

V01

Lebensdauer kosmischer Myonen

Samuel Haefs

samuel.haefs@tu-dortmund.de

David Venker

david.venker@tu-dortmund.de

Durchführung: 28.11.2022

Abgabe: 13.12.2022

Korrektur: 22.02.2023

TU Dortmund – Fakultät Physik

1 Zielsetzung

Ziel dieses Versuchs ist die Bestimmung der Lebensdauer von Myonen mittels eines Szintillators, unter Berücksichtigung der Untergrundereignisse.

2 Theorie

2.1 Das Myon

Myonen sind Elementarteilchen des Standardmodells der Teilchenphysik. Die Fermionen des Standardmodells sind in drei Generationen eingeteilt, wobei das Myon der 2. Generation angehört. Es ähnelt dabei stark dem Elektron aus der 1. Generation. So besitzen beide Teilchen einen Spin $S = \frac{1}{2}$ und eine Ladung von $q = -e$. Das Myon ist mit einer Masse von $m = 105,658 \text{ MeV}$ über 200 mal schwerer als das Elektron.

Die Myonen die auf der Erdoberfläche ankommen stammen aus Wechselwirkungen der primären kosmischen Strahlung mit der Atmosphäre. Dort entstehen größtenteils geladene Pionen, die wiederum wie folgt zerfallen:

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

Die entstandenen Myonen haben eine durchschnittliche Lebensdauer von $\tau = 2,197 \mu\text{s}$ [4]. Myonen zerfallen über:

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

2.2 Lebensdauer

Alle instabilen Teilchen besitzen notwendigerweise eine mittlere Lebensdauer. Nach dieser Zeit zerfallen sie in andere Teilchen. Allgemein ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen in der Zeit dt zerfällt

$$dW = \lambda dt. \tag{1}$$

Dabei ist λ die Zerfallskonstante für diesen Zerfall. Wird diese Überlegung auf eine Anzahl N Teilchen angewendet, definieren wir die Änderung der Teilchenzahl dN . Die Änderung der Teilchenzahl in der Zeit dt ist dann definiert als

$$dN = -N\lambda dt. \tag{2}$$

Diese Differentialgleichung kann mit dem Ansatz

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t) \tag{3}$$

gelöst werden. Damit erhalten wir das Zerfallsgesetz, welches zu jedem Zeitpunkt t angibt, wie viele Teilchen von den ursprünglich N_0 noch nicht zerfallen sind. Aus der Zerfallskonstante kann die mittlere Lebensdauer $\tau = \frac{1}{\lambda}$ bestimmt werden.

2.3 Untergrund

Der Versuch basiert darauf, dass Myonen und ihre Zerfallsteilchen die Elektronen ein Signal im Szintillator auslösen. Zwischen Myon und Elektron kann dabei nicht unterschieden werden. Es ist also möglich, dass ein zweites Myon ein Signal auslöst und später als ein Elektron gewertet wird. Um diesen Untergrund in der Auswertung zu berücksichtigen werden einige Vorüberlegungen getroffen. Die Anzahl gemessener Myonen n folgt einer Poissonverteilung

$$p_\lambda(n) = \frac{\lambda^n}{n!} \cdot \exp -\lambda, \quad (4)$$

wobei

$$\lambda = \frac{N_{\text{starts}}}{t_{\text{ges}}} \cdot T_s \quad (5)$$

der Erwartungswert der Verteilung ist. Hierbei ist N_{starts} die Anzahl der detektierten Startimpulse, also aller gemessenen Myonen in der Messzeit t_{ges} . Die Suchzeit T_s ist die Zeitspanne in der auf ein Elektronsignal gewartet wird, nachdem ein Startimpuls gemessen wurde. Der Untergrund kann über

$$U = N_{\text{starts}} \cdot p_\lambda(1) \quad (6)$$

abgeschätzt werden. Mit $p_\lambda(1)$ erhält man die Wahrscheinlichkeit dafür, dass genau ein Myon während der Suchzeit in den Szintillator trifft und die Messung verfälscht. Jedes weitere Myon würde wieder ein Startsignal auslösen.

