


V01

Lebensdauer kosmischer Myonen

Sophie  Bork Michael ^{Elias}  Windau
sophie.bork@gmx.de michael.windau@tu-dortmund.de

Durchführung: Halloween 

Abgabe: 6.11.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Myonen	3
2.2 Lebensdauer eines instabilen Teilchens	3
3 Aufbau	4
4 Durchführung	6
5 Auswertung	8
5.1 Justierung der Diskriminatoren	8
5.2 Kalibrierung des Vielkanalanalysators	10
5.3 Lebensdauer des Myons	11
6 Diskussion	12
Literatur	13

1 Zielsetzung

In diesem Versuch soll die Lebensdauer von kosmischen Myonen, welche in einem Szintillator abgebremst werden und dort zerfallen, bestimmt werden. Dies wird realisiert, indem viele individuelle Lebensdauern mithilfe einer elektrischen Schaltung aufgezeichnet werden und daraus eine allgemeine Lebensdauer bestimmt wird.

2 Theorie

2.1 Myonen

Myonen sind Elementarteilchen und gehören zur Familie der Leptonen. Auf sie wirken die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung. Ihre Masse beträgt in etwa das 200-fache der Elektronenmasse. Wenn Pionen, die erzeugt werden, wenn energiereiche kosmische Protonen mit Luftmolekülen in Wechselwirkung treten, zerfallen, entstehen Myonen. Beim Zerfall von einem π^- entsteht ein Myon und beim Zerfall von einem π^+ ein Antimyon. Die Zerfallsgleichungen lauten

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu\end{aligned}$$

Von diesen Myonen gelangen einige, die nahezu Lichtgeschwindigkeit besitzen, zur Erde. Ihre kinetische Energie kann bei mehreren Hundert MeV liegen.

Myonen zerfallen in Elektronen bzw. Positronen und Neutrinos gemäß den Gleichungen

$$\begin{aligned}\mu^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \\ \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu\end{aligned}$$

Die Lebensdauer von Myonen beträgt in etwa $2,2 \mu\text{s}$ [2].

2.2 Lebensdauer eines instabilen Teilchens

Wenn die Lebensdauer eines einzelnen Teilchens gemessen wird, kann aus dem Ergebnis kein Rückschluss auf die Lebensdauer anderer Teilchen gezogen werden, weil die individuellen Lebensdauern statistisch verteilt sind.

Die Lebensdauer τ einer Teilchenart beschreibt die Zeit, nach welcher die ursprüngliche Teilchenmenge N_0 auf den Wert $\frac{N_0}{e}$ reduziert wurde. Ihr Kehrwert ist die Zerfallskonstante λ .

Die Wahrscheinlichkeit für den Zerfall eines Teilchens im Intervall dt ist $dW = \lambda dt$.

Wird die Teilchenzahl mit einbezogen, entsteht die Gleichung

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N.$$

Daraus lässt sich eine genäherte Formel für die zeitliche Entwicklung der Teilchenzahl herleiten:

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

Um aus einer Stichprobe von n Lebensdauern τ zu bestimmen, ist es sinnvoll, die Methode der kleinsten Quadrate anzuwenden. Dabei wird der Ausdruck

$$\sum_{j=1}^n (N(t_j) - N_0 e^{-\lambda t})^2$$

minimalisiert, indem N_0 und λ verändert werden. Die Zeit t_j wurde in der Stichprobe $N(t_j)$ mal gemessen.

