1 Einleitung

Myonen, subatomare Partikel, die zur Familie der Leptonen gehören, stellen eine faszinierende und wichtige Komponente der modernen Elementarteilchenphysik dar. Entdeckt im Jahre 1936 von Carl D. Anderson und Seth Neddermeyer in der kosmischer Höhenstrahlung, haben Myonen seitdem die Neugier von Physikern wie Viktor Franz-Hess gepackt. Letzterer ist bekannt durch die Erforschung von Höhenstrahlung, in diesem Versuch wird einer seiner alten Myonendetektoren verwendet. Die Myonenproduktion in der Atmosphäre und ihre Fähigkeit, tief in die Erdoberfläche vorzudringen, machen sie zu wertvollen Werkzeugen für die Erforschung kosmischer Strahlung. Myonen werden durch hochenergetische kosmische Strahlung produziert, wenn in der Erdatmosphäre schwere Teilchen wie Pionen zerfallen. Diese Myonen sind hochenergetische Teilchen mit einer Energie von rund (1 GeV), welche es auf Grund der Relativitätstheorie zur Erdoberfläche schaffen. Des Weiteren sind Myonen instabile Elementarteilchen, die analog zu Elektronen eine negative Elementarladung tragen, jedoch eine etwa 207-mal größere Masse haben. Eine weitere bemerkenswerte Eigenschaft von Myonen ist ihre vergleichsweise lange Lebensdauer. Im Vergleich zu anderen instabilen Teilchen wie beispielsweise Pionen, haben Myonen eine bedeutend längere Lebensdauer, die es ermöglicht, ihre Eigenschaften und Verhalten präzise zu studieren. [1] [2]

In diesem Bericht werden wir genau diese Myonenlebensdauer bestimmen und den Fluss an Myonen durch den Detektor studieren. Dazu werden im diesem Bericht die verschiedenen Verteilungsfunktionen erörtert, der Aufbau unseres Detektors beschrieben, die entstehenden Daten ausgewertet und schließlich noch weitere interessante Fragen beantwortet.

2 Grundlagen und Theorie

Dieser Abschnitt erörtert die zugrundeliegenden statistischen Prozesse der Messungen, welche sowohl den Fluss von Myonen als auch die Halbwertszeiten der Myonen bestimmen, sowie die Geometrischen gegebenheiten des Myonen Teleskops.

2.1 Exponentialverteilung

In statistischen Prozessen, in denen ein Ereignis mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit P zu jedem Zeitpunkt auftreten kann, wird oft durch eine Exponentialverteilung beschrieben. Es stellt sich die Frage, wie wahrscheinlich es ist, dass das Ereignis während des Zeitintervalls $t_1 + dt$ eintritt. Dabei darf das Ereignis bis zu diesem Zeitpunkt nicht eingetreten sein. Dies wird durch die Gleichung 1 verdeutlicht.

$$P(t + dt) = P(t) \cdot (1 - C \cdot dt) \quad (1)$$

Dabei ist C die Wahrscheinlichkeit, ein Ereignis im Zeitintervall dt zu erhalten. Das Lösen dieses Differentialgleichungssystems ergibt die Exponentialverteilung 2 mit der Standardabweichung 3.

$$P(t) = \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau} \quad (2)$$

$$\sigma = \tau \quad (3)$$

Dabei beschreibt $\tau = 1/C$ die mittlere Lebensdauer.

Sowohl der Zerfallsprozess als auch der Einfallprozess von Myonen wird durch diese Verteilung beschrieben, denn in beiden Fällen kann das Ereignis zu jedem Zeitpunkt mit derselben Wahrscheinlichkeit eintreten.

2.2 Binomial- und Poissonverteilung

Stellt man nun die Frage, wie viele solcher Ereignisse n in einem Zeitraum Δt von insgesamt N Ereignissen stattfinden, so erhält man eine Binomialverteilung.

$$P(n) = \binom{N}{n} p^n (1-p)^{N-n} \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{Np(1-p)} \quad (5)$$

Dabei beschreibt p die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis im Zeitintervall Δt stattfindet.

Macht man nun die Messung mit genügend Ereignissen, so nähert sich die Binomialverteilung einer Poissonverteilung an. Dabei muss gelten, dass $Np \gg 0$, damit die Kurve nicht an der y-Achse abgeschnitten wird. Eine Poissonverteilung wird allgemein durch die Gleichung 6 beschrieben. Sie besitzt nun die Eigenschaft, dass die Standardabweichung direkt mit dem Erwartungswert zusammenhängt $\sigma = \sqrt{\lambda}$.

$$P(n) = \frac{n^{-n}}{n!} e^{-\lambda} \quad (6)$$

Diese Verteilung kann sehr gut durch eine Gaußkurve 7 beschrieben werden, wenn N groß ist.

$$P(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} e^{\frac{(n-\lambda)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

Somit sollten die Anzahl der einfallenden Myonen in einem Zeitraum Δt gaußverteilt sein. Darüber hinaus kann man anhand des Erwartungswerts der Verteilung den Myonenfluss an der Erdoberfläche bestimmen.

2.3 Räumlichkeit des Myonendetektors

Der Myonendetektor besteht aus zwei Platten und kann sowohl den vertikalen Myonenfluss als auch den gesamten Myonenfluss messen. Damit ein Myon von unserem Detektor erfasst werden kann, muss es in den Detektor eintreten. Beim Messen mit einer Platte können Myonen aus allen Raumrichtungen in den Detektor gelangen. Jedoch ist die effektive Fläche für ein schräg einfallendes Myon deutlich kleiner als für eines, das vertikal einfällt, und wird durch die Gleichung $A_{eff} = A_0 \cdot \cos(\beta)$ beschrieben. Zusätzlich ist der Myonenfluss in der oberen Halbkugel F_0 nicht homogen, da horizontal einfallende Myonen eine deutlich längere Strecke zurücklegen. Diese Inhomogenität kann durch $\cos^2(\beta)$ beschrieben werden. Diese Überlegungen wird durch Ausdruck 8 beschrieben.

$$\frac{N}{t} = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} [F_0 \cos(\beta)^2 (2rdsin(\beta) + \pi r^2 \cos(\beta)) \sin(\beta)] d\beta \quad (8)$$

Dabei beschreibt r den Radius der Platte und d die Dicke der Platte. So entstehen zwei Flächenelemente: zum einen die senkrechte Fläche der Scheibe und zum anderen die seitliche Fläche. Durch Lösen des Integrals kann man anhand der einfallenden Myonen in einem Zeitraum die Flussdichte der Myonen mit Gleichung 9 bestimmen.

$$F_0 = \frac{N}{2\pi t (\frac{\pi}{4} r^2 + \frac{\pi}{8} r d)} \quad (9)$$

Um ausschließlich den vertikalen Myonenfluss zu untersuchen, erfolgt die Zählung nur von Myonen, die beide Detektoren durchflogen haben und somit vertikal eingefallen sind (siehe Abbildung 1). Ein bestimmter Einfallswinkel der Myonen ist erforderlich, damit sie beide Detektoren passieren können (siehe Gleichung 10).

