

V01

Lebensdauer kosmischer Myonen

Sonia Chander

sonia.chander@tu-dortmund.de

Jana Schlücking

jana.schluecking@tu-dortmund.de

Durchführung: 04.07.2022

Abgabe: 09.07.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Versuches	3
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Das Myon	3
2.2	Lebensdauer instabiler Teilchen	4
2.3	Das Messverfahren	4
3	Aufbau	5
4	Durchführung	7
4.1	Justage	7
4.1.1	Bestimmung der Verzögerungszeit	7
4.1.2	Kalibrationsmessung	8
4.2	Messung der Lebensdauer	8
5	Auswertung	8
5.1	Justage	8
5.1.1	Justieren der Verzögerungsleitungen	8
5.1.2	Kalibration	9
5.2	Messung der Lebensdauer	10
5.2.1	Theoretische Untergrundrate	10
5.2.2	Bestimmung der Lebensdauer - numerisch	11
5.2.3	Bestimmung der Lebensdauer - theoretisch	11
6	Diskussion	16
7	Anhang	17
	Literatur	19

1 Ziel des Versuches

In diesem Versuch wird mithilfe eines Szintillationsdetektors die Lebensdauer kosmischer Myonen bestimmt. Dabei sollen die Funktionsweisen der einzelnen Bauteile der Schaltung näher betrachtet werden.

2 Theoretische Grundlagen

Damit die Durchführung des Versuches sinnvoll erscheint, werden in den nächsten Abschnitten einige theoretischen Grundlagen erläutert. Dabei geht es zuerst um das Myon, dann um die Lebensdauer von instabilen Teilchen, wo auch das Zerfallsgesetz hergeleitet wird. Abschließend wird die Berechnung der Untergrundrate erläutert.

2.1 Das Myon

Das Myon gehört zu den Elementarteilchen aus dem Standardmodell. Es ist ein geladenes Lepton der 2. Generation und wird umgangssprachlich auch als „schwerer Bruder“ des Elektrons bezeichnet. Es hat also eine elektrische Ladung von $-e$ und einen Spin von $\frac{1}{2}$. Da es keine Farbladung trägt, wechselwirkt es über die elektromagnetische und die schwache Wechselwirkung. Die Masse des Myon beträgt etwa $m = (105,658\,374\,5 \pm 0,000\,002\,4) \text{ MeV}$ [8], was ungefähr $207 \cdot m_{e^-}$, also 207 mal der Masse des Elektrons entspricht.

Kosmische Myonen entstehen in einer Höhe von 10 - 15 km in der Atmosphäre. Bei dem Zusammentreffen der Atomkerne der Atmosphärenteilchen und der primären kosmischen Strahlung entstehen unter anderem leichte Mesonen, wie Pionen (π) und Kaonen (K). Diese zerfallen aufgrund ihrer leichten Masse nur in Leptonen. Da der gesamte Zerfall von Pionen in Leptonen durch Helizität unterdrückt ist, die Unterdrückung aber antiproportional zur Masse des entstehenden Leptons ist, wird der Zerfall von Pion ins Elektron mit entsprechendem Neutrino deutlich stärker unterdrückt, als es beim Myon mit entsprechendem Neutrino der Fall ist. So entstehen die meisten kosmischen Myonen aus den Zerfällen:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \qquad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

Da Myonen schwerer sind als Elektronen, können und werden sie in diese zerfallen. Dies geschieht mehrheitlich über den Zerfall:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \qquad \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

Myonen haben eine mittlere Lebensdauer von ungefähr $2,2 \mu\text{s}$ [8], sie sind mit nahezu Lichtgeschwindigkeit c unterwegs. Nach klassischer Rechnung sollten sie nicht in dieser Menge auf der Erdoberfläche aufzufinden sein, da sie davor zerfallen. Da die Geschwindigkeit so hoch ist, müssen die Effekte der Zeitdilatation und Längenkontraktion beachtet werden. Das Auffinden von Myonen auf der Erdoberfläche wird oft als eines der erste Beispiele genannt bei der Motivation von relativistischen Rechnungen.

2.2 Lebensdauer instabiler Teilchen

Die Lebensdauer eines Teilchens ist über seine Zerfallsbereitschaft definiert. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen in der Zeit dt zerfällt ist gegeben durch

$$dW = \lambda \cdot dt,$$

wobei λ die teilchenspezifische Zerfallskonstante darstellt. Werden nun N Teilchen betrachtet, so ist die Änderung der Teilchenzahl dN in einem Zeitintervall dt :

$$dN = -N \cdot dW = -\lambda N \cdot dt.$$

Diese Gleichung kann integriert werden und daraus ergibt sich das bekannt Zerfallsgesetz

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

Als Nenngröße wird im Allgemeinen die mittlere Lebensdauer $\tau = \frac{1}{\lambda}$ angegeben. Dies bezeichnet die Zeit, in welcher der Anteil der Teilchen auf $\frac{1}{e}$ abgesunken ist.