3 Aufbau

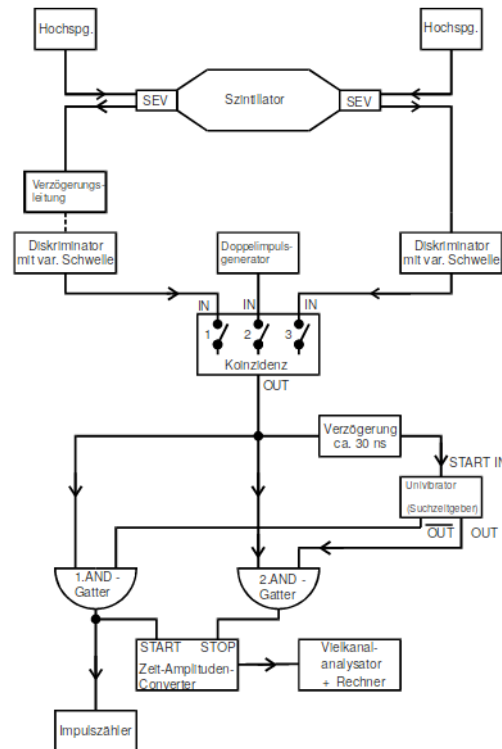


Abbildung 1: Schaltung zur Lebensdauerermessung kosmischer Myonen [1].

In Abbildung 1 ist eine Schaltung zu sehen, mit welcher die Lebensdauer kosmischer Myonen bestimmt werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auf der rechten Seite zwischen SEV und Diskriminator ebenfalls eine Verzögerung eingebaut ist.

Ein wesentlicher Baustein der Schaltung ist der **Szintillationsdetektor**. Dies ist ein 50l umfassender Edelstahltank gefüllt mit Tuolol, in dem Lichtimpulse nach etwa 10 ns abklingen. Ein eintreffendes Myon regt durch seine hohe kinetische Energie von teilweise mehr als 100 MeV die Moleküle im Szintillator an, welche beim Zurückfallen in den Ursprungszustand Lichtquanten emittieren. Wenn ein Myon im Szintillator zerfällt,

entsteht ein Elektron oder ein Positron, welches ebenfalls genug Energie besitzt, um die Szintillatormoleküle entsprechend anzuregen.

Die **Sekundärelektronenvervielfacher** (kurz SEV) mit eingebauten **Photokathoden** an beiden Enden des Szintillators bewirken, dass die eintreffenden Lichtimpulse in elektrische Signale umgewandelt werden.

Um die leicht unterschiedlichen Eigenschaften der beiden SEV ausgleichen zu können, wird nach jedem SEV eine **Verzögerungsleitung** eingebaut. Im Prinzip besteht die Leitung aus vielen einzelnen Kabeln, die einzeln dazugeschaltet werden können, um die Stromstrecke zu verlängern.

Nach jeder Verzögerungsleitung folgt ein **Diskriminator**. An diesem können zwei Dinge eingestellt werden. Zunächst einmal ist die Mindestspannungshöhe einstellbar, die ein Impuls haben muss, um vom Diskriminator durchgelassen zu werden. Dies sorgt für eine erste Herausfilterung ungewünschter Spannungsimpulse, welche durch eine spontane Elektronenemission von einer der Photokathoden entstehen können, da einige von ihnen viel kleiner sind als die Myonenimpulse. Außerdem kann am Diskriminator eingestellt werden, wie lang der Rechteckimpuls sein soll, welcher aus dem SEV-Impuls entsteht.

Die nachfolgende **Koinzidenzschaltung** dient dazu, einen noch größeren Teil der unerwünschten Elektronenimpulse herauszufiltern. Die zugrundeliegende Annahme ist, dass ein durch spontane Elektronenemission erzeugter Impuls nur an einem SEV einen Spannungsimpuls auslöst, ein durch ein Myon erzeugter Lichtblitz aber in einer sehr kleinen Zeit bei beiden SEV zu einer Reaktion führt. Die Koinzidenzschaltung lässt folglich nur "gleichzeitige" Ereignisse passieren. Findet ein Lichtblitz ganz nah bei einem der SEV statt, wird an diesem SEV quasi sofort ein Spannungssignal erzeugt. Es wird vom Diskriminator in ein Rechtecksignal umgewandelt. Am anderen SEV kommt das Licht etwas später an. Der dort erzeugte Spannungsimpuls des SEV wird vom nachgeschalteten Diskriminator ebenfalls in ein Rechtecksignal umgewandelt. Die Koinzidenzschaltung erkennt die Ereignisse als gleichzeitig an, die zu sich überlappenden Rechtecksspannungssignalen der beiden SEV führen.

