

V01

Lebensdauer von Myonen

Amelie Hater
amelie.hater@tu-dortmund.de

Ngoc Le
ngoc.le@tu-dortmund.de

Durchführung: 23.04.2025

Abgabe: 06.05.2025

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Standardmodell der Elementarteilchen	3
2.1.1	Myonen	3
2.2	Mittlere Lebensdauer von Elementarteilchen	3
3	Aufbau und Durchführung	4
3.1	Aufbau	4
3.2	Durchführung	6
4	Auswertung	6
4.1	Verzögerungszeit vor der Koinzidenzschaltung	6
4.2	Kalibrierung des Multichannel-Analyzers	8
4.3	Experimentelle Bestimmung der Lebendauer von Myonen und der Untergrun- dtrate	10
4.4	Berechnung der theoretischen Untergrundrate	11
5	Diskussion	11
5.1	Allgemein	11
5.2	Verzögerungszeit vor der Koinzidenzschaltung	11
5.3	Kalibrierung des MCAs	11
5.4	Bestimmung der Lebendauer von Myonen und der Untergrundrate	12
	Literatur	12
	Anhang	13
	Originaldaten	13

1 Zielsetzung

Ziel dieses Versuchs ist die Bestimmung der Lebensdauer von Myonen aus einer Messreihe von Individuallebensdauern einzelner Myonen.

2 Theorie

2.1 Standardmodell der Elementarteilchen

Das Standardmodell der Teilchenphysik, wie es z.B. in [1] erklärt wird, unterteilt die Elementarteilchen in Quarks, Leptonen und Eichbosonen. Quarks und Leptonen gehören zur Gruppe der Fermionen und lassen sich jeweils in drei Generationen einteilen, die sich insbesondere in ihrer Masse und Lebensdauer unterscheiden.

Quarks tragen eine sogenannte Farbladung und nehmen an der starken Wechselwirkung teil. Leptonen hingegen unterliegen nicht der starken, sondern der schwachen Wechselwirkung. Zu den geladenen Leptonen zählen das Elektron, das Myon und das Tauon, die jeweils eine elektrische Ladung von $-e$ besitzen und zudem der elektromagnetischen Wechselwirkung unterliegen. Die zugehörigen Neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ) sind elektrisch neutral. Im Gegensatz zu Elektronen sind Myonen und Tauonen instabil und zerfallen mit charakteristischen Lebensdauern τ .

2.1.1 Myonen

Myonen entstehen in der Erdatmosphäre in Höhen von etwa 15–20 km durch den Zerfall von Pionen. Diese Pionen entstehen zuvor bei der Wechselwirkung hochenergetischer kosmischer Protonen mit den Atomkernen der Luftmoleküle. Aufgrund ihrer kurzen Lebensdauer zerfallen die Pionen wie folgt:

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

Die dabei entstehenden Myonen besitzen eine mittlere Lebensdauer von $2,2\,\mu\text{s}$ und zerfallen in Elektronen, Neutrinos und Antineutrinos:

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

Da sich Myonen mit Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit bewegen, erreichen sie trotz ihrer kurzen Lebensdauer die Erdoberfläche und können die Erdoberfläche bis in Tiefen von etwa 400 km durchdringen.

2.2 Mittlere Lebensdauer von Elementarteilchen

Die Herleitung der mittleren Lebensdauer τ wird ausführlich in [2] behandelt. Die Zerfallsgeschwindigkeit eines Teilchens ist proportional zur Anzahl der verbleibenden

Teilchen $N(t)$ zu einem bestimmten Zeitpunkt t . Diese Beziehung wird durch die folgende Differentialgleichung beschrieben:

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

wobei λ die Zerfallskonstante ist, die die Wahrscheinlichkeit für den Zerfall eines Teilchens pro Zeiteinheit beschreibt. Die Lösung dieser Gleichung ergibt das exponentielle Zerfallsgesetz:

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

wobei N_0 die Anfangszahl der Teilchen darstellt. Die mittlere Lebensdauer τ ist definiert als die Zeit, nach der die Zahl der verbleibenden Teilchen auf den Wert $1/e$ des ursprünglichen Werts abgefallen ist. Sie ist mit der Zerfallskonstanten λ durch die Beziehung

$$\tau = \frac{1}{\lambda}, \quad (3)$$

verknüpft.

