

V 01

Lebensdauer der Myonen

Timo Gräßer
timo.graesser@udo.edu

Jasper Karl Lammering
jasper.lammering@udo.edu

Durchführung: 4.7.18

Abgabe: 12.08.18

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1. Theorie	3
1.1. Das Myon	3
1.2. Myon-Zerfall	3
1.3. Bestimmung der Lebensdauer	4
1.4. Messverfahren	4
2. Durchführung	4
2.1. Aufbau	4
2.2. Einstellen der Apparatur	6
3. Auswertung	7
3.1. Justage	7
3.2. Kalibration	8
3.3. Berechnung der theoretischen Untergrundrate für die experimentellen Gegebenheiten	9
3.4. Bestimmung der Lebensdauer kosmischer Myonen	10
4. Diskussion	13
Literatur	14
A. Kopie der Originaldaten	14

1. Theorie

1.1. Das Myon

Die Physik der Elementarteilchen wird durch das Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben. Darin werden alle Teilchen nach ihrem Spin in Fermionen und Bosonen eingeteilt, wobei Fermionen einen halbzahligen Spin und Bosonen einen ganzzahligen Spin besitzen. Die Fermionen werden wiederum nach ihrer Fähigkeit stark wechselzuwirken in Quarks und Leptonen eingeteilt. Das in diesem Versuch betrachtete Myon μ gehört zu den Leptonen, es wechselwirkt also nur über die schwache und, da es elektrisch geladen ist, über die elektromagnetische Wechselwirkung. Es bildet zusammen mit seinem zugehörigen Neutrino ν_μ und ihren Antiteilchen μ^+ , $\bar{\nu}_\mu$ die zweite Generation der Leptonen. Seine Masse übertrifft die des Elektrons circa um den Faktor 207. Aus diesem Grund ist es nicht stabil und zerfällt dominant über

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu. \quad (1)$$

1.2. Myon-Zerfall

Dieser Zerfall ist ein statistischer Prozess, was zur Folge hat, dass jedes Myon nach einer unterschiedlich langen Zeit zerfällt. Diese individuelle Zeit hängt aber nicht von dem einzelnen Alter der Teilchen ab. Die Wahrscheinlichkeit dW , dass ein Teilchen im Zeitraum dt zerfällt, ist:

$$dW = \lambda dt. \quad (2)$$

Hierbei ist λ die teilchenspezifische Zerfallskonstante. Damit kann nun die Zahl dN an Teilchen, die in dem Intervall dt zerfallen, bestimmt werden. Bei N betrachteten Teilchen ergibt sich:

$$dN = -N dW = -\lambda N dt. \quad (3)$$

Daraus ergibt sich nach Integration das Zerfallsgesetz für die zeitabhängige Teilchenzahl von zu Beginn N_0 Teilchen:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (4)$$

Ihr Kehrwert definiert die mittlere Lebensdauer τ . Nach der Zeit τ ist die Menge an Teilchen also auf den Bruchteil $1/e$ gesunken. Durch Ableitung nach der Zeit von (4) ergibt sich die Verteilungsfunktion der Lebensdauer t .

$$\frac{dN(t)}{N_0} = \lambda e^{-\lambda t} dt \quad (5)$$

1.3. Bestimmung der Lebensdauer

Die mittlere Lebensdauer des Myons lässt sich theoretisch aus dem arithmetischen Mittel aller Individuallebensdauern bestimmen. Da aber hier aus systematischen Gründen gewisse Wertebereiche (beispielsweise sehr kleine Zeiten aus Auflösungsgründen), nicht gemessen werden können, muss eine andere Methode genutzt werden. Dazu wird die Gleichung (4) mit freiem N_0 und λ an die Werte gefittet.

1.4. Messverfahren

Um hier die Lebensdauer des Myons zu bestimmen werden atmosphärische Myonen, die aus Pion-Zerfällen stammen, genutzt. Die Pionen stammen wiederum aus der Wechselwirkung von hochenergetischen Protonen aus der Höhenstrahlung mit Atomkernen der Luftmoleküle. Als Detektor wird ein Tank mit organischem Szintillatormaterial genutzt. Die einfallenden Myonen erzeugen dort einen Lichtblitz. Wenn ein Myon nun im Detektor komplett abgebremst werden kann, zerfällt es dort gemäß (1) und das ausgesandte Elektron erzeugt bei der Wechselwirkung mit dem Szintillatormaterial einen weiteren Lichtblitz. Der zeitliche Abstand dieser beiden Blitze entspricht der Lebensdauer dieses Myons. Beachtet werden muss die Möglichkeit, dass das negativ geladene Myon von einem Atom eingefangen werden kann und dort den Platz eines Elektrons einnimmt.