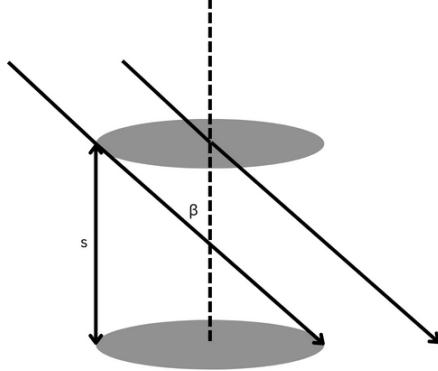


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Muonenteleskops, wie es im Versuch verwendet wurde. Mit Abstand s zwischen den Detektorplatten und dem Plattenradius r . In der Abbildung sind einfallende Muonen unter einem maximalen Einfallswinkel β (Öffnungswinkel) eingezeichnet. Dabei trifft ein Myon (linker Pfeil) beide Detektorplatten und das zweite Myon (rechter Pfeil) nur eine Detektorplatte. Die Dicke d der Detektorplatten kann vernachlässigt werden, da $d \ll s$ und somit der Öffnungswinkel nicht stark beeinflusst wird.

$$\beta = \arctan(2r/s) \quad (10)$$

Hierbei ist r der Durchmesser der beiden Detektorplatten und s der Abstand zwischen den Detektorplatten. Dies gibt uns den Öffnungswinkel β des Muonenteleskops. Fällt nun aber ein Myon in einem Winkel ein der kleiner ist wie der Öffnungswinkel, so kann es immer noch sein, dass das Myon nicht beide Detektorplatten trifft 1. Die Fläche mit der das Myon beide Detektorplatten trifft ist also die überschneidende Fläche der Projektionen beider Detektorplatten entlang des Einfallswinkels. Diese Flächenwinkel abhängig vom Winkel zu bestimmen ist sehr kompliziert, doch um das Problem zu vereinfachen kann man nur Myonen betrachten, die durch den Mittelpunkt der unteren Platte fliegen. Dies ergibt zwar einen gewissen Verlust des tatsächlich detektierten Myonenflusses, doch dieser Verlust kann vernachlässigt werden 2. Mit dieser Überlegung erhält man einen neuen Öffnungswinkel β , wobei $2r$ mit r ersetzt wird. Damit ergibt sich für den von der oberen Platte abgedeckten Raumwinkel folgende Gleichung 11.

$$\Omega_{plt} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\beta} \sin(\theta) d\phi d\theta \quad (11)$$

Der prozentual abgedeckte Raum kann dann durch Gleichung 12 beschrieben werden.

$$P_\Omega = \frac{\Omega_{plt}}{2\pi} \quad (12)$$

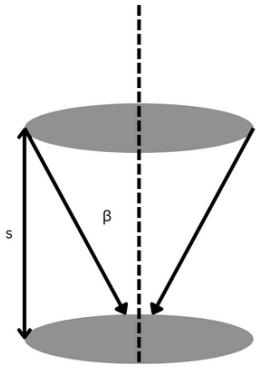


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Myonenteleskops, wie es im Versuch verwendet wurde. Mit Abstand s zwischen den DetektorPlatten und dem Plattenradius r . In der Abbildung sind einfallende Myonen unter einem maximalen Einfallswinkel β (Öffnungswinkel) eingezeichnet, sodass sie durch den Mittelpunkt der unteren Detektorplatte fliegen

Um nun den prozentualen Myonenfluss zu bestimmen, muss man den vertikal Fluss mit dem aus allen Richtungen vergleichen. Dabei muss man beachten das der Myonenfluss wieder von $\cos^2(\beta)$ abhängig ist. Lösen des Intergrals liefert folgende Gleichung 13.

$$P_\mu = 1 - \cos^3(\beta) \quad (13)$$

3 Versuchsaufbau und -durchführung

In diesem Abschnitt werden sowohl die Funktionalität als auch die Struktur und Durchführung des Experiments erläutert. [3]

3.1 Experimenteller Aufbau und Funktionalität

Zur Detektion der Myonen wird ein Plastik-Szintillationsdetektor verwendet. Geladene Teilchen wie die Myonen regen die Moleküle des Plastikmaterials an, wodurch etwa 3% dieser Energie als Photonen im UV-Bereich abgegeben werden. Um sicherzustellen, dass diese kurzen Lichtimpulse von den Photomultipliern erfasst werden können, die im sichtbaren Bereich, speziell im blauen Bereich, empfindlich sind, werden dem Plastikmaterial fluoreszierende Materialien in geringer Konzentration zugesetzt. Diese verschieben die Wellenlänge in den gewünschten Bereich. Der Spannungsimpuls am Ausgang des Photomultipliers wird verstärkt und über einen Diskriminatator, der Pulse unter einer bestimmten Höhe unterdrückt, in ein digitales Signal umgewandelt. Die Amplitude des Ausgangsimpulses des Verstärkers hängt von der Menge an Energie ab, die die Myonen im Szintillator durch Ionisation verlieren. Die verwendete Szintillatorscheibe hat einen Durchmesser von $1,00(1)$ m und eine Dicke von $7,5(1)$ cm. Sie ist in der Basis eines Kegels eingebaut. Im Experiment sind zwei Detektoren übereinander montiert, wobei der vertikale Abstand der beiden Szintillatorscheiben ebenfalls genau $1,00(1)$ m beträgt. Wenn ein Myon in den Szintillator eintritt, löst der entstehende Puls in der Messkarte, einer sogenannten Timerkarte, des angeschlossenen PCs die Registrierung des entsprechenden Zeitpunkts t aus. Jeder weitere Puls, sei es vom Myonzerfall oder vom nächsten zufällig eintreffenden Myon, wird ebenfalls registriert. Auf diese Weise können bis zu $N = 100$ Zeitpunkte t_i auf der Messkarte gespeichert werden, bevor diese Daten schließlich per LabVIEW-Software ausgelesen werden. Die Software ermöglicht sogar das direkte Auslesen der benötigten Zeitdifferenzen $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$. Während des Auslesevorgangs ist die Messung inaktiv. Um die zusätzliche Totzeit gering zu halten, ist es erforderlich, eine große Anzahl N zu verwenden. Kurze, hochfrequente Netzstörungen hingegen lassen sich am besten durch die Wahl einer kleinen Anzahl N eliminieren. Nachfolgende Abbildung veranschaulicht den Versuchsaufbau noch einmal bildlich.