2.3 Das Messverfahren

In diesem Versuch wird die mittlere Lebensdauer kosmischer Myonen aus einer Messung aus Individuallebensdauern ermittelt. In einem Szintillationsdetektor werden Myonen detektiert, falls diese zerfallen, werden auch die Elektronen in dem Detektor registriert. Da sich das Detektorsignal von Elektron und Myon nicht unterscheidet, und Myonen unabhängig voneinander in der gesamten Messzeit in den Tank des Szintillationsdetektor eintreten, kann es passieren, dass statt eines Zerfalls die Zeit zwischen zwei eintretenden Myonen gemessen wird. Daher gibt es gleichmäßig über alle Kanäle verteilt einen Untergrund.

Die Poissonverteilung beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass n Myonen bei einem Erwartungswert von $\mu(T_s)$ mit der Messzeit T_s eintreffen, gemäß:

$$p_\mu(n) = \frac{\mu}{n!} \cdot e^{-\mu}. \quad (1)$$

Der Erwartungswert, wie viele Myonen während einer Messzeit T_s in den Detektor eintreten, ist proportional zu der durchschnittlichen Rate I_{mess} mit der Myonen über die gesamte Messzeit in den Tank eingetreten sind. Diese errechnet sich daher aus der gesamten Messzeit t_{mess} und der gemessenen Anzahl der eingetretenen Myonen N_{Start} :

$$\mu(T_s) = I_{\text{mess}} \cdot T_s \quad \text{mit:} \quad I_{\text{mess}} = \frac{N_{\text{Start}}}{t_{\text{mess}}}. \quad (2)$$

Der Untergrund ist schließlich gegeben durch

$$U = N_{\text{Start}} \cdot p(1), \quad (3)$$

da genau ein eintretendes Myon in der Messzeit als Elektron aus dem Zerfall gemessen wird und diese Messung verfälscht. Alle weiteren eintretenden Myonen starten eine neue Messung.

3 Aufbau

Die Abbildung 1 zeigt die schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

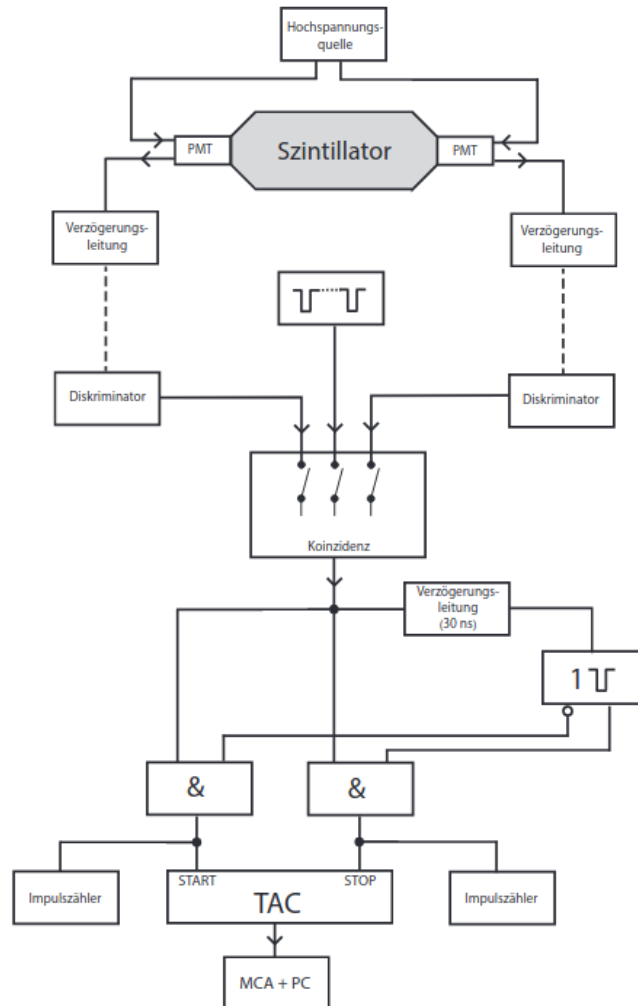


Abbildung 1: Das Blockschaltbild der im Versuch benutzten Schaltung [1].

Die einfallenden Myonen werden mithilfe eines organischen Szintillationsdetektors detektiert, der Tank hat eine Größe von etwa $V = 50\text{ l}$. In dem organischen Stoff werden die Moleküle durch das einfallende Myon oder das beim Zerfall entstehende Elektron angeregt, bei der Rückkehr in den Grundzustand werden Photonen mit einer Wellenlänge in der Größenordnung von $\lambda \approx 400\text{ nm}$ [2] emittiert. Die genaue Wellenlänge ist materialspezifisch. Es entsteht auch Licht durch das beim Myonzerfall entstehende Elektron. Die Lichtbitze werden über Lichtleiter an Photovervielfacher (PMT) weitergegeben. In einem PMT werden die Photonen auf eine Photokathode gelenkt, dort werden nach dem Photoeffekt Elektronen ausgelöst. Diese werden über die anliegende Hochspannung

