

V01

Lebensdauer der Myonen

Mark Schöne
mark.schoene@udo.edu

Henning Ptaszyk
henning.ptaszyk@udo.edu

Durchführung: 28.06.2017

Abgabe: 05.07.2017

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
1.1	Einleitung	3
1.2	Lebensdauer instabiler Teilchen	3
1.3	Messung der Lebensdauer	4
2	Durchführung	6
3	Auswertung	6
3.1	Kalibrierung der Zeitskala	8
3.2	Berechnung der Untergrundrate	9
3.3	Experimentelle Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen . . .	10
4	Diskussion	16

1 Theorie

1.1 Einleitung

Myonen zählen als Elementarteilchen, die nicht der Starken Wechselwirkung unterliegen, zur Gruppe der Leptonen. Sie tragen eine Ladung und wechselwirken daher auch mit elektromagnetischen Feldern. Im Vergleich zum Elektron besitzt das Myon eine ca. 207 mal größere Ruhemassen und ist nicht stabil. Der Zerfall von Myonen folgt dem Schema

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

bzw.

$$\mu^+ \longrightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (2)$$

im Fall des Antimyons. Mit dem im Folgenden untersuchten Versuch soll die Lebensdauer von Myonen bestimmt werden. Diese ist durch den Erwartungswert der Lebensdauerverteilung einzelner Myonen gegeben.

1.2 Lebensdauer instabiler Teilchen

Da Teilchenzerfälle rein statistische Prozesse sind, wird für die Zerfallswahrscheinlichkeit dW eines Teilchens im Zeitraum dt der Ansatz

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

gemacht. Insbesondere hängt die Zerfallswahrscheinlichkeit nicht von der Anzahl der vorhandenen Teilchen N ab. Für die Änderung der Teilchenzahl im Zeitraum dt gilt also

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

was durch Integration auf

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

führt. Um auf die Verteilungsfunktion zu schließen, muss betrachtet werden wie viele Teilchen eine Lebensdauer im Bereich von t bis dt haben. Diese Betrachtung führt auf eine Exponentialverteilung

$$dN(t) = N_0 \lambda \exp(-\lambda t) dt. \quad (6)$$

Die Lebensdauer τ eines Teilchens ist der Erwartungswert dieser Verteilung, welcher gerade $\tau = \frac{1}{\lambda}$ ist. [2]

1.3 Messung der Lebensdauer

Der Nachweis von in der Erdatmosphäre erzeugten Myonen soll mit einem organischen Szintillations Detektor geschehen, da organische Szintillatoren eine besonders kurze Ansprechzeit von wenigen Nanosekunden besitzen. Ein in den Detektor einfallendes Myon gibt seine kinetische Energie an einzelne Atome des Detektors ab. Die dadurch angeregten Moleküle gehen unter Emission von Photonen in ihre Grundzustände über. Auf diese Weise entsteht ein Photonenschauer, der von einem Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) nachgewiesen wird. Gibt ein Myon seine gesamte kinetische Energie an die Moleküle des Detektors ab, so zerfällt es innerhalb des Detektors. Beim Zerfall des Myons in ein Elektron und ein Neutrino wird die Ruhemasse des Myons teilweise in kinetische Energie des Elektron überführt. Dieses ist daher in der Lage wiederum Atome des Detektormaterials anzuregen, was wie oben beschrieben zu einem weiteren Photonenschauer führt. Der zeitliche Abstand zwischen zwei solchen Signalen entspricht dann der Lebensdauer eines bestimmten Myons. Der SEV besitzt den Nachteil, dass thermische Effekte häufig zur Emission von Elektronen führen. Durch den Einsatz von zwei SEV und einer Koinzidenzschaltung wird verhindert, dass auf diese Weise entstehende Signale an die im Folgenden beschriebene Schaltung zur Messung der Lebensdauer weitergeleitet werden. Die Koinzidenzschaltung gibt ein Signal nur dann weiter, wenn dieses von beiden SEV nahezu gleichzeitig gesendet wird. Da sich die spontane Emission von Elektronen beider SEV nicht gegenseitig bedingt, kann so ein Großteil der Störeffekte gefiltert werden. Um einheitliche Signale zu gewährleisten wird zwischen die SEV und die Koinzidenzschaltung jeweils ein Diskriminator mit variabler Schwelle geschaltet. Dieser wandelt die Signale der SEV in Rechtecksignale nach dem NIM-Standard um und ermöglicht der Koinzidenzschaltung daher die Signale der beiden SEV bestmöglich zu vergleichen. Zusätzlich werden die Signale der SEV durch die Schwelle des Diskriminators bereits vorgefiltert. Die beiden Schwellen sollten so eingestellt werden, dass beide Diskriminatoren die gleiche Anzahl von Signalen an die Koinzidenzschaltung weiterleiten.