3 Aufbau

Der Aufbau dieses Versuchs wird im nachfolgenden Abschnitt genauer erklärt. Das Schaltbild ist in Abbildung 1 dargestellt. Die eigentliche Detektion der Myonen findet mit einem Szintillator statt. Das Szintillatormaterial wird aufgrund der eintreffenden geladenen Teilchen ionisiert und Photonen anschließend emittiert. Die angeschlossenen Photomultiplier (PMT) werden über eine Hochspannungsquelle betrieben und verstärken die eintreffenden Photonen zu einem elektrischen Signal.

Das entstandene Signal wird beidseitig aus dem Szintillator jeweils in eine Verzögerungsleitung geschickt. Eine Verzögerungsleitung besitzt eine variable Leitungslänge, womit das elektrische Signal zeitlich verzögert werden kann. Anschließend gelangen die Signale in einen Diskriminator. Sollte das Signal eine festgelegte Signalstärke übersteigen, wird es in einen konstanten Impuls umgewandelt, dessen Signallänge einstellbar ist. Die Nutzung von zwei Diskriminatoren verhindert, dass spontan ausgelöste Signale der Photomultiplier als Myon gezählt werden. Wird im Szintillator ein Myon detektiert, sollten zwei Signale aus den beiden Diskriminatoren an die Koinzidenz übermittelt werden. Nur wenn innerhalb einer eingestellten Koinzidenzzeit zwei Signale die Koinzidenz erreichen, gibt sie ein Signal in den zweiten Teil der Schaltung weiter.

Das Signal aus der Koinzidenz wird aufgeteilt. Einerseits gelangt das Signal zu einem AND-Gatter, das als Startpunkt der Messung dient. Ein AND-Gatter benötigt jedoch