3 Aufbau und Durchführung

Der folgende Versuchsaufbau sowie die Durchführung basieren im Wesentlichen auf den Angaben in [3].

3.1 Aufbau

Der Versuchsaufbau zur Bestimmung der Lebensdauer von Myonen ist in der Abbildung 1 abgebildet. Er besteht aus einem Szintillatortank mit einem Volumen von ca. 50 L, an dessen beiden Enden jeweils ein Photomultiplier (PMT) angebracht ist. Der Szintillator erzeugt Lichtblitze (Szintillationen), wenn ein Myon hindurchtritt, welche von den PMTs in elektrische Signale umgewandelt werden [4]. Diese Signale werden über Verzögerungsleitungen an Diskriminatoren mit einstellbarer Schwelle weitergeleitet. Diese unterdrücken Rauschsignale, indem sie nur Pulse oberhalb eines definierten Spannungswerts durchlassen [2]. Die Pulsdauer am Ausgang dieser Diskriminatoren lässt sich ebenfalls variieren.

Die Ausgangssignale werden anschließend einer Koinzidenzschaltung zugeführt, die nur dann ein Signal erzeugt, wenn beide Pulse gleichzeitig auftreten. Durch diese Koinzidenzbedingung werden echte Myonensignale von zufälligen Hintergrundereignissen unterschieden. Das daraus resultierende Signal dient als Startimpuls für die nachfolgende Zeitmessung.

Das Koinzidenzsignal wird sowohl über zwei AND-Gattern als auch über eine zusätzliche Verzögerungsleitung von 30 ns an ein Monoflop weitergeleitet. Dieser erzeugt ein Zeitfenster, die sogenannte Suchzeit T_S , innerhalb derer ein Zerfallssignal erwartet wird. Die beiden AND-Gatter sind mit einem Time-Amplitude-Converter (TAC) verbunden. Eines der Gatter startet die Zeitmessung beim Eintritt des Myons, das andere beendet sie beim Zerfall. Über zusätzliche Leitungen, die mit einem Impulszähler verbunden sind,

ist es möglich, die Anzahl der Start- und Stoppimpulse getrennt zu erfassen. Durch diese Anordnung wird erreicht, dass die Zeitmessung startet, sobald ein Myon in das Detektor eintritt, und stoppt, wenn dieses zerfällt. Der TAC wandelt den Zeitabstand zwischen Start- und Stoppimpuls in eine analoge Spannung um, die proportional zur gemessenen Zeitdifferenz ist [2].

Das Signal des TAC wird anschließend an einen Vielkanalanalysator (MCA) übergeben, der über einen PC mit entsprechender Messsoftware ausgelesen wird. Der MCA digitalisiert diese Spannungen und ordnet sie entsprechend ihrer Höhe diskreten Kanälen zu, wodurch ein Histogramm der Zerfallszeiten erzeugt wird [4]. Zur Kalibrierung steht zudem ein Doppelimpulsgenerator zur Verfügung, der bei 1 kHz Doppelimpulse mit variablen Zeitabständen erzeugt.

