

V01

Lebensdauer kosmische Myonen

Richard Leven
richard.leven@udo.edu

Max Koch
max.koch@udo.edu

Durchführung: 13. Dezember 2022 Abgabe: 09. Januar 2023
Korrektur: 20. Februar 2023

TU Dortmund – Fakultät Physik

1 Ziel des Versuchs

Es wird versucht die Lebenszeit von Myonen zu messen. Dabei werden kosmische Myonen aus der Hochatmosphäre genutzt, die in einem Szintillatortank zerfallen. Dieser ist an eine Stopuhrschialtung angeschlossen, welche die Zerfallszeit der Myonen misst.

2 Theorie

In diesem Teil des Protokoll werden die theoretischen Grundlagen des Versuchs erläutert.

2.1 Das Myon

Myonen sind leptonische Elementarteilchen. Sie werden in das Standardmodell der Teilchenphysik zwischen den Elektronen und den Tauonen eingeordnet und besitzen eine Masse von $m_\mu = 105.65 \text{ MeV}$ [4]. Sie sind genauso wie das Elektronen negativ geladen, wobei diese Ladung betragsmäßig einer Elementarladung e entspricht. Im Gegensatz zum Elektronen zerfallen Myonen allerdings nach kurzer Zeit, ihre mittlere Lebenszeit beträgt dabei $\tau_\mu = 2.196 \mu\text{s}$ [4].

2.1.1 Kosmische Myonen

Die Quelle von Myonen die in diesem Versuch verwendet wird, sind kosmische Myonen. Diese entstehen als Teil einer Zerfallskette, welche durch ein Proton ausgelöst wird. Die Protonen stammen dabei aus kosmischer Strahlung, die anteilmäßig stärkste Quelle ist dabei die Sonne.

Wenn das Proton in die Erdatmosphäre eintritt löst dieses einen hadronischen Schauer aus. Dabei zerfällt das Proton am häufigsten in ein Pion π . Ein Zerfall in ein Kaon K ist auch möglich, tritt allerdings nur in $(10 - 15)\%$ [4] der Fälle auf.

Die entstanden Pionen können entweder neutral π^0 oder geladen π^+ , π^- sein. Die neutralen Pionen zerfallen dabei wesentlich schneller als die Ungeladenen und lösen durch ihren Zerfall eine elektromagnetische Kaskade aus ($\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$) aus. Diese Schauerkomponente ist für uns nur von geringer Bedeutung, da die Kaskade meist noch in der Atmosphäre endet.

Geladene Pionen haben eine längere Lebenszeit und zerfallen in einer Höhe von ungefähr 10 km. Durch ihre Zerfälle entstehen Myonen die in diesem Versuch gemessen werden sollen. Die Zerfälle sehen wie folgt aus:

$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$, also ein negatives Pionen zerfällt in ein Myon und ein Antineutrino,

oder $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$, also ein positiv geladenes Pion zerfällt in ein Antimyon und ein Neutrino.

Die gesamte Zerfallskette wird in Abbildung 1 veranschaulicht.

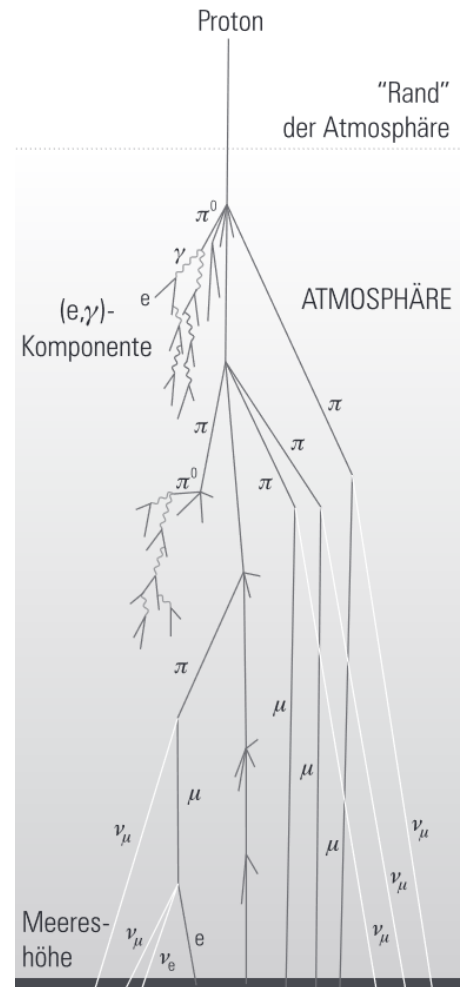


Abbildung 1: Ein statischer hadronischer Schauer, welcher durch ein Proton ausgelöst wird. Es werden die möglichen Zerfallsketten dargestellt die bei einem solchen Schauer auftreten können. [2]

Trotz der hohen Geschwindigkeit der entstandenen Myonen von $0.999c$ mit c als Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, sollten die Myonen aus klassischer Sicht nicht auf der Erde ankommen. Denn sie würden aufgrund ihrer kurzen Lebensdauer nach ungefähr 650 m zerfallen, also bevor sie die Erdoberfläche erreichen. Dies gilt allerdings nur für die klassische Betrachtung.