Da die Lebensdauer von Myonen im Vergleich zur Häufigkeit des Eintretens von Myonen in den Detektor klein ist, kann der zeitliche Abstand nach der Stoppuhr-Methode gemessen werden. Das bedeutet, dass eine Uhr mit jedem registrierten Signal abwechselnd gestartet bzw. gestoppt wird. Bei Verwendung dieser Methode treten jedoch zwei wesentliche Probleme auf. In dem Fall, dass ein Myon nicht im Detektor zerfällt würde kein zweites Signal von diesem Myon ausgehen, welches die Zeitmessung beendet. Für die Versuchsanordnung wirkt es in diesem Fall so, als würde das Signal, welches das nächste Myon bei seinem Eintritt in den Detektor erzeugt, vom Zerfall des vorherigen Myons stammen. Da das zu groben Verfälschungen der Messergebnisse führen würde, wird die Suchzeit T_s eingeführt. Diese bestimmt wie lange die Uhr auf ein Stoppsignal wartet. Ist die Suchzeit vorüber führt das nächste Signal zum erneuten Starten der Uhr. Das zweite Problem ist, dass zwei Myonen in einem zeitlichen Abstand in der Größenordnung der zu messenden Lebensdauern in den Detektor eintreten. Dieses Problem bleibt nach Einführung der Suchzeit bestehen. Das Eintreten von Myonen in den Detektor ist jedoch statistisch so verteilt, dass der durch dieses Problem erzeugte Fehler alle gemessenen Zeiten auf die gleiche Weise betrifft. Nach Berechnung dieses

gleichmäßig verteilten Fehlers, kann der Fehler von den Zählergebnissen der verschiedenen Lebensdauern abgezogen werden. Eine mögliche Versuchsanordnung zur Messung der Lebensdauer nach der Stoppuhr-Methode greift auf die Kombination aus einem Zeit-Amplituden-Konverter (TAC) und einem Vielkanalanalysator (VKA) zurück. Die im Folgenden beschriebene und in Abbildung 1 dargestellte Schaltung leitet Start- und Stoppsignale an den TAC weiter, welcher ein zur Zeit zwischen einem Start und einem Stopp Signal proportionales Spannungssignal an den Vielkanalanalysator weiter gibt. Dieser ordnet jedem Signal entsprechend seiner Größe einen Kanal innerhalb eines Datensatzes zu und erhöht den Wert des entsprechenden Kanals um Eins. Die Anzahl der Signale, die in einem bestimmten Kanal gespeichert werden, entspricht also der Häufigkeit des Auftretens eines Signals mit dieser Lebensdauer. Um die Suchzeit in die Schaltung zu implementieren wird eine Monostabile Kippstufe verwendet. Diese besitzt einen Eingang und zwei Ausgänge. Liegt am Eingang keine Spannung an steht ein Ausgang auf H und einer auf L. Sobald ein Spannungssignal den Eingang erreicht werden beide Ausgänge für die einstellbare Suchzeit auf den jeweils anderen Wert umgeschaltet. Ein von der Koinzidenzschaltung abgegebenes Signal wird an zwei verschiedene AND-Gatter und mit einer Verzögerung von 30 ns an die Monostabile Kippstufe weiter gegeben. Der ohne anliegende Spannung am Eingang auf H stehende Ausgang ist mit dem ersten AND-Gatter verbunden, sodass dieses das Signal an den Starteingang des TAC und einen Impulszähler weiterleiten kann. Während der Suchzeit steht nun der andere Ausgang der Monostabilen Kippstufe auf H, sodass ein während der Suchzeit von der Koinzidenzschaltung abgegebenes Signal durch das zweite AND-Gatter, aber nicht durch das erste, zum Stoppeingang des TAC geleitet wird. Gibt die Koinzidenzschaltung während der Suchzeit kein Signal ab, so gelangt das nächste Signal wieder zum Starteingang des TAC.

[2]

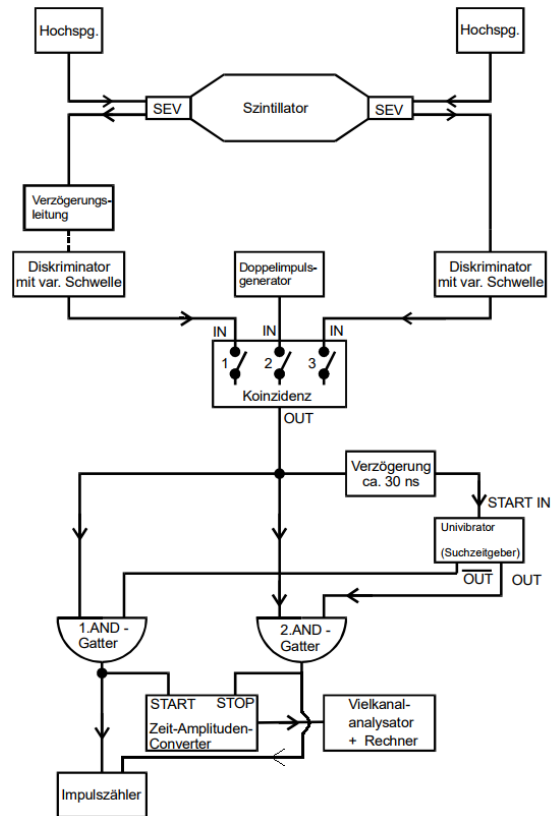


Abbildung 1: Schaltbild der Apparatur zur Messung der Lebensdauer von Myonen [2]. Die Leitung zwischen dem 2. AND-Gatter und dem Impulszähler stammt nicht aus dem Original, sondern wurde nachträglich eingefügt.

