

Versuch Nr.V01

## **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

## 1 Zielsetzung

Ziel dieses Versuches ist es, die Lebensdauer kosmischer Myonen mittels eines Szintillationsstanks zu bestimmen. Neben den Berechnungen soll auch die verwendete Schaltung genauer verstanden werden.

## 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. Diese Zerfälle sind in den Gleichungen 1 aufgelistet.

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

Diese auf diesem Weg entstandenen Myonen sind so hochenergetisch, dass sie nach dem Pionenzерfall 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 den folgenden Gleichungen 2 in Elektronen und Neutrinos:

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

## 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:

$$dW = \lambda dt \quad .$$

Daraus folgt für den Zerfall vieler Teilchen

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

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

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

Hier ist  $\lambda$  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  $\tau$  eines Teilchens bezeichnet. Sie berechnet sich zu  $\tau = \frac{1}{\lambda}$ .

## 4 Aufbau und Funktionsweise der Messapparatur

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(englisch: *photomultiplier tube* (PMT)) angebracht. Diese wandeln das eingehende Lichtsignal in einen Spannungsimpuls um.

Der PMT ist über eine Verzögerungsleitung an Diskriminatoren angeschlossen. 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 werden höherenergetische thermische Anregungen der PMT ausgefiltert, indem beide Diskriminatoren an eine Koinzidenzschaltung angeschlossen werden. Die Koinzidenzschaltung gibt nur ein Signal weiter, wenn beide eingehenden Signale innerhalb eines Zeitraumes  $t_k$  eintreffen. Mit diesen beiden Filtermethoden können der unkorrelierte Untergrund nur mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit ein Signal erzeugen. Jetzt folgt der Schaltungsteil, der zählt, wie viele Signale entstehen und falls das My-

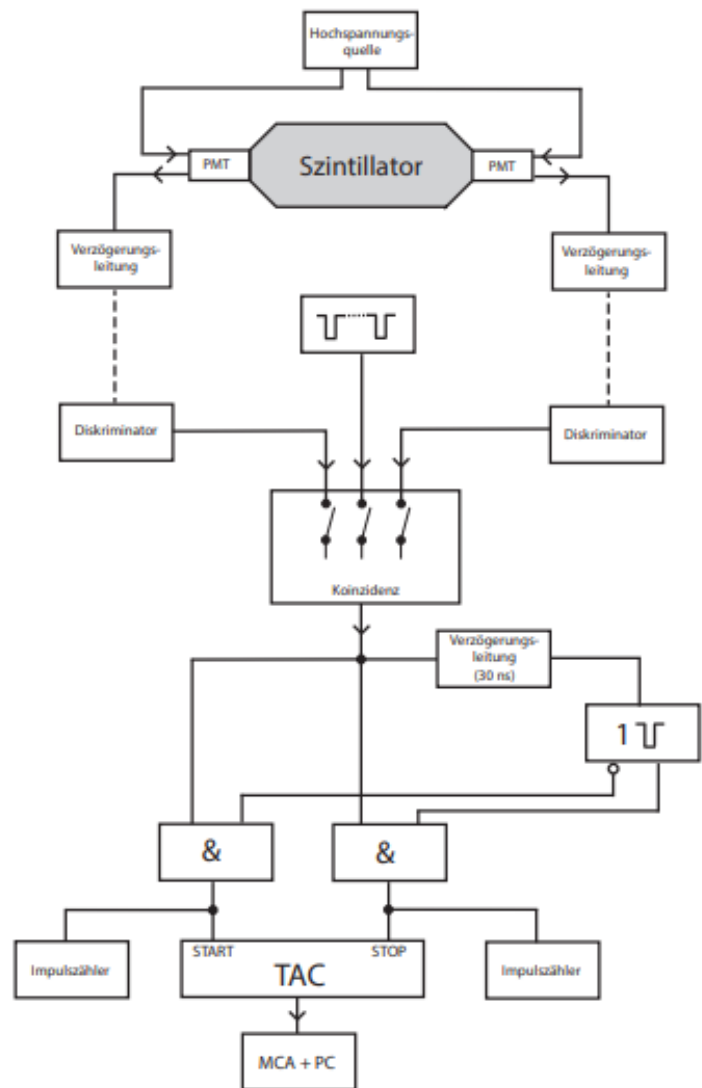


Abbildung 1: Skizze der Schaltung[6].

on 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 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 ein weiteres Signal als ein zerfallenes Myon interpretiert wird. 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 Myons 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 zudem den Zeit-Amplituden-Converter(TAC). Am zweiten AND-Gatter liegen aufgrund der Verzögerung ein HIGH und LOW-Signal, es entsteht also kein Signal für den Zerfall eines Teilchens.