Da das Myon aber eine hoch relativistische Geschwindigkeit besitzt, tritt im Bezugssystem des Myons Längenkontraktion auf. Wenn dieser relativistische Effekt beachtet wird, ändert sich die mittlere Flugdistanz des Myons auf 62 km.

Da das Myon eine relativistische Geschwindigkeit besitzt ist es unwahrscheinlich, dass es, ohne weitere Effekte zu nutzen, in der Detektorkammer zerfällt.

2.2 Zerfallszeit

Die Anzahl von Myonen dN die in einem Zeitintervall dt im Tank zerfallen, ist gegeben durch die Differentialgleichung

$$dN = -\lambda N dt,$$

wobei λ die Zerfallskonstante ist. Diese Differentialgleichung wird durch den Ansatz

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t) \quad (1)$$

gelöst, wobei N_0 die Anzahl der Teilchen zum Zeitpunkt $t = 0$ ist. Durch Gleichung (1) kann anschließend die mittlere Lebensdauer $\lambda = 1/\tau$ bestimmt werden.

2.3 Untergrund

Bei der Messung ist ein Poisson verteilter Untergrund zu beachten. Sein Ursprung liegt darin, dass ein zweites Myon in die Detektorvolumen eintreten kann. Dieses Eintreten wird die Messung der Zerfallszeit des ersten Myons stoppen. Um den Effekt durch den Untergrund so gering wie möglich zu halten, wird die theoretische Untergrundrate berechnet. Die Anzahl der gemessenen Myonen n folgt der Poissonverteilung

$$p(n) = \frac{\lambda^n}{n!} \exp(-\lambda),$$

hier ist λ der Erwartungswert der Verteilung, welcher durch

$$\lambda = \frac{N_{\text{ges}}}{t_{\text{ges}}} T_{\text{such}}$$

gegeben ist. Dabei entspricht N_{ges} der gesamten Anzahl an detektierten Eintrittsimpulsen in dem Messintervall t_{ges} . Die Suchzeit T_{such} ist die Zeit in der der Detektor aktiv bleibt. Sollte der Detektor in der Zeit T_{such} keinen zweiten Impuls, also optimalerweise einen Zerfallsimpuls, messen, wird die Messung verworfen. Der Untergrund ergibt sich aus

$$U(N_{\text{ges}}) = N_{\text{ges}} p(1), \quad (2)$$

wobei $p(1)$ die Wahrscheinlichkeit dafür ist, dass während der Suchzeit nur genau ein Myon in die Detektorkammer fällt.

3 Durchführung und Aufbau

In diesem Teil wird der Aufbau und die Durchführung des Versuchs beschrieben. Dabei wird besonders auf die im Versuch genutzte Schaltung eingegangen.

3.1 Aufbau

Zur besseren Beschreibung des Aufbaus wird dieser vereinfacht in drei Segmente geteilt: den Detektionsbereich, der Stoppuhr und dem Speicher. Der Aufbau inklusive Schaltung kann in Abbildung 2 gesehen werden.