2. Durchführung

2.1. Aufbau

In Abbildung 1 wird die Schaltung gezeigt. Im Folgenden werden die einzelnen Bestandteile von oben nach unten kurz beschrieben.

Der zentrale Detektor ist ein 50 l großer Szintillationstank. Wie oben beschrieben ist er mit organischem Szintillator gefüllt. Diese haben im Allgemeinen eine kürzere Ansprechzeit als anorganische. Zur Aufnahme der darin erzeugten Lichtsignale und zur Übersetzung in elektrische Spannungsimpulse sind an den Enden des Tanks Photomultiplier angebracht. Diese können auch durch thermisches Rauschen ein Signal erzeugen. Um dessen Einfluss auf die Messung zu reduzieren wird eine Koinzidenzschaltung aufgebaut, die also nur ein Signal liefert, wenn in beiden SEVs gleichzeitig ein Signal auftritt. Dieses Verfahren funktioniert, weil das Rauschen der beiden SEVs unkorreliert verläuft und deshalb nur ein Myonsignal gleichzeitig in beiden SEVs ein Signal erzeugt. Ein Ausgleich der systematischen elektronischen relativen Verzögerung eines SEVs zum anderen wird durch eine Verzögerungsleitung geleistet. Eine zusätzliche Rauschunterdrückung wird durch Diskriminatoren geleistet, die Signale bis zu einer einstellbaren Schwelle nicht durchlassen. Ein solcher Diskriminator liefert einen Normimpuls wenn diese Schwelle überschritten wird. Die Breite und Höhe dieses Pulses lassen sich einstellen. Da Rauschpulse aufgrund ihrer Entstehung durch einzelne Elektronen kleiner als Signalepulse sind, werden sie reduziert.

Der Koinzidenzschaltung folgend befindet sich die Stoppuhrschaltung. Diese teilt das Signal zunächst auf je einen Eingang zweier logischer AND-Gatter sowie einen Univibrator