Nachdem nun annähernd gewährleistet ist, dass nach der Koinzidenzschaltung nur noch verwertbare Signale vorliegen, muss ein Mechanismus eingesetzt werden, der dazu führt, dass das Signal des eintreffenden Myons die Lebensdauerermessung startet, und dass der Zerfall die Messung beendet.

Dazu wird das aus der Koinzidenzschaltung kommende Signal an einen Eingang des 1.AND-Gatters und an einen Eingang des 2.AND-Gatters weitergeleitet. Der zweite Ausgang der **AND-Gatter** ist mit einer **monostabilen Kippstufe** verbunden. AND-Gatter lassen ein Signal nur passieren, wenn auf ihre beiden Eingänge das Signal HIGH gegeben wird. Wenn an einem Eingang ein Spannungsimpuls ankommt, liegt an diesem Eingang für die Dauer des Impulses ein HIGH an.

In die Kippstufe fließt ebenfalls das Signal aus der Koinzidenzschaltung, allerdings ist eine Verzögerung eingebaut, sodass das Signal im Vergleich zu den AND-Gattern erst etwa 30 ns später ankommt.

Im Grundzustand ist die Kippstufe so eingestellt, dass sie auf den Eingang des 1.AND-Gatters ein HIGH gibt, auf den des 2. ein LOW. Kommt jetzt ein Startimpuls durch ein Myon hinter der Koinzidenzschaltung an, fließt er in beide AND-Gatter und sorgt für ein

HIGH auf dem ersten Eingang. Beim 1.AND-Gatter liegt durch die Kippstufe auf dem zweiten Eingang ebenfalls ein HIGH, sodass der Impuls hindurchgeht und als Startimpuls gezählt wird. Beim 2.AND-Gatter liegt durch die Kippstufe am zweiten Eingang ein LOW an, weshalb das Signal nicht passieren kann.

Nach 30 ns, wenn der Impuls an den ersten Eingängen der AND-Gatter schon wieder weg ist, erreicht das Signal aus der Koinzidenzschaltung die monostabile Kippstufe und führt dazu, dass diese sich umkehrt. Sie gibt nun also ein LOW auf den zweiten Eingang des 1.AND-Gatters und ein HIGH auf den zweiten Eingang des 2.AND-Gatters.

Kommt jetzt durch die Koinzidenzschaltung ein Signal durch den Myonenzerfall, wird es wieder zu den beiden AND-Gattern geleitet. Allerdings kann es diesmal aufgrund der Änderung der Situation durch die Kippstufe nur das 2.AND-Gatter passieren und wird somit als Stop-Impuls gezählt.

Der Stop-Impuls nach 30 ns Verzögerung führt dazu, dass die Kippstufe wieder zurückkippt, sodass ein neuer Startimpuls auch als solcher erkannt wird.

Start- und Stop-Impulse werden beide vom **Zeit-Amplituden-Converter** (kurz TAC) registriert. Dieser berechnet dann die Zeit zwischen Start- und Stop-Impuls und wandelt die Länge der Zeit in ein dazu proportionales Spannungssignal um.

Diese Spannungssignale werden ihrer Höhe entsprechend in einem Kanal des **Vielkanal-analysators** gespeichert.

Ein angeschlossener Rechner implementiert die in der Theorie vorgestellte Methode zur Berechnung der Lebensdauer.

Da einige Myonen eine hohe Geschwindigkeit haben, und somit den Szintillator wieder verlassen, ohne in ihm zu zerfallen, muss verhindert werden, dass ein zweites einfallendes Myon als Stop-Impuls für ein durchgeflogenes Myon gewertet wird. Dazu wird die Suchzeit T_S eingeführt. In dieser Zeit läuft die Schaltung wie zuvor beschrieben. Trifft allerdings in der Suchzeit kein Stop-Impuls ein, wird die Apparatur zurückgesetzt und wartet auf einen neuen Startimpuls. Die Suchzeit sollte so gewählt werden, dass es unwahrscheinlich ist, dass in ihr 2 Myonen im Tank eintreffen.

