

Versuch Nr.V1

Lebensdauer der Myonen

Niklas Düser
niklas.dueser@tu-dortmund.de

Benedikt Sander
benedikt.sander@tu-dortmund.de

Durchführung: 13.06.2022

Abgabe: 05.07.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Entstehung und Zerfall kosmischer Myonen	3
3	Lebensdauer instabiler Teilchen	3
4	Aufbau und Funktionsweise	4
5	Durchführung	5
6	Auswertung	7
6.1	Bestimmen der optimalen Verzögerungszeit	7
6.2	Kalibrierung des Multi-Channel-Analysers	9
6.3	Abschätzung des Untergrunds	11
6.4	Bestimmung der mittleren Lebensdauer	12
7	Diskussion	13
8	Anhang	14
8.1	Aufbau	14
8.2	Messwertfotos	14

1 Zielsetzung

Ziel dieses Versuches ist es die Lebensdauer kosmischer Myonen zu bestimmen und die verwendeten Schaltungen und Bauteile genauer zu verstehen.

2 Entstehung und Zerfall kosmischer Myonen

Myonen entstehen in der Atmosphäre in sogenannten Luftschauern, wenn hochenergetische kosmische Teilchen auf die Erdatmosphäre treffen. In unterschiedlichen Prozessen entstehen unter anderem geladene Pionen, welche wiederum in Myonen zerfallen:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad \text{und} \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu . \quad (1)$$

Diese auf diesem Weg entstandenen Myonen sind so hochenergetisch, dass sie nach dem Pionen Zerfall mit annähernd Lichtgeschwindigkeit in Richtung Erde fliegen. Nur aufgrund der relativistischen Geschwindigkeiten ist es den Myonen möglich auf der Erdoberfläche anzukommen. Denn im Vergleich zum Elektron sind Myonen instabil und besitzen eine ca. 207-mal größere Ruhemasse. Myonen zerfallen nach folgender Gleichung in Elektronen und Neutrinos:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad \text{und} \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu . \quad (2)$$

3 Lebensdauer instabiler Teilchen

Der Zerfall eines Elementarteilchens ist ein statistischer Prozess. Jedes Teilchen hat dieselbe Wahrscheinlichkeit zu Zerfallen. Die Wahrscheinlichkeit dW , dass ein Teilchen zerfällt ist also proportional zu der Zeit dt . Es folgt:

$$dW = \lambda dt . \quad (3)$$

Daraus folgt für den Zerfall vieler Teilchen

$$dN = -NdW = -\lambda N dt \quad . \quad (4)$$

Dabei ist dN die Anzahl an Zerfällen in dem Zeitraum dt , wenn N Teilchen betrachtet wurden. Integrieren dieser Gleichung ergibt das Zerfallsgesetz:

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda t) . \quad (5)$$

Hier ist λ die Zerfallskonstante, t die Zeit und N_0 die Gesamtzahl der betrachteten Teilchen. Die Zeit, nachdem die noch übrig gebliebenen Teilchen $N(t)$ auf $\frac{N_0}{e}$ abgefallen sind, wird als Lebensdauer τ eines Teilchens bezeichnet. Sie berechnet sich zu $\tau = \frac{1}{\lambda}$.

4 Aufbau und Funktionsweise

In Abbildung 1 ist die in diesem Versuch verwendete Schaltung gezeigt. Diese Schaltung wird genutzt um zu erkennen wie viele Myonen in dem Messzeitraum in den Messkörper eintreten, wie viele dieser eingetretenen Myonen innerhalb des Körpers zerfallen und wie viel Zeit zwischen dem Einfall und Zerfall liegt. Der Messkörper ist ein organischer Szintillationstank mit einem Volumen von ungefähr 50 Litern.

Beim Eintreten der Myonen in den Detektor werden die Myonen abgebremst und erzeugen einen Lichtblitz. Zerfällt das Myon innerhalb des Detektors entsteht ein hochenergetisches Elektron welches wiederum wieder mit dem Szintillatormaterial wechselwirkt und einen Lichtblitz erzeugt. Zur Messung dieser Signale sind an beiden Enden des Tanks Photomultiplier(PMT) angebracht. Diese wandeln das eingehende Lichtsignal in einen Spannungsimpuls um.