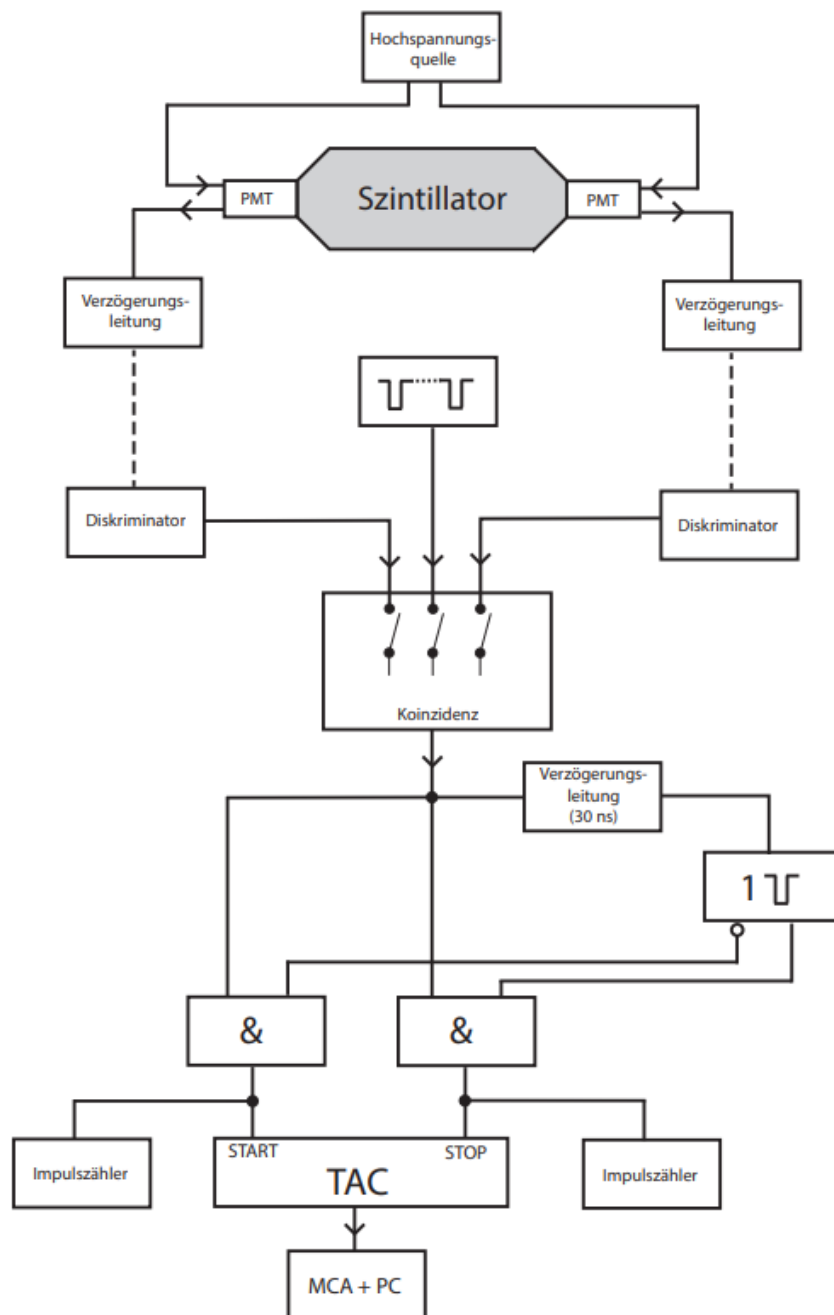


Abbildung 1: Skizze der verwendeten Schaltung. Im oberen Teil der Schaltung werden Signale detektiert und im unteren Teil die Zeit zwischen den Signalen gemessen. [1]

zwei aktivierte Eingänge um ein Signal weiterzugeben. Der zweite Eingang ist mit einem Monoflop verbunden, welcher in seinem Grundzustand über normale Ausgänge ein invertiertes Signal ausgibt und über invertierte Ausgänge ein Signal. Das Start AND-Gatter ist mit einem invertierten Ausgang verbunden. Es wird also aktiviert, sobald ein Signal der Koinzidenz es erreicht. Das Signal erreicht einen Impulszähler, welcher die Anzahl aller Start-Impulse zählt. Außerdem erreicht es den Start-Eingang des TAC (*Time amplitude converter*). Dieser misst die Zeit zwischen Start- und Stoppsignal und wandelt diese in eine Amplitude um.

Das ursprüngliche Signal aus der Koinzidenz wird außerdem über eine Verzögerungsleitung um etwa $\Delta t = 30 \text{ ns}$ verzögert und dann an den Monoflop übertragen. Daraufhin begibt sich der Monoflop in einen angeregten Zustand. Alle Ausgänge ändern somit ihr Ausgangssignal. Das inverse Signal, welches an das Start AND-Gatter geleitet wird, ist jetzt deaktiviert und verhindert so weitere Startmessungen. Allerdings aktiviert der nicht invertierte Ausgang nun den Stopp AND-Gatter. Dieser angeregte Zustand wird für eine Suchzeit T_s beibehalten. In dieser Zeit wird auf ein Signal der Elektronen, die aus dem Myonzerfall entstanden sind, gewartet. Dieses Zerfallssignal durchläuft den ersten Teil der Schaltung und gibt über die Koinzidenz ein Signal an das Stopp AND-Gatter. Dort sind nun beide Eingänge aktiviert und analog zum Start AND-Gatter wird der Impuls gezählt und an den TAC weitergegeben. Dieser beendet seine Messung und übergibt die Amplitude an den Vielkanalanalysator. Sollte innerhalb der Suchzeit kein weiteres Signal eintreffen, begibt sich der Monoflop wieder in den Grundzustand und eine neue Startmessung kann beginnen. Der Vielkanalanalysator erhält alle im Experiment gemessenen Zerfallszeiten und ordnet sie den entsprechenden Kanälen zu.

4 Durchführung

Bevor die komplette Schaltung aufgebaut wird, werden die einzelnen Bauteile überprüft und kalibriert. Wenn die Photomultiplier mit Strom versorgt werden, sollten am Oszilloskop Signale erkennbar sein. Diese Signalarate wird im Folgenden über die Schwellspannungen an den Diskriminatoren auf etwa $30 \text{ Signale} \cdot \text{s}^{-1}$ eingestellt. Um die Impulse zu zählen wird zusätzlich ein Impulszähler angeschlossen. Die Pulsdauer der Diskriminatoren wird am Oszilloskop überprüft und auf etwa $\Delta t = 10 \text{ ns}$ festgelegt.