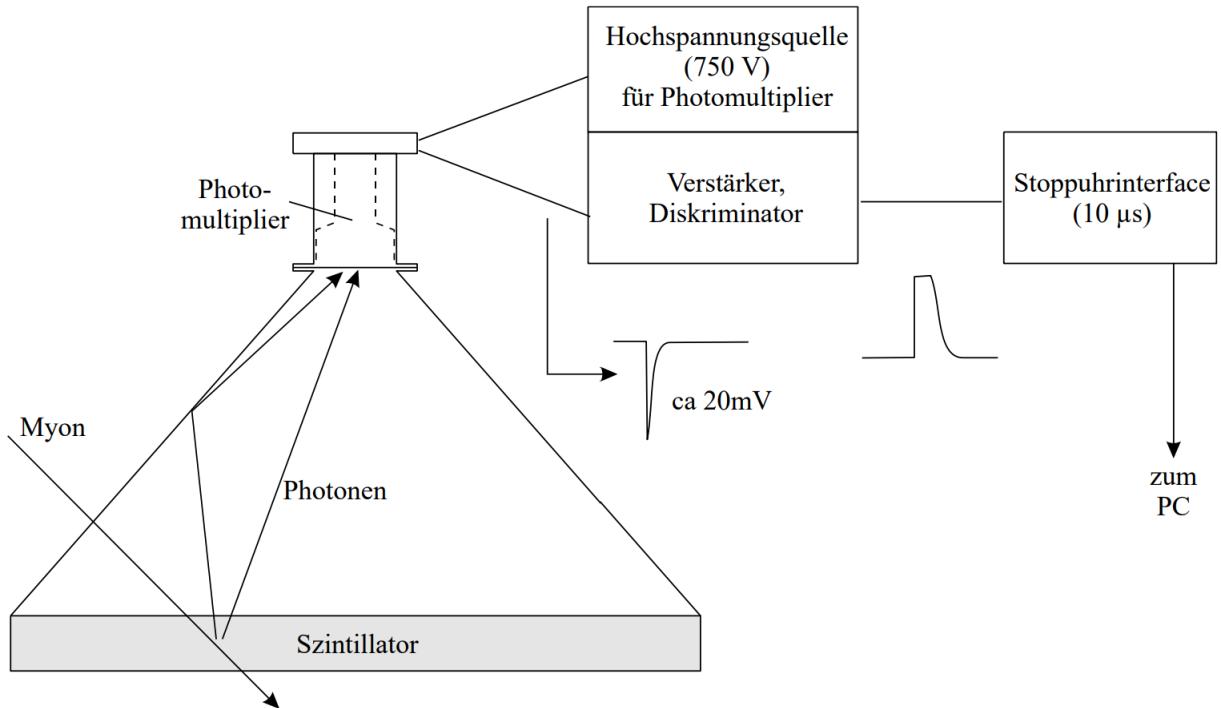


Abbildung 3: Graphische Darstellung des Versuchsaufbaus

3.2 Versuchsdurchführung

3.2.1 Einführende Messungen

Zu Beginn sollen einführende Messungen (ohne Messcomputer) durchgeführt werden, um den Myonfluss sowie den Prozentsatz der Myonen zu bestimmen, die gleichzeitig durch beide Detektoren gelangen. Dabei Sollte auch ein Bild von Signal eines einfallenden Myons betrachtet werden 4.

3.2.2 Messung von registrierten Teilchen in bestimmten Zeitintervall

Nun wird die Anzahl der Teilchen, die innerhalb eines festgelegten Zeitintervalls vom Detektor registriert werden, dabei werden nur signale Verwendet die die Triggar schwelle von 170 mV überschreit so das man ein eindeutiges Signal hat. Dies wird mehrmals hintereinander mit einem PC gemessen, beispielsweise 400-mal. Aus dieser Messserie wird ein Histogramm erstellt, das anschließend an eine Funktion angepasst werden soll, die diese Wahrscheinlichkeitsverteilung beschreibt. Zur Durchführung der Messungen steht eine Timerkarte von National Instruments zur Verfügung, die mithilfe eines LabVIEW-Programms gesteuert und ausgelesen wird. LabVIEW ist eine grafische Programmiersprache. Das Programm erfasst digitale Pulse am Counter-Eingang der Timerkarte und ist als Zustandsmaschine konzipiert, die vier Zustände kennt: Leerlauf und drei Messmodi. Im Leerlaufzustand befindet sich das Programm in einer While-Schleife, die eine Event-Struktur enthält und bei Beginn einer Messung den entsprechenden Case aufruft. Nach Abschluss der Messung kehrt das Programm in den Leerlaufzustand zurück.

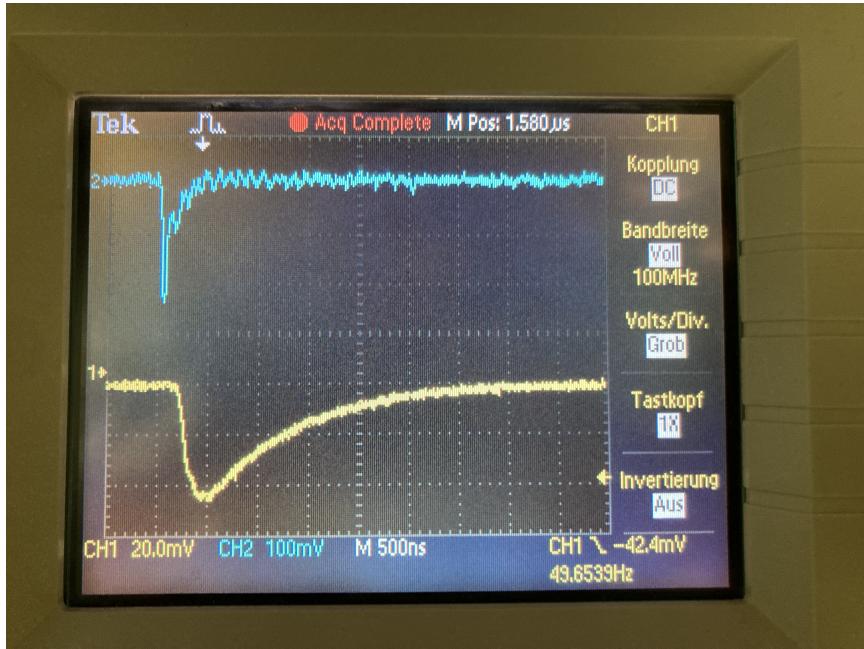


Abbildung 4: Das Bild zeigt eine Aufnahme des Ausgangs des Oszilloskops, das ein Photomultipliersignal und Diskriminatorsignal empfängt. Die Signale stellen ein detektiertes Myon dar. Das obere Signal(Blau) ist die Spannung welche von dem Photomultiplier erfasst wurde. Das untere Signal(Gelb) zeigt das entstandene Signal im Diskriminator.

3.2.3 Messung der Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Myonenpulsen

Nach Durchführung der vorangegangenen Messungen soll die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Myonpulsen für eine große Anzahl von Pulspaaren gemessen werden, wobei im Messprogramm 2500 Messungen voreingestellt sind und die Trigger Schwelle weiterhin bei 170 mV liegt.