Die PMT ist über eine Verzögerungsleitung an Diskriminatoren angebracht. Die Diskriminatoren dienen dazu den Großteil der thermischen Anregungen der PMTs auszufiltern, welche niederenergetischer sind als die Myonen Signale. An den Diskriminatoren wird eine gewisse Schwellspannung U_0 eingestellt, damit möglichst viele Rauschsignale unterdrückt werden aber auch möglichst keine echten Signale verloren gehen. Des Weiteren filtert der PMT höherenergetische thermische Anregungen aus, indem beide Diskriminatoren an eine Koinzidenzschaltung angeschlossen werden. Die Koinzidenzschaltung gibt nur ein Signal weiter, wenn beiden eingehenden Signale innerhalb eines Zeitraumes t_k eintreffen. Mit diesen beiden Filtermethoden können die unkorrelierten Störungen nur mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit ein echtes Signal

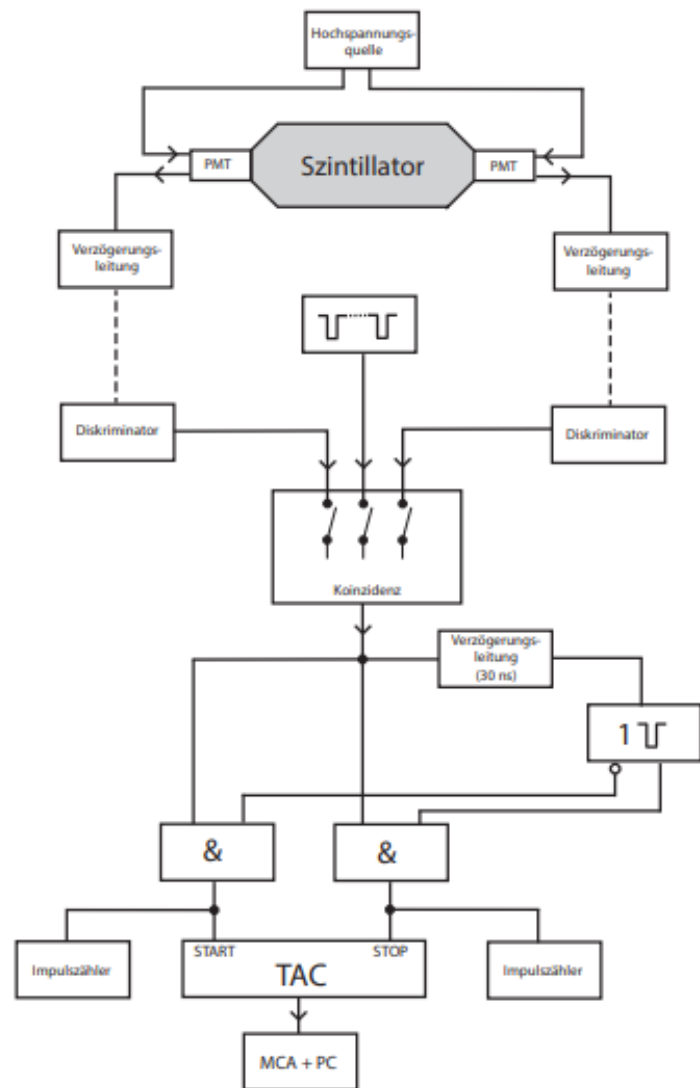


Abbildung 1: Skizze der Schaltung [6]

erzeugen.

Jetzt folgt der Schaltungsteil der zählt, wie viele Signale entstehen und falls das Myon innerhalb des Detektors zerfällt, wie lange es gelebt hat. Dies erfolgt, indem das Outputsignal der Koinzidenzschaltung in 3 Signale aufgeteilt wird. Zwei dieser Signale werden jeweils an eine Seite eines AND-Gatters angeschlossen. Das Dritte wird mit einer Verzögerung von ca. 30 ns an einen Monoflop angeschlossen.