Um die Startimpulse ohne zugehörige Stop-Impulse trotzdem registrieren zu können, wird zwischen dem 1.AND-Gatter und dem Eingang des TAC ein Impulszähler eingebaut.

Damit die vom TAC berechneten Werte überprüft werden können, kann zwischen dem 2.AND-Gatter und dem TAC ebenfalls ein Impulszähler eingebaut werden.

Der Doppelimpulsgenerator, welcher ebenfalls an die Koinzidenzschaltung angeschlossen ist, hat für die eigentliche Registrierung von Myonen keine Bewandnis. Er dient lediglich zur Kalibrierung.

4 Durchführung

Zunächst wird Hochspannung auf den Szintillator gegeben. Mithilfe eines Oszilloskops, an dessen Eingängen ein 50 Ω -Widerstand zur Reflexionsvermeidung eingebaut ist, kann überprüft werden, ob die SEV Spannungsimpulse aussenden.

Nun werden die Diskriminatoren angeschlossen. Das Oszilloskop sollte Rechtecksignale anzeigen.

Zur Einstellung der Diskriminatorschwelle wird der Impulszähler, der einfallende Myonen zählt, angeschlossen. Die Widerstände der Diskriminatoren werden so lange verändert, bis in einer 10-sekündigen Messung etwa 350 Myoneneinfälle pro SEV detektiert werden, was 35 Myoneneinfällen pro Sekunde entspricht.

Jetzt wird mithilfe der Diskriminatoren eingestellt, wie lang das Rechtecksignal sein soll, welches aus einem SEV-Signal im Diskriminator erzeugt wird. Die Länge des Plateaus wird bei beiden SEV auf etwa 12 ns eingestellt.

Danach werden die aus den Diskriminatoren kommenden Kabel in die Koinzidenzschaltung gesteckt.

Um die Ungleichheiten der beiden SEV auszugleichen, wird hinter jedes SEV eine Verzögerungsleitung eingebaut. Eine der Verzögerungsleitungen wird zunächst nicht benutzt, während die Länge der anderen so variiert wird, dass die durch sie verursachte Verzögerung im Bereich von 1 bis 30 ns liegt. In 1 ns-Schritten wird die Verzögerung erhöht und zu jeder Verzögerungszeit die Anzahl der einfallenden Myonen pro 10 s gemessen. Im Anschluss wird die gleiche Messung noch einmal vorgenommen, mit dem Unterschied, dass diesmal die Länge der ersten Verzögerungsleitung variiert wird und die für das zweite SEV nicht verwendet wird. Es wird überprüft, für welchen eingestellten Widerstand die nach der Koinzidenzschaltung gemessene Anzahl der einfallenden Myonen am größten ist. Da die Diskriminatoren Rechteckimpulse aussenden, gibt es theoretisch nicht einen Maximalwert, sondern ein Plateau von Maximalwerten. In der Praxis liegt der Maximalwert der verwendeten Apparatur bei 276 einfallenden Myonen pro 10 s und kommt genau dann vor, wenn nach dem 2. SEV eine Verzögerung von 8 ns eingestellt ist. Der Maximalwert bestätigt ebenfalls die Funktion der Koinzidenzschaltung, da sich die Zahl der pro Sekunde ankommenden Myonen von etwa 35 (ohne Koinzidenz) auf etwa 28 reduziert hat.

Ein Ausgang der Koinzidenzschaltung wird, mit einem zwischengeschalteten Widerstand, der eine Verzögerung von 30 ns bewirkt, an die monostabile Kippstufe angeschlossen. Die Suchzeit wird an der Kippstufe auf 13 μ s eingestellt.

Danach werden die anderen Ausgänge der Koinzidenzschaltung mit den ersten Eingängen der AND-Gatter verbunden. Der OUT-Ausgang der Kippstufe wird auf den zweiten Eingang des 1. AND-Gatters gegeben, der OUT-Ausgang wird auf den zweiten Eingang des 2. AND-Gatters gegeben.