2 Durchführung

Um die Messung der Lebensdauer von Myonen durchführen zu können muss die in Kapitel 1.3 beschriebene Schaltung aufgebaut, und ihre Funktionstüchtigkeit überprüft werden. Um die Signale der verschiedenen Bauteile zu betrachten wird ein Oszilloskop verwendet. Beim Betrachten der SEV Signale wird klar, dass aufgrund ihrer unregelmäßigen Form ein Diskriminator nötig ist, der die Signale in Rechtecksignale umwandelt. Die Längen der Rechtecksignale der Diskriminatoren werden auf 20 ns eingestellt. Zusätzlich werden die Schwellen beider Diskriminatoren so eingestellt, dass an beiden Eingängen der Koinzidenzschaltung ungefähr die gleiche Signalrate zu messen ist. Da es unmöglich ist beide SEV exakt gleich zu fertigen kann es vorkommen, dass die beiden SEV aufgrund verschiedener elektrischer Eigenschaften unterschiedliche Reaktionszeiten aufweisen. Daher werden Verzögerungsleitungen zwischen die SEV und die Diskriminatoren geschaltet. Für verschiedene Verzögerungszeiten wird die Signalrate am Ausgang der Koinzidenzschaltung gemessen. Aufgrund der in Abbildung 2 dargestellten Verteilung wird einer der SEV um 4 ns verzögert. Die Apparatur muss vor der Messung kalibriert werden. Dazu werden die Eingänge der Koinzidenzschaltung, an welche die SEV angeschlossen sind, vorübergehend deaktiviert und ein Doppelimpulsgenerator wird an einen freien Eingang angeschlossen. Dieser gibt mit einer festgelegten Frequenz je zwei Impulse in einstellbaren Abständen zwischen 0 ns und 9,9 ns an die Koinzidenzschaltung ab. Um die verfügbaren Kanäle des Vielkanalanalysators optimal ausnutzen zu können wird die Spannungsausgabe des TAC so eingestellt, dass bei Impulsabständen von 9,9 ns ungefähr der mittlere Kanal aufgefüllt wird. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass über die gesamte Suchzeit, welche auf $T_s = 20 \mu\text{s}$ eingestellt wird, Werte in die Kanäle eingetragen werden können und, dass möglichst wenige Kanäle leer bleiben. Für Impulsabstände von $0 \mu\text{s}$ bis $9 \mu\text{s}$ wird in Schritten von $1 \mu\text{s}$ jeweils 20 s lang die Anzahl der Signale gezählt. Den aufgefüllten Kanälen kann nun die entsprechende Zeit zugeordnet werden. Nach der Kalibration wird der Doppelimpulsgenerator wieder entfernt und die den SEV zugeordneten Eingänge der Koinzidenzschaltung werden wieder aktiviert. Für eine Gesamtdauer von $T = 169\,098 \text{ s}$ werden nun die Lebensdauern einzelner Myonen gemessen.

3 Auswertung

Zur experimentellen Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen werden bei einer Messzeit von

$$t_{\text{mess}} = 169\,098 \text{ s}$$

die Zeitabstände zwischen Startsignalen N_{start} und Stoppsignalen N_{stop} gemessen. Die Anzahl der gemessenen Signale beträgt jeweils

$$N_{\text{start}} = 3\,920\,300 \pm 1978$$

$$N_{\text{stop}} = 25\,537 \pm 51.$$

Als Fehler für die Anzahl N gemessener Signale wird, gemäß der Poisson-Statistik, \sqrt{N} verwendet.

Zur Berechnung der Fehler aller folgenden Zählergebnisse wird identisch vorgegangen.

Um wie in der Durchführung 2 beschrieben, die einzustellende Suchzeit, sowie die Auflösungszeit Δt der Koinzidenzeinheit zu bestimmen wird für verschiedene Verzögerungszeiten die Signalrate gemessen. Es ergibt sich der in Abbildung 2 gezeigte Plot. Wie in der Abbildung visualisiert, werden lineare Regressionsgeraden an das Plateau und dessen Flanken angepasst. Dabei wird für das Plateau eine konstante Funktion und für die Flanken jeweils eine linearer Zusammenhang gewählt. Für die Höhe des Plateaus wird eine Zählrate von $(24,33 \pm 0,15)/s$ ermittelt. Für die Positionen an denen der Halbwert angenommen wird, ergeben sich

$$\Delta t_{\text{links}} = -36,2 \text{ ns}$$

$$\Delta t_{\text{rechts}} = 33,1 \text{ ns}$$

Es resultiert im Mittel eine Auflösungszeit von

$$\Delta t = 34,6 \text{ ns}.$$

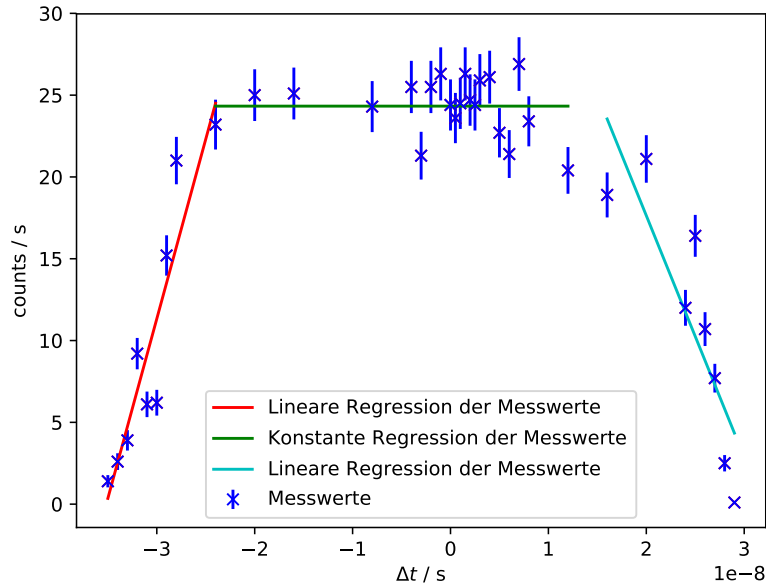


Abbildung 2: Signalrate am Ausgang der Koinzidenzschaltung für verschiedene Verzögerungszeiten.