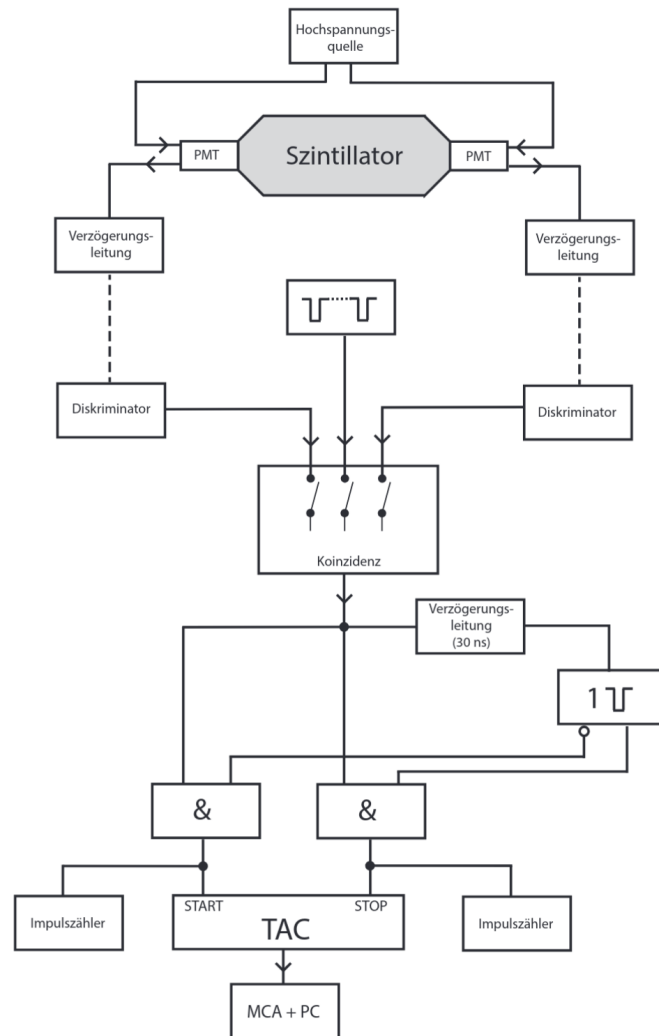


Abbildung 1: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Lebensdauer von Myonen. [3]

3.2 Durchführung

Zunächst wird zur Kalibrierung des MCA ein Doppelimpulsgenerator angeschlossen. Mit diesem wird gemessen, welcher zeitliche Abstand zwischen zwei Impulsen welchem Kanal im MCA zugeordnet wird. Die Kalibrierung sollte mit mindestens zehn Messpunkten im Bereich von $0,3 - 9,9 \mu\text{s}$ durchgeführt werden. Um die Messgenauigkeit über den gesamten Bereich zu gewährleisten, sollte für alle Messpunkte die gleiche Messdauer eingehalten werden. Hier wird die Messdauer von 60 s gewählt. Die Zählerraten können anschließend miteinander verglichen werden. Für den weiteren Verlauf ist der Doppelimpulsgenerator nicht angeschlossen.

Sobald die Photomultiplier mit Hochspannung versorgt sind, sollten an ihren Ausgängen Spannungssingale mit unterschiedlichen Amplituden zu erkennen sein. Dies kann mithilfe eines Oszilloskops überprüft werden. Anschließend werden die Schwellenwerte der Diskriminatoren so eingestellt, dass an beiden Ausgängen etwa 30 Impulse pro Sekunde erzeugt werden. Dabei sollte eine Pulsdauer von etwa $\Delta t = 10 \text{ ns}$ gewählt werden. Der Impulszähler hilft dabei, die Anzahl der Signale zu kontrollieren. Um die Koinzidenzschaltung richtig abzustimmen, verändert man die Verzögerungsleitungen systematisch von -30 ns bis 30 ns und misst die Anzahl der Pulse in einem Zeitraum von 30 s . Der gewählte Messbereich ist dabei so groß, dass sich die Halbwertsbreite später zuverlässig bestimmen lässt. Nachdem eine geeignete Verzögerung gefunden wurde, bleibt diese für den gesamten Versuch unverändert.

Nach abgeschlossener Kalibrierung wird die Langzeitmessung zur Bestimmung der Lebensdauer gestartet, welche für mindestens 24 h durchgeführt wird.

4 Auswertung

Bevor die Langzeitmessung durchgeführt wird, werden verschiedenen Bestandteile des Aufbaus kalibriert. Dazu wird die Verzögerung zwischen den eingehenden Signalen an der Koinzidenzschaltung systematisch variiert und die Impulsrate nach dieser gemessen. Außerdem werden Messdaten zur Kalibrierung des MCAs aufgenommen, um einen Zusammenhang zwischen der Channelzahl und der Zeit zwischen Start- und Stoppsignal herstellen zu können.