3.2.4 Messung der mittleren Lebensdauer der Myonen

Die Messung der mittleren Lebensdauer der Myonen ist aufgrund der geringen Anzahl beobachtbarer Zerfälle nicht innerhalb eines einzigen Nachmittags durchführbar. Daher wird eine Messung gestartet, die bis zum nächsten Praktikumstermin fortgesetzt wird. Vor Beginn der Messung ist es erforderlich, den Diskriminator einzustellen und die korrekte Funktion des Experiments zu überprüfen. Zur Auswertung mit dem Praktikums-PC wird der Datensatz der Messung verwendet, die von der Gruppe in der vorherigen Woche oder beim vorherigen Termin gestartet wurde.

3.2.5 Auswertung der Hauptmessung

Bei der Auswertung der Hauptmessung analysieren wir eine Messung von ungefähr 10.000 Zerfallszeiten, die mit dem oberen Detektor gemessen wurden, und bestimmen die mittlere Lebensdauer der Myonen durch Anpassung einer Exponentialfunktion. Es wird festgestellt, dass nicht alle Daten verwendet werden können und eine Auswahl getroffen werden muss.

4 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Messung diskutiert und in graphischer Form dargestellt. Anhand dieser Ergebnisse kann dann sowohl der Myonenfluss, als auch die mittlere Lebensdauer der Myonen bestimmen werden.

4.1 Vorbereitende Messungen

Um den Myonenfluss zu bestimmen wurde zuerst ein Aufnahme des Oszilloskops gemacht, in welchem 100 ms aufgezeichnet wurden (siehe Abbildung 5). In diesem Zeitraum wurden die Signale mit einer Stärke von über 20 mV gezählt. Nach der Theorie 2.2 ergibt sich somit $N = 11(3)$. Somit ergibt sich für den Zeitraum von einer Sekunde ein Zählrate von $Z = 110(33) \text{ s}^{-1}$. Aus der

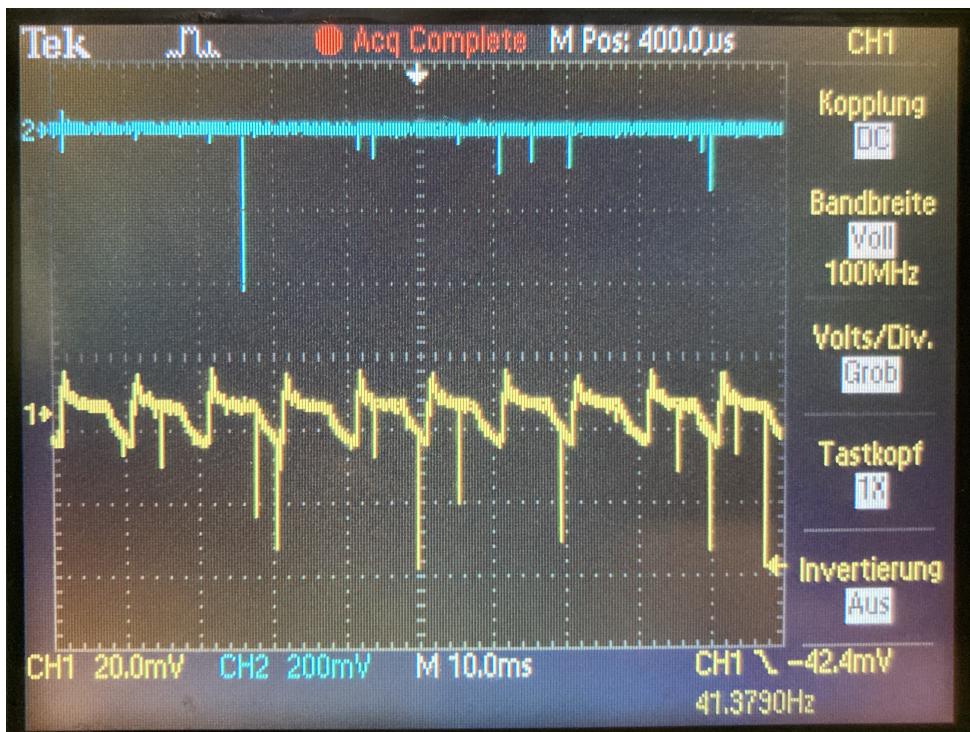


Abbildung 5: Das Bild zeigt eine Aufnahme des Ausgangs des Oszilloskops, das ein Photomultipliersignal und Diskriminatorsignal empfängt. Dieses Signal wird verwendet, um den Myonenfluss durch die beiden Detektorplatten abzuschätzen. An dem in Orange dargestellten Signal lassen sich 11 Peaks innerhalb eines Zeitintervalls von 100 ms ablesen.

Zählrate kann man nun den vertikalen Fluss berechnen 9: $F = 83(25) \text{ sr}^{-1} \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$. Dies ist mit dem im Skript angegebenen vertikalen Fluss von $F = 100 \text{ sr}^{-1} \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$ konsistent.

Als nächstes wurden die Myonen betrachtet, welche von beiden Detektorplatten registriert wurden. Dafür wurde der Trigger bei einem Detektor auf 20 mV gesetzt und 100 Bilder betrachtet, bei denen der Trigger ausgelöst wurde. Es wurde dann überprüft, ob im zweiten Detektor auch ein Myon detektiert wurde. Dabei wurden über zwei Messungen im Durchschnitt $N = 15,8(28)$ Myonen detektiert, welche in beiden Detektorplatten gemessen werden konnten. Der Detektor deckt vom Mittelpunkt der unteren Platte einen Raumwinkel von $P_\Omega = 0,106(4)$ relativ ab. Vom gesamten Myonenfluss werden $P_{my} = 0,284(10)$ von der oberen Platte relativ abgedeckt.

Beide Prozentwerte stimmen nicht mit unserem tatsächlich gemessenen Prozentsatz überein, was darauf schließen lässt, dass unsere vereinfachte Betrachtung nicht ganz stimmt und eine andere Fläche betrachtet werden muss, um ein genaueres Ergebnis zu erhalten.

Als nächstes soll schematisch ein Zerfallsprozess betrachtet werden (siehe Abbildung 6). Ein solcher Zerfall wird später näher betrachtet und in größeren Mengen aufgezeichnet.