Im nächsten Schritt wird die Schaltung bis zur Koinzidenz aufgebaut und der dortige Ausgang überprüft. Dafür wird das Ausgangssignal der Koinzidenz an einen Impulszähler angeschlossen und systematisch die Verzögerung an einer der Verzögerungsleitungen erhöht. Wichtig ist hierbei, dass der Messbereich groß genug ist, damit die Halbwertsbreite bestimmt werden kann. Die gleiche Messung wird mit der anderen Verzögerungsleitung durchgeführt. Nach der Messung wird eine Verzögerung ausgewählt, bei der die Signalarate etwa $20 \text{ Signale} \cdot \text{s}^{-1}$ beträgt.

Der restliche Teil der Schaltung wird gemäß Abbildung 1 aufgebaut. Allerdings wird der Doppelimpulsgenerator zur Kalibrierung an die Koinzidenz angeschlossen. Der Doppelimpulsgenerator erzeugt zwei zeitlich getrennte Impulse mit variablen Zeitabstand. Damit kann überprüft werden welche Zerfallszeit in welchen Kanal des Vielkanalanalysators

eingeordnet wird. Es werden mindestens zehn Messwerte im Bereich $0,3\,\mu\text{s}$ bis $9,9\,\mu\text{s}$ aufgenommen. Nach dieser Messung werden die Photomultiplier wieder angeschlossen und die Schaltung sollte nun Abbildung 1 entsprechen. Die eigentliche Messung der Lebenszeit läuft nun für etwa 44 h.

5 Auswertung

5.1 Verzögerungszeit

Im Folgenden wird für Messgrößen, die eine Anzahl beschreiben eine Poisson-verteilte Messunsicherheit $\sigma = \sqrt{N}$ angenommen. In weiteren Rechnungen wird mithilfe der Python-Bibliothek *uncertainties*[3] die Fehlerfortpflanzung durchgeführt.

Die in einem Zeitraum von 10 s gemessenen Impulse N bei eingestellter Verzögerungszeit t sind in Tabelle 1 aufgelistet. Eine Verzögerung auf der linken bzw. rechten Leitung entspricht einer negativen bzw. positiven Verzögerungszeit.

Tabelle 1: Die Anzahl detektierter Ereignisse N in Abhängigkeit der eingestellten Verzögerungszeit t der Verzögerungsleitungen. Eine Verzögerung auf der linken bzw. rechten Leitung entspricht einer negativen bzw. positiven Verzögerungszeit. Die Messzeit beträgt jeweils 10 s.

t / ns	Anzahl Impulse N in 10 s	t / ns	Anzahl Impulse N in 10 s
-28	0	1	215
-26	0	2	227
-24	0	3	237
-22	0	4	260
-20	1	6	281
-18	9	8	300
-16	10	10	255
-14	23	12	234
-12	35	14	162
-10	57	16	96
-8	99	18	75
-6	168	20	45
-4	183	22	25
-3	188	24	20
-2	205	26	10
-1	221	28	6
0	212		

Die Messwerte werden in einen Anstiegs- und Abstiegsbereich unterteilt. Wird das Signal eines Photomultipliers zu stark verzögert, löst die Koinzidenz kein Signal aus. Im mittleren Bereich wäre ein Plateau zu erwarten, dieses wird in diesen Daten nicht beobachtet. Statt die Gesamtanzahl gemessener Impulse in einem bestimmten Zeitraum wird die