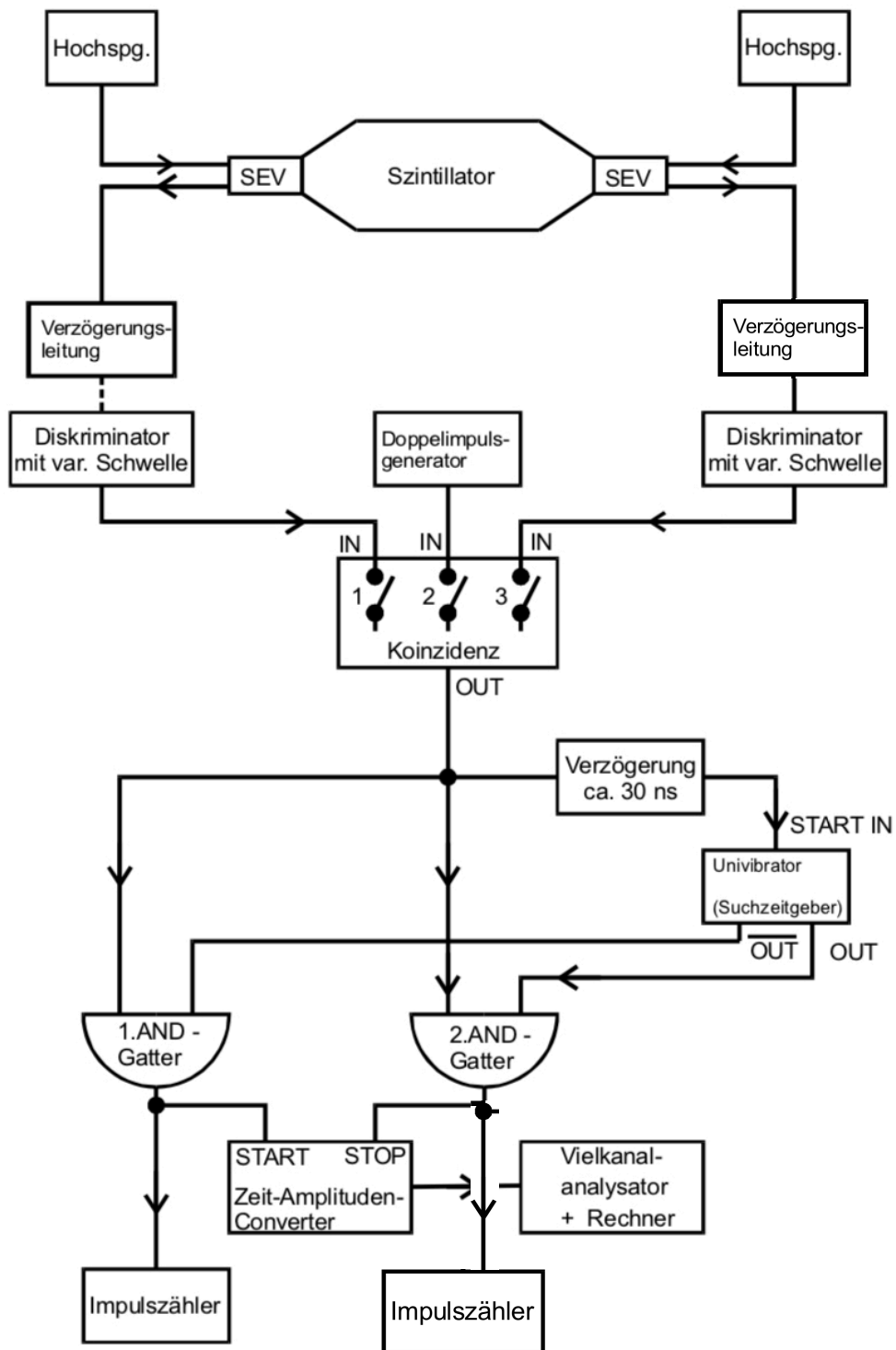


Abbildung 1: Blockschaltbild der hier genutzten Schaltung.[2]

auf. Diese drei Bauteile erhalten immer das Signal. Je nach zeitlichem Abstand zweier Signale, dem damit verbundenen Verhalten des Univibrators und aufgrund der logischen Schaltung werden verschiedene Effekte ausgelöst. Der Univibrator hat einen normalen und einen invertierten Ausgang. Bei eintreffendem Signal gibt zunächst der normale Ausgang das Signal weiter und der invertierte nicht. Dann startet die einstellbare Suchzeit. Ein Signal das innerhalb dieser Zeit eintrifft wird am invertierten Ausgang ausgegeben. Wenn die Zeit abgelaufen ist, ohne dass ein Signal eingetroffen ist, schaltet der Univibrator wieder auf den normalen Ausgang. So bald nun ein Myonsignal in die Schaltung eintritt, erhält das erste AND-Gatter sowohl von der direkten Leitung als auch von der Leitung über den normalen Ausgang des Univibrators ein Signal. Damit sendet es ein Signal weiter an den Start-Eingang des später beschriebenen Zeit-Amplituden-Converter (TAC). Wenn dann ein Signal innerhalb der Suchzeit des Univibrators eintrifft, wird es vom invertierten Eingang ans zweite AND-Gatter geleitet. Dieses erhält also dann an beiden Eingängen ein Signal und sendet so ein Signal an den Stopp-Eingang des TAC. Diese Methode kann benutzt werden, da der mittlere zeitliche Abstand von zwei einfallenden Myonen klein gegenüber ihrer Lebensdauer ist. Ein über den gesamten Zerfallszeitbereich konstanter Untergrund hat seinen Ursprung also darin dass zwei Myonen statistisch bedingt mit einem zeitlichen Abstand von $t < T_S$ in den Tank eintreten. T_S sollte also so groß gewählt werden, dass möglichst viele Messwerte der Zerfallszeiten genommen werden können, aber so klein, dass der Untergrund nicht zu groß wird. Der TAC wandelt den zeitlichen Abstand von Start- und Stopp-Signal in einen dem proportional großen Spannungsimpuls um. Dieser wird an einen Vielkanalanalysator geleitet. Dort wird die Häufigkeit der Pulse ihrer Höhe entsprechend in Kanälen gezählt. Das Histogramm der Kanäle kann im Rechner ausgelesen werden.

2.2. Einstellen der Apparatur

Um sich mit der Apparatur vertraut zu machen, sie aufzubauen und ihre Funktionsweise zu überprüfen werden vor der eigentlichen Messung einige Tests durchgeführt.

Zunächst werden die Impulse aus den SEVs vor und nach den Diskriminatoren am Oszilloskop untersucht. Vorher sollten sie unterschiedliche Eigenschaften besitzen und danach gleich hoch und lang sein. Dabei kann die Breite der Pulse eingestellt werden. Diese sollte klein gegenüber der Lebensdauer der Myonen sein, damit sich zwei Impulse möglichst nicht überlagern. Außerdem wird mit einem Zählwerk überprüft, ob beide Leitungen ähnliche Impulsraten aufweisen und dies mit der Schwelle am Diskriminator eingestellt. Darauf folgend wird untersucht welche Verzögerungszeit zwischen den SEVs die maximale Zählrate nach der Koinzidenzschaltung liefert. Dazu wird die Verzögerung in beide Richtungen variiert und für je zehn Sekunden die Impulszahl gemessen. Außerdem wird die Zählrate nach der Koinzidenzschaltung mit den Zählraten der Eingänge verglichen um die Rauschunterdrückung zu überprüfen.