Der Monoflop gibt nach dem er durch ein HIGH-Signal getriggert wurde für eine gewisse einstellbare Zeit T_S ein HIGH Signal aus. Dies ist die Suchzeit T_S in der beobachtet wird, ob das Myon zerfällt. Der Output des Monoflops ist nun invertiert an dem 1. AND-Gatter und normal an dem 2. AND-Gatter angeschlossen. Wenn die Schaltung im Ruhezustand ist und das Signal eines eintretenden Myon ankommt, liegen an dem ersten AND-Gatter nun zwei HIGH-Signale an, da durch die Verzögerung der Monoflop noch nicht aktiviert wurde. Dieses HIGH-Signal wird an einen Impulszähler weitergegeben und startet den Zeit-Amplituden-Converter(TAC). Am zweiten AND-Gatter liegen aufgrund der Verzögerung jedoch ein HIGH und LOW-Signal.

Wenn das Myon jetzt jedoch innerhalb der Suchzeit T_S zerfallen ist und ein weiteres Signal erzeugt verhält sich die Schaltung anders. Jetzt liegt durch den Monoflop noch ein LOW-Signal am ersten AND-Gatter an. Der erste Impulszähler und der Zeit-Amplituden-Converter werden nicht erneut aktiviert. An dem zweiten AND-Gatter liegen dann jedoch zwei HIGH-Signale an. Dieses ist an einen Impulszähler und an den Zeit-Amplituden-Converter angeschlossen und stoppt diesen. Der Zeit-Amplituden-Converter gibt nun ein Signal mit einer Spannungshöhe korreliert zu der Zeit zwischen den Signalen an einen Multi-Channel-Analyser(MCA) weiter. Dieser wird von einem PC ausgewertet.

5 Durchführung

Zunächst wird die Schaltung nach Abbildung 1 aufgebaut. Dazu müssen die verschiedenen Schaltungskomponenten korrekt aneinander geschaltet werden.

Dann folgt die Justierung der Schaltung. Dabei wird neben den Messgeräten des Versuches ein Oszilloskop verwendet. Zunächst werden die Schwellspannungen an den Diskriminatoren so eingestellt, dass auf beiden Seiten eine Signalarate von ca. 30 Hz vorliegt. Dann werden die Einstellungen der Verzögerungsleiter bei einer Pulsdauer von $\Delta t = 20$ ns und $\Delta t = 10$ ns optimiert. Die Pulsdauern werden an den Diskriminatoren über kleine Schrauben verändert und an dem Oszilloskop abgelesen. Anschließend werden beide Diskriminatoren an die Koinzidenzschaltung geschaltet, je einer der Verzögerungsleiter verstellt und die Signalarate gemessen. Durch systematisches, einzelnes Verstellen der Verzögerungen ergibt sich eine Kurve der Signalaraten. Dabei sollten genug Werte aufgenommen werden, um die Halbwertsbreite dieser Kurve zu bestimmen.

Jetzt wird für den restlichen Versuch bei einer Signallänge von $\Delta t = 10$ ns die optimale Verzögerung eingestellt. Es sollte eine Ereignisrate im Bereich von 20 Hz anliegen, dazu wird an dem Monoflop eine Suchzeit von $T_S = 10$ μ s eingestellt.

Des Weiteren wird der TAC so eingestellt, dass möglichst viele Kanäle des MCA genutzt werden. Dafür wird der Doppelpulsgenerator mit einem Impulsabstand von 10 ns an die

Koinzidenzschaltung geschaltet und der TAC so eingestellt, dass ein Channel in der Mitte angesprochen wird.

Zuletzt werden noch der TAC und der MCA so kalibriert, dass aus der Spannungshöhe bzw. dem Channel eine Lebensdauer berechnet werden kann. Dazu wird wieder der Doppelpulsgenerator an die Koinzidenzschaltung angeschlossen, 10 unterschiedliche Impulsabstände eingestellt und jeweils der damit korrespondierende Kanal ausgelesen. Mit den Informationen der Channel und der Impulsabstände lässt sich der TAC und der MCA kalibrieren.

Zuletzt wird die Messung der Lebensdauern der Myonen gestartet. Dafür werden über einen Zeitraum von ungefähr zwei Tagen die Lebensdauern der Myonen am Computer und die Startsignale an einem der Zähler aufgenommen.