Beide Ausgänge der AND-Gatter führen (über jeweils einen Impulszähler) in den TAC, wobei das 1. AND-Gatter auf den Start- und das 2. AND-Gatter auf den Stop-Eingang gegeben wird.

An den TAC werden ein Vielkanalanalysator und ein Rechner angeschlossen.

Die Funktion des TAC wird überprüft, indem anstelle der beiden SEV der Doppelimpuls-generator auf einen Eingang der Koinzidenzschaltung gegeben wird. Dieser generiert Doppelimpulse, deren Zeitabstand in einem Bereich von 0,1 bis 9,9 μ s manuell eingestellt werden kann. Um eine Aussage darüber treffen zu können, welcher Kanal für welchen Zeitabstand zwischen den Impulsen steht, wird die Frequenz des Doppelimpuls-generators immer in 0,5 μ s-Schritten erhöht, und beobachtet, welcher Zeitabstand der Impulse welchen Kanal füllt.

5 Auswertung

Im folgenden Kapitel wird die Justierung und Kalibrierung ausgewertet, sowie die Lebensdauer des Myons anhand der Messdaten ermittelt. Die dabei auftretenden Fehlerrechnungen werden mit dem *uncertainties*-Paket in *Python* berechnet. Für den Fehler der gemessenen N wird \sqrt{N} angenommen, da diese poissonverteilt sein sollten.

Zuerst wird die Justierung der Diskriminatoren ausgewertet, anschließend die Kalibrierung des Vielkanalanalysators ausgewertet, und zum Schluß die Lebensdauer ermittelt.

5.1 Justierung der Diskriminatoren

Die gemessenen Signale $N(T_{VZ})$ pro 10 Sekunden zu den jeweiligen Verzögerungszeiten sind in Tabelle 1 aufgelistet. Zusätzlich sind die Daten in Abbildung 2 dargestellt.