Als nächstes werden Univibrator und TAC justiert. Die Suchzeit des Univibrators wird etwas größer eingestellt als der Zeitmessbereich des TAC. Mit Hilfe eines Doppelimpuls-generators wird überprüft ob der TAC korrekt arbeitet, also Spannungsimpulse liefert dessen Höhe proportional zum zeitlichen Abstand der Impulse ist. Dies wird am PC mit

Vielkanalanalysator kontrolliert. So wird auch eine Zeitkalibrierung durchgeführt, da man den eingestellten Abstand der Impulse so einem Kanal zuordnen kann.

Um abzuschätzen wie oft Myonen detektiert werden, also auch die die nicht im Behälter zerfallen, wird noch an das erste AND-Gatter ein Zählwerk angeschlossen. Außerdem wird am zweiten AND-Gatter ein Impulszähler angeschlossen um einen Wert für die Anzahl an gemessenen Zerfallszeiten zu erhalten. Mit diesen Werten kann zusammen mit der Messzeit der Untergrund bestimmt werden.

Dann kann mit der eigentlichen Messung begonnen werden, bei der die individuellen Lebensdauern 20 bis 30 Stunden aufgenommen werden und als Histogramm dargestellt werden. Dann kann mit der in Kapitel 1.3 beschriebenen Methode die mittlere Lebensdauer bestimmt werden.

3. Auswertung

Bei allen Zähl-Messwerten wird ein \sqrt{N} -Fehler gemäß der Poissonstatistik angenommen. Alle Funktionenfits in der Auswertung werden jeweils mit der Funktion *curve fit* aus *SciPy v1.1.0* durchgeführt.

3.1. Justage

In den SEVs, den Kabeln und den Diskriminatoren entstehen bei einem Myonsignal unterschiedliche Verzögerungen, sodass es vorkommen kann, dass am Koinzidenzschalter kein Signal weitergegeben wird, obwohl ein Myon in den Detektor eingetroffen ist. Um dies zu vermeiden werden vor beiden Diskriminatoren die Verzögerungen justiert. Um die optimale Verzögerung zu bestimmen werden die Verzögerungen variiert und jeweils die Myonen-Counts für ein 10 s-Messintervall aufgenommen. In Abbildung 2 sind die Messwerte für die Zählrate gegen die Verzögerungszeit aufgetragen. Für das gesamte Experiment wird eine Verzögerungszeitdifferenz von

$$T_V = 3 \text{ ns}$$

eingestellt, da dieser Wert sehr zentral auf dem Plateau liegt. Von den rot markierten Messpunkten wird das arithmetische Mittel und die Standardabweichung bestimmt. Es ergibt sich für die Höhe des Plateaus

$$I_{\text{Plateau}} = (187 \pm 12) \cdot 10^{-1} \text{ s}^{-1}. \quad (6)$$

Außerdem wird jeweils für die schwarz gekennzeichneten Messwerte links vom Plateau und die blau gekennzeichneten Messwerte rechts vom Plateau eine Ausgleichsgerade bestimmt. Für die Geradengleichung

$$I_i(\Delta t) = m_i \Delta t + b \quad (7)$$

ergeben sich die Parameter

$$m_{\text{li}} = (1,76 \pm 0,19) \text{ ns}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad b_{\text{li}} = (282 \pm 19) \cdot 10^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (8)$$

für den linken Fit und

$$m_{\text{re}} = (-1,63 \pm 0,18) \text{ ns}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad b_{\text{re}} = (401 \pm 32) \cdot 10^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (9)$$

für den rechten Fit. Um die Halbwertsbreite des Plateaus zu bestimmen werden zunächst jeweils die Schnittpunkte zwischen halbem Plateaumittelwert und linkem Fit und halbem Plateaumittelwert und rechtem Fit bestimmt. Dabei ergibt sich

$$\Delta t_{\text{li}} = (-107 \pm 16) \cdot 10^{-1} \text{ ns} \quad \Delta t_{\text{re}} = (189 \pm 29) \cdot 10^{-1} \text{ ns}. \quad (10)$$