6 Auswertung

Da es sich bei diesem Versuch um ein Zählexperiment handelt folgen die Messwerte einer Poisson-Verteilung. Daher wird für die Zählimpulse eine Poisson-Unsicherheit von \sqrt{N} genutzt.

6.1 Bestimmen der optimalen Verzögerungszeit

Bei diesem Versuch kann es in verschiedenen Bauteilen, wie den Kabeln oder den Diskriminatoren zu Verzögerungen des Signals kommen. Diese können dazu führen, dass an der Koinzidenzschaltung kein Myonen-Signal gemessen wird, obwohl eins eingetroffen ist. Aus diesem Grund muss zuerst eine optimale Verzögerung für das Signal vor einem der beiden Diskriminatoren bestimmt werden, damit die Anzahl der erkannten Signale maximal wird.

Dafür werden die Myonen-Impulse simuliert in dem Pulse mit den Pulsdauern 10 ns und 20 ns auf die Diskriminatoren gegeben werden. Anschließend werden die Verzögerungszeiten vor einem der Diskriminatoren variiert.

Für die Messreihe mit der Pulsdauer $\Delta t_1 = 10$ ns finden sich die Messwerte der Verzögerungszeit, der Messdauer T_{mess} , der gemessenen Pulsanzahl und der Pulse pro Sekunde in Tabelle 1. In der Tabelle 2 sind die Messwerte für die Reihe mit $\Delta t_2 = 20$ ns.

Tabelle 1: Die Impulszahl und Zählrate in Abhängigkeit der Verzögerungszeit bei einer Messdauer von ungefähr 20 s mit einer Pulsdauer von 20 ns.

Δt / ns	T_{mess} / s	N	$\frac{N}{T_{\text{mess}}}$ / 1/s
-8	19,98	205	10,2603
-6	20,44	303	14,8239
-4	20,10	409	20,3483
-2	19,98	463	23,1732
0	19,98	458	22,9229
1	20,04	457	22,8044
2	20,34	498	24,4838
3	20,31	470	23,1413
4	20,14	452	22,4429
6	20,00	424	21,2000
8	20,10	254	12,6368
10	20,05	187	9,3267

Um die optimale Verzögerungszeit zu finden wird auf den Plateaus der Zählraten ein linearer Fit der Form

$$y = m \cdot x + n \quad (6)$$

berechnet. Für diesen Fit soll der Parameter m sehr klein sein, so dass der Fit des Plateaus ungefähr einer Konstante entspricht. Wenn dies auftritt wurde das Intervall für

Tabelle 2: Die Impulszahl und Zählrate in Abhängigkeit der Verzögerungszeit bei einer Messdauer von ungefähr 20 s mit einer Pulsdauer von 20 ns.

Δt / ns	T_{mess} / s	N	$\frac{N}{T_{\text{mess}}}$ / 1/s
-14	19,93	327	16,4074
-12	20,24	409	20,2075
-10	20,00	507	25,3500
-8	20,26	478	23,5933
-6	19,98	496	24,8248
-4	19,80	580	29,2929
-2	19,98	581	29,0791
0	20,17	601	29,7967
0,5	20,20	611	30,2475
1	20,70	610	29,4686
2	20,10	628	31,2438
3,5	20,00	605	30,2500
4	20,29	713	35,1405
4,5	20,23	581	28,7197
6	20,29	605	29,8176
8	20,06	588	29,3121
9	20,02	546	27,2727
10	20,06	559	27,8664
12	20,32	480	23,6220
14	20,11	335	16,6584

das Plateau so gewählt, dass eine auf diesem Intervall zentral liegende Verzögerungszeit für den Versuch genutzt werden kann.

Für die Pulsbreite 10 ns wurde das Verzögerungszeitintervall $\Delta t \in [-2, 6]$ für das Plateau identifiziert. Bei der Pulsbreite 20 ns ist es das Intervall $\Delta t \in [-4, 9]$.

Daraus ergeben sich dann für die Plateaufits die in Tabelle 3 dargestellten Fitparameter.

Tabelle 3: Regressionsparameter für die Plateaufits m und n für die Pulsdauern Δt_1 und Δt_2 .