4.1 Verzögerungszeit vor der Koinzidenzschaltung

Die Verzögerung Δt vor der Koinzidenzschaltung wird für den weiteren Versuch so gewählt, dass die Anzahl der Pulse nach der Schaltung (im Folgenden Counts genannt) maximal ist. Die gemessenen Counts N haben eine zugehörige Unsicherheit von \sqrt{N} . Die Messwerte sind in Tabelle 1 aufgeführt. In der Abbildung 2 sind neben den Messwerten die Ausgleichskonstante durch das in dem Bereich $\Delta t = \pm 10 \text{ ns}$ vermutete Plateau und die Halbwertsbreite der Funktion dargestellt.

Die Höhe des Plateaus beträgt $11,27 \text{ Counts/s}$. Zur Bestimmung der Halbwertsbreite Δt_{HWB} wird der Abstand beider Flanken auf halber Höhe der Ausgleichskonstanten berechnet. Daraus ergibt sich $\Delta t_{\text{HWB}} = 11,44 \text{ ns}$.

Tabelle 1: Anzahl von der Koinzidenzschaltung ausgehende Pulse in Abhängigkeit von der Verzögerung.

Verzögerung Δt [ns]	Counts $N[s^{-1}]$	Verzögerung Δt [ns]	Counts $N[s^{-1}]$
-30	$0,00 \pm 0,00$	1	$10,67 \pm 3,27$
-28	$0,00 \pm 0,00$	2	$11,80 \pm 3,44$
-26	$0,03 \pm 0,18$	3	$11,37 \pm 3,37$
-24	$0,00 \pm 0,00$	4	$9,30 \pm 3,05$
-22	$0,00 \pm 0,00$	5	$8,77 \pm 2,96$
-20	$0,00 \pm 0,00$	6	$7,00 \pm 2,65$
-18	$0,00 \pm 0,00$	7	$5,63 \pm 2,37$
-16	$0,03 \pm 0,18$	8	$4,03 \pm 2,01$
-14	$0,03 \pm 0,18$	9	$3,60 \pm 1,90$
-12	$0,00 \pm 0,00$	10	$2,30 \pm 1,52$
-10	$0,10 \pm 0,32$	12	$0,70 \pm 0,84$
-9	$0,23 \pm 0,48$	14	$0,23 \pm 0,48$
-8	$0,87 \pm 0,93$	16	$0,03 \pm 0,18$
-7	$1,57 \pm 1,25$	18	$0,07 \pm 0,26$
-6	$3,23 \pm 1,80$	20	$0,07 \pm 0,26$
-5	$5,03 \pm 2,24$	22	$0,03 \pm 0,18$
-4	$7,43 \pm 2,73$	24	$0,00 \pm 0,00$
-3	$8,27 \pm 2,88$	26	$0,00 \pm 0,00$
-2	$9,40 \pm 3,07$	28	$0,00 \pm 0,00$
-1	$10,93 \pm 3,31$	30	$0,00 \pm 0,00$
0	$11,57 \pm 3,40$		

Die Auflösungszeit t_{AZ} wird durch $t_{AZ} = |2 \cdot 10 \text{ ns} - \Delta t_{\text{HWB}}|$ berechnet. Daraus ergibt sich $t_{AZ} = 8,56 \text{ ns}$.

Für den weiteren Verlauf des Versuches wird eine Verzögerungszeit von 2 ns verwendet, da diese die größte Anzahl an Pulsen verursacht.