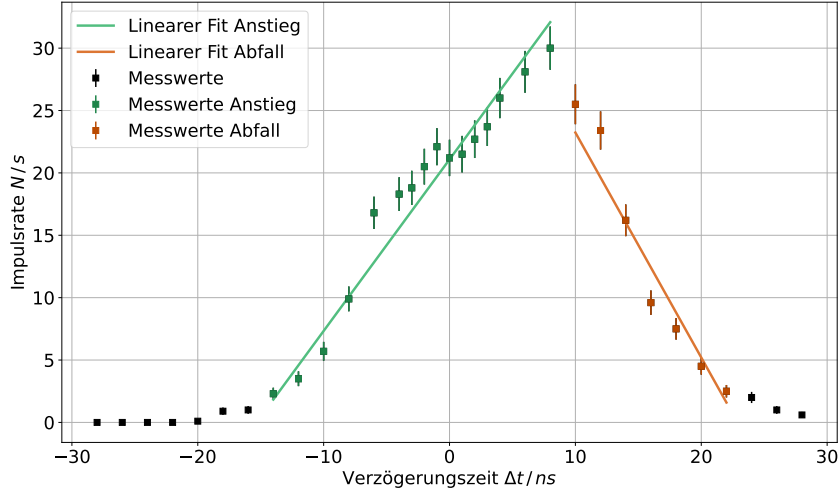


Abbildung 2: Die gemessene Ereignisrate N in Abhängigkeit der Verzögerungszeit Δt . Die Messwerte werden in zwei Bereiche unterteilt, wobei die ersten und letzten Messwerte nicht berücksichtigt werden. Der Anstieg und Abfall wird näherungsweise jeweils durch einen linearen Fit dargestellt.

Impulsrate pro Sekunde betrachtet. Anstiegs- und Abstiegsbereich folgen einem linearen Verlauf und daher wird ein linearer Fit der Form

$$N = a \cdot t + b$$

mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate (*scipy.optimize.curve_fit*[2]) durchgeführt. Aus der Ausgleichsrechnung folgen die Parameter

$$\begin{aligned} a_{\text{Anstieg}} &= (1,37 \pm 0,06) \cdot 10^9 \frac{1}{\text{s}^2}, & b_{\text{Anstieg}} &= (21,08 \pm 0,61) \frac{1}{\text{s}}, \\ a_{\text{Abfall}} &= (-1,80 \pm 0,20) \cdot 10^9 \frac{1}{\text{s}^2}, & b_{\text{Abfall}} &= (41,27 \pm 3,83) \frac{1}{\text{s}}. \end{aligned}$$

Das Maximum ergibt sich als Schnittpunkt der Geraden und kann auf

$$N_{\text{Max}} = (29,81 \pm 0,72) \frac{1}{\text{s}} \quad (7)$$

bestimmt werden. Aus den Schnittpunkten der Ausgleichsgeraden mit der halben maximalen Höhe N_{Max}

$$\begin{aligned} t_{\text{Anstieg}} &= (-4,49 \pm 0,40) \text{ ns} \\ t_{\text{Abfall}} &= (14,62 \pm 2,67) \text{ ns} \end{aligned}$$

kann die Halbwertsbreite als Differenz der Schnittpunkte zu

$$\Delta t = t_{\text{Abfall}} - t_{\text{Anstieg}} = (19,11 \pm 2,70) \text{ ns} \quad (8)$$

bestimmt werden. Die Messwerte und Ausgleichsgeraden sind in Abbildung 2 dargestellt. Um im Folgenden eine möglichst hohe Impulsrate zu messen, wird die Verzögerungszeit auf $\Delta t = 8 \text{ ns}$ eingestellt.

5.2 Kalibration des Vielkanalanalysators

Der Vielkanalanalysator ordnet ein Ereignis einem Kanal zu. Jeder Kanal deckt ein definiertes Zeitintervall ab. Die mittlere Zeit jedes Kanals wird mithilfe eines Impulsgenerators bestimmt.

Die ermittelten Kanäle für die eingestellten Zeitabstände zwischen zwei Impulsen sind in Tabelle 2 gelistet. Die Kanäle sind mit dem Impulsabstand linear korreliert. Ein linearer

Tabelle 2: Die ermittelten Kanäle am Vielkanalanalysator in Abhängigkeit des eingestellten Impulsabstands am Impulsgenerator.

$t / \mu\text{s}$	Kanal
0.5	4
1	16
2	38
3	61
4	84
5	107
6	129
7	152
8	175
9	197
9.9	218

Fit der Form

$$t = a \cdot ch + b \quad (9)$$

wird durchgeführt, wobei ch die Kanäle („channel“) im Bereich $[0, 511]$ und t den Impulsabstand beschreibt. Die Ausgleichsgerade mit den Parametern

$$a_{\text{Kalibration}} = (0,0440 \pm 0,0001) \text{ s}, \quad b_{\text{Kalibration}} = (0,3125 \pm 0,0079) \text{ s}$$

und die Messwerte sind Abbildung 3 abgebildet. Jedem Kanal kann jetzt eine Zeit zugeordnet werden.