mehrere Male beschleunigt und auf Dynoden geschossen, sodass immer mehr Elektronen ausgelöst werden. Die Vervielfachung der Elektronen kann, je nach Wellenlänge der einfallenden Photonen, 10^8 - 10^9 betragen [2]. Die Elektronen werden schließlich auf eine Anoden gelenkt und bilden einen Strompuls, der elektronisch weiterverarbeitet wird. Die PMTs haben hohe thermische Fluktuationen. Es werden daher 2 PMTs benutzt, welche an eine Koinzidenzschaltung geschaltet sind. Falls ein Myon oder ein Elektron detektiert wird, sollte in beiden PMTs ein elektrischer Strompuls erzeugt werden. Die thermischen Fluktuationen sind in beiden PMTs unabhängig voneinander, sodass es sehr unwahrscheinlich ist, dass in beiden PMTs zeitgleich Elektronen vervielfacht werden und die Koinzidenzschaltung ausgelöst wird durch thermische Fluktuationen. An jeden PMT ist eine Verzögerungsleitung und ein Diskriminator angeschlossen. An dem Diskriminator wird eine Schwellspannung eingestellt, die Ereignisse auf Energieskalen unterhalb der Schwellspannung herausfiltert. Die Verzögerungsleitungen sollen unterschiedlich schnelles Auslösen der Photomultiplier oder generelle Zeitdifferenzen zwischen den beiden PMTs ausgleichen, welche die Koinzidenz von Ereignissen behindert. Die Koinzidenzschaltung gibt nur ein Signal weiter, falls aus beiden angeschlossenen Leitungen ein Signal innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls ankommt. Dadurch wird der Untergrund stark unterdrückt.

Der nachfolgende Teil der Schaltung stellt eine Stoppuhr dar, er ist in der Abbildung 2 nochmal dargestellt. Ein wichtiges Bauteil ist hier der Monoflop. Dieser hat einen invertierten und einen normalen Ausgang. Kommt ein Signal an den Monoflop, dann gibt er ein HIGH aus. Nach einer gewissen Zeit T_s wird vom Monoflop wieder ein LOW ausgegeben. Die Zeit T_s stellt in diesem Versuch die Suchzeit dar, eine obere Grenze für den Bereich, in dem die Lebensdauer vermutet wird.

Im Normalzustand liegt von dem Monoflop ein HIGH an dem ersten AND-Gatter und ein LOW am zweiten AND-Gatter (links). Wird von der Koinzidenzschaltung ein Signal gegeben, so liegen am ersten AND-Gatter zwei HIGH Signale an, sodass ein Signal weitergegeben wird. Es wird ein Impuls gezählt und der Time-Amplitude-Converter (TAC) wird ausgelöst und startet die Zeitnahme. Da am zweiten AND zu dem Zeitpunkt vom Monoflop ein LOW anliegt, passiert dort nichts. Durch die Verzögerungsleitung wird der Monoflop erst 30 ns später getriggert. Innerhalb der Suchzeit T_s liegt durch den Monoflop ein LOW am ersten AND-Gatter und ein HIGH am zweiten AND-Gatter. Läuft nun die Suchzeit ab, ohne dass ein weiteres Teilchen registriert wird, geht der Monoflop

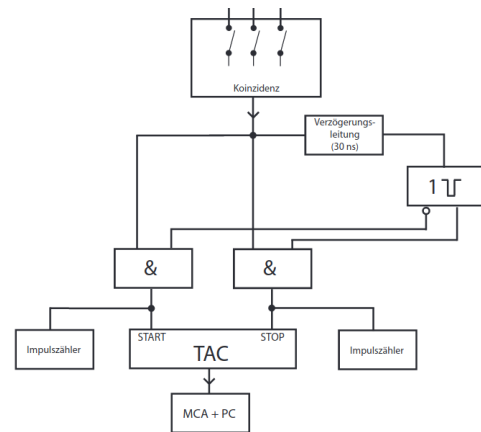


Abbildung 2: Der untere Teil der Schaltung aus Abbildung 1, zur genaueren Betrachtung [1].

in seinen Ausgangszustand zurück, der TAC verwirft die angefangene Zeitnahme. Es wird kein Signal weitergegeben.

Wird während der Suchzeit ein weiteres Signal von der Koinzidenzschaltung in die restliche Schaltung gegeben, so liegen zwei HIGH Signale am zweiten AND-Gatter, hier wird der Impuls gezählt und die Zeitnehmung wird am TAC gestoppt. Der Monoflop wird in seinen Ausgangszustand getriggert.

Am TAC wird die gemessene Zeit in einen zur ihr proportionalen Spannungspuls konvertiert. Dieser geht weiter an den Multichannelanalyser (MCA) (dt. Vielkanalanalysator). Der MCA sortiert die Spannungspulse nach ihrer Größe und sammelt Pulse ähnlicher Höhe in den einzelnen Kanälen. Am Computer wird ein Histogramm erzeugt, wie viele Spannungspulse in welchem Kanal gesammelt werden.

An der Koinzidenzschaltung ist neben den PMT noch ein Doppelpulsgenerator angeschlossen, mit dem der untere Teil der Schaltung getestet werden kann und durch welchen die Kanäle des MCA mit einer Zeit assoziiert werden können.

