

V01

Lebensdauer kosmischer Myonen

Durchführung: 18.12.2019

Abgabe: 03.01.2020

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
1.1	Zielsetzung und Motivation	3
1.2	Elementarteilchen nach dem Standardmodell	3
1.3	Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Elementarteilchen	4
2	Aufbau und Durchführung	4
2.1	Aufbau	4
2.2	Durchführung	7
3	Auswertung	7
3.1	Auswahl einer geeigneten Verzögerungszeit vor der Koinzidenzschaltung .	7
3.2	Kalibrierung des Multichannel-Analyzers	9
3.3	Bestimmung der Lebensdauer aus der Langzeitmessung	10
3.4	Bestimmung der Untergrundrate	11
4	Diskussion	13
4.1	Wahl der Verzögerungszeit	13
4.2	Bestimmung der Untergrundrate	13
4.3	Bestimmung der Lebensdauer kosmischer Myonen	13
	Literatur	13

1 Theorie

1.1 Zielsetzung und Motivation

Ziel des Versuchs ist die Bestimmung der charakteristischen Lebensdauer von Myonen, indem Individuallebensdauern einzelner Myonen gemessen werden.

1.2 Elementarteilchen nach dem Standardmodell

Basierend auf dem dem Standardmodell gibt es verschiedene Elementarteilchen, die Quarks, Leptonen und die Eichbosonen. Die Quarks und Leptonen lassen sich in drei Generationen einteilen. Die sechs Quarks unterliegen der starken Wechselwirkung, und besitzen je drei verschiedene Farbladungen. Die Leptonen währenddessen unterliegen u.a. der schwachen Wechselwirkung und sind einzuteilen in drei geladene Leptonen und drei Neutrinos, wobei erstere auch der elektromagnetischen Wechselwirkung unterliegen. Leptonen gehören zur Familie der Fermionen. Sie sind also Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen, die der Fermi-Dirac-Statistik folgen. Die drei Generationen der Leptonen unterscheiden sich durch ihre Masse und haben eine unterschiedliche Lebensdauer. Elektronen gehören zur ersten Leptonen-Generation, während die hier betrachteten Myonen zur zweiten Generation gehören und in etwa die 206-fache Masse der Elektronen besitzen. Im Gegensatz zu den Elektronen sind Myonen und Tauonen nicht stabil, sondern zerfallen durch ihre endliche Lebensdauer.

Die Myonen entstehen in der höheren Erdatmosphäre. Zunächst treffen hochenergetische Protonen auf Atomkerne der Luftmoleküle und erzeugen Pionen. Diese besitzen eine sehr kurze Lebensdauer und zerfallen danach in Myonen

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

Da die Lebensdauer der Myonen deutlich größer ist und diese sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, können diese bis zur Erdoberfläche reichen und dort in einem Szintillator detektiert werden. In der Szintillatormaterie wechselwirken die Myonen mit den Molekülen und geben dabei mehrere MeV ihrer kinetischen Energie in gequantelten Anteilen an die Moleküle ab. Diese werden dadurch angeregt und fallen nach einer Zeit zurück in ihren Grundzustand, wobei sie überschüssige Energie in Form von Photonen aussenden. Durch das Eintreffen eines Myons entstehen somit eine große Anzahl an Photonen mit Energie im Bereich des sichtbaren Lichts. Einige Myonen haben eine so geringe Energie, dass sie im Szintillator komplett abgebremst werden und dort zerfallen. Der Myonenzerfall in Elektronen und Neutrinos kann folgendermaßen dargestellt werden

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.$$

Das entsprechende Antiteilchen, hier das Antimyon, verhält sich genauso wie das Myon und zerfällt entsprechend in Positron und Neutrinos

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu.$$

Die entstehenden Elektronen und Positronen erzeugen ebenfalls einen Lichtblitz im Szintillator, sodass der zeitliche Abstand zwischen den beiden Lichtblitzen der individuellen Lebensdauer des detektierten Myons entspricht.