Die Halbwertsbreite entspricht etwa der doppelten Breite der Rechtecksimpulse und lautet

$$\Delta t_{\frac{1}{2}} = (296 \pm 33) \cdot 10^{-1} \text{ ns}. \quad (11)$$

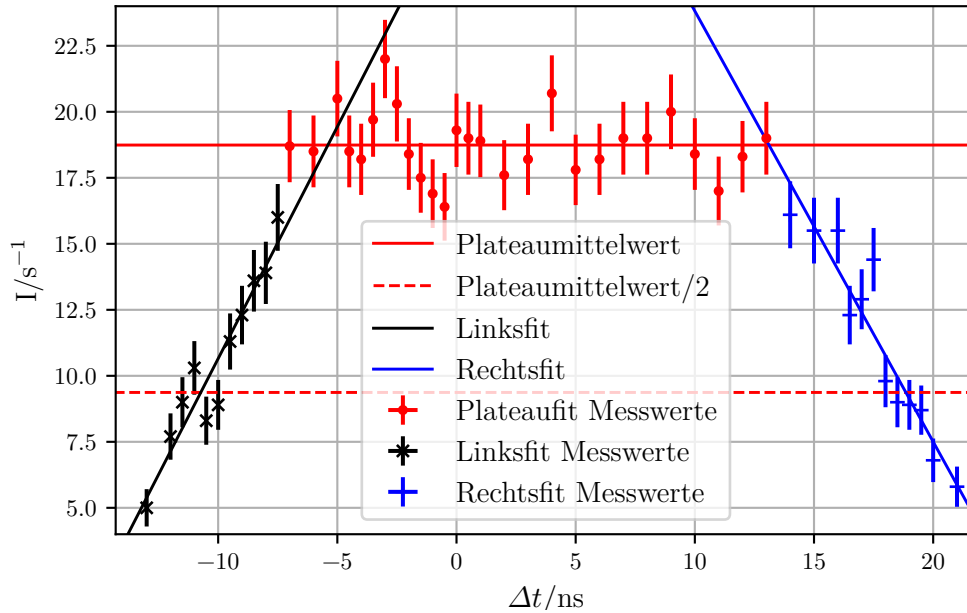


Abbildung 2: Messwerte der Justagemessung zur Bestimmung der Halbwertsbreite und der optimalen Verzögerung zwischen den beiden SEVs. Die Messwerte werden aufgespalten in Plateau-, Links- und Rechts-Messwerte und es wird jeweils ein linearer Fit durchgeführt.

3.2. Kalibration

Die Messwerte der Lebensdauer der Myonen für diverse Zerfallszeitintervalle werden in Kanälen gespeichert. Daher muss eine Kalibrationsmessung zur Umrechnung von

Kanalnummern ch in Zerfallszeiten durchgeführt werden. Die Messwerte sind in Tabelle 1 aufgelistet und in Abbildung 3 graphisch dargestellt. Es wird eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt. Für die Geradengleichung

$$\Delta t(ch) = m_{\text{kal}} \cdot ch + b_{\text{kal}} \quad (12)$$

ergeben sich die Parameter

$$m_{\text{kal}} = (2,236 \pm 0,001) \cdot 10^{-2} \text{ ns} \quad b_{\text{kal}} = (4,01 \pm 0,33) \cdot 10^{-2} \text{ ns}. \quad (13)$$

Die resultierende Ausgleichsgerade ist ebenfalls in Abbildung 3 aufgetragen.

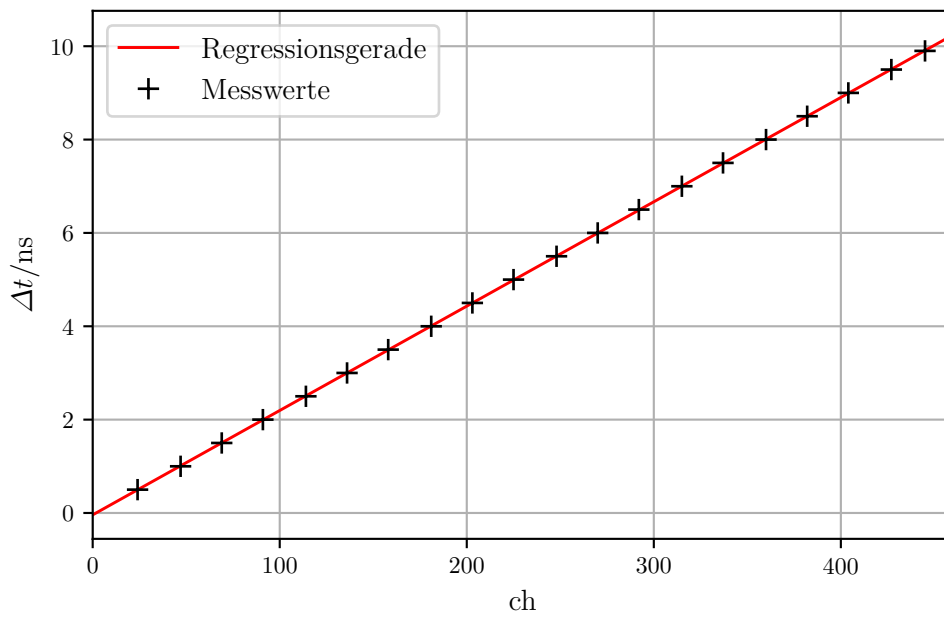


Abbildung 3: Messwerte und Ausgleichsgerade der Kalibrationsmessung zur Umrechnung von Kanalnummern in Zerfallszeiten.