4 Durchführung

Die im Aufbau 3 beschriebene Schaltung wird Schritt für Schritt aufgebaut und währenddessen eingestellt. Anschließend wird die Messung von Individuallebensdauern gestartet und mehrere Tagen laufen gelassen.

4.1 Justage

Die PMT werden an eine Hochspannung angeschlossen. Mit einem Oszilloskop wird sich vergewissert, dass Spannungsimpulse verschiedener Höhe sichtbar sind. Die PMT werden jeweils an eine verstellbare Verzögerungsleitung angeschlossen, welche zunächst auf einer Verzögerung von 0 ns stehen. Es wird ein PMT über die Verzögerungsleitung mit einem Diskriminator verbunden, dann werden mit Hilfe eines Zählwerkes die Impulse pro Sekunde ermittelt. Es werden in einem Zeitraum von 10 ns die ankommenden Impulse gezählt. Die Schwellspannung des Diskriminators wird so eingestellt, dass in etwa 30 s^{-1} gemessen werden. Dann wird die Pulsdauer des Diskriminators auf einem Oszilloskop betrachtet und so eingestellt, dass sie eine Pulsdauer von $\Delta t = 10 \text{ ns}$ hat. Das gleiche Vorgehen wird mit dem anderen PMT und dem anderen Diskriminator wiederholt.

4.1.1 Bestimmung der Verzögerungszeit

Damit die Koinzidenzschaltung bestmöglichst eingestellt ist, werden die Impulse der Schaltung für verschiedene Verzögerungszeiten gemessen. Dafür wird die Koinzidenzschaltung an einen Impulszähler geschlossen. Die zuvor eingestellten Diskriminatoren werden inklusive der Verzögerungsleitungen und den PMTs als Input in die Koinzidenzschaltung gesteckt. Nun wird für verschiedene Verzögerungszeiten die Anzahl an Impulsen in einem Intervall von $t = 20 \text{ s}$ notiert. Dazu wird erst eine Leitung verlängert, während die andere auf einer Verzögerung von 0 ns steht. Danach wird die zuerst ausgemessene Leitung auf

keine Verzögerung gestellt und die andere schrittweise erhöht. Anschließend wird eine geeignete Verzögerungszeit ausgewählt und für den weiteren Versuchsablauf eingestellt. Ein Richtwert für die Ereignisrate ist etwa 20 s^{-1} . Nur wird die restliche Schaltung aufgebaut. An dem Monoflop wird eine Suchzeit von $10\text{ }\mu\text{s}$ eingestellt. Der Messbereich des TAC wird dementsprechend angepasst, sodass diese die Spannungspulse so bildet, dass möglichst viele Kanäle im MCA benutzt werden können. Dann stehen die verschiedenen Kanäle für feinere Zeitintervalle.

4.1.2 Kalibrationsmessung

Die gemessenen Zeiten zwischen zwei detektierten Ereignissen wird je Länge in verschiedene Kanäle im MCA sortiert und am Computer wird die Anzahl an Zeiten pro Kanal abgelesen. Damit mit den Kanälen eine Zerfallszeit assoziiert werden kann, werden die PMT von der Koinzidenzschaltung gesteckt und ein Doppelpulsgenerator mit einstellbarer Zeit t_a zwischen den Pulsen angeschlossen.

Es wird eine Zeit t_a eingestellt, für 15 s gemessen und anschließend der Kanal und die Anzahl der Ereignisse notiert. Es wird in Schritten von $\Delta t_a = 0,3\text{ }\mu\text{s}$ der Messbereich von $0,3\text{ }\mu\text{s}$ - $9,9\text{ }\mu\text{s}$ ausgemessen.

4.2 Messung der Lebensdauer

Es werden die Photomultiplier wieder an die Koinzidenzschaltung angeschlossen, der Doppelpulsgenerator wird entfernt. Die Impulszähler und die Messung am Computer werden zeitgleich gestartet. Die Messung sollte 20 h - 30 h laufen, damit einige Zerfallszeiten aufgenommen werden.

5 Auswertung

5.1 Justage

5.1.1 Justieren der Verzögerungsleitungen

Wie in der Durchführung beschrieben werden die Verzögerungsleitungen vor den Diskriminatoren justiert. Die aufgenommenen Messwerte dieser Kalibration sind in Tabelle 1 zu finden. Für die Höhe des Plateaus ergibt sich mithilfe einer Mittelwertsrechnung

$$I_{\text{Plateau}} = 351,57 \pm 18,75.$$

Mit den Messwerten des Anstiegs und des Abfalls wird jeweils eine Ausgleichsrechnung mit der Form

$$I = m \cdot t + b$$

durchgeführt. Mithilfe von python werden somit folgende Fitparameter bestimmt:

Anstieg	$m_{\text{An}} = (43,00 \pm 1,72) \frac{1}{\text{ns}}$	$b_{\text{An}} = 330,65 \pm 6,68,$
Abfall	$m_{\text{Ab}} = (-34,87 \pm 1,44) \frac{1}{\text{ns}}$	$b_{\text{Ab}} = 399,48 \pm 11,33.$

Die jeweiligen Ausgleichsgeraden sind ebenfalls in Abbildung 3 zu finden. Die Halbwertsbreite des Plateaus wird über die Schnittstellen der beiden Ausgleichsgeraden mit der halben Plateauhöhe bestimmt. Daraus ergibt sich für die beiden Schnittstellen

$$t_{\text{links}} = (-3,60 \pm 0,21) \text{ ns} \quad t_{\text{rechts}} = (6,4 \pm 0,4) \text{ ns}.$$

Dadurch folgt für die Halbwertsbreite

$$t_{\frac{1}{2}} = (10,0 \pm 0,5) \text{ ns}.$$

Als Verzögerungszeitdifferenz wird $\Delta t = 2 \text{ ns}$ genommen, dieser Wert bleibt über den ganzen Versuch bestehen. Dadurch beträgt die Ereignisrate $18,8 \text{ s}^{-1}$.