Messreihe	m / 1/ns ²	m / 1/ns
Δt_1	-0,20	23,29
Δt_2	-0,05	30,10

Die Messdaten für Δt_1 sind inklusive der Unsicherheiten der Messdaten und der Plateaufits in Abbildung 2 grafisch dargestellt. Für Δt_2 sind die Daten in Abbildung 3 aufgetragen. Aus den zuvor bestimmten Intervallen ergibt sich, als in beiden Plateaus zentral liegender Wert, für die zu nutzende Verzögerungszeit $\Delta t = 2$ ns. Da für die restliche Auswertung

von diesen Messungen unabhängige Messwerte genutzt werden, kann dort alehrdings auch eine andere Verzögerung genutzt worden sein.

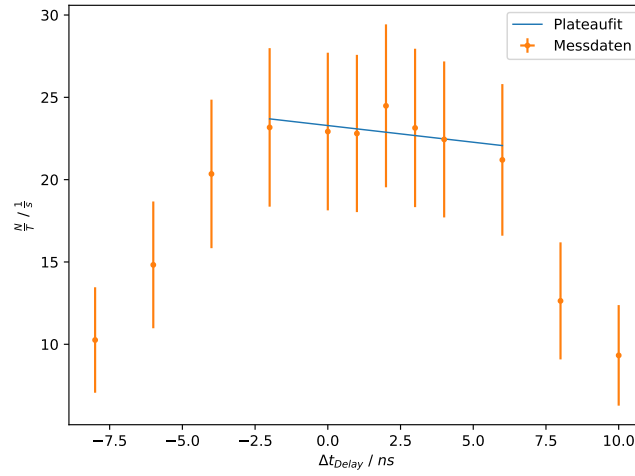


Abbildung 2: Die Messwerte der Zählrate, für eine Pulsbreite von $\Delta t_1 = 10 \text{ ns}$, gegen die Verzögerungszeit Δt aufgetragen. Außerdem ist der Plateaufit eingezeichnet.

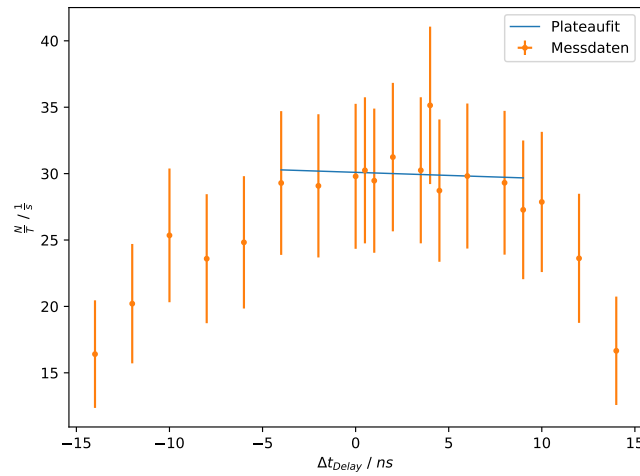


Abbildung 3: Die Messwerte der Zählrate, für eine Pulsbreite von $\Delta t_1 = 20 \text{ ns}$, gegen die Verzögerungszeit Δt aufgetragen. Außerdem ist der Plateaufit eingezeichnet.

6.2 Kalibrierung des Multi-Channel-Analysers

Um den MCA zu kalibrieren wird auf ihn das Signal eines Doppelimpulsgenerators gegeben. Das Bining des MCA hängt linear von der Verzögerung zweier Signale ab, wodurch

über den Zusammenhang zwischen verschiedenen Verzögerungen und den angesteuerten Kanälen, den Kanälen eine Impulsdauer zugeordnet werden kann. Die dafür genutzten Werte der zeitlichen Abstände der vom Doppelimpulsgenerator erzeugten Pulse und die Werte der damit korrespondierenden Kanäle, sind in Tabelle 4 aufgetragen.

Tabelle 4: Die Messwerte der Pulsdauern und der damit korrespondierenden Kanäle K im MCA.

$\Delta t / \mu\text{s}$	K
0,8	37
1,8	81
2,8	126
3,8	171
4,8	216
5,8	261
6,8	306
7,8	350
8,8	395
9,8	440

Eine lineare Regression der Form der Gleichung 6 ergibt

$$m = (2,31 \pm 0,02) \mu\text{s}$$

$$n = (-17,01 \pm 4,90) \mu\text{s}$$

für die Fitparameter. Dies ist grafisch, inklusive des Messwerte, in der Abbildung 4 dargestellt.