3.1 Kalibrierung der Zeitskala

Das aufgezeichnete Histogramm der Zerfallszeiten, kann nicht in der direkt vorliegenden Form physikalisch interpretiert werden. Dies liegt daran, dass die Bins nicht in einer Zeiteinheit gegeben sind, sondern in einheitenloser Form. Um jedem Kanal k eine entsprechende Zeit t zuzuordnen wird eine linearer Regression, der Form

$$t(k) = s \cdot k + b, \quad (7)$$

an Bins bekannter Zeit vorgenommen. Die in Tabelle 1 angegebenen Paare, jeweils bestehend aus Bin-Nummer und entsprechender Zeit werden für die Kalibrierung verwendet. Bei der Messung wurden in den benachbarten Bins 22 und 23 von 0 verschiedene Einträge, nämlich 484 und 19788 gefunden. Es erfolgte daher eine Zusammenfassung der beiden Kanäle durch eine mit den Bininhalten gewichtete Mittelwertbildung der Binnummern. In Abbildung 3 ist die an die Kalibrierungswerte angepasste Funktion gezeigt. Der Fehler auf den somit bestimmten Wert ist vergleichsweise so klein, dass dieser nicht graphisch dargestellt wird. Es wird davon ausgegangen, dass auch für Bins oberhalb von Nummer 200, die Regression Gültigkeit besitzt. Anschließend lassen sich mit den berechneten Parametern

$$s = (45\,451,26 \pm 1,90) \text{ ps} \quad (8)$$

$$b = (-44,97 \pm 0,24) \text{ ns} \quad (9)$$

die Kanäle des aufgenommen Histogramms durch die tatsächlichen Zeiten ausdrücken. Eine graphische Darstellung des Histogramms ist in Abbildung 6 gegeben.

Tabelle 1: Kanäle und zugehörige Zeiten der Kalibrierungsmessung.

Kanal	Zeit in μs
22,98 \pm 0,35	1
45	2
67	3
89	4
111	5
133	6
155	7
177	8
199	9

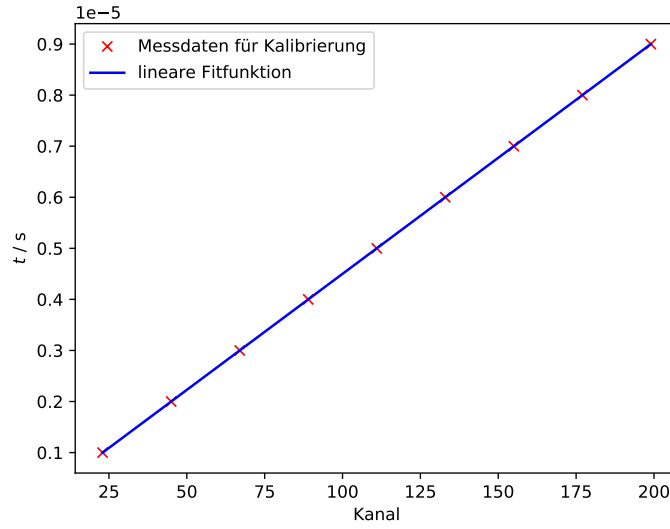


Abbildung 3: Graphische Darstellung der linearen Fits an die Werte der Kalibrierungsmessung.

3.2 Berechnung der Untergrundrate

Im Experiment wird immer dann ein Messwert aufgenommen, wenn auf ein Startsignal innerhalb von der Suchzeit $T_s = 20\mu\text{s}$ ein weiteres Signal (Stopsignal) folgt. Für die Bestimmung der mittleren Lebenszeit der Myonen sind nur die Fälle interessant, bei denen die Zeitmessung durch ein Myon-zerfall induziertes Signal gestoppt wird. Da allerdings auch der Fall eintreten kann, dass während der Suchzeit ein weiteres Myon in den Detektor einfällt und die Zeitmessung stoppt. Diese Ereignisse werden im Folgenden als Untergrund bezeichnet. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Untergrundereignisse gleichmäßig auf alle Kanäle verteilen, sodass eine konstante Untergrundrate zur Korrektur von dem Inhalt jedes (nicht leeren) Bins abgezogen wird.