1.3 Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Elementarteilchen

Da es sich beim Zerfall des Myons um einen statistischen Prozess handelt, besitzen einzelne Myonen unterschiedliche individuelle Lebensdauern. Dies hat zur Folge, dass eine allgemeinere Definition der Lebensdauer nötig ist. Diese bezeichnet man als die mittlere Lebensdauer. Da die Zerfälle der einzelnen Teilchen unabhängig voneinander sind, ergibt sich bei einer Gesamtteilchenzahl N für die Anzahl dN der Teilchen, die in der Zeit dt zerfallen

$$dN = -NdW = -\lambda N dt, \quad (1)$$

wobei $dW = \lambda dt$ die Zerfallswahrscheinlichkeit eines einzelnen Teilchens im Zeitintervall dt ist und λ die Zerfallskonstante darstellt. Für eine sehr große Teilchenzahl N kann dieser Zusammenhang integriert werden

$$\frac{N(t)}{N_0} = e^{-\lambda t}. \quad (2)$$

Durch Bildung von

$$\frac{dN(t)}{N_0} = \frac{N(t) - N(t + dt)}{N_0}$$

ergibt sich die exponentielle Verteilungsfunktion der Lebensdauer t :

$$\frac{dN(t)}{N_0} = \lambda e^{-\lambda t} dt. \quad (3)$$

Die mittlere Lebensdauer ergibt sich als Mittelwert aus allen möglichen Lebensdauern gewichtet mit der Verteilungsfunktion. Dies entspricht dem Erwartungswert

$$\tau = \int_{-\infty}^{\infty} \lambda t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (4)$$

der Verteilungsfunktion (3). Die mittlere Lebensdauer τ entspricht also der inversen Zerfallskonstante λ .

2 Aufbau und Durchführung

2.1 Aufbau

Wie in Kapitel 1.2 beschrieben, wird die Lebensdauer der einzelnen Myonen bestimmt, indem die Zeitdifferenz zwischen Eintreffen des Myons im Szintillator und dem folgenden Zerfall gemessen wird. Zur Zeitmessung werden die Signale des Szintillators als Start- und Stopp-Impulse an einen Zeit-Amplituden-Konverter übertragen. Dabei kann nicht

zwischen Myonen-Signalen und Zerfalls-Signalen unterschieden werden. Problematisch hierbei ist, dass die meisten Myonen eine sehr hohe Energie haben, sodass sie im Szintillator nicht vollständig abgebremst werden. Dies hat zur Folge, dass sie nicht innerhalb des Szintillators zerfallen. Diese Myonen senden also nur ein Start-Signal bei ihrem Eintreffen, aber kein Stopp-Signal. Weiterhin zerfallen nicht alle Myonen sofort, sondern manche werden zunächst von einem Atomkern eingefangen und bilden ein myonisches Atom.

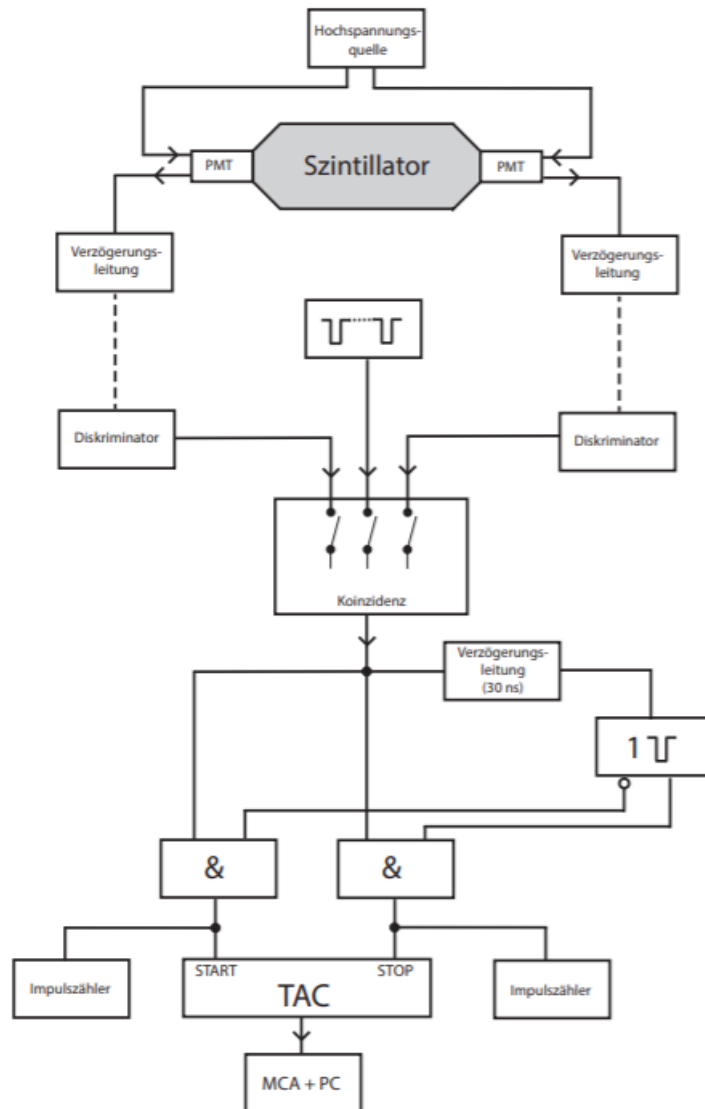


Abbildung 1: Darstellung des schematischer Versuchsaufbaus [2].