3.3. Berechnung der theoretischen Untergrungrate für die experimentellen Gegebenheiten

Bei der Messung der Lebensdauer kosmischer Myonen mit der in Abschnitt 2 beschriebenen Apparatur tritt das Problem auf, dass Stopp-signale fälschlicherweise durch ein weiteres eintreffendes Myon ausgelöst werden können, anstatt durch den Zerfall des eingefallenen Myons. Über die gesamte Messzeit von

$$t_{\text{mess}} = 85\,721 \text{ s} \quad (14)$$

tritt also ein Untergrund auf, der sich etwa gleichmäßig auf alle Kanäle verteilt, da die Myonen unabhängig voneinander eintreffen. Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass n Myonen bei einem Erwartungswert $\mu(T_S)$ in einer Zeit T_S in den Detektor einfallen, ist gegeben durch die Poissonverteilung

$$p_\mu(n) = \frac{\mu}{n!} e^{-\mu}. \quad (15)$$

Der Erwartungswert $\mu(T_S)$ entspricht dem Wert, wie viele Myonen durchschnittlich in der Suchzeit

$$T_S = 10,3 \mu\text{s} \quad (16)$$

in den Detektor einfallen. Dieser lässt sich berechnen über

$$\mu(T_S) = I_{\text{mess}} \cdot T_S, \quad (17)$$

wobei I_{mess} die durchschnittliche gemessene Rate, mit der die Myonen eintreffen, ist. Diese folgt aus der Messzeit (14) und der gesamten gemessenen Anzahl an Startsignalen

$$N_{\text{start}} = 1\,456\,661 \pm 1207 \quad (18)$$

mit

$$I_{\text{mess}} = \frac{N_{\text{start}}}{t_{\text{mess}}} = (16,99 \pm 0,01) \text{ s}^{-1}. \quad (19)$$

Der gesamte Untergrund während der Messzeit t_{mess} ergibt sich aus der Wahrscheinlichkeit für genau ein eintreffendes Myon innerhalb der Suchzeit T_S gemäß Gleichung (17) multipliziert mit der gesamten Anzahl an Startereignissen

$$U_{\text{ges}} = p_\mu(1) N_{\text{start}} = 254,9 \pm 0,4. \quad (20)$$

Dieser Wert muss noch auf die Anzahl relevanter Kanäle, die innerhalb der Suchzeit T_S echte Myonzerfallssignale oder Untergrund messen, normiert werden. Aus der Kalibrationsgeraden in Abschnitt 3.2 ergibt sich für das Zeitintervall $[0, T_S]$ etwa das Kanal-Intervall $[2, 463]$. Der normierte Untergrund lautet daher

$$U_t = \frac{U_{\text{ges}}}{463 - 2} = 0,5330 \pm 0,0009. \quad (21)$$

3.4. Bestimmung der Lebensdauer kosmischer Myonen

Die Messwerte der Counts N pro Zeitintervall sind in Abbildung 4 graphisch dargestellt. Bei den ersten drei Zeitintervallen bzw. Kanälen werden entgegen der Erwartung einer Exponentialverteilung Null Counts gemessen, weshalb diese Kanäle vernachlässigt werden. Dieselbe Beobachtung wird bei den Kanälen > 463 bzw den Zeitintervallen $> 10,311 \mu\text{s}$ gemacht. Diese Kanäle werden ebenfalls abgeschnitten, da die Suchzeit von T_S dort weder

echte Signale noch Untergrund-Signale zulässt. Der vierte Kanal wird im Folgenden ebenfalls vernachlässigt, da der gemessene Wert von $N = (118 \pm 11)$ counts sehr stark von den anderen umliegenden Messwerten abweicht, was eher auf einen Messfehler, als auf eine statistische Schwankung hindeutet.

Mit den übrigen, in Abbildung 4 in schwarz eingezeichneten Messpunkten wird ein Funktionenfit mit einer modifizierten Exponentialverteilung

$$N_n(t) = N_{0,n}e^{-\lambda_n t} + U_n \quad (22)$$

durchgeführt. Es ergeben sich die Parameter

$$N_{0,n} = (40,3 \pm 0,4) \text{ counts} \quad \lambda_n = (0,4748 \pm 0,0003) \mu\text{s}^{-1} \quad (23)$$

$$U_n = (0,56 \pm 0,08) \text{ counts}. \quad (24)$$

Die berechnete Fitfunktion ist ebenfalls in Abbildung 4 zu sehen. Aus der Zerfallskonstante ergibt sich die Lebensdauer der kosmischen Myonen

$$\tau_n = \frac{1}{\lambda_n} = (2,11 \pm 0,07) \mu\text{s}. \quad (25)$$

Bei diesem Vorgehen wurde der Untergrund U_n numerisch als Fitparameter bestimmt.