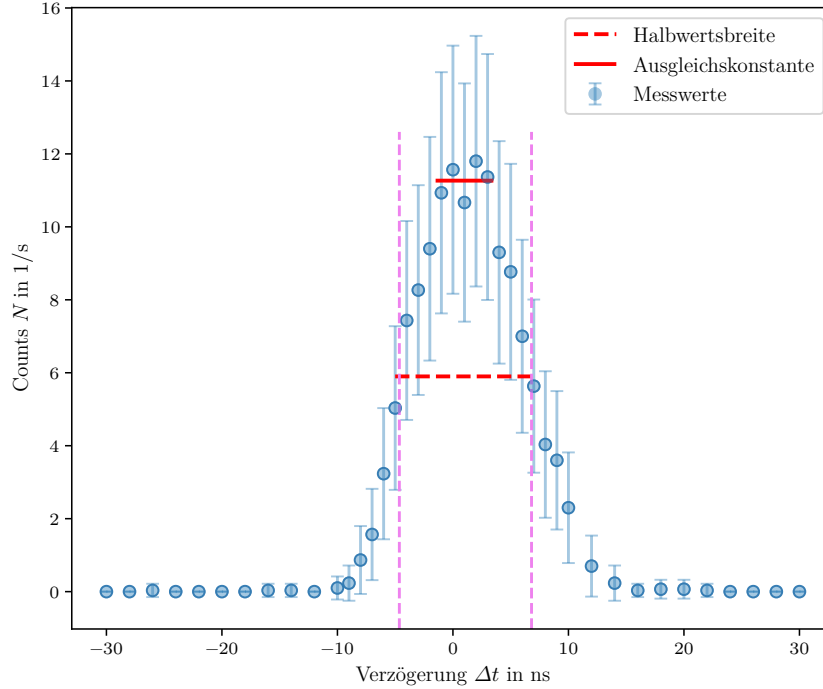


Abbildung 2: Darstellung der Messwert der Variation der Verzögerungszeit mit Ausgleichskonstante und Bestimmung der Halbwertsbreite.

4.2 Kalibrierung des Multichannel-Analyzers

Zur Kalibrierung des Multichannel-Analyzers werden die Kanäle gemessen, die bei verschiedenen Zeitdifferenzen befüllt werden. In Tabelle 2 sind die Nummern der gefüllten Kanäle mit der zugehörigen Zeitdifferenz Δt_K aufgeführt. Falls bei der gleichen Zeitdifferenz mehr als ein Kanal befüllt wird, wird ein Mittelwert abhängig von der Höhe der Counts in den verschiedenen Kanälen für die Kanalnummer verwendet. Die Messwerte und eine lineare Regression sind in Abbildung 3 graphisch dargestellt. Die Ausgleichsgerade der Form $\Delta t_K = m \cdot \text{Kanalnummer} + n$ stellt einen Zusammenhang zwischen Zeitdifferenz und Kanalnummer her, sodass diese in einander umgerechnet werden können. Aus der Ausgleichsrechnung ergibt sich

$$m = (0,0217 \pm 0,0000) \frac{\text{Counts}}{\mu\text{s}} \text{ und}$$

$$n = (0,0965 \pm 0,0033) \mu\text{s}.$$

Tabelle 2: Gefüllte Kanäle bei verschiedenen Zeitdifferenzen.

Kanalnummer	Zeitdifferenz $\Delta t_K [\mu\text{s}]$	Kanalnummer	Zeitdifferenz $\Delta t_K [\mu\text{s}]$
9	0,3	235	5,2
42	1,0	267	5,9
74	1,7	300	6,6
106	2,4	341	7,5
138	3,1	364	8,0
170,69	3,8	396	8,7
203	4,5		