In Abbildung 1 ist der verwendete Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Aufgrund der benötigten geringen Abklingzeit wird ein organischer Szintillator verwendet. Dieser hat gegenüber anorganischen Szintillatoren den Nachteil, dass keine gute Energieauflösung

erreicht wird. Allerdings wird hier keine Messung dieser Energieklasse benötigt, sodass dieser Nachteil für die Durchführung irrelevant ist.

Wie in der Abbildung deutlich wird, werden an zwei entgegengesetzten Seiten Photomultiplier (PMT) optisch angekoppelt. Diese wandeln die Lichtimpulse des Szintillators in elektronische Impulse um. Ein Problem bei den PMT besteht darin, dass sie zu spontaner Elektronenemission neigen. Diese können die Messungen verfälschen. Auf Grund dessen werden zwei PMT und eine Koinzidenzschaltung verwendet, die nur Signale zulässt, wenn die beiden PMT innerhalb eines kurzen Intervalls „gleichzeitig“ Impulse liefern. Da die beiden PMT und deren optische Kopplung an den Szintillator leichte Unterschiede aufweisen können, wird beiden PMT jeweils eine Verzögerungsleitung nachgeschaltet. Diese wird so angepasst, dass die Signale zeitgleich bei der Koinzidenzschaltung ankommen. Vor der Koinzidenzschaltung ist jeweils ein Diskriminator, der zum einen der Rauschunterdrückung dient, indem er sämtliche Signale unterhalb einer einstellbaren Schwelle herausfiltert, und zum anderen die Signale der PMT auf eine einheitliche Länge und Breite bringt. Die restliche Schaltung besteht aus Bauteilen, welche dem NIM-Standard folgen.

Da die mittlere Lebensdauer der Myonen kleiner als der mittlere zeitliche Abstand zwischen zwei einfallenden Myonen ist, kann die Lebensdauer mithilfe einer Stoppuhr gemessen werden. Die Stoppuhr wird durch den Impuls eines einfallenden Myons gestartet und durch den Impuls des zerfallenden Myons gestoppt. Dazu wird ein Zeit-Amplituden-Converter (TAC) verwendet, der einen Spannungsimpuls abgibt. Die Amplitude ist proportional zur Zeitdifferenz zwischen Start- und Stoppsignal. Außerdem werden die Start- und Stoppsignale, die den TAC erreichen, von Impulszählern aufgezeichnet. Die Impulse des TAC werden von einem Vielkanalanalysator entsprechend ihrer Höhe histogrammiert. Zur Kalibrierung der Kanäle kann an die Koinzidenzschaltung ein Doppelimpulsgenerator angeschlossen werden, welcher elektrische Impulse mit einer einstellbaren Zeitdifferenz erzeugen kann.

Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die meisten Myonen zu hochenergetisch sind, sodass sie durch den Szintillator durchgehen und nicht darin komplett abgebremst werden. Dadurch geben diese nur einen Startimpuls und keinen Stoppsignal. Es wird also eine logische Schaltung mithilfe eines Univibrators und zweier AND-Gatter aufgebaut, die die Schaltung nach einer einstellbaren Suchzeit T_s wieder in ihren Ausgangszustand versetzt, sodass nach Ablauf dieser Zeit das nächste Signal wieder als Startsignal gewertet wird. Vor dem Univibrator ist eine Verzögerungsleitung mit einer Verzögerung von ca. 30 ns eingebaut. Zu Beginn der Messung liegt am Ausgang des Univibrators ein L-Signal an, am invertierten Ausgang also ein H-Signal, sodass ein Signal von der Koinzidenzschaltung das 1. AND-Gatter passieren kann und die Zeitmessung am TAC startet. Nach der Verzögerung von 30 ns erreicht das Signal der Koinzidenzschaltung den Univibrator, welcher die Suchzeit startet. Während der Suchzeit liegt am Ausgang des Univibrators ein H-Signal an sodass ein Signal von der Koinzidenzschaltung nur das 2. AND-Gatter passiert und nicht das 1., sodass ein Stopp-Signal am TAC ankommt. Nach Ablauf der Suchzeit oder nach Eintreffen eines Signals springt der Univibrator zurück in seinen Ausgangszustand, sodass das nächste Signal wieder nur das 1. AND-Gatter passieren kann, die Zeitmessung des TACs also neu startet.