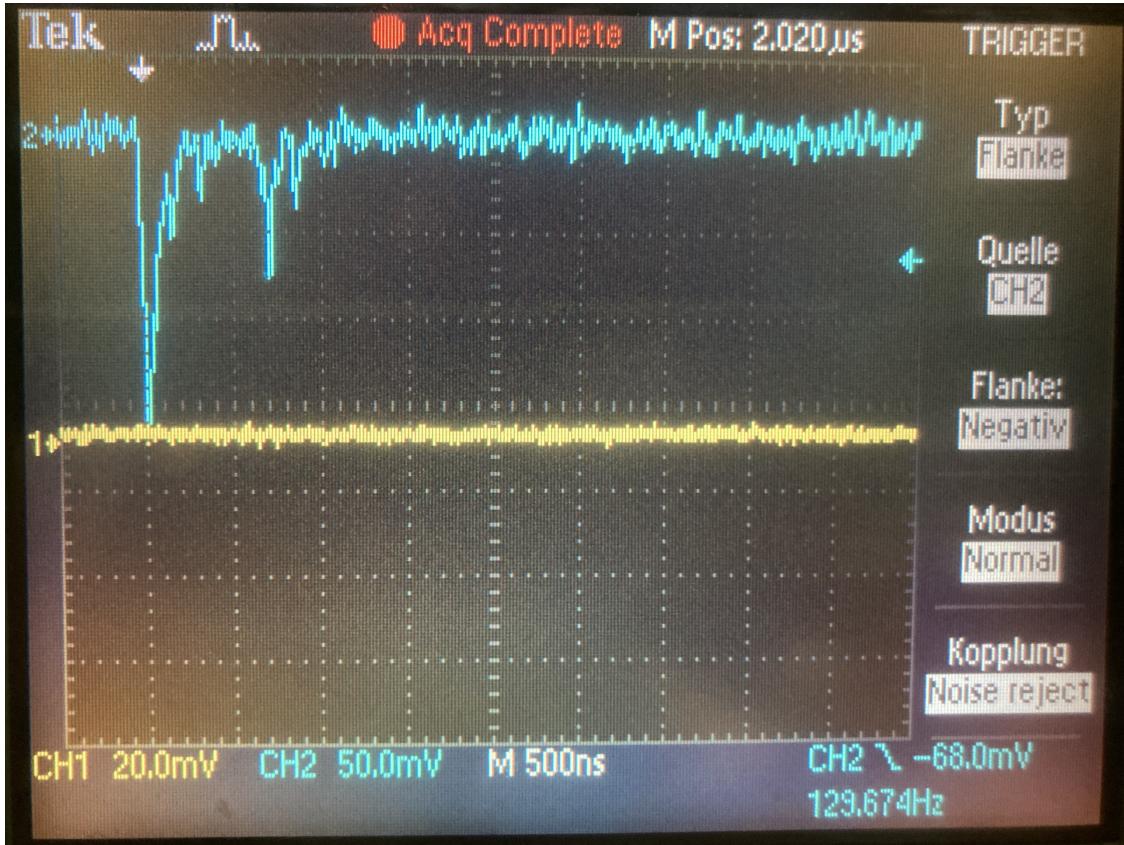


Abbildung 6: Das Bild zeigt eine Aufnahme des Ausgangs des Oszilloskops, das ein Photomultipliersignal und Diskriminatorsignal empfängt. Das in Blau dargestellte Signal zeigt einen potenziellen Myonenzerfall.

Hier erkennt man das der Zerfall etwa $0,7 \mu\text{s}$ nach dem Auftreten des Myons stattgefunden hat.

4.2 Messung des Myonenflusses

Um exaktere Messungen des Myonenflusses zu erhalten wurde nun das Diskriminatormodul eingeschaltet. Dabei wurde sowohl am Oszilloskop als auch beim Diskriminator eine Triggerspannung von 170 mV eingestellt. Nun wurde über ein Labview-Programm die innerhalb einer Sekunde detektierten Myonen gezählt. Das Programm führt diese Messung 400 mal durch. Die resultierenden Daten wurden in Abbildung 7 als Histogramm dargestellt und durch eine Gaußkurve gefittet.

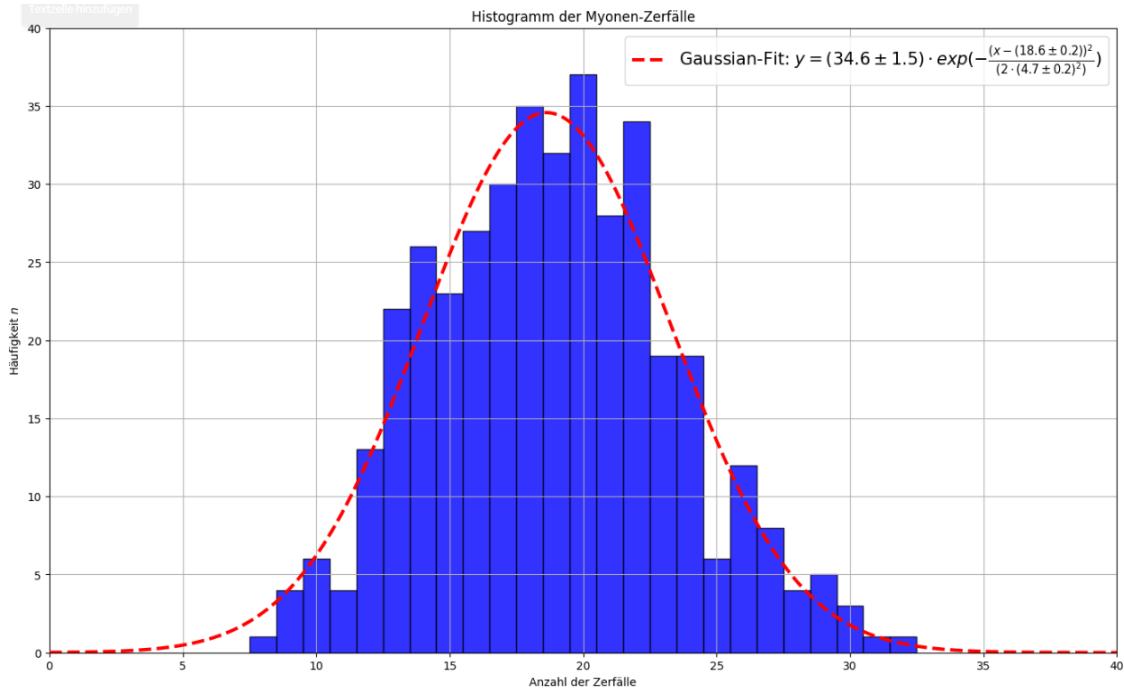


Abbildung 7: Das Histogramm illustriert die Anzahl der Myonen-Zerfälle, die im Zeitintervall von einer Sekunde auftreten, gegen die Häufigkeit dieses Ereignisses. An die beobachtete Verteilung wurde eine Gauß-Kurve angepasst, welche durch die Funktion $y = 34.6(15) \cdot \exp\left(-\frac{x-18.6(2)}{2 \cdot (4.7(2))^2}\right)$ beschrieben wird.

Anhand der Gaußkurve wurden im Mittel $\lambda = 18,6(2)$ Myonen in einer Sekunde detektiert. Die Gaußkurve hat dabei eine Standardabweichung von $\sigma = 4,7(2)$. Dies passt gut zum theroretisch erwarteten Wert einer Poissonverteilung $\sigma = \sqrt{\lambda} = 4,31(3)$. Der Fehler unseres Erwartungswertes stimmt mit dem theoretischen Fehler von $\delta = 0,22$ überein. Betrachtet man nun die Gaußkurve mit statistischer Gewichtung in Abbildung 8, bei der bezogen auf die Abweichung vom Erwartungswert gewichtet wurde, so erhält man eine neue Gaußkurve, welche der Ersten sehr ähnelt 8.