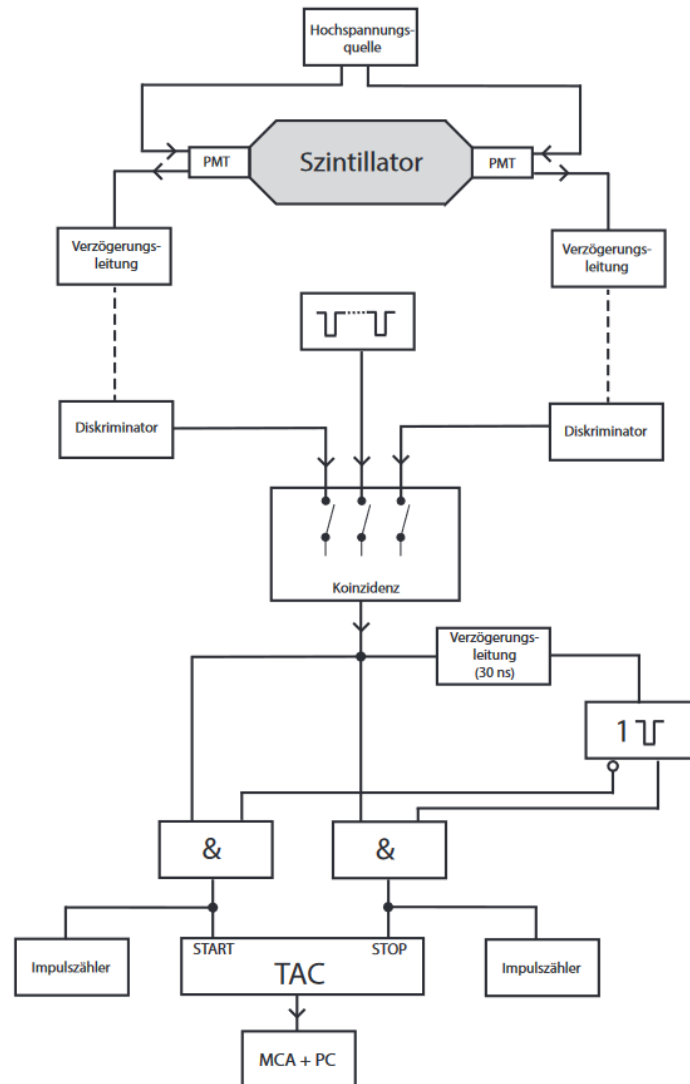


Abbildung 2: Eine schematische Darstellung des Aufbaus der im Versuch verwendet wird. [1]

3.1.1 Detektionsbereich

Der Detektionsbereich ist der erste der drei Teile des Aufbaus. Er besteht aus einem Szintillatortank mit einem Volumen von ungefähr $V = 50 \text{ L}$. Durch Eintreten eines Myons wird das Szintillatormaterial ionisiert, wodurch Photonen emittiert werden. Dieser Lichtblitz kann mithilfe von zwei Photomultipliern (PMT) detektiert werden. An den PMT liegt dabei eine Hochspannung an. Beim Eintreten der Photonen in einen der PMT wird dabei eine Elektronenkaskade ausgelöst. Diese erzeugt letztendlich ein Spannungssignal, welches in die Schaltung gegeben wird.

Aber nicht nur beim Eintritt eines geladenen Teilchens wird ein Lichtblitz erzeugt sondern auch beim Zerfall. Im Fall des Myons liegt es daran, dass es in ein Elektron sowie zwei Neutrinos zerfällt. Die Neutrinos haben im Vergleich zu den Myonen eine nur geringe Masse. Die Masse des Myons ist im Vergleich zum Elektron groß. Aufgrund dieser Massendifferenz hat das entstandene Zerfalls Elektron eine hohe kinetische Energie. Diese kinetische Energie deponiert das Elektron in Form von Photonen im Szintillatortank.

Diese Photonen können von den PMT gemessen werden. Um möglichst wenig Fehlmessungen zu erhalten werden zwei PMTs genutzt, die beide ein Signal messen müssen damit die Stoppuhr aktiviert wird. In diesem Kontext ist eine Fehlmessung, die Ausgabe eines Signals durch ein PMT obwohl kein Myon in das Detektorvolumen eingetreten ist. Aus diesem Grund werden an beide PMT jeweils eine Verzögerungsleitung angeschlossen. Diese sorgt dafür, dass die Spannungsimpulse der PMTs gleichzeitig an der Koinzidenz ankommen. Zwischen PMT und Koinzidenz befindet sich zudem ein Diskriminator, welcher dafür sorgt, dass nur genügend große Spannungsimpulse durchgelassen werden. Wenn zwei Spannungsimpulse gleichzeitig an der Koinzidenz ankommen gibt diese ein Signal weiter an den Stoppuhr-Bereich der Schaltung.

3.1.2 Stoppuhr

Die Koinzidenz gibt ihr Signal weiter an den Stoppuhr-Teil der Schaltung. Das Koinzidenz Signal wird dabei an zwei AND-Gatter und einen Monoflop weiter gegeben. Der Monoflop erhält das Signal allerdings erst nachdem dieses durch eine Verzögerungsleitung gelaufen ist. An dem Monoflop wird die Suchzeit T_{such} eingestellt, während der die Stoppuhr aktiv bleibt.