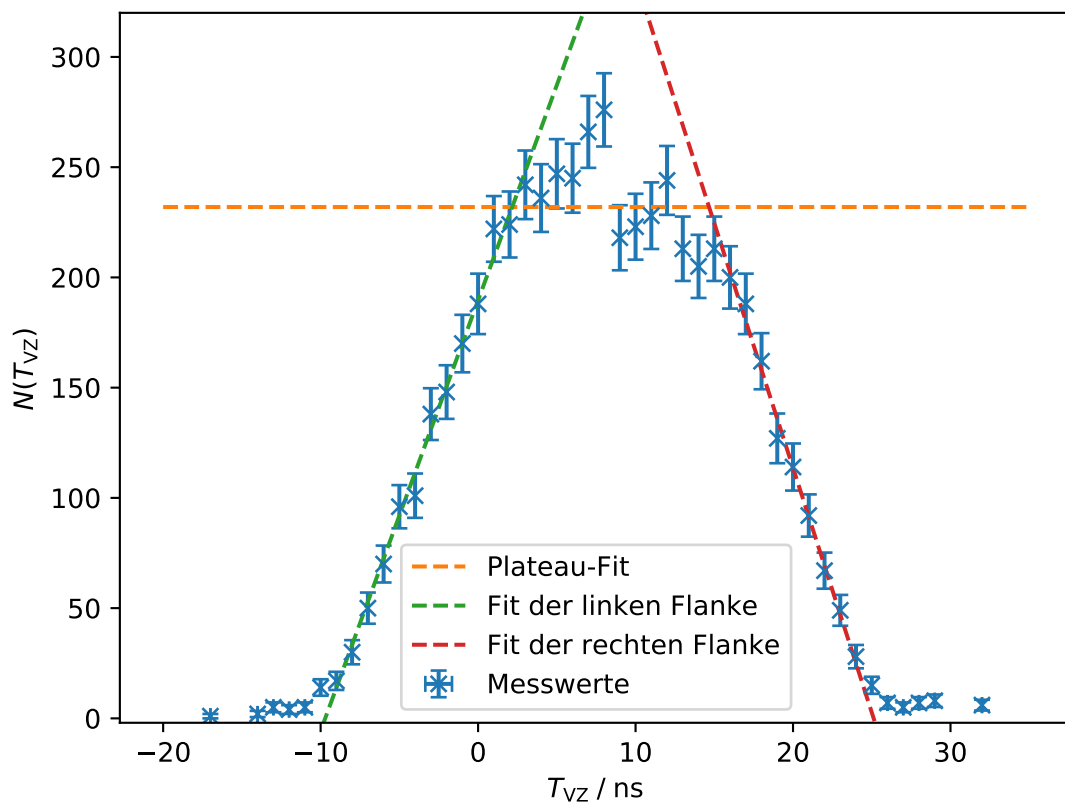


Abbildung 2: Die Gemessenen Signale $N(T_{VZ})$ über der Verzögerungszeit T_{VZ} . Dazu die Regressionsgeraden für die jeweiligen Bereiche.

Durch das Plateau an Maximalwerten in Abbildung 2 wird eine Regressionsgerade mit Steigung 0 gelegt, um mittels Formel 1 die Maximalanzahl an Signalen pro 10 Sekunden

Tabelle 1: Gemessene Signale zu eingestellten Verzögerungszeiten.

T_{VZ} / ns	$N(T_{VZ})$	T_{VZ} / ns	$N(T_{VZ})$	T_{VZ} / ns	$N(T_{VZ})$
-17	1	1	222	17	188
-14	2	2	224	18	162
-13	5	3	242	19	127
-12	4	4	236	20	114
-11	5	5	247	21	92
-10	14	6	245	22	67
-9	17	7	266	23	49
-8	30	8	276	24	28
-7	50	9	218	25	15
-6	70	10	223	26	7
-5	96	11	228	27	5
-4	101	12	244	28	7
-3	138	13	213	29	8
-2	148	14	205	32	6
-1	170	15	213		
0	188	16	200		

zu erhalten.

$$N(T_{VZ}) = 0 \cdot T_{VZ} + N_{\max} \quad (1)$$

Es ergibt sich ein $N_{\max} = 232 \pm 4$.

Als nächstes wird mithilfe des Maximalwerts die Halbwertsbreite, und damit die Breite des Plateaus, bestimmt. Dafür werden zunächst Regressionsgeraden durch die Flanken gelegt, um die Verzögerungszeiten zu erhalten, bei denen die Signalanzahl auf $N_{\max}/2$ gesunken ist.

$$N(T_{VZ}) = a \cdot T_{VZ} + b \quad (2)$$

Nach 2 ergeben sich folgende a und b für die linke bzw. rechte Flanke:

Linke Flanke:

$$a_l = (19.5 \pm 0.8) \frac{1}{\text{ns}}$$

$$b_l = 190 \pm 6$$

Rechte Flanke:

$$a_r = (-22.2 \pm 1.6) \frac{1}{\text{ns}}$$

$$b_r = 557 \pm 33$$

Setzt man $N(T_{VZ})$ gleich $N_{\max}/2$, ergeben sich:

$$T_{VZ,L} = (-3.8 \pm 0.4) \text{ ns}$$

$$T_{VZ,R} = (19.9 \pm 2.1) \text{ ns}$$

Damit ergibt sich eine Breite des Plateaus von

$$T_{VZ,\text{Gesamt}} = T_{VZ,L} + T_{VZ,R} = (23.7 \pm 2.1) \text{ ns}.$$

5.2 Kalibrierung des Vielkanalanalysators

Die Kalibrierung des Vielkanalanalysators wird verwendet, um eine Umrechnung der Channels c des Analysators auf Zeitabstände t zu ermöglichen.

$$t(c) = a \cdot c + b \quad (3)$$

Dafür werden mittels Formel 3 die vom Doppelimpulsgenerator gefüllten Channels in Verbindung mit den eingestellten Zeitabständen gebracht. Mit einer Regressionsgeraden durch die in Tabelle 2 aufgelisteten Messwerte werden a und b bestimmt:

$$a = (0.022348 \pm 0.000012) \mu\text{s}$$

$$b = (-0.033 \pm 0.003) \mu\text{s}$$

Dabei werden die in Tabelle 2 mit einem Sternchen markierten Werte in der Regression nicht beachtet, da in dem Fall der Doppelimpulsgenerator für eine Zeit zwei Channels füllte.