Hier erkennt man, dass die statistische Unsicherheit des Erwartungswerts und der Standardabweichung durch die Gewichtung deutlich kleiner werden. Dies folgt daraus, dass Werte mit einer größeren Abweichung vom Erwartungswert weniger Einfluss auf die Gaußkurve haben.

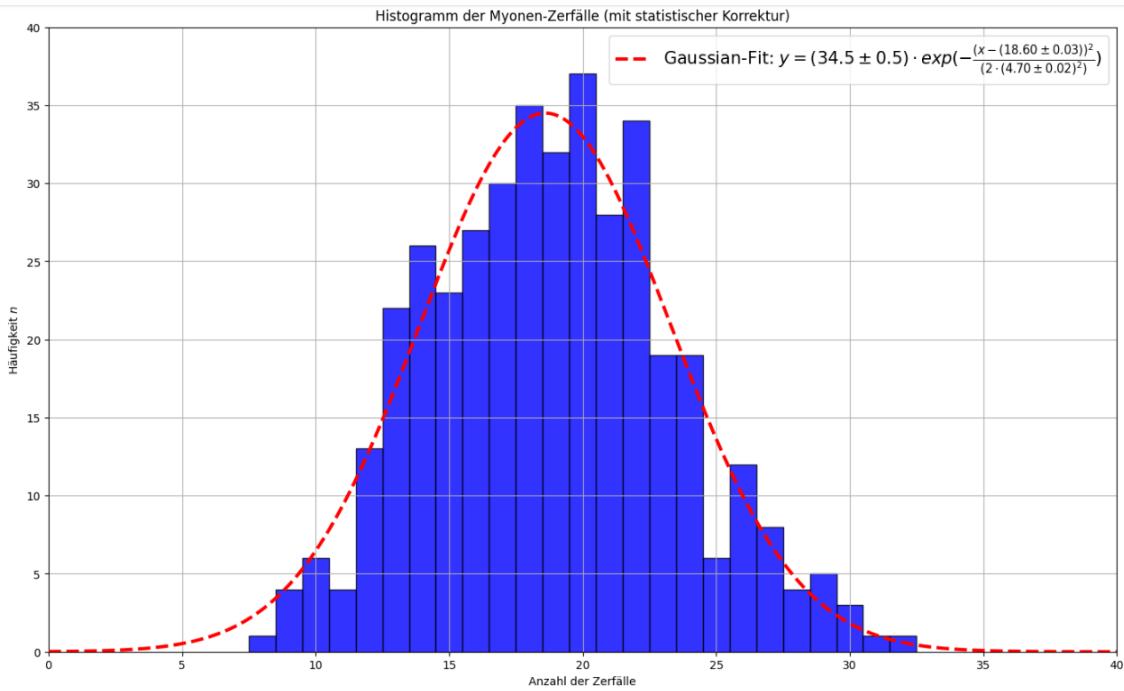


Abbildung 8: Das Histogramm illustriert die Anzahl der Myonen-Zerfälle, die im Zeitintervall von einer Sekunde auftreten, gegen die Häufigkeit dieses Ereignisses unter Berücksichtigung einer statistischen Gewichtung. An die beobachtete Verteilung wurde eine Gauß-Kurve angepasst, welche durch die Funktion $y = 34.5(5) \cdot \exp\left(-\frac{x-18.60(3)}{2 \cdot (4.70(2))^2}\right)$ beschrieben wird.

4.3 Zeitabstand zwischen Myonensignalen

Nun wollen wir herausfinden wie viele Zeit zwischen zwei Myonensignalen vergeht. Hier zu wird vom Programm eine Stoppuhr gestartet sobald ein Myon detektiert. Wird nun ein zweites Myonensignal gemessen stoppt die Stoppuhr. Diese Messung wird insgesamt 2500 mal durchgeführt. Um ausschließen zu können, dass es sich beim zweiten Signal um einen Zerfall handelt, werden für die Auswertung nur Signale genommen welche ein größeres Zeitintervall als 0,5 ms aufweisen. Wie aus Kapitel 2.1 hervorgeht wird bei den gemessenen Signalen eine Exponentialverteilung erwartet. Als Obergrenze wird ein maximal Zeitintervall von 300 ms festgelegt. Unsere Ergebnisse zeigen, dass bei der Messung im Mittel etwa $t = 53(50)$ ms zwischen dem Einfall des ersten Myons und des zweiten liegen. Wobei die kürzeste gemessene Zeit, mit berücksichtigung des Filters, 0,55 ms beträgt und die längste Zeit 299,17 ms beträgt. In Abbildung 9 werden die Daten in einem logarithmischen Plot dargestellt.

Aus dem exponentiellen Fit kann man nun die mittlere Zeit zwischen zwei Myoneneinfällen auf den Detektor bestimmen $\lambda = 55,4(12)$ ms. Damit würde man in einer Sekunde etwa $N = 18,1(4)$ Myoneneinfälle erwarten. Was mit dem Ergebniss aus der vorbereitenden Messung in Kapitel 4.1 übereinstimmt. Der Fehler der mittleren Zeit stimmt auch mit der Thorie überein, für 2500 Messungen ergibt sich eine Fehler von $\delta = \lambda/\sqrt{n} = 1,1$ ms. Somit ist die zweite Messung zur Bestimmung des Myonenflusses ungenauer.