Solange kein Signal an der Stoppuhr angekommen ist, gibt der Monoflop an das AND Gatter 1 ein WAHR und an das AND Gatter 2 ein FALSCH Signal. Wenn nun ein Signal in die Stoppuhr eingeht, bekommt das AND Gatter 1 zwei WAHR Signale und aktiviert damit den Time-Amplitude-Converter (TAC). Außerdem invertiert der Monoflop, nachdem das Signal durch die Verzögerung gelaufen ist, sein Ausgangssignal. Wenn nun ein zweites Signal durch die Koinzidenz kommt erhält AND Gatter 2 zwei WAHR Signale und stoppt so den TAC. Der TAC wandelt dann die Zeit in der dieser aktiv war in ein Spannungssignal um. Dabei ist dessen Amplitude größer, umso länger der TAC aktiv war. Der TAC gibt sein Spannungssignal an das Speicher-Segment der Schaltung weiter. Nachdem die Suchzeit T_{such} des Monoflops um ist stellt sich dieser wieder in seine Grundeinstellung und eine neue Messung kann beginnen.

3.1.3 Speicher

Der TAC gibt sein Ausgangssignal an einen Multi-Channel-Analyzer (MCA) weiter. Dieser ordnet jedem Signal einen Kanal zu. Die Zuordnung hängt dabei von der Amplitude des Signals ab. Umso Höher die Amplitude des Signal, umso höher ist auch die Kanalnummer. Da die Amplitude des Signals proportional zu der gemessenen Zerfallszeit ist, muss während der Kalibration gemessen werden welcher Kanalnummer welche Zerfallszeit entspricht.

Zusätzlich zum MCA sind zwei Impulszähler teil des Speicher Segments der Schaltung. Diese messen wie oft AND Gatter 1 und 2 aktiviert werden. Daraus lässt sich später feststellen wie viele Fehlmessungen es gab.

3.2 Durchführung

Die Schaltung wird nach Abbildung 2 aufgebaut. Nach dem Verkabeln der Schaltung muss diese kalibriert werden. Dabei wird bei der Detektoreinheit angefangen.

Zunächst müssen die Diskriminatoren kalibriert werden. Dafür wird das Ausgangssignal eines Diskriminators in ein Oszilloskop gegeben. Nun wird die Pulsbreite des Ausgangssignal so angepasst, dass diese eine ungefähre Halbwertsbreite von 15 ns hat. Dieselbe Einstellung wird ebenfalls für den anderen Diskriminator durchgeführt.

Als nächstes werden die beiden Verzögerungsleitungen zwischen PMT und Diskriminator so angepasst, dass die Koinzidenz ein Signal ausgibt, wenn beide PMT einen Lichtblitz messen. Dafür wird an die Koinzidenz ein Impulszähler angeschlossen. Nun wird die Verzögerung einer Verzögerungsleitung variiert und für ein Messintervall von $\Delta t = 10$ s, gemessen wie viele Impulse die Koinzidenz ausgibt. Es werden für beide Verzögerungsleitungen die Impulse bei Verzögerungen von (0 – 15) ns gemessen. Nachdem die Messreihe abgeschlossen ist, wird eine Verzögerung gewählt, bei welcher ungefähr 20 Impulse pro Sekunde durch die Koinzidenz gelassen werden.

An dem Monoflops wird eine Suchzeit von $T_{\text{such}} = 14 \mu\text{s}$ eingestellt. Der Messbereich des TAC wird dementsprechend angepasst. Wenn dieser nicht angepasst wird, werden die ausgegebenen Amplituden zu klein oder zu groß sein. Dies führt dazu, dass die Empfindlichkeit der Messung eingeschränkt wird.

Um die Kanalnummern einer Messzeit zuzuordnen, wird der MCA kalibriert. Dafür wird ein Doppelimpulsgenerator anstelle der Koinzidenz gesetzt, der zwei Impulse generiert, dessen zeitlicher Abstand in einem Intervall von (0.3 – 9.9) μs einstellbar ist. Wenn nun eine Zeit an dem Doppelimpulsgenerator eingestellt wird, so wird der TAC Spannungsimpulse gleicher Amplitude an den MCA geben. Dadurch füllt dieser nur einen Kanal, welcher zu der Zeit gehört, die am Doppelimpulsgenerator eingestellt wird. Um möglichst genau die Kanalnummer zu einem Zeitintervall zuordnen zu können, werden die Kanalnummern für mehrere Zeitintervalle am Doppelimpulsgenerator bestimmt. Es werden 20 Zeitintervalle von (0.3 – 9.9) μs in 0.5 μs -Schritten gemessen.