Die Untergrundrate ergibt sich aus der Anzahl an Untergrundereignissen geteilt durch die Zahl der gefüllten Kanäle (342). Um die Zahl der Untergrundereignisse zu erhalten, wird die Wahrscheinlichkeit dafür, dass innerhalb der Suchzeit T_s genau ein einfallendes Myon im Detektor registriert wird, benötigt. Diese Wahrscheinlichkeit folgt einer Poisson-Verteilung[3]

$$p(n) = \frac{\mu^n}{n!} \cdot e^{-\mu}. \quad (10)$$

Dabei bezeichnet n die Anzahl gezählter Ereignisse und μ den Erwartungswert. Hier kann der Erwartungswert durch

$$\mu = R \cdot T_s \quad (11)$$

bestimmt werden. Wobei R die Rate, mit der die Myonen in den Detektor einfallen, angibt. Diese Einfall-Rate lässt sich wiederum als

$$R = \frac{N_{\text{start}}}{t_{\text{mess}}}, \quad (12)$$

den gemessen Startsignalen N_{start} pro Messzeit t_{mess} ausdrücken. Somit ergibt sich unter Verwendung der Gleichungen (10), (11) und (12) eine Untergrundrate von

$$U = \frac{p(1) \cdot N_{\text{start}}}{342} = 3,549 \pm 0,004.$$

3.3 Experimentelle Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen

Zur Bestimmung der mittleren Myon-Lebensdauer wird an den in Abbildung 4 dargestellten Messwerte eine lineare Regression der Gleichung (6) entsprechenden Funktion vorgenommen. Die Gewichtung stellt dabei der jeweilige Bininhalt dar. Dabei wird vor Durchführung der Regression, die in Abschnitt 3.2 berechnete Untergrundrate U von jedem Bin-Inhalt (ungleich 0) abgezogen. Es ergibt sich die in Abbildung 4 gezeigte Regressionsfunktion. In Abbildung 5 ist eine logarithmische Darstellung der y-Achse (counts) gewählt. Die Parameter der Regression lauten

$$N_0 = 478,24 \pm 14,61$$

$$\lambda = (472\,789,20 \pm 20\,198,83) \frac{1}{\text{s}}.$$

Der Parameter λ lässt sich als der Kehrwert der mittleren Lebensdauer identifizieren. Somit beträgt die auf diese Weise experimentell ermittelte Lebensdauer

$$\tau_1 = (2,12 \pm 0,09) \mu\text{s}.$$

Die Abweichung zum Literaturwert [1]

$$\tau_{\text{literatur}} = (2,196\,981\,1 \pm 0,000\,002\,2) \mu\text{s}$$

beträgt

$$\frac{|\tau_{\text{literatur}} - \tau_1|}{\tau_{\text{literatur}}} = (4 \pm 5) \, \%.$$

Eine andere Möglichkeit eine konstante Untergrundrate zu berücksichtigen, als die (analytische) Berechnung (siehe Abschnitt 3.2), ist den Untergrund als Parameter in der für die Regression verwendeten Funktion einzuführen. Dazu wird Gleichung (6) zu

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} + U \quad (13)$$

abgeändert. Die Regression wurde in diesem Fall nur auf Messwerten, deren Counts ungleich 0 sind, durchgeführt. Dies hat den Grund, dass bei diesen Messwerten kein Untergrund vorliegen kann, da nichts gemessen wurde. Für die Regressions-Parameter ergeben sich

$$\begin{aligned} N_0 &= 478,32 \pm 14,58 \\ \lambda &= (469\,673,51 \pm 25\,212,50) \frac{1}{\text{s}} \\ U &= 2,71 \pm 3,90 \end{aligned}$$

In Abbildung 6 ist eine graphische Darstellung der Regression zu finden. In Abbildung 7 ist eine logarithmische Darstellung der y-Achse(counts) gewählt.

Damit ergibt sich eine mittlere Lebensdauer von

$$\tau_2 = (2,13 \pm 0,11) \mu\text{s}.$$

Die Abweichung zum Literaturwert [1]

$$\tau_{\text{literatur}} = (2,196\,981\,1 \pm 0,000\,002\,2) \mu\text{s}$$

beträgt

$$\frac{|\tau_{\text{literatur}} - \tau_2|}{\tau_{\text{literatur}}} = (3 \pm 5) \, \%.$$