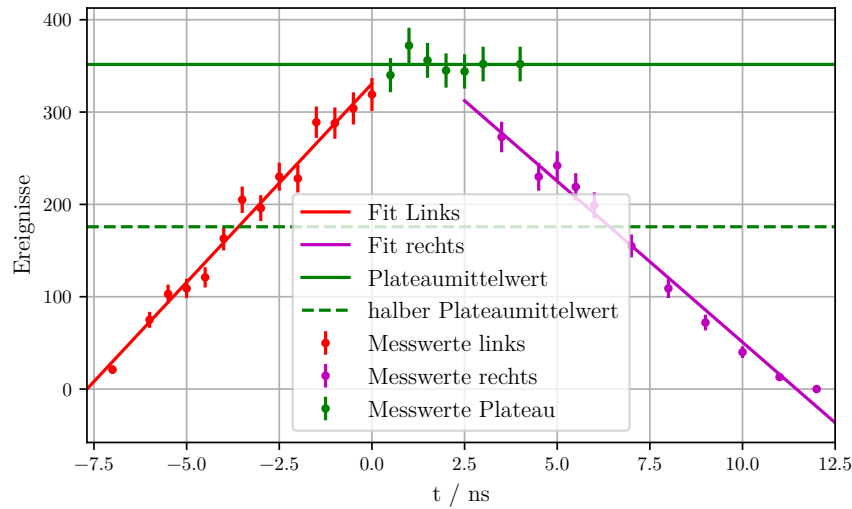


Abbildung 3: Eine graphische Darstellung der Messdaten der Verzögerungszeitmessung. Es werden ein Anstieg, ein Plateau und ein Abfall identifiziert und entsprechend Ausgleichsrechnungen gemacht.

5.1.2 Kalibration

Um mit dem Multichannelanalyzer arbeiten zu können, muss festgestellt werden welcher Kanal für welche Zerfallszeit steht. Durch die Kalibrationsmessung kann jedem Kanal eine Zerfallszeit zugeordnet werden. Es werden für die verschiedenen Zeitabstände Δt innerhalb von 15 s gemessen, wie viele Ereignisse in einen Kanal fallen, und diese beiden Werte notiert. Falls es Ereignisse in mehreren Kanälen gibt, dann wird ein gewichteter Mittelwert ausgerechnet. Die aufgenommen Messwerte sind in Tabelle 2 zu finden. Durch die Messwerte wird eine Ausgleichsrechnung durchgeführt mit der Form

$$\text{ch} = m \cdot t + \text{ch}_0.$$

Der letzte Messwert zu $\Delta t = 9,9 \mu\text{s}$ wird in der Ausgleichsrechnung nicht berücksichtigt, da dieser die Ausgleichsgerade fälschlicherweise verschiebt. Da anscheinend dieser Zeitabstand zwischen den beiden Impulsen schon mit der Suchzeit $T_S = 10 \mu\text{s}$ gleichgesetzt wird und somit keine Impulse in diesem Kanal zu sehen sind. Dabei werden folgende Werte ermittelt:

$$m = (0,0217 \pm 8,9686) \frac{1}{\mu\text{s}} \quad \text{ch}_0 = 0,1507 \pm 0,0023 .$$

Eine grafische Darstellung der Messwerte sowie die dazugehörige Ausgleichsrechnung ist in Abbildung 4 zu finden.

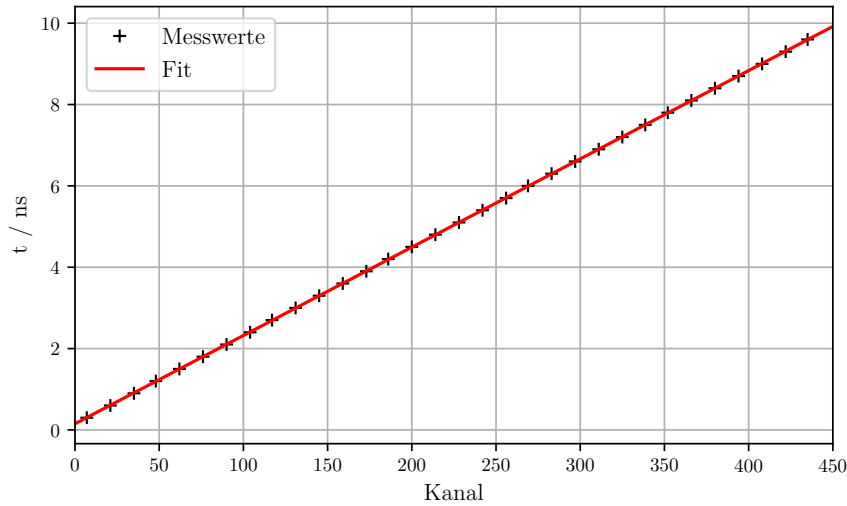


Abbildung 4: Die Messwerte der Messung zur Kalibration des MCA mit einer Ausgleichsrechnung.