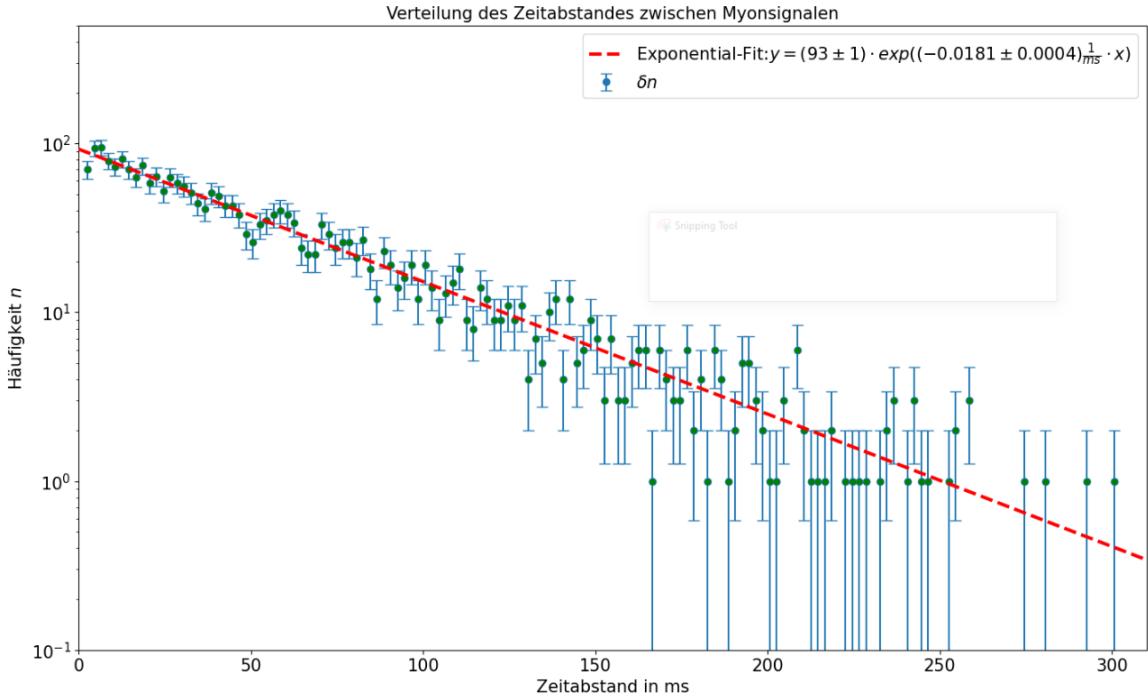


Abbildung 9: Das Diagramm veranschaulicht den Zeitabstand zwischen dem Eingang von Myonsignalen, wobei die Zeitdauer in Millisekunden gegen die Häufigkeit n aufgetragen ist, mit einer Intervallbreite von 2 ms. Die y-Achse ist logarithmisch skaliert. Ein exponentieller Fit wurde an die Daten angepasst, der durch die Funktion $y = 93(1) \cdot \exp(-0,0181(4) \text{ ms}^{-1} \cdot x)$ beschrieben wird.

4.4 Mittlere Lebensdauer des Myons

Um nun die mittlere Lebensdauer des Myons zu bestimmen wird eine ähnliche Messung wie in Kapitel 4.3 durchgeführt. Um nun den Zerfallsprozess zu beobachten werden nur Signale betrachtet bei denen das zweite Detektorsignal in einem Zeitintervall von $0,8 \mu\text{s}$ bis $25 \mu\text{s}$ nach dem ersten Detektorsignal liegt. Damit ist es zwar noch möglich das ein zweites Myon in diesem Zeitintervall in den Detektor einfällt, jedoch ist dies deutlich unwahrscheinlicher. Da nicht so viele Myonen im Detektor zerfallen dauert diese Messung deutlich länger und läuft über mehrere Tage. Dabei wurden insgesamt 10000 Datenpunkte aufgezeichnet. In diesem Bericht werden allerdings die Daten der vorherigen Gruppe verwendet. Die Daten sind in Abbildung 10 logarithmisch dargestellt. In der Abbildung sind zwei Bereiche zu erkennen. Der Bereich links ist durch den Zerfall von Myonen dominiert. Der rechte Bereich ab etwa $15 \mu\text{s}$ ist durch weitere einfallende Myonen dominiert. Da die Wahrscheinlichkeit für das Einfallen eines weiteren Myons auf der Skala von μs annähernd konstant ist wird hier ein Offset von $21,9(13)$ an den Fit addiert. Damit lässt sich vermuten das von den 10000 Messungen etwa $2,02(12) \cdot 10^3$ Messungen ein zweites einfallendes Myon darstellen, anstatt einen Myonenzerfall. Damit wurden also $7,99(12) \cdot 10^3$ Zerfälle während des Experimentes beobachtet. Hätte das Messgerät keine Totzeit, also könnte es jeden Myonenzerfall sofort detektieren, dann wären stattdessen insgesamt $1,45(5) \cdot 10^4$ Zerfälle gemessen worden. Aus dem linken Bereich erhält man für die mittlere Lebensdauer der Myonen $\tau = 2,15(5) \mu\text{s}$ dies stimmt mit dem Literaturwert der mittleren Lebensdauer von $\tau = 2,197 \mu\text{s}$ überein. Obwohl zu erwarten wäre, dass unsere Messung eigentlich eine geringere mittlere Lebensdauer aufweist,

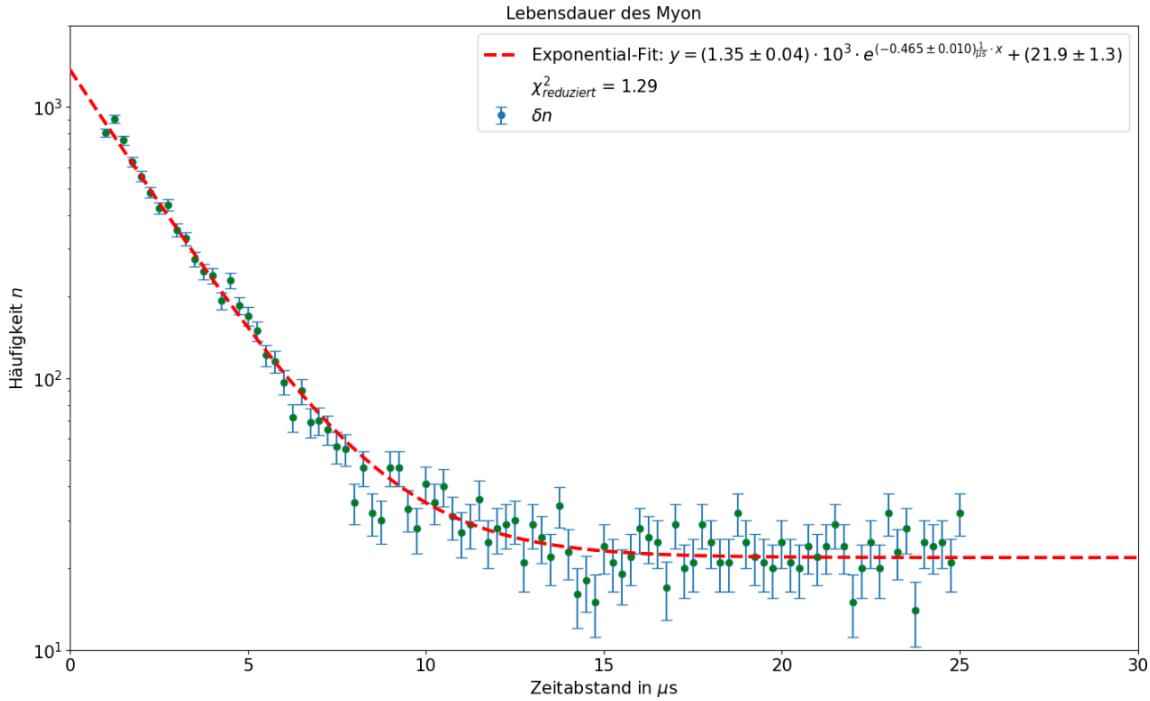


Abbildung 10: Das Diagramm beschreibt die Lebensdauer der Myonen. Der Zeitabstand in Mikrosekunden, mit einer Intervallbreite von $0,25\,\mu\text{s}$, ist gegen die Häufigkeit n des Ereignisses aufgetragen. Es wurde ein exponentieller Fit angepasst, der durch die Funktion $y = 1.35(4) \cdot 10^3 \cdot \exp(-0,465(10)\,\mu\text{s}^{-1} \cdot x) + 21.9(13)$ beschrieben ist. Des Weiteren wurde das $\chi^2_{\text{reduziert}} = 1.29$ bestimmt, um die Qualität des Fits anzugeben.

da hier der Zerfall in einem Material betrachtet wird bei dem es durch Myoneneinfang einen weiteren Zerfallskanal gibt.