Nach der vollständigen Kalibration wird der Doppelimpulsgenerator aus der Schaltung entfernt. Die Koinzidenz wird wieder in die Schaltung integriert und die eigentliche Messung wird gestartet. Nach ungefähr 3 Tagen wird die Messung gestoppt.

4 Auswertung

Bei den folgenden Messauswertungen wurde ein Fehler von \sqrt{N} bei N gemessenen Ereignissen pro Kanal verrechnet, da diese Poisson verteilt sind. Für alle *fits*, die in der Auswertung vorkommen, wurde das *python* Packet *LMFIT* verwendet[3].

4.1 Halbwertsbreite bei variierender Verzögerung

Es wurden für die Bestimmung der Halbwertsbreite, auch „full width at half maximum“, kurz fwhm, genannt, eine Verzögerung von je 15 ns bei beiden Verzögerungsleitungen eingestellt. Daraus ergibt sich eine Verzögerungsdifferenz zwischen den beiden Leitungen zwischen -15 ns und 15 ns.

Bei einem Messintervall von $\Delta t = 10$ s werden die Pulse der PMTs gezählt und gegen die Verzögerungsdifferenz aufgetragen, was in Abbildung 3 zu sehen ist.

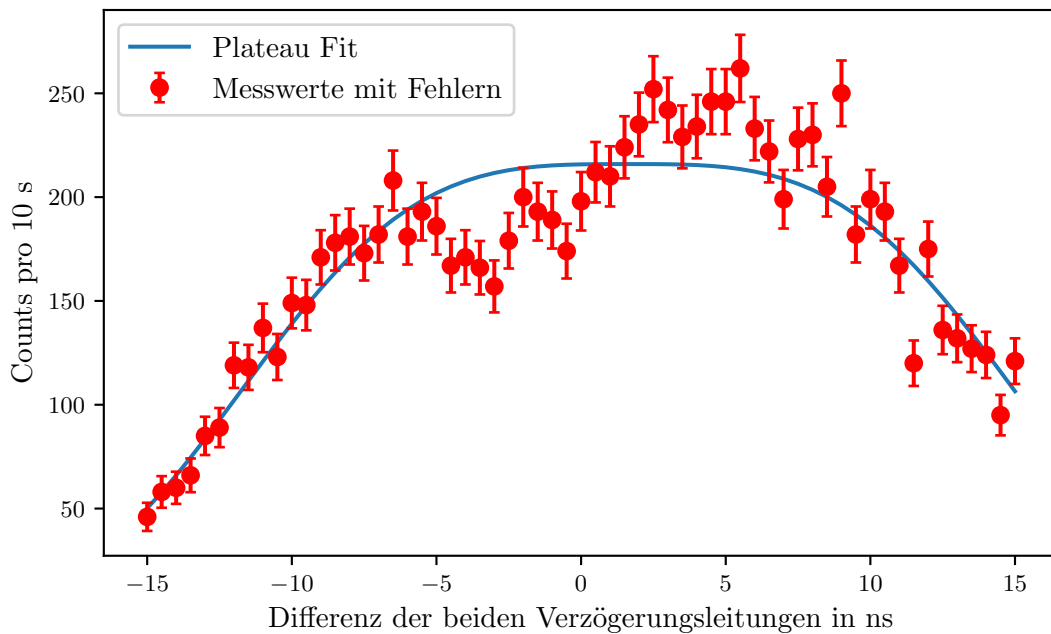


Abbildung 3: Gezählte Pulse bei verschiedenen Verzögerungseinstellungen der Verzögerungsleitungen, sowie ein Fit zur Annäherung des Verlaufs und zur Bestimmung des fwhm.

Wie in Abschnitt 3 beschrieben, gibt die Koinzidenz nur ein Signal aus, wenn beide PMT einen Lichtblitz messen. Wird die Messung eines PMT zu stark verzögert, so gibt es kein Signal.

Zu erwarten ist somit eine Plateaufunktion mit seitlich abfallenden Werten und dem Plateau dazwischen. Zur Bestimmung der Halbwertsbreite wurde der Verlauf der Messdaten an eine Plateau-Funktion angenähert. In Abbildung 3 ist dieser Plateau-Fit dargestellt,

dessen Funktionsparameter berechnet wurden zu:

- $A = 215.914$
- $\mu = 1.617$
- $\sigma = 14.843$
- $n = 1.675$

bei einer Plateau-Funktion der Form

$$f(x; A, \mu, \sigma, n) = A \cdot \exp \left(- \left(\frac{|x - \mu|}{\sigma} \right)^{2n} \right) \quad (3)$$

Die Halbwertsbreite lässt sich aus den Werten des Minimums und des Plateaus ermitteln. Der halbe Wert beträgt 82.877 ± 0.007 counts und ergibt eine Breite von $fwhm = (29.305 \pm 0.0014)$ ns.