Trotz des Herausfilterns vieler Störeffekte bleibt ein Untergrund übrig, da es eine endliche Wahrscheinlichkeit gibt, dass innerhalb der Suchzeit zwei Myonen hintereinander eintreffen, sodass die Zeitdifferenz zwischen den beiden Myonen als Lebensdauer aufgezeichnet wird, obwohl die Myonen nicht in dem Zeitraum zerfallen sind. Da eintreffende Myonen und zerfallende Myonen nicht voneinander unterschieden werden können, kann dieser Untergrund bei der Versuchsdurchführung nicht herausgefiltert werden, sondern muss bei der Auswertung berücksichtigt werden.

2.2 Durchführung

Zunächst müssen die einzelnen Komponenten der Schaltung aufgebaut bzw. eingestellt werden. Angefangen wird bei den Diskriminatorschwellen, die so eingestellt werden, dass beide Diskriminatoren die gleiche Impulsrate liefern, welche bei 30 Impulsen pro Sekunde liegen sollte. Dann werden die Verzögerungsleitungen so aufeinander eingestellt, dass die maximale Anzahl an Impulsen von der Koinzidenzschaltung ausgegeben werden. Danach wird ein Oszilloskop an den Ausgang des Univibrators angeschlossen, um die Suchzeit T_S einzustellen. Gewählt wird eine Suchzeit von $10\text{ }\mu\text{s}$. Nun wird die Schaltung bis zum TAC aufgebaut und dessen Funktionsweise überprüft. Dazu wird der Doppelimpulsgenerator anstelle der PMT an die Koinzidenzschaltung angeschlossen. Der Messbereich des TACs wird an die Suchzeit T_S angepasst. Zuletzt wird der Vielkanalanalysator angeschlossen und kalibriert. Dazu werden mit dem Doppelimpulsgenerator Impulse mit verschiedenen Zeitdifferenzen erzeugt und überprüft, welche Kanäle diesen Zeitdifferenzen entsprechen. Daraus kann eine Ausgleichsgerade für den Zusammenhang zwischen Kanalnummer und Zeitdifferenz berechnet werden.

Nach dem Aufbau der Schaltung und der Kalibrierung wird das Messprogramm gestartet und zeitgleich werden die Impulszähler gestartet. Über einen Zeitraum von $t_{\text{Mess}} = 98\,072\text{ s} \approx 27,24\text{ h}$ werden Daten aufgenommen.

3 Auswertung

Vor der eigentlichen Langzeitmessung zur Bestimmung der Myonen-Lebensdauer wird eine Messreihe zur Untersuchung der Koinzidenzschaltung durchgeführt. Dazu werden die beiden Verzögerungsleitungen systematisch variiert und die Impulsrate am Ausgang der Koinzidenzschaltung gemessen. Anschließend werden Messdaten zur Kalibration des Multichannel-Analyzers (MCA) aufgenommen.

3.1 Auswahl einer geeigneten Verzögerungszeit vor der Koinzidenzschaltung

Zur Auswahl einer geeigneten Verzögerungszeit werden die Verzögerungsleitungen systematisch variiert und die Zählrate hinter der Koinzidenzschaltung beobachtet. Die sich dabei ergebenden Messwerte sind in Tabelle 1 dargestellt, wobei sich die Unsicherheit auf die Zählrate N aus \sqrt{N} ergibt. Bei einer Ausgleichsrechnung mit einer konstanten Funktion durch das vermutete Plateau im Intervall $[-10\text{ ns}; 10\text{ ns}]$ ergibt sich ein

Tabelle 1: Zählrate hinter der Koinzidenzschaltung bei verschiedenen Einstellungen der Verzögerungsleitungen.