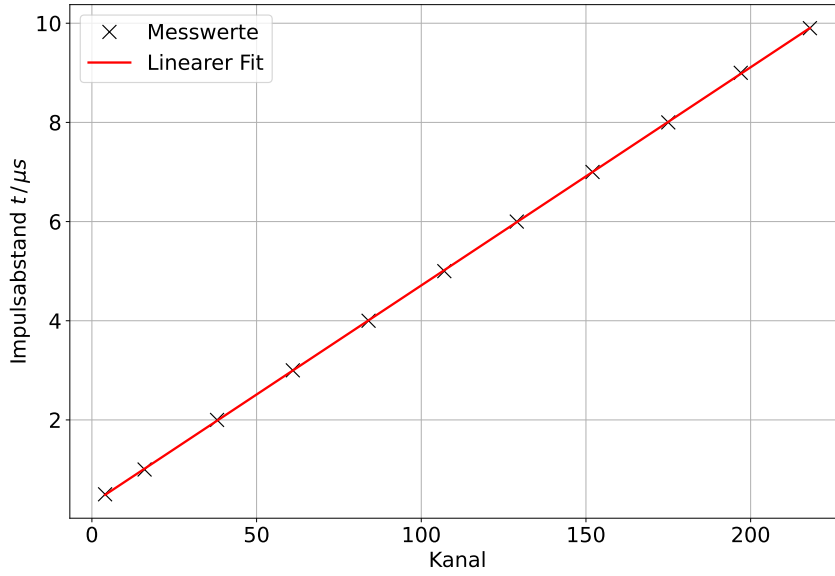


Abbildung 3: Die ermittelten Kanäle des Vielkanalanalysators in Abhängigkeit des eingestellten Impulsabstands. Ein linearer Fit verdeutlicht die lineare Korrelation zwischen den Variablen.

5.3 Statistische Abschätzung der Untergrundereignisse

Die eigentliche Messung der Lebensdauer der Myonen umfasst eine Messzeit von

$$t_{\text{mess}} = 158\,234\,\text{s}.$$

Die Gesamtanzahl der Start- N_{Start} und Stoppsignale N_{Stop} beträgt

$$N_{\text{Start}} = 4\,509\,112,$$

$$N_{\text{Stop}} = 17\,526.$$

Durch ein eintreffendes Myon wird das Startsignal ausgelöst. Zerfällt das Myon in der Suchzeit $T_S = 10\,\mu\text{s}$ wird ein weiteres Signal, das Stoppsignal detektiert. Im Folgenden wird die Untergrundrate mit statistischen Methoden abgeschätzt. Die Ereignisrate beträgt im Durchschnitt etwa $n = 28,5\,\frac{1}{\text{s}}$. Die Wahrscheinlichkeit, dass während der Suchzeit T_S ein weiteres Myon in den Detektor trifft folgt einer Poisson-Verteilung. Der Untergrund wird mittels Gleichung 6 auf

$$N_{\text{Untergrund}} = 1283 \tag{10}$$

abgeschätzt. Dabei verteilt sich der Untergrund auf alle Kanäle.

5.4 Lebensdauer kosmischer Myonen

Die Lebensdauer der Myonen τ wird mithilfe einer exponentiellen Ausgleichskurve bestimmt. Zuerst wird der Untergrund als Fit-Variable U_1 behandelt. Es wird eine Ausgleichsrechnung mit der Funktion

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} + U_1 \quad (11)$$

durchgeführt. Dabei werden die Kanäle im Bereich $[4, 218]$ beachtet. Die ersten vier Kanäle