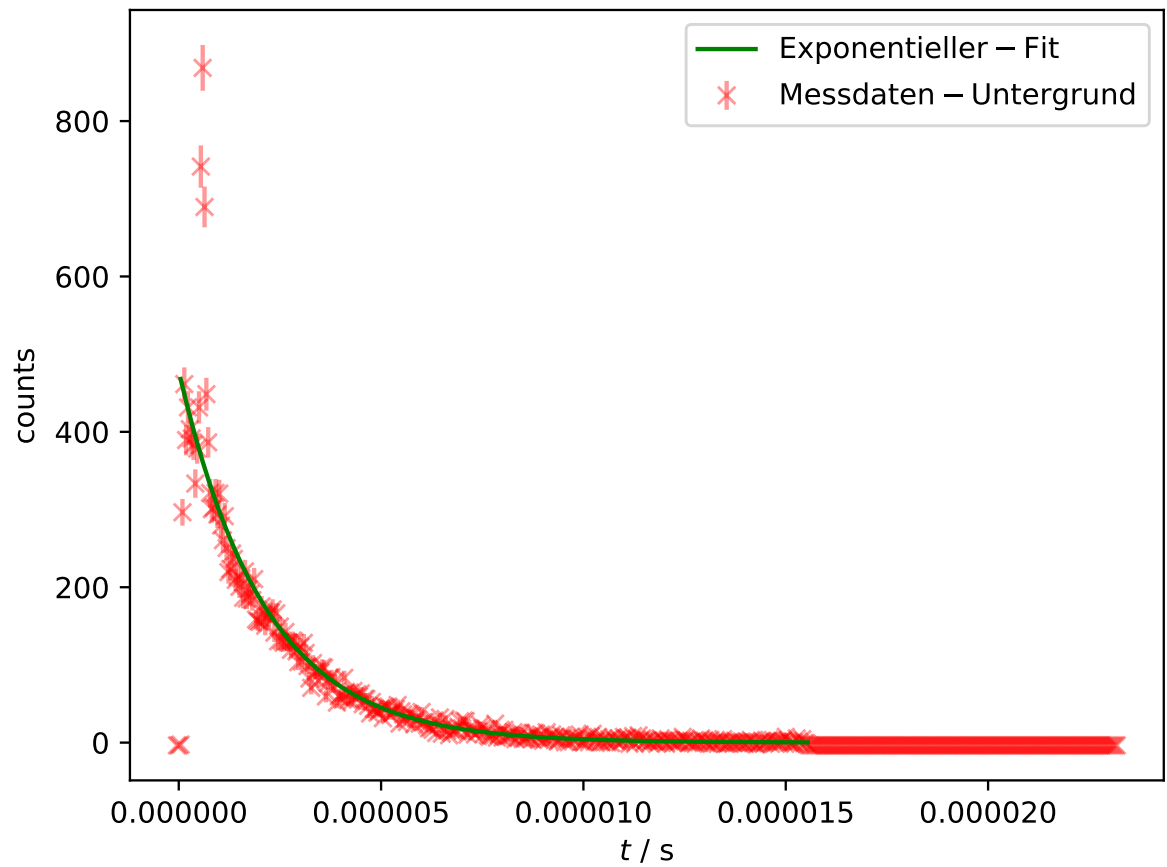


Abbildung 4: Aufgenommenes Histogramm der Zerfallszeiten(Counts abzüglich berechneter Untergrundrate), sowie Exponentieller-Fit.

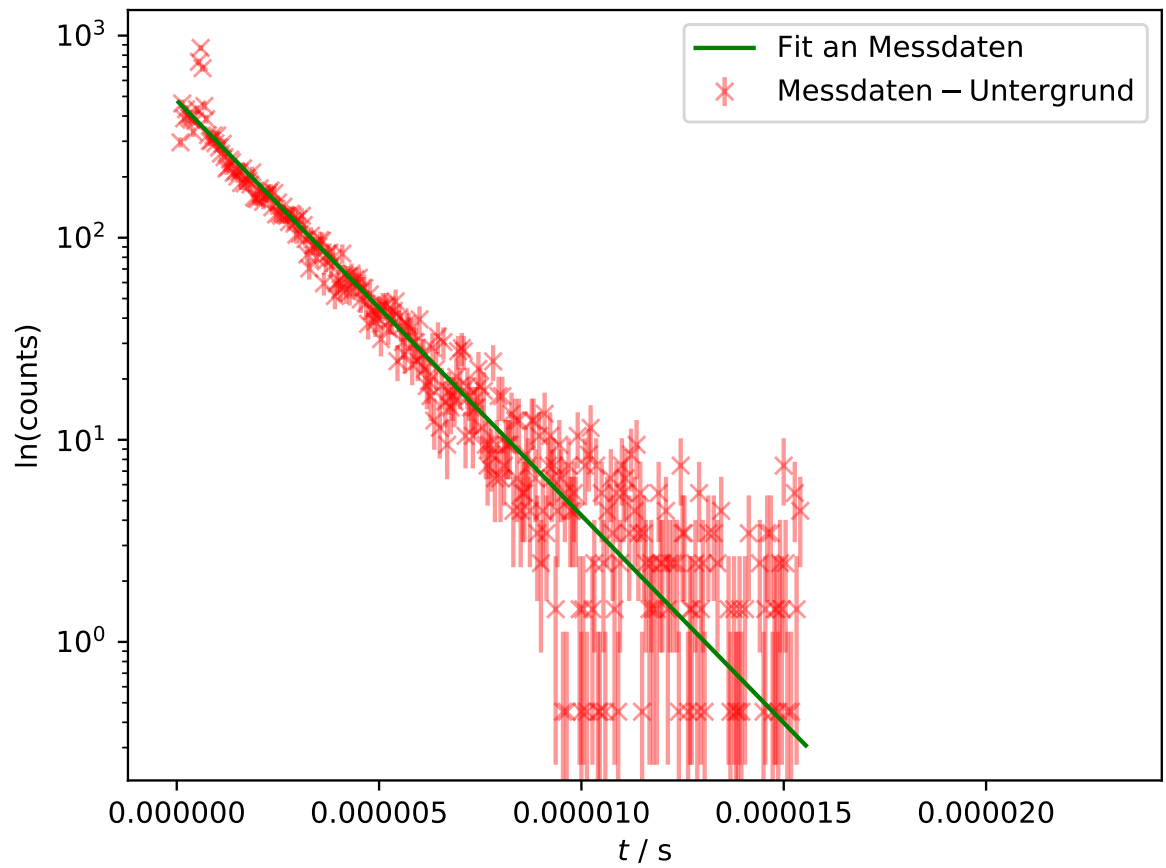


Abbildung 5: Aufgenommenes Histogramm der Zerfallszeiten(Counts abzüglich berechneter Untergrundrate), sowie Fit der Messdaten (halblogarithmische Darstellung).