Verzögerung Δt / ns	Counts N	Verzögerung Δt / ns	Counts N
-24,0	$0,1 \pm 0,1$	2,0	$21,1 \pm 1,5$
-23,0	$0,0 \pm 0,0$	2,5	$17,7 \pm 1,3$
-22,0	$0,0 \pm 0,0$	3,0	$19,3 \pm 1,4$
-21,0	$0,4 \pm 0,2$	4,0	$17,9 \pm 1,3$
-20,0	$0,0 \pm 0,0$	5,0	$17,9 \pm 1,3$
-19,0	$0,1 \pm 0,1$	6,0	$17,3 \pm 1,3$
-18,0	$0,6 \pm 0,2$	7,0	$17,8 \pm 1,3$
-17,0	$0,7 \pm 0,3$	8,0	$16,8 \pm 1,3$
-16,0	$1,1 \pm 0,3$	9,0	$17,5 \pm 1,3$
-15,0	$3,6 \pm 0,6$	10,0	$16,6 \pm 1,3$
-14,0	$5,2 \pm 0,7$	11,0	$12,9 \pm 1,1$
-13,0	$6,0 \pm 0,8$	12,0	$14,6 \pm 1,2$
-12,0	$7,2 \pm 0,8$	13,0	$11,9 \pm 1,1$
-11,0	$8,0 \pm 0,9$	14,0	$10,6 \pm 1,0$
-10,0	$11,6 \pm 1,1$	15,0	$9,4 \pm 1,0$
-9,0	$12,4 \pm 1,1$	16,0	$5,6 \pm 0,7$
-8,0	$14,2 \pm 1,2$	17,0	$3,9 \pm 0,6$
-7,0	$15,3 \pm 1,2$	18,0	$2,1 \pm 0,5$
-6,0	$16,7 \pm 1,3$	19,0	$0,9 \pm 0,3$
-5,0	$19,0 \pm 1,4$	20,0	$0,7 \pm 0,3$
-4,0	$18,5 \pm 1,4$	21,0	$0,4 \pm 0,2$
-3,0	$20,5 \pm 1,4$	22,0	$0,2 \pm 0,1$
-2,5	$18,4 \pm 1,4$	23,0	$0,6 \pm 0,2$
-2,0	$19,3 \pm 1,4$	24,0	$0,2 \pm 0,1$
-1,5	$17,6 \pm 1,3$	25,0	$0,4 \pm 0,2$
-1,0	$18,6 \pm 1,4$	26,0	$0,4 \pm 0,2$
-0,5	$18,0 \pm 1,3$	27,0	$0,2 \pm 0,1$
0,0	$16,8 \pm 1,3$	28,0	$0,3 \pm 0,2$
0,5	$18,5 \pm 1,4$	29,0	$0,2 \pm 0,1$
1,0	$17,7 \pm 1,3$	30,0	$0,0 \pm 0,0$
1,5	$16,8 \pm 1,3$		

durchschnittlicher Wert von

$$\bar{N} = 17,4 \pm 0,4.$$

Zur Bestimmung der Halbwertsbreite werden die entsprechenden Zeiten nun durch eine lineare Interpolation mit Python 3.7.4 bestimmt. Dazu werden die Messpunkte ausgewählt, deren Zählraten den halben Maximalwert von 8,7 Counts umschließen. Anschließend wird jeweils eine lineare Funktion an die entsprechenden Messpunkte angelegt, die in Abbildung 2 blau eingezeichnet sind. Anhand der Schnittpunkte dieser Funktionen mit der Geraden bei 8,7 Counts werden die entsprechenden Zeiten der linken und rechten Flanke berechnet. Diese sind in der Abbildung 2 schwarz gestrichelt markiert. Aus der Differenz dieser Zeiten wird dann wiederum die Halbwertsbreite bestimmt. Dabei ergeben sich für die

$$\begin{aligned} \text{linke Flanke: } \Delta t_{\text{links}} &= -10,8 \text{ ns} \\ \text{rechte Flanke: } \Delta t_{\text{rechts}} &= 15,2 \text{ ns}. \end{aligned}$$

Die Messwerte sowie die Ergebnisse der Rechnung zur Halbwertsbreite sind in Abbildung 2 graphisch zusammengefasst. Damit folgt eine Halbwertsbreite von $\Delta t_{\text{HWB}} = 25,78 \text{ ns}$.