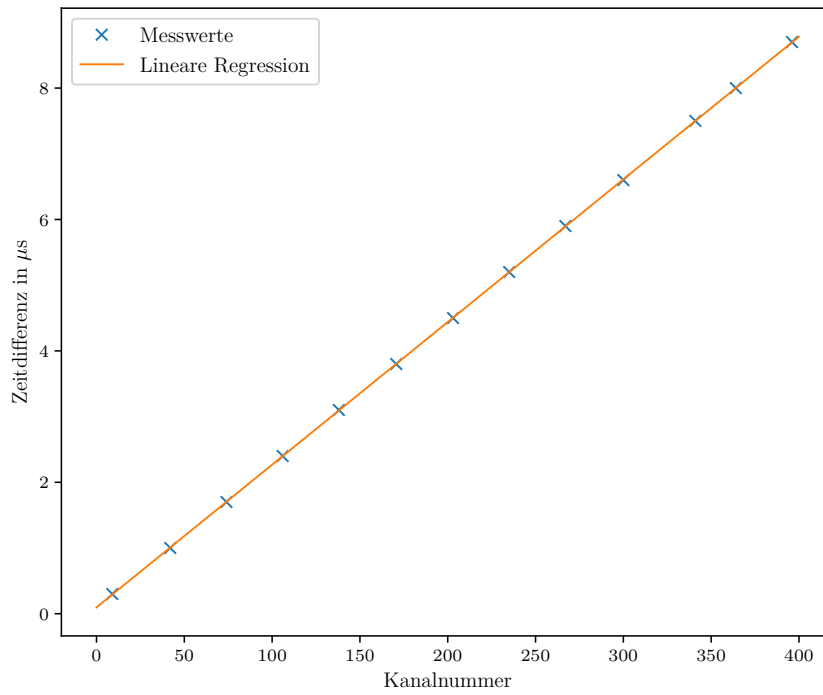


Abbildung 3: Darstellung der Messwerte der Kalibrierung des Multichannel-Analyzers mit Ausgleichsgerade.

4.3 Experimentelle Bestimmung der Lebensdauer von Myonen und der Untergrundrate

Die Lebensdauer von Myonen wird aus einer Langzeitmessung über mehrere Tage bestimmt. Die aufgenommenen Messwerte sind graphisch in Abbildung 4 mit einer Ausgleichsfunktion dargestellt.

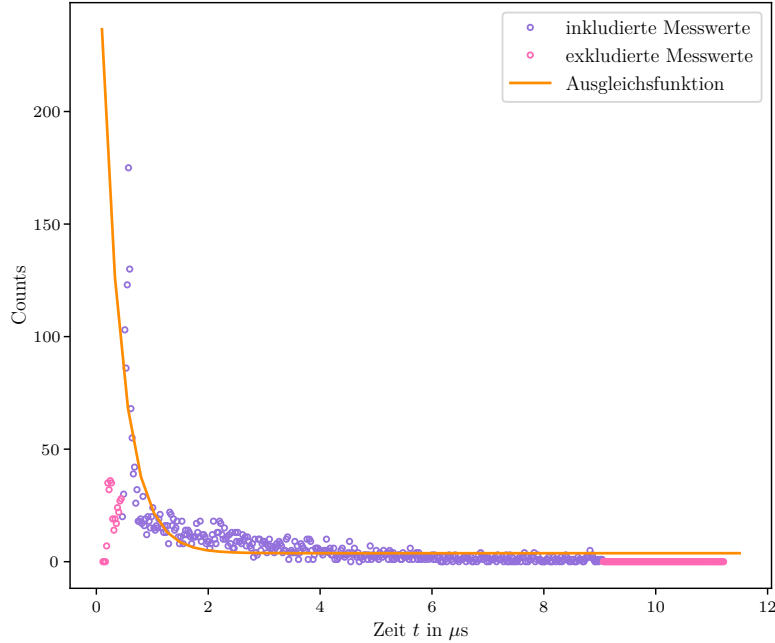


Abbildung 4: Darstellung der Messwerte zur Berechnung der Lebensdauer von Myonen mit Ausgleichsfunktion.

Die Ausgleichsfunktion hat nach der Gleichung (2) die Form

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

Für die Werte ergeben sich aus der Ausgleichsrechnung

$$\begin{aligned} N_0 &= 306,8 \pm 43,8, \\ \lambda &= (2,7618 \pm 0,2214) \frac{1}{\mu\text{s}} \text{ und} \\ U &= 3,77 \pm 0,53. \end{aligned}$$

Für die Ausgleichsrechnung werden die ersten 16 Messwerte und die letzten 100 exkludiert. Die ersten 16 Messwerte sind ungewöhnlich niedrig für eine exponentielle Verteilung und die letzten 100 Kanäle enthalten keinen von 0 verschiedenen Wert.