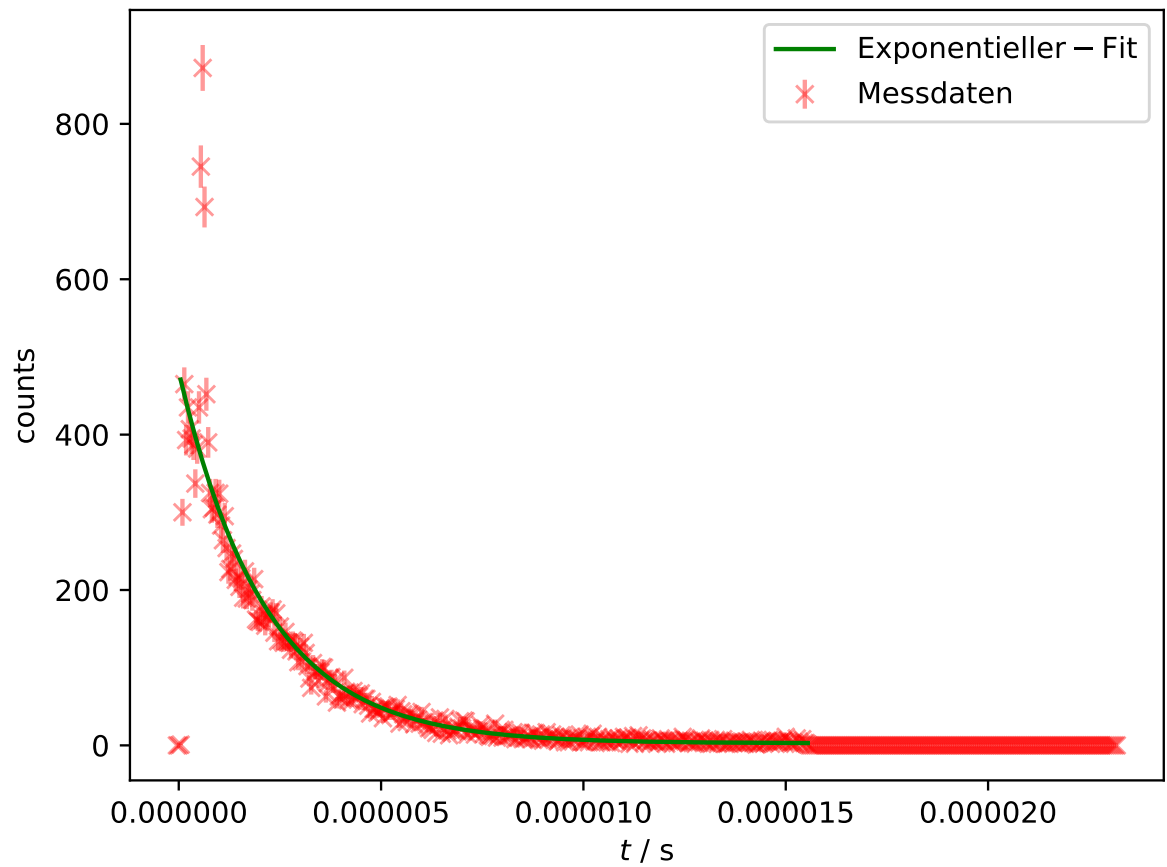


Abbildung 6: Aufgenommenes Histogramm der Zerfallszeiten, sowie Exponentieller-Fit(Untergrundrate als Parameter).