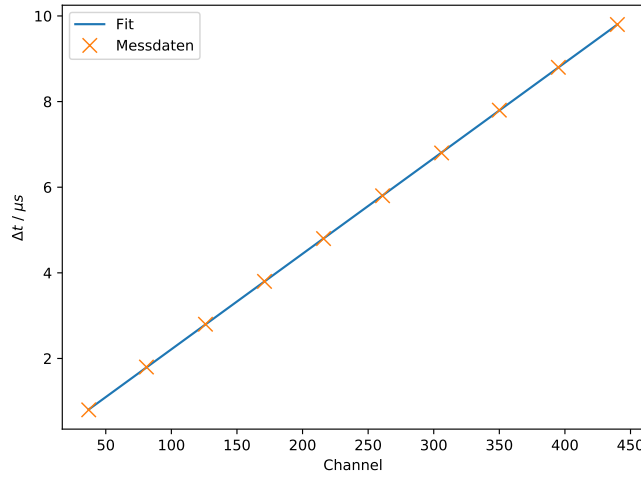


Abbildung 4: Die Doppelimpulsdauer Δt gegen die Kanalnummer aufgetragen. Zusätzlich ist noch die auf diesen Werten berechnete Ausgleichsgerade eingezeichnet.

6.3 Abschätzung des Untergrunds

Bei der Messung der Lebensdauer der Myonen kann es passieren, dass ein zusätzliches in den Tank eintretendes Myon ein Stopp-Signal auslöst. Dazu muss es während der Suchzeit $T_S = 10 \mu s$ eintreten. Dieser Untergrund von Signalen verteilt sich dabei gleichmäßig über alle Kanäle, da alle Dauern zwischen ersten und zweiten Myon, aufgrund der Unabhängigkeit, gleichwahrscheinlich sind. Die Wahrscheinlichkeit P , dass k Myonen eintreten, ist über eine Poisson-Verteilung der Form

$$P_\lambda(k) = \frac{\lambda^k}{k!} \exp(-\lambda)$$

gegeben. Der Erwartungswert λ entspricht der durchschnittlichen Zählrate der Myonen mal der Suchzeit. Die durchschnittliche Zählrate lässt sich bei einer Gesamtmessdauer $T_{\text{ges}} = 272\,190 \text{ s} \approx 76 \text{ h}$ und einer Gesamtanzahl von Startimpulsen $N_{\text{start}} = 3\,256\,768 \pm 1805$ zu

$$\frac{N_{\text{start}}}{T_{\text{ges}}} = (11,965 \pm 0,007) \frac{1}{\text{s}}$$

bestimmen. Daraus folgt

$$\lambda = \frac{N_{\text{start}}}{T_{\text{ges}}} \cdot T_S = (0,119\,65 \pm 0,000\,07) \cdot 10^{-3} \quad .$$

Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten mindestens eines Myons P_{ges} mal der Gesamtmessdauer T_{ges} ergibt die Gesamtanzahl erwarteter Untergrundmyonen

$$U_{\text{ges}} = P_{\text{ges}} \cdot T_{\text{ges}} = 389,65 \quad .$$

Für jeden der 512 Kanäle ergibt das einen Untergrund von $U_K = 0,761$.

6.4 Bestimmung der mittleren Lebensdauer

Bei der Messung der Lebensdauern wurden 26753 Stopp-Signale gemessen. Der Zerfall von Myonen folgt dem Zerfallsgesetz, weswegen sich die Anzahl der nicht zerfallenen Myonen über den exponentiellen Zusammenhang

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda t) + U_K \quad (7)$$

beschreiben lässt. Dabei ist N_0 der y-Achsenabschnitt, λ die Zerfallskonstante und U_K der zuvor berechnete Untergrund pro Kanal. Über die in Abschnitt 6.2 bestimmte Kalibrierung des MCA lassen sich die gemessenen Zerfälle pro Bin in gemessenen Zerfälle pro Zeit im Tank umrechnen.