5.2 Messung der Lebensdauer

5.2.1 Theoretische Untergrundrate

Neben Myonenzерfälle, die Stoppsignale auslösen, können weitere Myoneneinfälle dieses Stoppsignal auslösen. Dieser Untergrund trifft auf alle Kanäle gleichmäßig auf und läuft über die ganze Messung ab. Dafür wird Gleichung (1) verwendet. Der Erwartungswert μ sowie die durchschnittlich gemessene Rate I_{Mess} wird mit (2) bestimmt. Die Suchzeit T_S wurde auf $10 \mu\text{s}$ eingestellt. Dabei beträgt die Messzeit

$$t_{\text{Mess}} = 272\,201 \text{ s}$$

und die gesamte Anzahl der Startsignale

$$N_{\text{Start}} = 4\,560\,816,00 \pm 2135,61 .$$

Somit ergibt sich für die durchschnittlich gemessene Rate

$$I_{\text{Mess}} = (16,755 \pm 0,008) \frac{1}{\text{s}}.$$

Dadurch kann mithilfe von (3) der gesamte Untergrund während der Messzeit bestimmt werden. Dieser beträgt somit

$$U_{\text{ges}} = 764,1 \pm 0,7.$$

Der gesamte Untergrund wird auf die relevanten Kanäle normiert. Aus der Kalibrationsmessung ergeben sich als relevante Kanäle innerhalb der Suchzeit T_{S} das Intervall $[4; 445]$. Somit beträgt der normierte Untergrund

$$U_{\text{norm}} = 1,7325 \pm 0,0016.$$

5.2.2 Bestimmung der Lebensdauer - numerisch

Die aufgenommenen Messwerte sind in Abbildung 5 zu sehen. Durch diese Messwerte wird ein Fit der Form

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} + U_{\text{num}}.$$

Dabei werden die ersten vier Kanäle sowie die Kanäle > 445 nicht berücksichtigt, da diese Null Counts haben. Bei den Kanälen > 445 liegt es an der Suchzeit T_{S} , die überschritten wird und somit Signale, die nach der Suchzeit eintreffen nicht als Stoppsignale registriert werden. Für die Fitparameter ergeben sich somit folgende Werte:

$$N_0 = 153,38 \pm 1,56,$$

$$\lambda = (0,51 \pm 0,01) \frac{1}{\mu\text{s}},$$

$$U_{\text{num}} = 2,64 \pm 0,56.$$

Bei dem hier betrachteten Untergrund U_{n} handelt es sich um ein numerisch bestimmten Untergrund. Die Fit-Funktion ist in Abbildung 5 zu finden. Durch die bestimmte Zerfallskonstante λ kann nun die Lebensdauer berechnet werden. Es gilt

$$\tau_{\text{num}} = \frac{1}{\lambda} = (1,97 \pm 0,04) \mu\text{s}.$$

5.2.3 Bestimmung der Lebensdauer - theoretisch

Zunächst wird von den signifikanten Messwerten die theoretisch bestimmte Untergrundrate abgezogen. Diese beträgt

$$U_{\text{theo}} = 1,7325 \pm 0,0016.$$

Durch die angepassten Messwerte wird eine Ausgleichsrechnung der Form

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

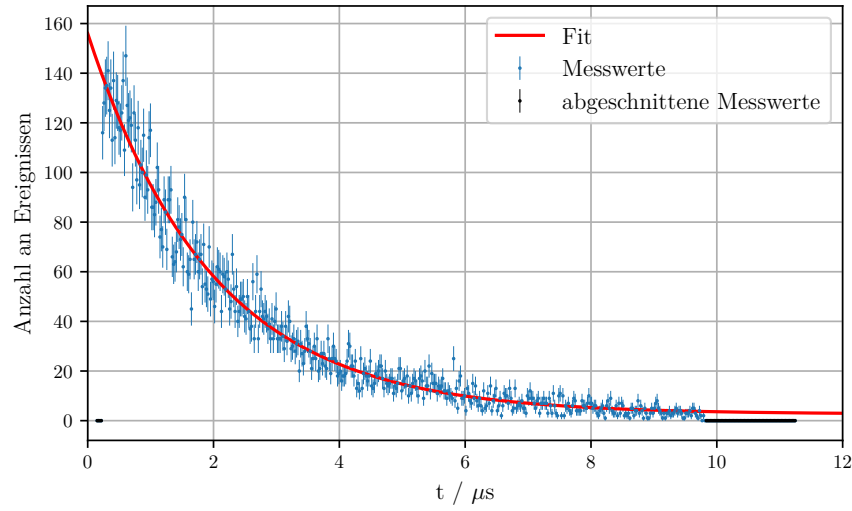


Abbildung 5: Die aufgenommenen Messwerte zur Bestimmung der Lebensdauer, sowie der dazugehörige Fit mit einer e-Funktion. Die schwarz markierten Messpunkte wurden bei der Ausgleichsrechnung nicht berücksichtigt, da diese teilweise aufgrund der überschrittenen Suchzeit keine Ereignisse haben.