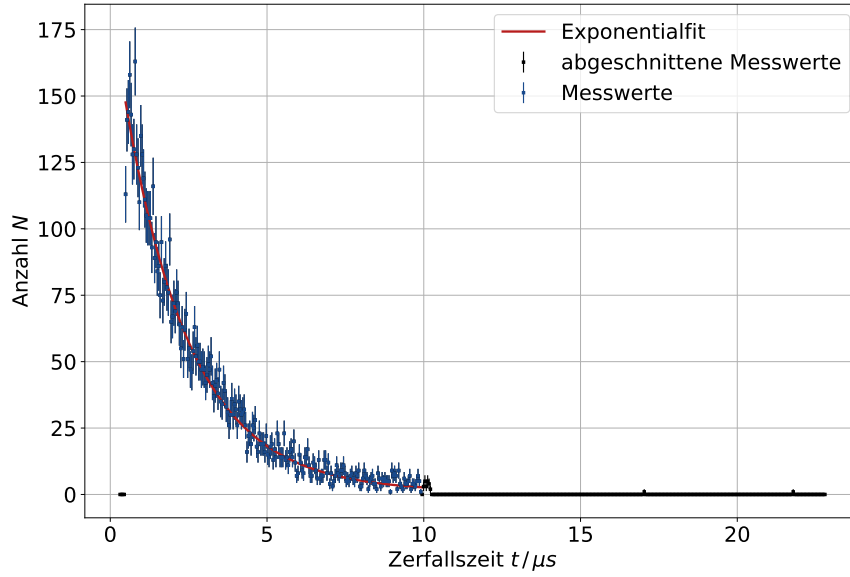


Abbildung 4: Die Anzahl detektierter Ereignisse N die ein Start- und Stoppsignal ausgelöst haben in Abhängigkeit der gemessenen Zerfallszeit t . Die exponentielle Ausgleichskurve führt direkt zur Lebensdauer der kosmischen Myonen.

weisen eine sehr geringe Ereignisrate auf, obwohl im Anfangsbereich hohe Ereignisraten erwartet werden. Ein möglicher Grund ist, dass der Vielkanalanalysator oder der TAC zu kurze Zerfallszeiten nicht erfassen kann. Setzt man den Kanal 218 in Gleichung 9 ein, so erhält man eine Zerfallszeit von $\sim 10 \mu\text{s}$. Dies entspricht der Suchzeit T_S . Alle weiteren Kanäle weisen daher sehr geringe bis keine Ereignisse auf und dürfen nicht in der Ausgleichsrechnung berücksichtigt werden.

Die betrachteten Kanäle werden analog in die entsprechenden Zerfallszeiten umgerechnet und anschließend der Fit durchgeführt. Dabei ergibt sich für die Lebensdauer $\tau = 1/\lambda$ und für den Untergrund U_1

$$\tau_1 = (2,11 \pm 0,05) \mu\text{s}, \quad (12)$$

$$U_1 = (1,05 \pm 0,41). \quad (13)$$

Die Messwerte und exponentielle Ausgleichskurve sind in Abbildung 4 dargestellt.

Zuletzt wird der in Unterabschnitt 5.3 statistisch abgeschätzte Untergrund zur Bestimmung der Lebensdauer der kosmischen Myonen verwendet. In der exponentiellen Ausgleichsfunktion

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} + U_2 \quad (14)$$

wird der Untergrund nicht weiter als Fit-Parameter behandelt. U_2 ist hier der statistisch ermittelte Untergrund. Es wird angenommen, dass sich der Untergrund (Gleichung 10) gleichmäßig auf alle Kanäle verteilt. Dabei werden weiter die Kanäle $[4, 218]$ betrachtet. Der Untergrund pro Kanal ergibt sich dann zu

$$U_2 = 5,97. \quad (15)$$

Aus einer Ausgleichsrechnung mit Gleichung 14 folgt

$$\tau_2 = (1,69 \pm 0,04) \mu\text{s} \quad (16)$$

für die Lebensdauer der Myonen unter Beachtung des statistisch abgeschätzten Untergrunds. Die Anzahl Ereignisse N für die Zerfallszeiten der Kanäle $[4, 218]$, sowie die Ausgleichskurve sind in Abbildung 5 dargestellt.