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 TAC 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 Signalrate von ca. 30 Hz vorliegt. Dann werden die Einstellungen der Verzögerungsleiter bei einer Pulsdauer von  $\Delta t = 20$  ns und  $\Delta t = 10$  ns variiert. Die Pulsdauern werden an den Diskriminatoren über kleine Schrauben verändert und an dem Oszilloskop abgelesen. Es werden beide Diskriminatoren an die Koinzidenzschaltung geschaltet und je einer der Verzögerungsleiter verstellt und die Signalrate gemessen. Durch systematisches einzelnes Verstellen der Verzögerungen ergibt sich eine Kurve der Signalraten. 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  $T_S = 10$   $\mu$ 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 mit unabhängigen Ereignissen 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-Impulsdauern mithilfe der Diskriminatoren modifiziert. Dabei werden die Pulsdauern 10 ns und 20 ns eingestellt. 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  $T_{\text{mess}}$ , 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 10 ns.

$\Delta t$ / ns	$T_{\text{mess}}$ / 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 Messwertplateaus der Zählraten eine Konstante  $N_{\text{Plat}}$  gefitet, was der Durchschnittshöhe des Plateaus entspricht. 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  $\Delta t \in [-4, 9]$ .

Aus den Schnittpunkten der Hälfte der Durchschnittshöhe und den aufsteigenden und abfallenden Flanken lässt sich die Halbwertsbreite der Messverteilung bestimmen. Dafür

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

$\Delta t / \text{ns}$	$T_{\text{mess}} / \text{s}$	$N$	$\frac{N}{T_{\text{mess}}} / 1/\text{s}$
-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

wird die lineare Gleichung

$$y = m \cdot x + n \quad (3)$$

auf die komplementären Intervalle der Plateaus gefitet. Dies geschieht für beide Messreihen einmal an der aufsteigenden und einmal an der abfallenden Flanke. Daraus ergeben sich dann für die Fits die in Tabelle 3 dargestellten Fitparameter.

**Tabelle 3:** Regressionsparameter für die Plateaufits und für die Flankenfits, für die Pulsdauern  $\Delta t_1$  und  $\Delta t_2$ .

Messreihe	$N_{\text{Plat}} / 1/\text{ns}$	$m_{\text{auf}} / 1/\text{ns}^2$	$n_{\text{auf}} / 1/\text{ns}$	$m_{\text{ab}} / 1/\text{ns}^2$	$n_{\text{ab}} / 1/\text{ns}$
$\Delta t_1$	$22,88 \pm 0,37$	$1,68 \pm 0,32$	$25,04 \pm 1,59$	$-2,97 \pm 0,76$	$38,13 \pm 6,19$
$\Delta t_2$	$29,97 \pm 0,55$	$1,09 \pm 0,24$	$33,12 \pm 2,30$	$-2,80 \pm 0,39$	$56,34 \pm 4,75$

Die Messdaten für  $\Delta t_1$  sind inklusive der Unsicherheiten der Messdaten und der Fits in Abbildung 2 grafisch dargestellt. Für  $\Delta t_2$  sind die Daten in Abbildung 3 aufgetragen. Über den Zusammenhang

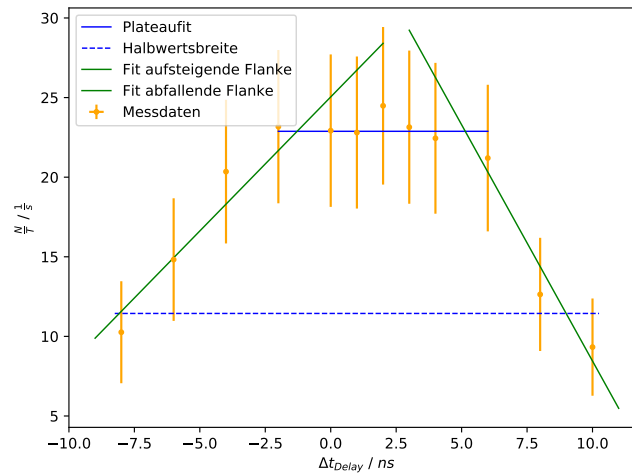
$$\Delta t_{\text{Verz}} = 2\Delta t_i - \Delta S \quad ,$$

welcher die Verschiebung des Maximums berechnet, lässt sich für die einzelnen Messreihen die optimale Verzögerungszeit bestimmen. Die dafür errechneten Schnittpunkte  $S_{t1}$  für  $\Delta t_1$ , und  $S_{t2}$  für  $\Delta t_2$ , mit den Flankenfits sind Tabelle 4 aufgetragen. Zusätzlich sind die errechneten Verzögerungszeiten aufgetragen.