durchgeführt. Für die Fitparameter ergeben sich somit folgende Werte:

$$N_0 = 153,06 \pm 1,53 \text{ und} \\ \lambda = (0,496 \pm 0,006) \frac{1}{\mu\text{s}}.$$

Aus der Zerfallskonstante ergibt sich die Lebensdauer wie folgt:

$$\tau_{\text{theo}} = \frac{1}{\lambda} = (2,017 \pm 0,026) \mu\text{s}.$$

Die bereinigten Messwerte sowie die Fit-Funktion sind in Abbildung 6 zu finden.

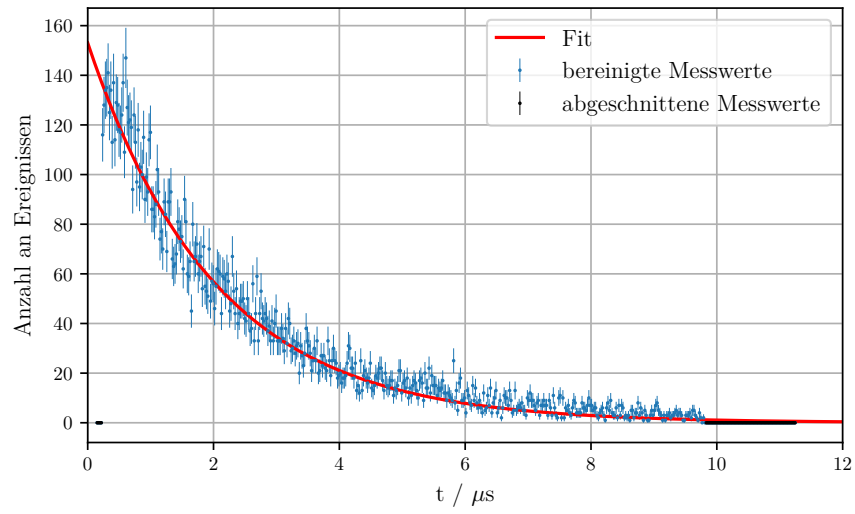


Abbildung 6: Die aufgenommenen Messwerte zur Bestimmung der Lebensdauer, sowie der dazugehörige Fit mit einer e-Funktion. Die schwarz markierten Messpunkte wurden bei der Ausgleichsrechnung nicht berücksichtigt, da diese teilweise aufgrund der überschrittenen Suchzeit keine Ereignisse haben.

Tabelle 1: Die Messdaten der Verzögerungsmessung. Es wurde für jede Verzögerungszeit 20 s lang gemessen.

Δt / ns	Impulse I
−10,0	1
−9,0	4
−8,0	11
−7,0	21
−6,0	75
−5,5	103
−5,0	109
−4,5	121
−4,0	163
−3,5	205
−3,0	196
−2,5	230
−2,0	228
−1,5	289
−1,0	288
−0,5	304
0	319
0,5	340
1,0	372
1,5	356
2,0	345
2,5	344
3,0	352
3,5	273
4,0	352
4,5	230
5,0	242
5,5	219
6,0	199
7,0	155
8,0	109
9,0	72
10,0	40
11,0	13
12,0	0

Tabelle 2: Die Messwerte zur Kalibration des MCAs. Jeder Messpunkt wurde für 15 s gemessen.

Δt / ns	Kanal	Impulse I
0,3	7	16213
0,6	21	15462
0,9	35	15547
1,2	48	13928
1,5	62	15391
1,8	76	15293
2,1	90	15470
2,4	103,98	15172
2,7	117	15234
3,0	131	16310
3,3	145	15505
3,6	159	15470
3,9	173	15405
4,2	186	15301
4,5	200	15206
4,8	214	15221
5,1	228	15780
5,4	242	15224
5,7	256	15158
6,0	269	15125
6,3	283	15334
6,6	297	16094
6,9	311	15216
7,2	325	15094
7,5	338,62	15517
7,8	352	15390
8,1	366	15162
8,4	380	15348
8,7	394	16517
9,0	408	15362
9,3	421,99	15254
9,6	435	15454
9,9	0	0

6 Diskussion

Die Versuchsdurchführung verlief ohne Probleme. Bei der Justage der Verzögerungsleitung wurde eine Zeitdifferenz von

$$T_V = 2 \text{ ns}$$

gewählt. Diese liegt relativ mittig auf dem Plateau. Auch bei der Kalibration des MCAs gab es keine weiteren Probleme. Neben dem erwarteten linearen Verlauf zwischen Zeit und Channel, wurde auch festgestellt, dass die gemessene Anzahl an Ereignissen in derselben Größenordnung waren. Desweiteren wurde die Empfindlichkeit des Monoflop bemerkt. Bei einem zeitlichen Abstand von $9,9 \mu\text{s}$ wurden keine Ereignisse registriert, da dieser Abstand mit der Suchzeit $T_S = 10 \mu\text{s}$ gleichgesetzt wurde.