Die Untergrundrate entspricht dem Parameter U aus der Ausgleichsfunktion und ist dementsprechend

$$U = (3,77 \pm 0,53) \frac{\text{Counts}}{\text{Kanal}}.$$

Die Lebensdauer τ wird mithilfe von Gleichung (3) zu $\tau = (0,362 \pm 0,029) \mu\text{s}$ berechnet.

4.4 Berechnung der theoretischen Untergrundrate

Zur Berechnung der theoretischen Untergrundrate wird die durchschnittliche Ereignisrate N_{Myon} im Szintillatortank von $20,7 \text{ s}^{-1}$ verwendet. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein weiteres Myon während der Suchzeit $T_{\text{S}} = 20 \mu\text{s}$ in den Szintillatortank eintritt ist poissonverteilt. Die verwendete Poissonverteilung wird durch die Gleichung

$$P(k) = \frac{(T_{\text{S}} \cdot N_{\text{Myon}})^k}{k!} e^{-T_{\text{S}} \cdot N_{\text{Myon}}} \quad (4)$$

beschrieben. Daraus ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit, dass ein weiteres Myon einfällt zu $P(1) = 4,1383 \cdot 10^{-4}$. Bei einer Langzeitmessung von $\Delta t_{\text{L}} = 2$ Tage ergibt sich eine durchschnittliche Startanzahl von $N_{\text{Start}} = \Delta t_{\text{L}} \cdot N_{\text{Myon}} - \Delta t_{\text{L}} \cdot N_{\text{Myon}} \cdot P(1)$. N_{Start} ergibt sich zu 3575480. Die fehlerhafte Stoppanzahl ergibt sich durch $N_{\text{f,Stopp}} = N_{\text{Start}} \cdot P(1)$ zu 1480. Diese Verteilen sich auf die ersten 412 Kanäle. Daher kommt es zu der Untergrundrate pro Kanal von

$$U_{\text{theo}} = 3,5 \frac{\text{Counts}}{\text{Kanal}}.$$

5 Diskussion

5.1 Allgemein

Beim Aufbau des Versuchs traten große Probleme bei der Verkabelung auf. Die Weiterleitung von Signal war oftmals gestört aus offensichtlichen Grund. Daher ist ein Fehler in den Messwerten aufgrund der Messelektronik nicht auszuschließen. Außerdem war der Umgang mit dem Computerprogramm zur Messaufzeichnung problematisch, da es bei einigen Messversuchen nichts aufzeichnete.

5.2 Verzögerungszeit vor der Koinzidenzschaltung

Bereits vor der Koinzidenzschaltung sollte das Signal aus beiden Photomultipliern auf 30 Pulse/s gesenkt werden. Dies war allerdings nicht möglich, da ein Photomultiplier grundsätzlich eine viel höhere Pulsrate lieferte, als der andere. Daher konnte das eine Signal nur auf ungefähr 100 Pulse/s heruntergeregelt werden und das andere auf 30 Pulse/s . Dies könnte zu Fehlern in den Messdaten führen. Außerdem ist in den für Verzögerungszeit aufgenommenen Messwerte kein klares Plateau zu erkennen, was eine Folge der unterschiedlichen Pulsraten sein könnte. Demnach könnte die Einstellung der Verzögerung als 2 ns nicht ideal gewesen sein und Einfluss auf den Rest des Versuchs gehabt haben.

5.3 Kalibrierung des MCAs

Die Messwerte der Kalibrierung des MCAs liegen allesamt augenscheinlich sehr nah an der Ausgleichsgerade, was für eine hohe Genauigkeit spricht. Diese Messwerte konnten

nicht durch die Photomultiplier verfälscht werden, da die Pulse für die Messung vom Doppelpulsgenerator erzeugt wurden. Dies kann ein Grund für die Genauigkeit sein. Zusätzlich erfolgte die Messung computergestützt, was den Einfluss der menschlichen Reaktionszeit nebensächlich macht.