Die Daten sind in Tabelle 1 aufgelistet.

4.2 MCA Kalibration

Für die Kalibration wurden die Pulsabstände von $0.3 \mu s$ schrittweise um $0.5 \mu s$ erhöht bis $9.8 \mu s$. Diese Pulsabstände werden gegen den Index der Kanäle des MCA aufgetragen, was in Abbildung 4 dargestellt ist.

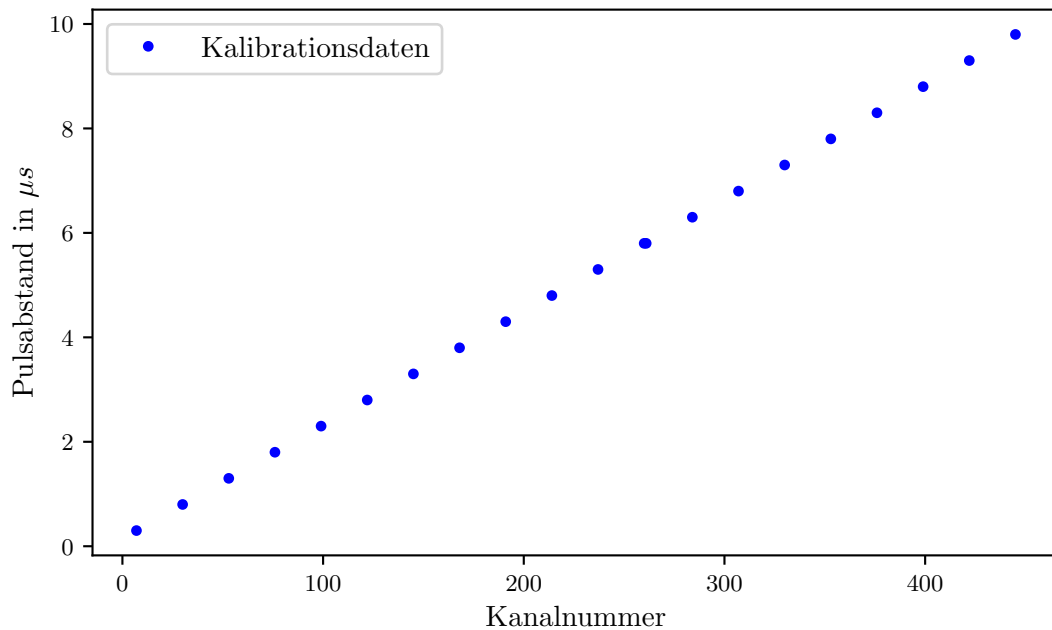


Abbildung 4: Abhängigkeit der Kanäle von dem Pulsabstand der Signale in μs .

Die Ausgleichsgerade ergibt eine Steigung von $0.0217 \frac{\mu\text{s}}{\text{Kanal}}$ und einen Startpunkt bei $0.1542 \mu\text{s}$. Die Funktion lautet somit

$$f(x) = 0.0217x + 0.1542 \quad (4)$$

und gibt den jeweiligen Pulsabstand einer Kanalnummer an. Die Daten sind in Tabelle 2 aufgelistet.

4.3 Berechnung der Untergrundrate

Die Messung zeichnete 5635849 Start Signale auf und 15414 Stopp Signale. Es gibt insgesamt 512 Kanäle, von denen die ersten vier sowie die letzten 47 keine Messdaten beinhalten.

Gemäß Gleichung 2 wird zunächst der Erwartungswert der Verteilung λ berechnet. Die Suchzeit betrug $T_{\text{Such}} = 14 \mu\text{s}$ und die totale Messzeit umfasste $t_{\text{ges}} = 253\,654 \text{ s}$. Daraus ergibt sich ein Erwartungswert von $\lambda \approx 311.06 \cdot 10^{-6}$ und damit nach Gleichung 2 ein Untergrund von 1752.55.

Pro Kanal sind dies 3.423 Untergrundmessungen.

4.4 Lebensdauer von Myonen

In Abbildung 5 sind die rohen Messergebnisse nach ca. 3 Tagen totaler Messzeit in Abhängigkeit der Kanäle aufgetragen.