Diese Messdaten sind mit dem auf ihnen nach Gleichung 7 berechneten Fit in Abbildung 5 grafisch dargestellt.

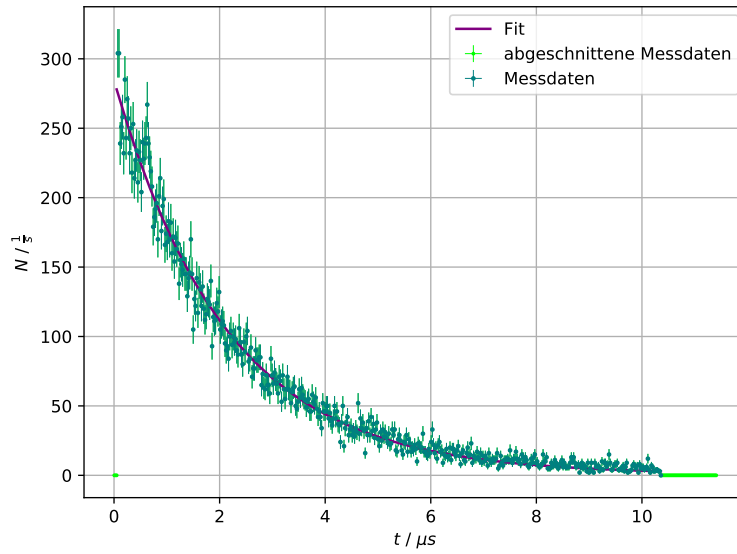


Abbildung 5: Anzahl der gemessenen Impulse gegen die damit korrespondierenden Lebenszeiten im Tank aufgetragen. Außerdem ist noch die exponentielle Ausgleichsfunktion eingezeichnet.

Die Parameter der Ausgleichsrechnung ergeben sich zu

$$N_0 = 283,783 \pm 1,876$$

$$\lambda = (0,470 \pm 0,004) \frac{1}{\mu s} \quad .$$

Die Ausgleichsrechnung findet allerdings nicht auf allen Messwerten statt, da Messwerte entfernt wurden. Dies geschah für Messdauern, für welche $N = 0$ gemessen wurde. Für späte Messwerte liegt das daran, dass sie zu Bins gehören, die mit Zeiten größer der Suchrate korrespondieren. Die frühen gehören zu Bins, welche nach der Kalibrierung zu

negativen Δt gehören würden. Da dies beides unphysikalische Werte sind, wurden sie in den Rechnungen ignoriert.

Aus den Fitparametern lässt sich die mittlere Lebensdauer τ der Myonen errechnen.

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = (2,126 \pm 0,019) \mu\text{s} \quad .$$

7 Diskussion

Bei der Durchführung des Versuchs sind ein paar Probleme aufgetreten. Die Bestimmung der optimalen Verzögerung lief reibungslos ab. Für die Kalibrierung des MCA gab es allerdings Probleme mit der Schaltung, weswegen keine Messwerte mehr aufgenommen werden konnten. Aus diesem Grund wurden alle weiteren Messwerte bereitgestellt und die Abschnitte ab dem Abschnitt 6.2 sind unabhängig von unseren Messungen. Deswegen lässt sich der Verlauf der weiteren Messungen auch nicht diskutieren.

Die Lebensdauer der Myonen wurde über einen geeignet langen Zeitraum von ungefähr drei Tagen aufgenommen und liefert als Ergebnis die mittlere Lebensdauer $\tau = (2,126 \pm 0,019) \mu\text{s}$. Der Literaturwert für die Lebensdauer ist $\tau_{\text{theo}} = (2,196\,981\,1 \pm 0,000\,002\,2) \mu\text{s}$ [4]. Die relative Abweichung zwischen Literaturwert und errechnetem Wert lässt sich über die Formel