Betrachtet man die Anzahl der gemessenen Zerfälle so erhält man einen theoretischen Fehler für die mittlere Lebensdauer von $\delta = 0,03\,\mu\text{s}$. Da dieser kleiner ist als der Fehler unserer Fitfunktion ist der Fit konsistent mit der Erwartung.

Somit ist der in Abbildung 6 dargestellte Zerfall, welcher zum Zeitpunkt $t = 0,7(1)\,\mu\text{s}$ gemessen wurde, mit einer Wahrscheinlichkeit von $P = 0,978(2)$ wirklich ein Zerfall.

4.5 Konzeptionelle Fragen

In diesem Abschnitt werden die konzeptionellen Fragen der Aufgabenliste beantwortet. Einige dieser Fragen wurden bereits im Bericht beantwortet, da sie wichtig für das Verständnis sind, werde aber nochmal der Vollständigkeits halber in diesem Abschnitt beantwortet :

Frage a)

Insgesamt konnten $7,99(12) \cdot 10^3$ Zerfallsprozesse beobachtet werden, damit sollte man die mittlere Lebensdauer der Myonen mit einem Fehler von $\delta = 0,03 \mu\text{s}$ bestimmen können. Nach dem Prinzip der Fehlerrechnung müsste man für die Genauigkeit des gemessenen Literaturwerts insgesamt mehr als 3 Milliarden Zerfälle im Vakuum beobachten.

Frage b)

Theoretisch wird die mittlere Lebensdauer über die Zerfallsbreite Γ [4] bestimmt. Diese beschreibt die energetische Unschärfe des Zustandes. Umso unschärfer die Energie eines Zustand ist desto kürzer ist dessen mittlere Lebensdauer. Für ein Myon kann diese theoretisch mit Gleichung 14 bestimmt werden.

$$\Gamma = \int_{E_{min}}^{E_{max}} \frac{G_F^2}{12\pi^3} m_\mu^2 E^2 \left(3 - \frac{4E}{m_\mu}\right) \quad (14)$$

Damit lässt sich eine theoretische Lebensdauer [5] von $\tau = \hbar/\Gamma = 2,156 \mu\text{s}$ bestimmen. Welche etwas vom Literaturwert abweicht.

Frage c)

Beim χ^2 -Test wird überprüft, wie gut die gegebenen Daten mit der Fitfunktion übereinstimmen. Dabei beschreibt das χ^2 ein zu minimierenden Parameter und die Abweichung von der Fitfunktion zum Datenwert an der jeweiligen Stelle. Stimmen diese immer überein so gibt es keine prozentuale Abweichung der Parameter und $\chi^2 = 1$.

Frage d)

Um einen Fit an einem Datensatz zu machen werden sehr viele mögliche Fitfunktionen genutzt und überprüft, wie gut die Datenwerte mit dieser Fitfunktion übereinstimmen. Bei einem guten Fit liegen viele Datenpunkte nahe an der Fitfunktion. Dies bedeutet aber auch, dass eine kleine Veränderung der Fitfunktion dafür sorgt das deutlich weniger Punkte auf dieser liegen. Damit kann das Fit-Programm erkennen, dass die Fitfunktion einen geringen Fehler aufweist. Liegen die Punkte deutlich gestreuter so liegen nach Veränderung der Fitfunktion immer noch ähnlich viele Punkte auf der Fitfunktion. Somit sind deutlich mehr Fitfunktionen erlaubt, was zu einem statistisch größeren Fehler führt.

Frage e)

Da es sich bei dem in Abbildung 10 dargestellten Prozess um zwei mögliche Exponentialverteilungen handelt, wäre es genauer diesen durch zwei Exponentialfunktionen zu beschreiben. Da aber die Exponentialverteilung des Myonenflusses einen deutlich größeren Erwartungswert hat, kann man diesen im Bereich den wir betrachten als annähernd konstant betrachten.

Frage f)

Die mittlere Lebensdauer beschreibt wie lange ein Teilchen im Durchschnitt überlebt, das bedeutet aber nicht, dass 50% der Teilchen vor und nach dieser mittleren Lebensdauer zerfallen. Dieser Zeitpunkt wird durch die Halbwertszeit T beschrieben.

Frage g)

Da im Protokoll nicht das Auswertungsskript für die Datenauswertung beigefügt ist, ist es unserer Meinung nach nicht wichtig die Dateinamen anzugeben, da diese auch bei der Abgabe nicht beigefügt werden. Dennoch sollten relevante Informationen die im Dateinamen vorkommen wie die Triggerspannung im Bericht angegeben sein.

5 Diskussion und Ergebnisse

In diesem Experiment konnte anhand eines Myonendetektors, der schon von Franz-Hess genutzt wurde die mittlere Lebensdauer der Myonen auf $\tau = 2,15(5) \mu\text{s}$ bestimmt werden. Dazu wurden verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen diskutiert, wie man diese für das Experiment nutzen kann und welche Fehler man dabei erwarten kann. Es wurde außerdem gemessen das im Mittel $\lambda = 55,4(12) \text{ ms}$ vergehen bis ein zweites Myon im Detektor registriert wird. Hieraus lässt sich ein Myonenfluss von $18,6(2) \text{ s}^{-1}$ im Detektor errechnen.

Literatur

- [1] Wikipedia. *Myon*. Online; Status: 14. März, 2024. Abgerufen am 10. April, 2024. URL: <https://de.m.wikipedia.org/wiki/Myon>.
 - [2] Universität Bonn. *Myonen in der Theorie*. Online; Status: - . Abgerufen am 10. April, 2024. URL: <https://www.physik-astro.uni-bonn.de/cosmics4school/de/myon#:~:text=Die%20mittlere%20Lebensdauer%20eines%20Myons, nur%20etwa%20660%20m%20zur%C3%BCcklegen>.
 - [3] Universität Innsbruck - Reinhard Bischof, mit Ergänzungen von Emmerich Kneringer. *Fortgeschrittenenpraktikum 1 - Sommersemester 2022 Aufgabe Myonlebensdauer*. Skript; Status: Sommersemester 2022. Abgerufen am 10. April, 2024.
 - [4] Wikipedia. *Zerfallsbreite*. Online; Status: 24. Januar, 2023. Abgerufen am 10. April, 2024. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Zerfallsbreite>.
 - [5] Emmerich Kneringer. *Myon–Lebensdauer*. Online; Status: - . Abgerufen am 10. April, 2024. URL: http://physik.uibk.ac.at/hephy/muon/proseminar_aufgaben.pdf.

Erklärung

Hiermit bestätigen wir, dass der vorliegende Bericht unabhängig verfasst wurde und dass alle erforderlichen Quellen und Referenzen angegeben wurden.

Arik Bürkle 12.03.2024
Student 1 Datum

Robin Hoffmann 12.03.2024
Student 2 Datum

Valentin Ertl
Student 3