Tabelle 2: Kalibrierung des Vielkanalanalysators. Die Anzahl der Signale pro 10 Sekunden für den jeweiligen Channel, und der jeweiligen Zeit.

c	N_{DI}	Δt	c	N_{DI}	Δt
24	10170	0.5	*247	*8379	*5.5
46	10207	1	*248	*1846	*5.5
69	9943	1.5	270	10000	6
91	10091	2	292	10018	6.5
113	10097	2.5	315	9881	7
136	9797	3	337	9911	7.5
158	9975	3.5	359	10144	8
180	10168	4	382	9902	8.5
203	9957	4.5	404	10175	9
225	10288	5	427	1011	9.5

5.3 Lebensdauer des Myons

Die Messung lief $T_{\text{Ges}} = 158216$ Sekunden (= 43.95 Stunden), und hat insgesamt $N_{\text{Start}} = 5345056$ Startsignale, sowie $N_{\text{Stopp}} = 10995$ Stoppsignale registriert.

Durchqueren zwei Myonen den Szintillator in einem zeitlichen Abstand, der kleiner als die Suchzeit $T_S = 10 \mu s$ ist, registriert die Messung ein fälschliches Stoppsignal. Um die Wahrscheinlichkeit für ein Ereigniss dieser Art zu bestimmen, wird zuerst die Rate R der einkommenden Myonen, sowie daraus die Anzahl N_S der während der Suchzeit ausgelösten Signale berechnet:

$$R = N_{\text{Start}} / T_{\text{Ges}} = 33.78 \frac{1}{s}$$

$$N_S = R \cdot T_S = 0.000439$$

Da die Signale unabhängig voneinander auftreten, wird die Wahrscheinlichkeit aus der Poissonverteilung ermittelt:

$$W(1) = N_S \cdot \exp(-N_S) = 0.000438$$

$W(1)$ ist damit die Wahrscheinlichkeit für ein weiteres Signal während der laufenden Suchzeit.

Aus der Wahrscheinlichkeit lässt sich nun auf die Gesamtanzahl der so entstandenen Signale, sprich dem Untergrund U , schließen. Da der Untergrund für jeden Channel gleich ist, ergibt sich für den Untergrund pro Channel:

$$U_C = U/511 = W(1) \cdot N_{\text{Start}} \cdot \frac{1}{511}$$

$$= 4.592$$

Im folgenden wird dieser Wert für den Untergrund mit dem verglichen, der sich aus der Regression der Messdaten mit unbekanntem U_{Fit} Parameter aus dem *curve_fit*-Paket von *Python* ergibt. Zudem lässt sich aus den Regressionsparametern die Lebensdauer bestimmen. Dafür wird die Funktion 4 mit unbekanntem N_0 , λ und U_{Fit} verwendet.

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda \cdot t} + U_{\text{Fit}} \quad (4)$$

Die Regression ist in Abbildung 3 abgebildet. Die Parameter ergeben sich wie folgt:

$$N_0 = 172.8 \pm 2.2$$

$$\lambda = (0.506 \pm 0.007) \frac{1}{\mu s}$$

$$U_{\text{Fit}} = 1.43 \pm 0.18$$

Die Lebensdauer τ ergibt sich aus dem Kehrwert der Zerfallskonstante λ :