**Tabelle 4:** Die Schnittpunkte der halbierten Plateauhöhe mit den Flankenfits und die daraus errechneten Verzögerungszeiten, für die Pulsdauern  $\Delta t_1$  und  $\Delta t_2$ .

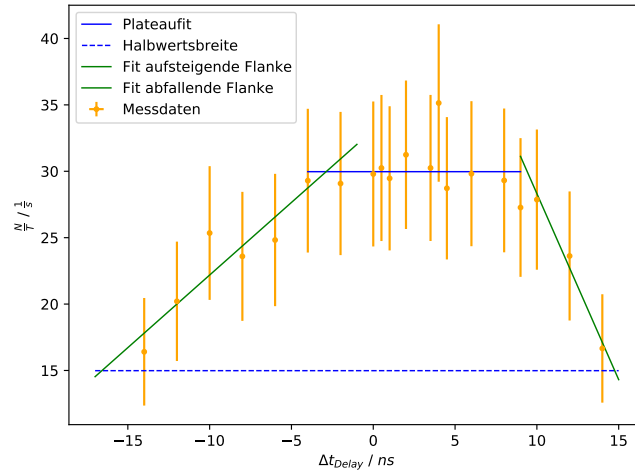
Messreihe	$S_{\text{auf}} / \text{ns}$	$S_{\text{ab}} / \text{ns}$	$\Delta S / \text{ns}$	$\Delta t_{\text{Verz}} / \text{ns}$
$\Delta t_1$	$-8,1 \pm 1,8$	$9,0 \pm 3,1$	$17 \pm 4$	$3 \pm 4$
$\Delta t_2$	$-17 \pm 04$	$14,8 \pm 2,7$	$31 \pm 5$	$9 \pm 5$

Für die weiteren Rechnungen kann dann das arithmetische Mittel der bestimmten Verzögerungszeiten  $\Delta t = 6 \text{ ns}$  genutzt werden.



**Abbildung 2:** Die Messwerte der Zählrate, für eine Pulsbreite von  $\Delta t_1 = 10 \text{ ns}$ , gegen die Verzögerungszeit  $\Delta t$  aufgetragen. Außerdem ist der Plateaufit, die Fits auf den Flanken und die Halbwertsbreite eingezeichnet.





**Abbildung 3:** Die Messwerte der Zählrate, für eine Pulsbreite von  $\Delta t_2 = 20$  ns, gegen die Verzögerungszeit  $\Delta t$  aufgetragen. Außerdem ist der Plateaufit, die Fits auf den Flanken und die Halbwertsbreite eingezeichnet.

## 6.2 Kalibrierung des Multi-Channel-Analysers

Um den MCA zu kalibrieren, wird auf ihn das Signal eines Doppelimpulsgenerators gegeben. Die angesteuerten Bins sind proportional zur Höhe des Spannungspulses, der vom TAC ausgesendet wird. Dieser wiederum ist proportional zur Zeit zwischen dem Start- und dem Stopp-Signal. Dadurch lässt sich über den Zusammenhang zwischen den Verzögerungszeiten der Pulse, des Impulsgenerators und den angesteuerten Kanälen herstellen. Darüber werden den Kanälen eine Impulsdauer zugeordnet werden. Die dafür genutzten Werte der zeitlichen Abstände der vom Doppelimpulsgenerator erzeugten Pulse und die Werte der damit korrespondierenden Kanäle sind in Tabelle 5 aufgetragen.

**Tabelle 5:** Die Messwerte der Differenz der Pulse des Doppelimpulsgenerators und der damit korrespondierenden Kanäle  $K$  im MCA.