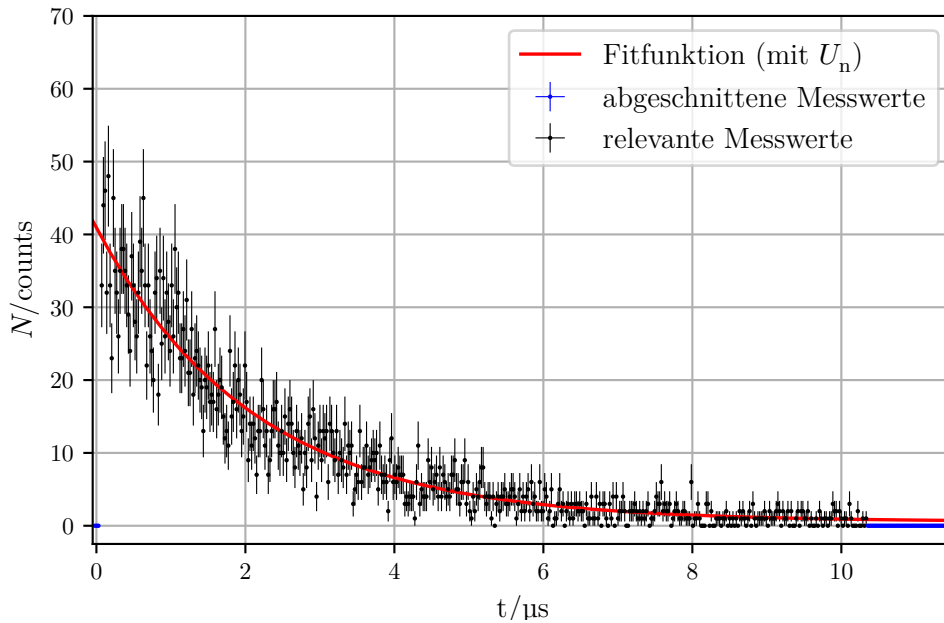


Abbildung 4: Messwerte und Exponentialfit, welcher den Untergrund U_n als Fitparameter berücksichtigt, der Lebensdauer-Messung.

Als nächstes wird die Lebensdauer mit dem in Abschnitt 3.3 theoretisch berechneten Untergrund

$$U_t = (0,5530 \pm 0,0009) \text{ counts} \quad (26)$$

bestimmt. Dazu wird dieser Untergrund von jedem nicht vernachlässigtem Messwert abgezogen und erneut ein Exponentialfit, dieses mal ohne zusätzliche Konstante, gemäß

$$N_t(t) = N_{0,t}e^{-\lambda_t t} \quad (27)$$

durchgeführt. Sowohl die um den theoretischen Untergrund korrigierten Messwerte, als auch die neue Fitfunktion sind in Abbildung 5 graphisch dargestellt. Die zugehörigen berechneten Fitparameter lauten

$$N_{0,t} = (40,3 \pm 0,4) \text{ counts} \quad \lambda_t = (0,4744 \pm 0,0001) \mu\text{s}^{-1}. \quad (28)$$

Damit ergibt sich die Lebensdauer der kosmischen Myonen

$$\tau_t = \frac{1}{\lambda_t} = (2,11 \pm 0,05) \mu\text{s}. \quad (29)$$

Bei diesem Vorgehen wurde der Untergrund U_t wie bereits erwähnt theoretisch berechnet.