$$\tau = (1.98 \pm 0.03) \mu s$$

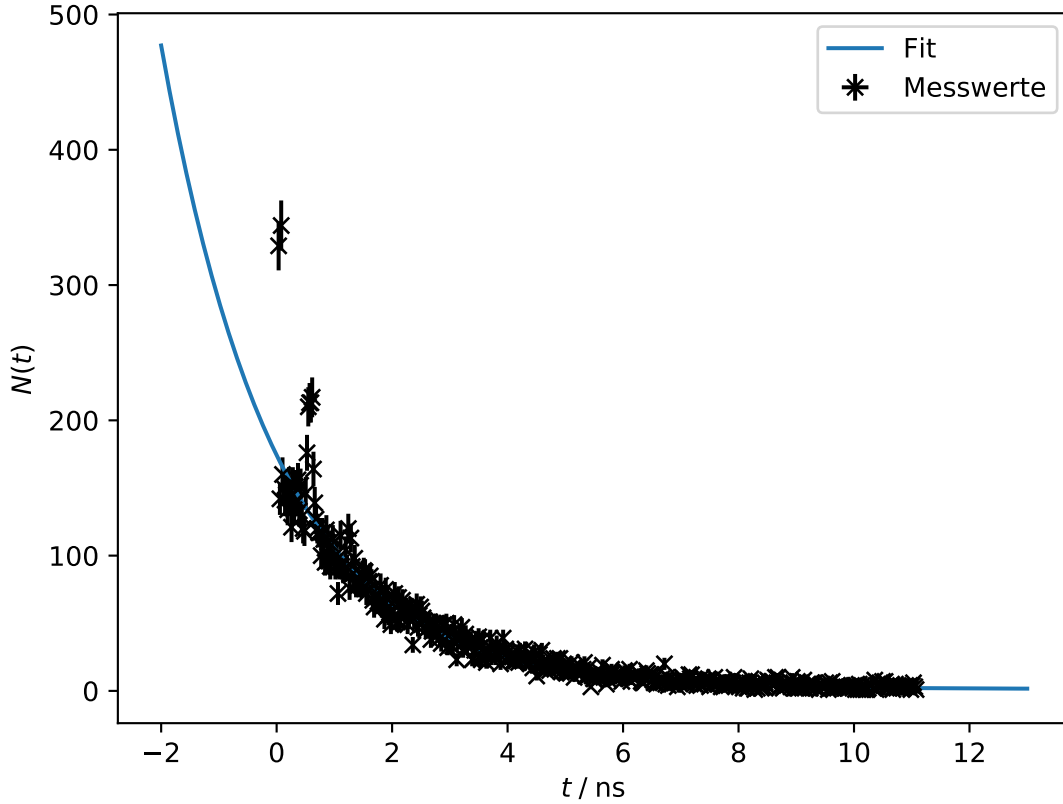


Abbildung 3: Die Gemessenen Signale über die in Zeitabstände umgewandelten Channels, sowie die Regression.

6 Diskussion

Die ermittelten Werte für den Untergrund betragen $U_C = 4.592$ und $U_{\text{Fit}} = 1.43 \pm 0.18$. Damit ist der erste Wert mehr als dreimal so groß wie der andere.

Die bestimmte Lebensdauer des Myons liegt bei $\tau = (1.98 \pm 0.03) \mu\text{s}$. Der Theoriewert liegt dagegen bei $\tau_{\text{theo}} = 2.197 \mu\text{s}$ [2], und ist damit nicht im Fehlerintervall des ermittelten Wertes.

Die große Abweichung bei dem Untergrund könnte aus den Messwerten bei dem Plateau kommen, da dort die lineare Regression nicht wirklich auf die Daten passt. Ein möglicher Grund für diese hohen Abweichungen bei der Plateaumessung könnte ein systematischer Fehler in der Veränderung der Verzögerungszeit sein.

Der Grund für die Abweichung der Lebensdauer könnte eine fehlerhaften Zuordnung der Signale vom Vielkanalanalysator sein. Dieses Phänomen war schon bei der Kalibrierung

sichtbar, und könnte die Messdaten verfälschen.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch Nr. 01 Lebensdauer der Myonen*. 2018. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/FP/SKRIPT/V01.pdf>.
- [2] Particle Data Group. *PDG: Muon*. 2018. URL: <http://pdg.lbl.gov/2014/listings/rpp2014-list-muon.pdf>.