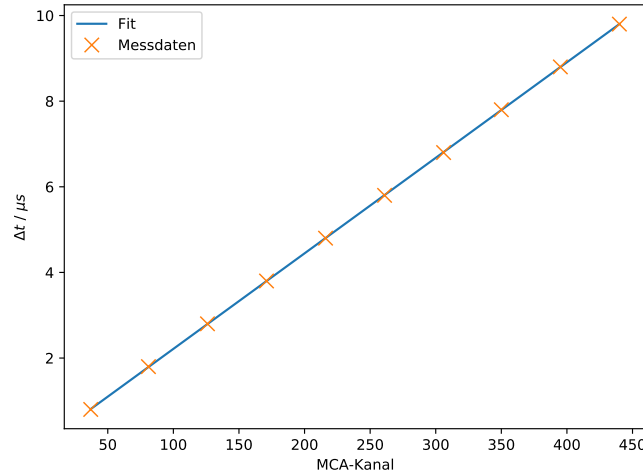
$\Delta t / \mu\text{s}$	$K$
0,8	37
1,8	81
2,8	126
3,8	171
4,8	216
5,8	261
6,8	306
7,8	350
8,8	395
9,8	440

Eine lineare Regression der Form der Gleichung 3 folgend, 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 der Messwerte in der Abbildung 4 dargestellt. Die Suchzeit  $T_S = 10 \mu\text{s}$  korrespondiert nach dieser Ausgleichsrechnung mit dem Kanal  $448,95 \pm 0,43 \approx 449$ .



**Abbildung 4:** Der zeitliche Abstand der Pulse  $\Delta t$  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  $T_S = 10 \mu\text{s}$  eintreten. Dieser Untergrund von Signalen verteilt sich dabei gleichmäßig über alle Kanäle. Dies liegt daran, dass alle Dauern zwischen erstem und zweiten Myon, aufgrund der Unabhängigkeit der Ereignisse 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  $\lambda$  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  $P_{\text{ges}}$  ergibt sich über die Summe der Wahrscheinlichkeiten mit  $k \geq 1$

$$P_{\text{ges}} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda^k}{k!} \exp(-\lambda) = 0,1196 \cdot 10^{-3} \quad .$$

Dies multipliziert mit der Gesamtmessdauer  $T_{\text{ges}}$  ergibt die Gesamtanzahl der erwarteten Untergrundmyonen

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

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

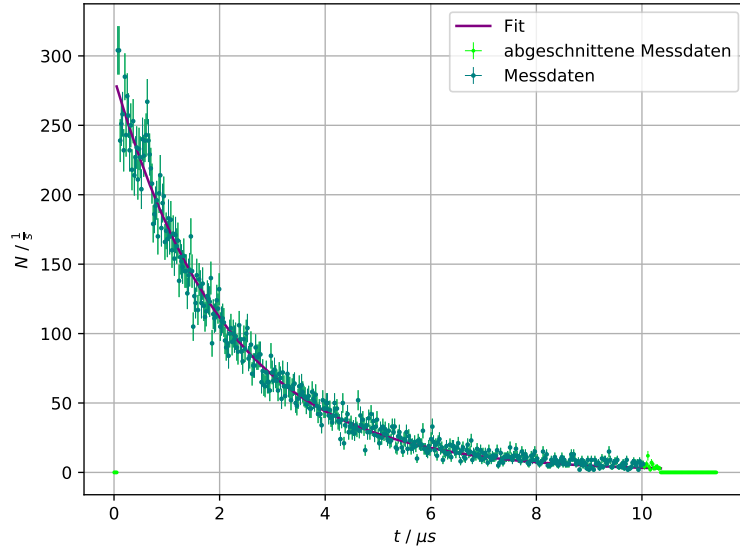
## 6.4 Bestimmung der mittleren Lebensdauer

Bei der Messung der Lebensdauern wurden 26753 Stopp-Signale gemessen. Um einen Fit auf die Lebensdauern zu berechnen, wird die Gleichung 3 um den zuvor berechneten Untergrund pro Kanal  $U_K$  erweitert

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda t) + U_K \quad . \tag{4}$$

Über die in Abschnitt 6.2 bestimmte Kalibrierung des MCA lassen sich die gemessenen Zerfälle pro Bin in gemessene Zerfälle pro Zeit im Tank umrechnen.

Diese Messdaten sind mit dem auf ihnen nach Gleichung 3 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

$$N_0 = 283,806 \pm 1,884$$

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

Die Ausgleichsrechnung findet allerdings nicht auf allen Messwerten statt, da Messwerte entfernt wurden. Dies geschah für Messdauern, für welche  $N = 0$  gemessen wurde. Für spätere Messwerte liegt das daran, dass sie zu Bins gehören, die mit Zeiten größer der Suchzeit korrespondieren. Dies ist nach der in Abschnitt 6.2 durchgeführten Ausgleichsrechnung ab dem Bin 449 der Fall. Die frühen entfernten Messwerte gehören zu Bins, welche nach der Kalibrierung zu negativen  $\Delta t$  gehören würden. Da dies beides unphysikalische Werte sind, wurden sie in den Rechnungen ignoriert.