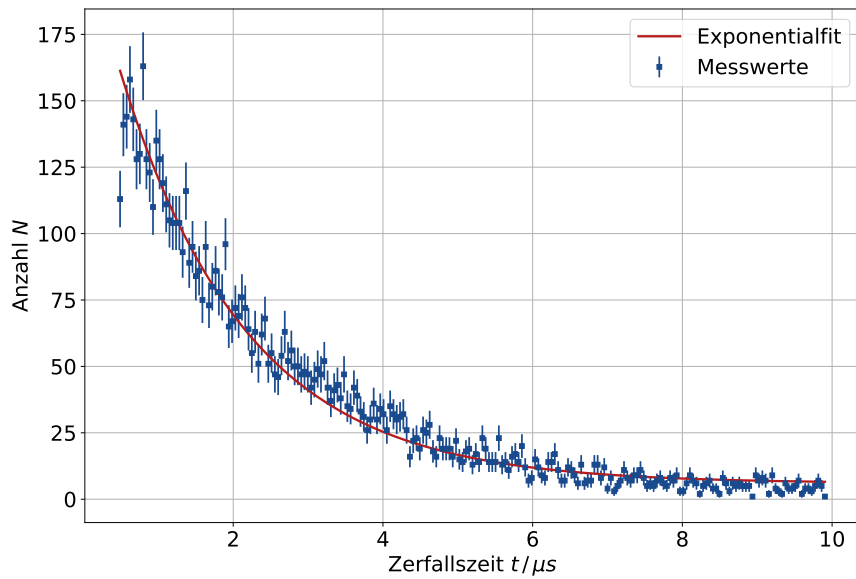


Abbildung 5: Die Anzahl detektierter Ereignisse N die ein Start- und Stoppsignal ausgelöst haben in Abhängigkeit der gemessenen Zerfallszeit t . Die exponentielle Ausgleichskurve berücksichtigt den statistisch ermittelten Untergrund als Konstante.

6 Diskussion

Bei der Untersuchung der Verzögerungszeit wurde nicht wie zu erwarten ein Plateau gemessen. Die bestimmte Halbwertsbreite $\Delta t = (19,11 \pm 2,70) \text{ ns}$ entspricht nicht der eingestellten doppelten Impulsdauer $\Delta t_{\text{th}} = 2 \cdot 20 \text{ ns}$. Die Einstellung der Impulsdauer mittels Oszilloskop wurde nicht korrekt durchgeführt. Beim Ablesen der Impulsdauer wurde lediglich auf den Abstand der Peaks geachtet und somit die Impulsbreite vernachlässigt. Es wurde also nicht beachtet, dass das Signal eine Ausdehnung besitzt. Eine bessere Möglichkeit wäre es gewesen, den Impulsabstand auf halber Höhe zu bestimmen.

Die gemessene Lebensdauer der kosmischen Myonen wurde über zwei Methoden bestimmt. Unter Beachtung des Untergrunds als Parameter in der Ausgleichsrechnung ergibt sich für die Lebensdauer $\tau_1 = (2,11 \pm 0,05) \mu\text{s}$. Verglichen mit dem Literaturwert $\tau_{\text{lit}} = 2,197 \mu\text{s}$ [4] weicht die errechnete Lebensdauer um 3,96 % ab.

Wird der Untergrund mittels statistischer Abschätzung berücksichtigt folgt für die Lebensdauer $\tau_2 = (1,69 \pm 0,04) \mu\text{s}$. Der über diese Methode errechnete Wert weist mit 23 % eine deutlich größere Abweichung zum Literaturwert auf. Auffällig ist, dass der mittels Poisson-Verteilung abgeschätzte Untergrund $U_2 = 5,97$ verglichen mit dem mittels Ausgleichsrechnung bestimmte Untergrund $U_1 = (1,05 \pm 0,41)$ überschätzt wird. Ein möglicher Grund ist, dass die Ausreißer nicht in der Ausgleichsrechnung berücksichtigt werden, aber einen Beitrag zum Untergrund liefern können. Um die statistische Aussagekraft der Daten zu erhöhen kann ein größerer Szintillatortank verwendet werden. Ebenso kann die gesamte Messzeit des Experiments erhöht werden.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *V01 - Lebensdauer kosmischer Myonen*. 2022.
- [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] R. L. Workman u. a. „Review of Particle Physics“. In: *PTEP* 2022 (2022), S. 083C01. DOI: 10.1093/ptep/ptac097.