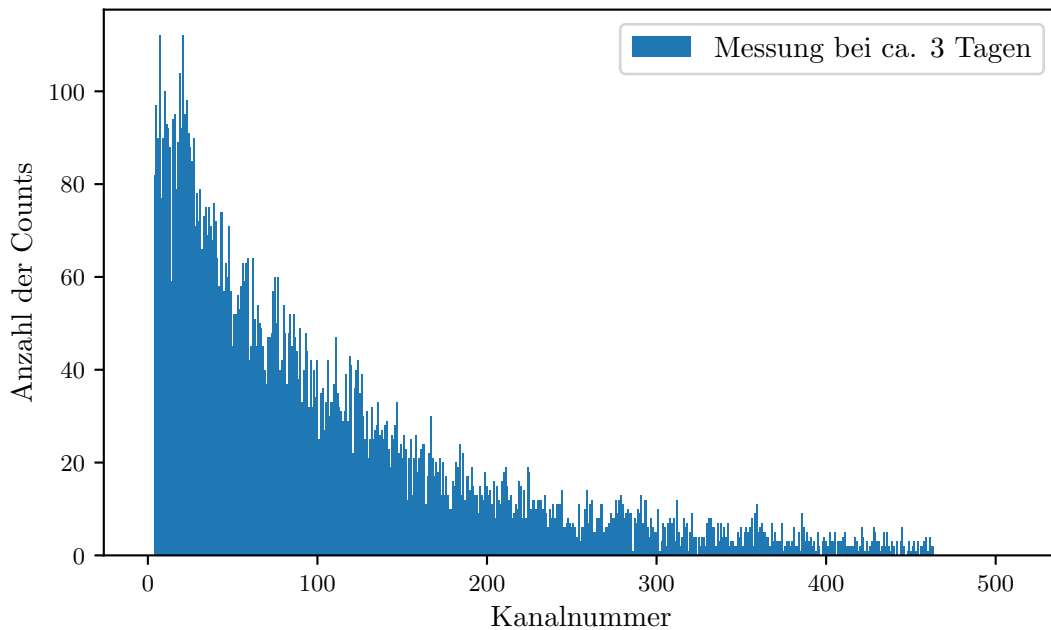


Abbildung 5: Rohdaten nach ca. 3 Tagen Messung von Myonenlebensdauern.

Nach Konvertierung der Kanäle in Zerfallsdauern, mit der Ausgleichsgerade bestimmt in Unterabschnitt 4.2, wird ein Fit an die Messdaten samt Unsicherheiten angelegt. Das Ergebnis dieses Exponential-Funktion Fits, nach Gleichung 1, ist in Abbildung 6 dargestellt. Hierbei wurden die Untergrundmessungen in den Unsicherheiten berücksichtigt und alle Nullwerte aus den Kanälen ohne Messwerte aus der Fit-Berechnung ausgelassen.

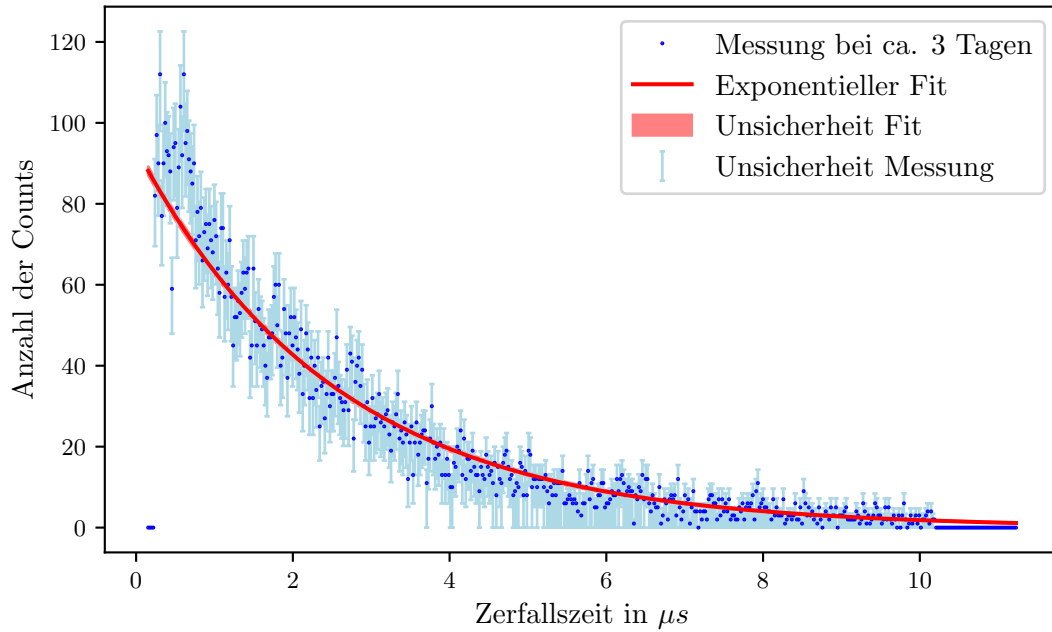


Abbildung 6: Die Messdaten und der Fit der Messdaten samt Unsicherheiten sind gegen die Lebensdauer aufgetragen.