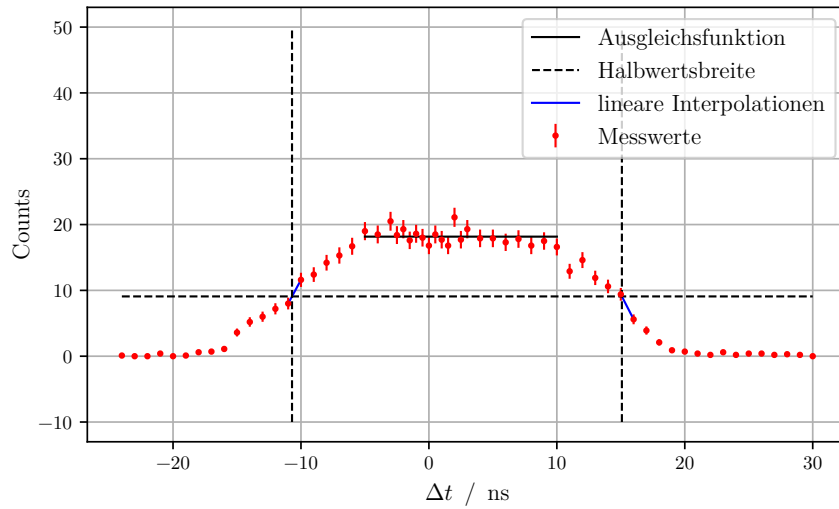


Abbildung 2: Graphische Darstellung der Messwerte zur Variation der Verzögerungsleitungen sowie Bestimmung der Halbwertsbreite.

Die Auflösungszeit ergibt sich daraus mit

$$t_{\text{Auflösung}} = |2 \cdot 10 \text{ ns} - \Delta t_{\text{HWB}}| = 5,78 \text{ ns}.$$

3.2 Kalibrierung des Multichannel-Analyzers

Zur Kalibration des MCAs werden die in Tabelle 2 dargestellten Messwerte aufgenommen. Sollten zwei benachbarte Kanäle bei gleicher Zeitdifferenz gefüllt werden, wird ein

Tabelle 2: Befüllte Kanäle des MCAs gegen die vom Doppelimpulsgenerator vorgegebene Zeitdifferenz.

Kanalnummer	Zeitdifferenz $\Delta t / \mu\text{s}$	Kanalnummer	Zeitdifferenz $\Delta t / \mu\text{s}$
12	0,5	123	5,5
23	1,0	134	6,0
34	1,5	145	6,5
45	2,0	156	7,0
56	2,5	167	7,5
67,05	3,0	178	8,0
78,81	3,5	189	8,5
89,99	4,0	200	9,0
101	4,5	211	9,5
112	5,0		

gewichteter Mittelwert der Kanalnummern gebildet. Des Weiteren werden die Messwerte gegeneinander aufgetragen. Daran wird eine lineare Ausgleichsfunktion der Form

$$\Delta t = m \cdot \text{Kanalnummer} + n$$

durchgeführt. Dabei ergeben sich die Parameter

$$m = (0,045\,17 \pm 0,000\,05) \mu\text{s pro Kanal}$$

$$n = (-0,044 \pm 0,006) \mu\text{s},$$

mithilfe derer sich jedem Kanal eine Zeitdifferenz Δt zuordnen lässt. Somit ist die x -Achse nicht mehr in Kanalnummern, sondern als Zeitachse skaliert. Die graphische Darstellung der Messwerte sowie der Ergebnisse der Ausgleichsrechnung sind in Abbildung 3 zu sehen.

3.3 Bestimmung der Lebensdauer aus der Langzeitmessung

Die Langzeitmessung wird über $t_{\text{Mess}} = 98\,072\text{ s} \approx 27,24\text{ h}$ laufen gelassen. In dieser Zeit werden $N_{\text{start}} = 1644370$ Startsignale und $N_{\text{stop}} = 4979$ Stoppsignale registriert. Nach der Zeitskalierung der Messdaten des MCAs wird daran eine exponentielle Ausgleichsrechnung analog zu Gleichung (2) der Form

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda t) + U$$

mithilfe von Python 3.7.4 und dem Modul `scipy.optimize.curve_fit` durchgeführt. Dabei ergeben sich für die Parameter die Werte