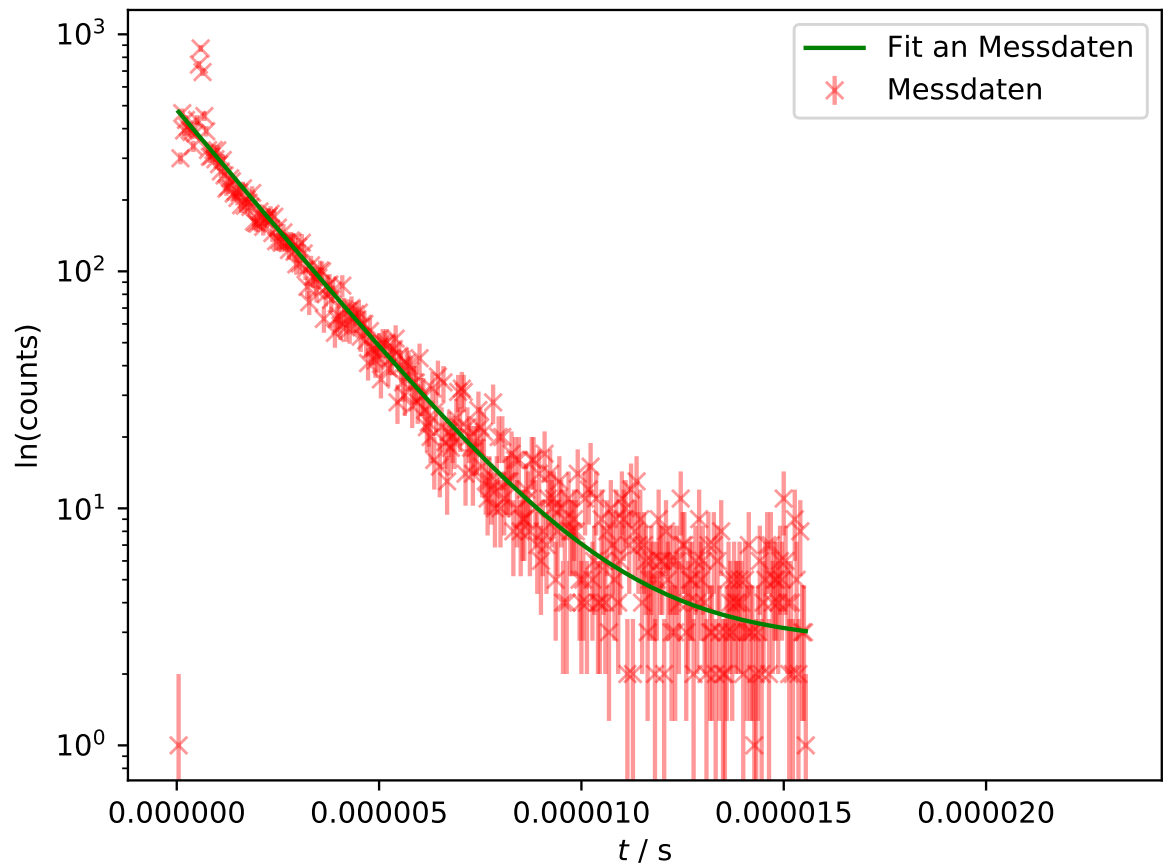


Abbildung 7: Aufgenommenes Histogramm der Zerfallszeiten, sowie Exponentieller-Fit(Untergrundrate als Parameter, halblogarithmische Darstellung).

4 Diskussion

Für die mittlere Lebensdauer von Myonen wurden die Werte $(2,12 \pm 0,09) \mu\text{s}$ (Fit an Messwerte abzüglich Untergrundrate) und $(2,13 \pm 0,11) \mu\text{s}$ (Fit an Messwerte mit Untergrundrate als Parameter) ermittelt.

Diese Werte weichen um $(4 \pm 5) \%$ beziehungsweise $(3 \pm 5) \%$ vom Literaturwert[1] ab. Es werden somit ähnliche Werte für die mittlere Lebensdauer gefunden. Dies liegt, daran, dass sich beide Methoden von der Herangehensweise her, nur bei der Bestimmung des Untergrunds unterscheiden und sich für diesen mit $3,549 \pm 0,004$ (berechnet) und $2,71 \pm 3,90$ (Fit-Parameter) ebenfalls ähnliche Werte ergeben.

Um generell die Abweichung der Werte vom Literaturwert zu erklären, lässt sich die endliche Zeitauflösung des Vielkanalanalysators nennen. Dadurch kommt es zu Fehl- bzw. Mehrfachzuordnungen gemessener Zeiten.

Weitere Fehlerquellen können in der Justage der Messapparatur auftreten, da für Verzögerungszeit nie perfekte Werte eingestellt werden können. So kommt es zu Nichtbeziehungsweise Fehl-erzeugung von Messereignissen. Dabei spielen vor allem auch nicht ideale elektronische Bauteile eine Rolle. Zwar wird das in der Auswertung 3 beschriebene Problem des Fehlauflösens eines Stoppsignals berücksichtigt, dennoch kann keine der bestimmten Untergrundraten exakt diesen systematischen Fehler korrigieren. In den Abbildungen 6 und 4 fällt auf, dass einige wenige Messwerte, deren Counts im Bereich von ca. 800 liegen, vergleichsweise weit von der Regressionsgeraden entfernt sind. Um zu überprüfen ob es sich dabei um für das Experiment sinnvolle Messungen handelt, kann die Anzahl an Stoppsignalen mit der Anzahl an histogrammierten Ereignissen verglichen werden.

Es wurden $25\,537 \pm 51$ Stoppsignale gemessen und im Histogramm wurden $23\,080 \pm 150$ Ereignisse gezählt. Somit lässt sich dieser Vergleich nicht als Begründung für die unerwartet hohe Anzahl an Counts bei den von der Regressions-Funktion abweichenden Messwerten anführen.

Abschließend lässt sich die Messung als Bestätigung des Werts der Lebensdauer von Myonen bezeichnen, da in beiden Fällen Werte gefunden wurden, innerhalb deren Unsicherheiten der Literaturwert liegt. Weiterhin ist zu erwähnen, dass beide Werte nach unten abweichen, was damit zu begründen ist, dass der Literaturwert für Myonen im Vakuum gilt. Da aber in diesem Experiment Myonen in Materie untersucht werden, wird für die mittlere Lebensdauer ein geringerer Wert erwartet, da sich positiv geladene und negative geladene Myonen in Materie anders verhalten. Im Unterschied zum Myon positiver Ladung können negativ geladene Myonen anstatt zu zerfallen zusammen mit einem Atomkern ein myonisches Atom bilden. Dadurch wird ebenfalls ein Signal im Detektor ausgelöst was aber nicht zur Messung der eigentlichen mittleren Lebensdauer eines Myons führt.

Literatur

- [1] K.A. Olive et al. *Particle Physics Booklet*. 2014.
- [2] Physikalisches Praktikum TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu V01*. URL: <http://129.217.224.2/HOME/PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/FP/SKRIPT/V01.pdf>.
- [3] J.Henniger R.Schwierz TU Dresden. 17. Juli 2017. URL: <https://tu-dresden.de/mn/physik/ressourcen/dateien/studium/lehrveranstaltungen/praktika/pdf/PV.pdf?lang=en>.