5.4 Bestimmung der Lebensdauer von Myonen und der Untergrundrate

Die Problematik, die sich bei der Langzeitmessung ergab, war, dass das Computerprogramm die Messwerte nicht aufgezeichnet hatte, als die Messung nach 2 Tagen gestoppt werden sollte. Allerdings konnten die Daten dann doch nach 4 Tagen auf dem Computer von einer anderen Gruppe gefunden werden, die den Versuch an diesem Tag durchführen sollte. Aus diesem Grund ist die genaue Messdauer nicht bekannt und die Anzahl der Start- und Stoppsignale ebenso. Daher konnte die Untergrundrate nur durch die Ausgleichsfunktion und mit einer theoretischen Einfallrate bestimmt werden. Die Abweichung zwischen

$$U_{\text{theo}} = 3,5 \frac{\text{Counts}}{\text{Kanal}} \text{ und } U = (3,77 \pm 0,53) \frac{\text{Counts}}{\text{Kanal}}$$

liegt bei 7,71 %. Die Abweichung zwischen der theoretischen Lebensdauer $2,2 \mu\text{s}$ und der gemessenen Lebensdauer $(0,362 \pm 0,029) \mu\text{s}$ beträgt 507,73 %. Diese Abweichung ist sehr hoch. Dies könnte eine Folge der vielen aufgetretenen Probleme sein.

Literatur

- [1] C. Grupen. *Einsteig in die Astroteilchenphysik*. 2. Aufl. Springer Spektrum, 2018.
- [2] W.R. Leo. *Techniques for nuclear and particle physics experiments*. 2. Aufl. Springer-Verlag, 1994.
- [3] *Versuch zum Literaturverzeichnis*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2025.
- [4] H. Kolanoski und N. Wermes. *Teilchendetektoren*. 1. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, 2016.

Anhang

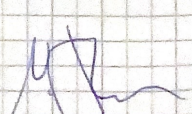
Originaldaten

23.04.2025

VO 1 - Myonenlebensdauermessung

Kalibrierung mittels Doppelpulsgeber Messdauer: 60s
Einstellung: 0,1 μ s

	Counts	
3	60069	Stop
	60074	Start
10	59965	Stop
	59974	Start
17	60161	Stop
	60169	Start
24	60405	Stop
	60423	Start
31	60100	Stop
	60103	Start
38	59807	Stop
	59813	Start
45	60064	Stop
	60074	Start
52	60010	Stop
	60010	Start
59	60352	Stop
	60397	Start
66	60063	Stop
	60066	Start



73	ca 68000	Stop	} 1,06 min genau → sind rausgegangen
	68600	start	
75	60000	stop	
	60003	start	
80	59304	stop	} kleiner peak (4. peak ist hinzugekommen?)
	59310	start	
87	59661	Stop	} ab allem aber 90 geht ab
	59663	start	
94		Stop	} Zähler nicht mehr → PC nicht mehr
		Start	
99		Stop	} auf 1 Zähler zählt doppelt andere grenzt
		start	

→ dass PMT auf der linken Seite gibt viel viel
mehr Signale als rechts → links 100% rechts 30% Peaks

Delay (links 30) 30 sek Aufnahme

-30	30	0
-28	28	0
-26	26	1
-24	24	0
-22	22	0
-20	20	0
-18	18	0
-16	16	1
-14	14	1
-12	12	0
-10	10	3
-8	8	7

-8	386	26
-7	358	47
-6	328	97
-5	298	816 151
-4	268	258 223
-3	238	228 248
-2	158	224 282
-1	154	328
0	151	347
1	102	320
2	85	354
3	32	341
4		279
5		263
6		210
7		169
8		121
9		108
10		69
12		21
14		7
16		1
18		2
20		2
22		1
24		0
26		0
28		0
30		0

Eingestellte
 Delyx

17:33 Uhr Messung
 gestartet