$$\Delta x = \left| \frac{x - x_{\text{theo}}}{x_{\text{theo}}} \right|$$

bestimmen. Sie ergibt sich zu $\Delta\tau = (-3,2 \pm 0,9) \%$. Daraus lässt sich erkennen, dass der errechnete Wert im Rahmen der Standardabweichung sehr gut mit dem Literaturwert übereinstimmt. Dies lässt sich über die lange Messdauer und die damit im Verhältnis kleine Unsicherheit nach Poisson erklären. Außerdem tritt nur ein sehr kleiner Untergrund von Myonenzerfällen auf, welcher zu $U_K = 0.761$ bestimmt wurde. Die trotzdem auftretende Abweichung lässt sich unter anderem über die Einstellung der Verzögerungszeit vor einem der Diskriminatoren erklären. Dies wird während der Durchführung nur abgeschätzt und muss nicht den optimalen Wert ergeben. Des Weiteren ließe sich noch die Suchrate T_S des Monoflops weiter feinjustieren, um den Untergrund zu minimieren.

Insgesamt liefert der Versuch aber sehr gute Ergebnisse und die errechnete Lebensdauer stimmt sehr gut mit dem Literaturwert überein.

8 Anhang

8.1 Aufbau

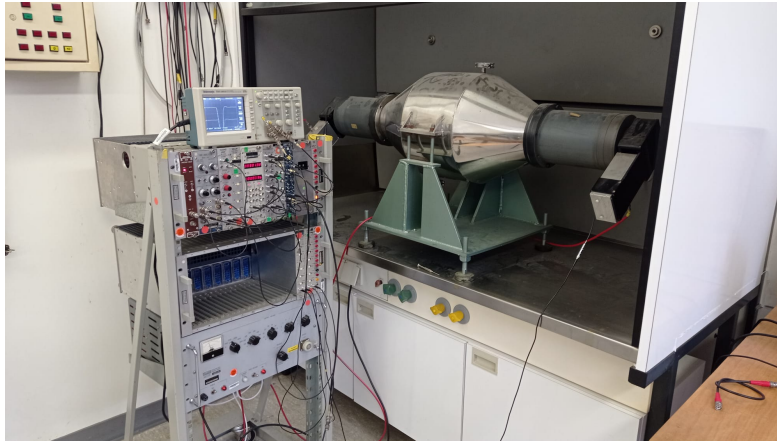


Abbildung 6: Der Versuchsaufbau des Versuchs Lebensdauer von Myonen.

8.2 Messwertfotos

Lebensdauer von MgO₂

Pulsbreite: 20 ns

Delay in s	Messzeit in s	Pulsanzahl nach Δt	Koinzidenz
0 ns	20,17 s	601	
0,5 ns	20,20 s	611	
1 ns	20,70 s	610	
2 ns	20,10 s	628	
3,5 ns	20,00 s	605	
4 ns	20,29 s	713	
4,5 ns	20,23 s	581	
6 ns	20,27 s	605	
8 ns	20,06	588	
9 ns	20,02	546	
10 ns	20,06	559	
14 ns	20,11	335	
17 ns	20,32	480	
<hr/>			
negativer Delay	-2 ns	19,98	581
Delay	-4 ns	19,8	580
Delay	-6 ns	19,98	496
Delay	-8 ns	20,26	478
Delay	-10 ns	20,00	507
Delay	-12 ns	20,24	409
Delay	-14 ns	19,93	327

Abbildung 7: Die Messwerte der Verzögerungzeitmessungen.

Pulsbreite 10 ns

<u>Delays in ns</u>	<u>Messzeit in ns</u>	<u>Zahl Pulsen Zahl</u> <u>nach Kreiszahl</u>
0 ns	19,98	458
1 ns	20,04	457
2 ns	20,34	456
3 ns	20,31	470
4 ns	20,14	452
6 ns	20,00	424
8 ns	20,10	254
10 ns	20,05	187
-2 ns	19,98	463
-4 ns	20,10	409
-6 ns	20,44	303
-8 ns	19,98	205

Delay 2 ns wird genutzt


Kalibrierung der Dämpfung mCA 

Abbildung 8: Die Messwerte der Verzögerungszeitmessungen.

Literatur

- [1] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [2] 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/>.
- [3] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [4] *Myonen*. 2022. URL: <https://pdglive.lbl.gov/Particle.action?node=S004&init=0> (besucht am 05.07.2022).
- [5] 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/>.
- [6] *Versuchsanleitung zu Versuch V01: "Lebendauer kosmischer Myonen"*. Fakultät Physik, TU Dortmund. 2022.