Aus den Fitparametern lässt sich die mittlere Lebensdauer  $\tau$  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. Bei den weiteren Messungen sind allerdings keine weiteren Probleme aufgetreten.

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

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

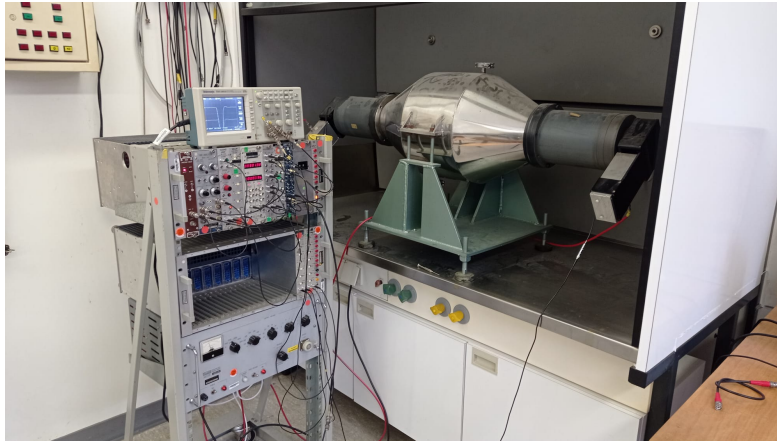
bestimmen. Sie ergibt sich zu  $\Delta\tau = (3,2 \pm 0,9) \%$ . Daraus lässt sich erkennen, dass der errechnete Wert im Rahmen der Standardabweichung sehr gut mit dem Literaturwert übereinstimmt. Dies lässt sich über die lange Messdauer und die damit im Verhältnis kleine Unsicherheit nach Poisson erklären. 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 Suchzeit  $T_S$  des Monoflops erklären, welcher weiter feinjustiert werden kann um den Untergrund zu minimieren. Außerdem wurden für die Berechnung Bins ignoriert, in denen sich Messwerte befanden, weil sie in Bins lagen, die mit errechneten Zeiten größer der Suchzeit korrespondieren. Bei 460 nicht leeren Bins haben 10 Bins am Ende der Kurve allerdings einen zu vernachlässigbaren Einfluss auf die Ausgleichsrechnung.

Bei der Bestimmung der idealen Verzögerungszeit wurden die Zeiten  $\Delta t_{\text{Verz},1} = (3 \pm 4) \text{ ns}$  und  $\Delta t_{\text{Verz},2} = (9 \pm 5) \text{ ns}$  bestimmt. Diese besitzen eine große Unsicherheit und weichen in ihren Nennwerten stark voneinander ab. Der Wert  $\Delta t_{\text{Verz},2}$  liegt auch am Rande seines Plateaus, was ihn zu einer schlechten Wahl für eine Verzögerungszeit macht, da bei leichten Abweichungen die Zählraten stark schwanken können. Durch Abschätzen aus den Grafiken lässt sich eine Verzögerungszeit, die zentral auf dem Plateau liegt, zu  $\Delta t = 2 \text{ ns}$  bestimmen.  $\Delta t_{\text{Verz},1}$  stimmt im Rahmen der Messunsicherheiten mit diesem Wert überein. Der Wert  $\Delta t_{\text{Verz},2}$  nicht. Allerdings ist  $\Delta t = 2 \text{ ns}$  auch kein Theoriewert, sondern nur eine grafische Abschätzung. Da vermutlich mit einem vollkommen anderen Verzögerungszeit die weiteren Messungen durchgeführt wurden, haben die schlechten Ergebnisse dieser Auswertung keinen Einfluss auf die weiteren Messungen.

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 MgO<sub>2</sub>

Pulsbreite: 20 ns

Delay in s	Messzeit in s	Pulsanzahl nach $\Delta t$	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
negativer Delay	-6 ns	19,98	496
Delay	-8 ns	20,26	478
negativer Delay	-10 ns	20,00	507
Delay	-12 ns	20,24	409
negativer Delay	-14 ns	19,93	327

Abbildung 7: Die Messwerte der Verzögerungzeitmessungen.

Pulsbreite 10 ns		
Delays in ns	Messzeit in ns	Zahl Pulsen Zahl hoch kein Zähl
0 ns	19,98	458
1 ns	20,04	457
2 ns	20,34	496
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.