Die Fit-Parameter ergeben die Lebensdauer des Myons:

- $N_0 = 93.6524 \pm 1.1433$
- $\tau = 2.5454 \pm 0.0417 \text{ } \mu\text{s}$

5 Diskussion

5.1 Halbwertsbreite der Verzögerung

Als Pulsdauer wurden $\Delta t = 15$ ns angelegt. Da beide Verzögerungsleitungen symmetrisch genutzt wurden, also von -15 ns bis 15 ns, wird eine Halbwertsbreite von 30 ns erwartet. Die gemessene Halbwertsbreite weicht mit ihrem Wert von $fwhm = (29.305 \pm 0.0014)$ ns (2.317 ± 0.005) % davon ab. Zu erklären ist diese Abweichung mit möglichen Defekten der Verzögerungsleitungen, wie beispielsweise Wackelkontakten, die bei der Durchführung beobachtet wurden, und die Einbrüche in der Messung zu Abbildung 3 verursacht haben könnten.

5.2 Lebensdauer von Myonen

Der Literaturwert zur Lebensdauer von Myonen liegt bei $\tau_\mu = 2.196$ μ s, sodass der gemessene Wert von $\tau = (2.5454 \pm 0.0417)$ μ s einen Unterschied von (13.7267 ± 1.4134) % aufweist. Dieser Wertunterschied kann unter anderem vermindert werden durch einen größeren Versuchsaufbau mit höherem Szintillatortankvolumen und einer längeren Messzeit.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *kosmische Myonen*. Versuchsanleitung. 2018.
- [2] Claus Grupen. *Einstieg in die Astroteilchenphysik: Grundlagen, Messungen und Ergebnisse aktueller Forschung*. Springer-Verlag, 2017.
- [3] Matthew Newville, Till Stensitzki, Renee Otten u. a. *LMFIT: Non-Linear Least-Squares Minimization and Curve-Fitting for Python*. Version 1.0.2. URL: <https://lmfit.github.io/lmfit-py/index.html>.
- [4] R. L. Workman u. a. „Review of Particle Physics“. In: *PTEP* 2022 (2022), S. 083C01. DOI: 10.1093/ptep/ptac097.

Tabelle 1: Daten zur Halbwertsbreite bei verschiedenen Verzögerungen

Verzögerung der Leitung 1 in ns	Verzögerung der Leitung 2 in ns	counts pro 10 s
0	0	198
0	0.5	174
0	1	189
0	1.5	193
0	2	200
0	2.5	179
0	3	157
0	3.5	166
0	4	171
0	4.5	167
0	5	186
0	5.5	193
0	6	181
0	6.5	208
0	7	182
0	7.5	173
0	8	181
0	8.5	178
0	9	171
0	9.5	148
0	10	149
0	10.5	123
0	11	137
0	11.5	118
0	12	119
0	12.5	89
0	13	85
0	13.5	66
0	14	60
0	14.5	58
0	15	46
0.5	0	212
1	0	210
1.5	0	224
2	0	235
2.5	0	252
3	0	242
3.5	0	229
4	0	234
4.5	0	246
5	0	246
5.5	0	262
6	0	233
6.5	0	222
7	0	199
7.5	0	228
8	0	230
8.5	0	205
9	0	250
9.5	0	182
10	0	199
10.5	0	193
11.0	0	167
11.5	0	120
12	0	175
12.5	0	136
13	0	132
13.5	0	127
14	0	124
14.5	0	95
15	0	121

Tabelle 2: Daten zur Bestimmung der Lebenszeiten pro Kanal

Kanalnummer	Pulsabstand in μs
7	0.3
30	0.8
53	1.3
76	1.8
99	2.3
122	2.8
145	3.3
168	3.8
191	4.3
214	4.8
237	5.3
260	5.8
261	5.8
284	6.3
307	6.8
330	7.3
353	7.8
376	8.3
399	8.8
422	9.3
445	9.8