Die beiden bestimmten Untergrundraten betragen

$$U_{\text{theo}} = 1,7325 \pm 0,0016 \quad U_{\text{num}} = 2,64 \pm 0,56.$$

Die relativ Abweichung der Untergrundraten voneinander beträgt somit

$$\Delta U = 52 \%$$

somit liegen diese nah beieinander. Wird die Bestimmung der Untergrundraten betrachtet, fällt auf, dass der theoretisch bestimmte Untergrund weniger fehleranfällig ist, da die Werte zur Bestimmung relativ eindeutig ist. Die numerisch bestimmten Untergrundrate basiert allein auf eine Ausgleichsrechnung, die stark variiert, insbesondere wenn entschieden werden muss, welche Messwerte signifikant sind und welche außer Acht gelassen werden müssen.

Die daraus berechnete Lebensdauer beträgt

$$\tau_{\text{theo}} = (2,017 \pm 0,026) \mu\text{s} \quad \tau_{\text{num}} = (1,97 \pm 0,04) \mu\text{s}.$$

Der Literaturwert für die Lebensdauer kosmischer Myonen beträgt $2,2 \mu\text{s}$ [8]. Somit folgen für die Abweichungen der jeweils ermittelten Lebensdauern vom Literaturwert:

$$\Delta\tau_{\text{theo}} = 8,3 \% \quad \Delta\tau_{\text{num}} = 10,5 \%.$$

Die Lebensdauer, die mit der theoretischen Untergrundrate bestimmt wurde, ist somit näher am Theoriewert. Dadurch wird auch klar, dass die theoretische Untergrundrate genauer ist. Dies lässt sich damit begründen, dass eine Ausgleichsrechnung umso genauer wird, desto weniger Parameter bestimmt werden müssen.

Ein Effekt, der bei der theoretischen Berechnung des Untergrundes nicht mitbeachtet wird, ist, dass die Myonen auch in einem Atomkern eingefangen werden können und ein hochangeregtes myonisches Atom entsteht. Hierbei wird auch ein Photon ausgesand, welches wie sonst auch ein Signal auslöst. Somit kann auch so ein Vorfall fälschlicherweise als Zerfall gewertet und gemessen werden.

7 Anhang

V01 - Lebensdauer von ^{kosmischen} Myonem 20 sek 04.07.22

$\Delta t = t_1 - t_2$ [ns] Counts

0	358
0,5	340
1,0	372
1,5	356
2,0	345
2,5	344
3,0	352
3,5	273
4,0	352
4,5	230
5,0	242
5,5	219
6,0	199
7,0	155
8,0	109
9,0	72
10,0	40
11,0	13
12,0	0
0	319
-0,5	304
-1,0	288
-1,5	289
-2,0	228
-2,5	230
-3,0	196
-3,5	205
-4,0	163
-4,5	121
-5,0	109
-5,5	103
-6,0	75
-7,0	21
-8,0	11
-9,0	4
-10,0	1

X Plattform
mitte

Abbildung 7: Die Originaldaten von der Versuchsdurchführung.

Kalibration MCA		Doppelimpuls → welcher channel	
$\Delta t_{\text{Impulse}} [\mu\text{s}]$	Channel Marker	Counts	15 sec
0,3	7	16 213	
0,6	21	15 462	
0,9	35	15 547	
1,2	48	13 928	
1,5	62	15 331	
1,8	76	15 293	
2,1	90	15 470	
2,4	103/104	318 / 14853	
2,7	117	15 234	
3,0	131	16 310	
3,3	145	15 505	
3,6	159	15 470	
3,9	173	15 405	
4,2	186	15 301	
4,5	200	15 206	
4,8	214	15 221	
5,1	228	15 780	
5,4	242	15 224	
5,7	256	15 158	
6,0	269	15 125	
6,3	283	15 334	
6,6	297	16 094	
6,9	311	15 216	
7,2	325	15 094	
7,5	338/339	5827 / 9690	
7,8	352	15 390	
8,1	366	15 152	
8,4	380	15 348	
8,7	394	16 517	
9,0	408	15 362	
9,3	421/422	96 / 15158	
9,6	435	15 4854	
9,9	0	0	
	Suchzeit		

Abbildung 8: Die Originaldaten von der Versuchsdurchführung.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *V01 - Lebensdauer kosmischer Myonen*. 2022.
- [2] Norbert Wermes Hermann Kolanoski. *Teilchendetektoren*. Springer Spektrum Berlin, Heidelberg, 2016.
- [3] 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/>.
- [4] 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/>.
- [5] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [6] W.R. Leo. *Techniques for nuclear and particle physics experiments*. Springer Verlag, 1994.
- [7] 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/>.
- [8] *The Review of Particle Physics (2022)*. URL: <https://pdglive.lbl.gov/Viewer.action> (besucht am 03.07.2022).
- [9] W. Walcher. *Praktikum der Physik*. Teubner, 2004.