$$N_0 = 91 \pm 1$$

$$\lambda = (0,456 \pm 0,009) \frac{1}{\mu\text{s}}$$

$$U = 1,1 \pm 0,2,$$

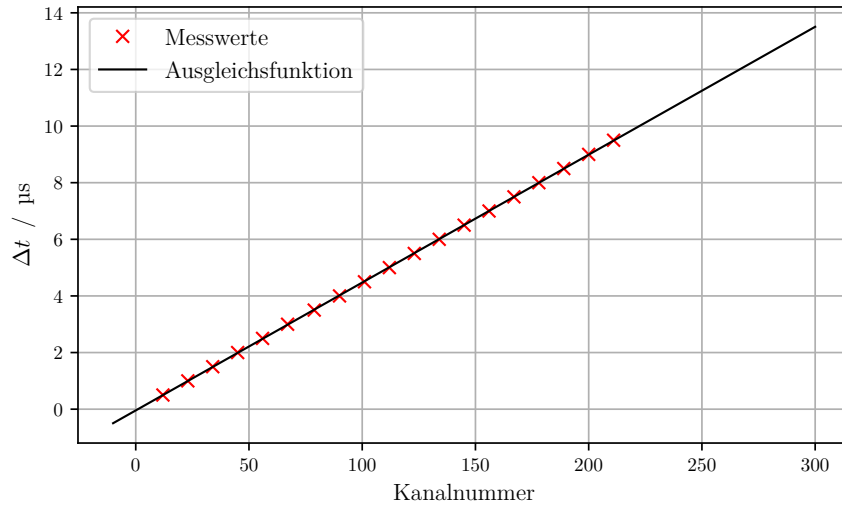


Abbildung 3: Graphische Darstellung der Messwerte und Ergebnisse der Ausgleichsrechnung.

wobei sich die Lebensdauer τ aus der Zerfallskonstante λ mit

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = (2,19 \pm 0,04) \mu s$$

berechnen lässt. Für die Ausgleichsrechnung werden die ersten drei Kanäle nicht mit einbezogen, da die Zählrate dort unwahrscheinlich niedrig ist. Außerdem wird die Ausgleichsrechnung nur bis Kanal 482 durchgeführt, da dies der letzte Kanal mit einer von null verschiedenen Zählrate ist. Eine graphische Darstellung der Messwerte sowie die berechnete Ausgleichsfunktion sind in Abbildung 4 zu sehen.

3.4 Bestimmung der Untergrundrate

Die Untergrundrate entsteht durch ein weiteres innerhalb der Suchzeit T_S einfallendes Myon, sodass an der Koinzidenz ein fehlerhafter Stoppimpuls ausgelöst wird. Sie lässt sich auf zwei verschiedenen Wegen bestimmen. Einerseits ergibt sie sich aus dem Parameter U der Ausgleichsrechnung in Abschnitt 3.3, der den y-Achsenabschnitt darstellt. Andererseits lässt sie sich aber auch aus der Annahme einer poissonverteilten Einfallswahrscheinlichkeit der Myonen berechnen.

Bei der Ausgleichsrechnung stellt der y-Achsenabschnitt gerade die Anzahl an zusätzlich eingefallenen Myonen pro Kanal dar. Es ergibt sich also

$$U_{\text{Fit}} = 1,0 \pm 0,2 \frac{\text{Counts}}{\text{Kanal}}.$$

Die Rechnungen für die zweite Methode sind etwas umfangreicher und ergeben sich aus der Anzahl der Startimpulse. Daraus lässt sich die pro Zeiteinheit durchschnittlich

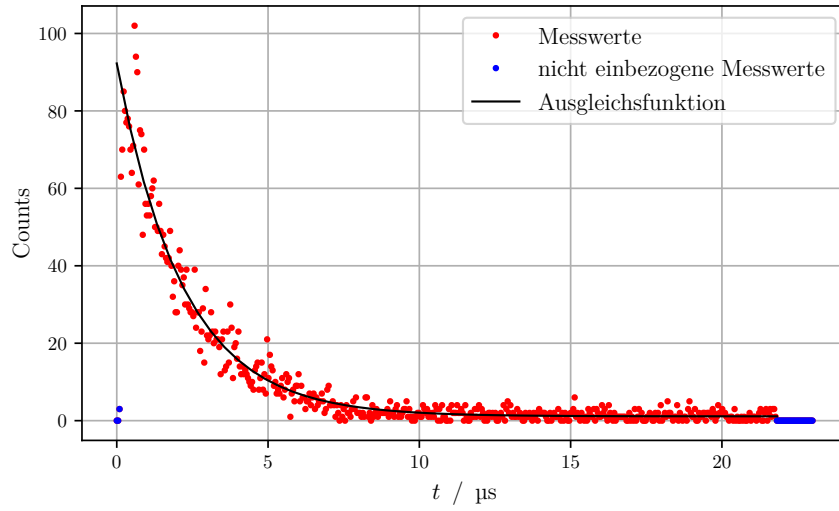


Abbildung 4: Ergebnisse der Langzeitmessung zur Lebensdauer der Myonen und berechnete Ausgleichsfunktion.

einfallende Anzahl Myonen

$$N_{\text{Myon}} = \frac{N_{\text{start}}}{t_{\text{Mess}}} = (16,77 \pm 0,01) \frac{1}{\text{s}}$$

berechnen. Aus der Poissonverteilung lässt sich dann die Wahrscheinlichkeit berechnen, mit der n weitere Myonen während der Suchzeit $T_S = 20 \mu\text{s}$ im Tank einfallen. Sie ergibt sich aus

$$P(k) = \frac{(T_S \cdot N_{\text{Myon}})^k}{k!} \cdot \exp(-T_S \cdot N_{\text{Myon}}).$$