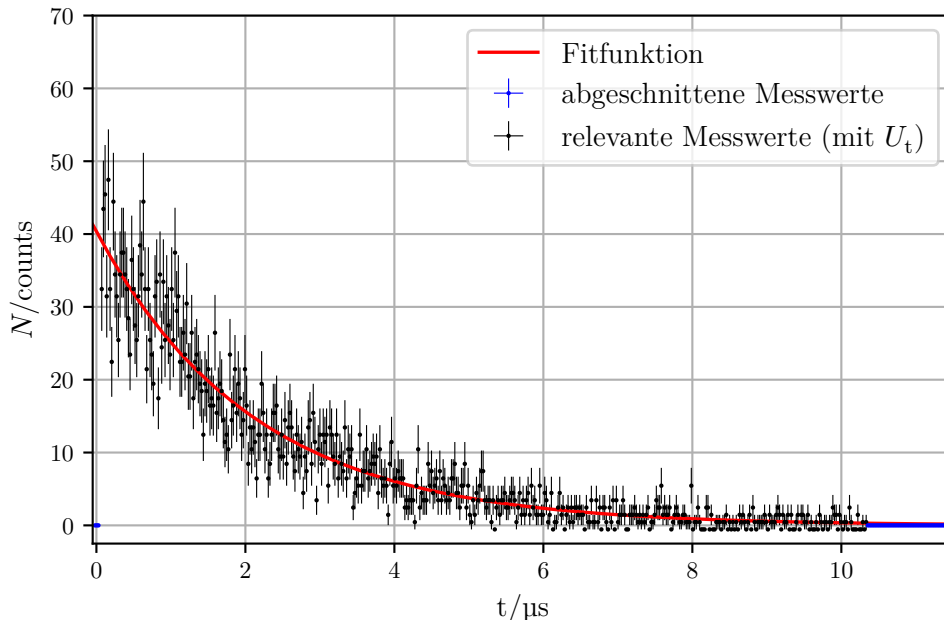


Abbildung 5: Um den Untergrund U_t verschobene Messwerte und Exponentialfit der Lebensdauer-Messung.

ch	$\Delta t/\mu\text{s}$
24	0,5
47	1,0
69	1,5
91	2,0
114	2,5
136	3,0
158	3,5
181	4,0
203	4,5
225	5,0
248	5,5
270	6,0
292	6,5
315	7,0
337	7,5
360	8,0
382	8,5
404	9,0
427	9,5
445	9,9

Tabelle 1: Messwerte der Kalibrationsmessung.

4. Diskussion

Bei der Justage der Verzögerungszeiten ist ein breites Plateau erkennbar, siehe Abbildung 2. Die eingestellte Verzögerungszeit von

$$T_V = 3 \text{ ns}$$

liegt zentral auf diesem Plateau und kann zuverlässig für die Messung verwendet werden. Die Messwerte und der lineare Fit der Kalibrationsmessung sind in Abbildung 3 dargestellt. Die relativen Fehler der Fitparameter lauten

$$\Delta m_{\text{rel}} \approx 0 \% \quad (30)$$

für die Steigung und

$$\Delta b_{\text{rel}} = 8,2 \% \quad (31)$$

für den Abzissenabschnitt und sind damit sehr gering. Die Umrechnung der Messwerte mittels eines linearen Zusammenhangs ist damit verlässlich.

Beim Vergleich des theoretisch berechneten Untergrundwerts (21) und des numerisch bestimmten Untergrundwerts (24) fällt auf, dass diese mit einer Abweichung von

$$\Delta U_{\text{rel}} = 1,3 \% \quad (32)$$

nah beieinander liegen, jedoch der Fehler beim numerisch bestimmten Untergrund um zwei Zehnerpotenzen größer ist, als beim theoretischen. Die numerische Bestimmung ist etwas ungenauer, da das Anpassen von mehr Fitparametern allgemein ungenauer ist. Bei der theoretischen Berechnung resultiert der Fehler lediglich aus der Poissonabweichung der Startcounts N_{start} und ist daher wesentlich geringer. Da die verschiedenen Untergründe dennoch sehr nah beieinander liegen, liegen auch die berechneten Lebensdauern nah beieinander, die Abweichung ist vernachlässigbar klein. Die relative Abweichung vom Literaturwert [1]

$$\tau = 2,197 \mu\text{s} \quad (33)$$

beträgt jeweils

$$\Delta \tau_{\text{rel}} = 4,0 \% \quad (34)$$

und ist damit gering. Bei der numerischen Bestimmung ergibt sich eine Abweichung von 1,24 und bei der theoretischen Berechnung eine Abweichung von 1,74. Ein Grund für die Abweichung nach unten kann unter anderem die Tatsache sein, dass die Zerfallszeit der Myonen in Materie und nicht im Vakuum gemessen wurde. Das hat zur Folge, dass die negativ geladenen Myonen eine weitere Option anstatt des Zerfalls haben, sie können nach ihrer Abbremsung von einem Atomkern eingefangen werden, sodass ein hochangeregtes myonisches Atom entsteht. Dabei entsteht ebenfalls ein Lichtblitz, sodass die Zerfallszeit des Myons, wenn die zweite Option in Materie vernachlässigt wird, unterschätzt wird.

Literatur

- [1] K.A. Olive et al. *Particle Physics Booklet*. 2014.
- [2] TU Dortmund. *Lebensdauer der Myonen*. 2018. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/MASTER/SKRIPT/V01.pdf>..

A. Kopie der Originaldaten