Die Wahrscheinlichkeit für $k = 1$ ist also

$$\begin{aligned} P(1) &= T_S \cdot N_{\text{Myon}} \cdot \exp(-T_S \cdot N_{\text{Myon}}) \\ &= 0,000\,335\,5 \pm 0,000\,000\,2 \\ &= 0,033\,55 \pm 0,000\,02\%. \end{aligned}$$

Daraus resultiert die Anzahl der fehlerhaften Stoppimpulse

$$\begin{aligned} N_{\text{fehl}} &= N_{\text{start}} \cdot P(1) \\ &= 551,7 \pm 0,5, \end{aligned}$$

die sich auf die vorderen 482 Kanäle verteilen. Daher ergibt sich die Untergrundrate pro Kanal zu

$$U_{\text{Poisson}} = 1,145 \pm 0,001 \frac{\text{Counts}}{\text{Kanal}}.$$

4 Diskussion

4.1 Wahl der Verzögerungszeit

Zunächst wird die bereits während der Durchführung eingestellte Verzögerungszeit vor den Diskriminatoren diskutiert. Dort wurde eine Zeit von $\Delta t = 2 \text{ ns}$ eingestellt. Die optimale Verzögerungszeit ergibt sich aus der Mitte des in Kapitel 3.1 bestimmten Plateaus und liegt damit bei 2,5 ns. Also lässt sich davon ausgehen, dass die aufgrund der maximalen Zählrate ausgewählte Verzögerungszeit hinreichend gut gewählt war.

4.2 Bestimmung der Untergrundrate

Die Untergrundrate wurde auf zwei verschiedenen Wegen bestimmt. Bei der Berechnung mit der Annahme einer Poisson-Verteilung ergab sich eine Untergrundrate von $U_{\text{Poisson}} = 1,114 \pm 0,001 \frac{\text{Counts}}{\text{Kanal}}$. Aus der Ausgleichsrechnung ergab sich ein Wert von $U_{\text{Fit}} = 1,1 \pm 0,2 \frac{\text{Counts}}{\text{Kanal}}$. Die beiden Werte weichen also um 1,3% voneinander ab. Dies spricht dafür, dass die Ausgleichsrechnung valide Ergebnisse geliefert haben kann.

4.3 Bestimmung der Lebensdauer kosmischer Myonen

Bei der Ausgleichsrechnung ergab sich eine Myonen-Lebensdauer von $\tau = (2,19 \pm 0,04) \mu\text{s}$. Der Literaturwert beträgt $(2,196\,981\,1 \pm 0,000\,002\,2) \mu\text{s}$ [1]. Hier beträgt die Abweichung also 0,32%. Zu erwähnen ist hierbei allerdings, dass die ersten drei Kanäle für die Ausgleichsrechnung nicht herangezogen worden sind. Die Zählraten lagen dort eine Größenordnung unter dem erwarteten Wert, sodass diese die Messung verfälscht hätten. Auffällig ist außerdem ein Peak in mehreren der vorderen Kanäle, wo eigentlich ein exponentieller Abfall zu erwarten war. Wie sich an den extrem geringen Abweichungen zum Literaturwert zeigt, scheint dieser die Messung nicht beeinflusst zu haben. Er ist eventuell auf eine Ungenauigkeit in der Justierung zurückzuführen. Bei genauerer Betrachtung fällt auch auf, dass die Summe über alle Kanäle des MCAs $N_{\text{MCA}} = 4724$ liegt. Die Anzahl aller vom TAC registrierten Stop-Impulse betrug $N_{\text{TAC}} = 4979$. Beide Punkte sprechen dafür, dass der MCA für kurze Zeiten schlechter funktioniert. Konkret gilt dies zumindest für $t < 0,14 \mu\text{s}$, vermutlich allerdings sogar für $t < 0,59 \mu\text{s}$, da für diese Zeit der theoretisch nicht erwartete Peak auftrat. Zusammenfassend sind die Messungen aber dennoch sehr gut ausgefallen.

Literatur

- [1] M. Tanabashi et al. (Particle Data Group). *The Review of Particle Physics*. 2019. (Besucht am 29.12.2019).
- [2] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch 01*. URL: <http://129.217.224.2/HOME PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/FP/SKRIPT/V01.pdf> (besucht am 18.12.2019).