

V01

Lebensdauer komischer Myonen

Lukas Bertsch

lukas.bertsch@tu-dortmund.de

Tom Troska

tom.troska@tu-dortmund.de

Durchführung: 12.06.2023

TU Dortmund – Fakultät Physik

1. Zielsetzung

Kosmische Myonen entehen in der Erdatmosphäre auf einer Höhe von rund 10 km durch den Zerfall von Pionen. Ziel des Versuchs ist es, die mittlere Lebensdauer der Myonen mithilfe eines geeigneten Versuchsaufbaus zu ermitteln.

2. Theorie

Trifft ein hochenergetisches Proton aus dem Weltraum auf ein Luftmolekül der Erdatmosphäre kann ein Pion entstehen. Pionen haben eine kurze mittlere Lebensdauer von $\tau_\pi = 26 \text{ ns}$ [2] und zerfallen hauptsächlich in Myonen gemäß

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

Die Myonen bewegen sich mit annähernd Lichtgeschwindigkeit und zerfallen überwiegend über

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

zu Elektronen und den entsprechenden Neutrinos.

2.1. Detektion der Myonen

In diesem Versuch wird die Lebensdauer einzelner Myonen mithilfe eines Szintillationsdetektors ermittelt. Tritt ein hochenergetisches Myon in das Szintillatormaterial ein, wird ein Großteil der Energie des Myons dort deponiert. Dies hat zur Folge, dass die Szintillatormoleküle angeregt werden. Nach einer kurzen Relaxationszeit wird ein Photon emittiert, welches mithilfe eines Photomultipliers detektiert werden kann. Der Detektor ist in Abschnitt 3.1 im Detail beschrieben.

Zerfällt ein Myon in dem Szintillationsdetektor werden die Szintillatormoleküle erneut angeregt und ein Lichtblitz kann detektiert werden. Durch Messung der Zeitpunkte des Eintritts und Zerfalls eines Myons lässt sich auf die Lebensdauer rückschließen. Geschieht dies für viele Myonen lässt sich die mittlere Lebensdauer bestimmen.

2.2. Lebensdauer der Myonen

In einem infinitesimalen Zeitintervall dt zerfällt ein Myon mit derselben Wahrscheinlichkeit. Dadurch ergibt sich der Zusammenhang

$$dW = \lambda dt$$

wobei dW die Wahrscheinlichkeit bezeichnet, dass das Myon in einem infinitesimalen Bereich zerfällt und der Proportionalitätsfaktor λ als Zerfallskonstante identifiziert wird.

Werden N Teilchen betrachtet, ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, dass die Teilchen noch nicht zerfallen sind von

$$dN = -NdW = -N\lambda dt.$$

Durch Umstellen und Lösen der Differentialgleichung lässt sich das Zerfallsgesetz

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

herleiten. Hierbei wird die Anzahl der Teilchen, die zu Beginn betrachtet werden, als N_0 bezeichnet. Über die zeitliche Ableitung und Umstellen lässt sich eine Verteilung für die Lebensdauern berechnen

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

Der Erwartungswert bezüglich der Zeit dieser Exponentialverteilung ist als mittlere Lebensdauer zu interpretieren

$$\langle t \rangle = \tau = \int_0^\infty \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (1)$$

3. Durchführung

3.1. Aufbau und Funktionsweise des Detektors

Eine schematische Skizze des verwendeten Versuchsaufbaus ist in Abbildung 1 zu sehen. In einem zylindrischen Gefäß befindet sich ein organisches Szintillatormaterial. An dem linken und rechten Ende des Tanks ist jeweils ein Photomultiplier (*PhotoMultiplier Tube*: PMT), auch Sekundärelektronenverstärker (SEV) genannt, angebracht. Tritt ein Photon in diesen Photomultiplier ein, löst es über den äußeren Photoeffekt ein Elektron aus dem Material heraus. Dieses Elektron wird in einem elektrischen Feld zu einer Elektrode hin beschleunigt, wo erneut Elektronen ausgelöst werden. Dieser Prozess wiederholt sich, wobei nach jeder Beschleunigungsstufe mehr Elektronen beschleunigt werden. Am Ende des Photomultipliers treffen die Elektronen auf eine Anode und fließen über einen Widerstand ab. Dabei entsteht ein messbarer Spannungspuls. Ein Querschnitt eines beispielhaften Photomultipliers ist in Abbildung 2 gegeben.

Das Signal aus den beiden Photomultipliern durchläuft jeweils eine einstellbare Verzögerungsleitung und einen Diskriminator. Über die Verzögerungsleitung können eventuell unterschiedlich schnell reagierende Photomultiplier ausgeglichen werden und über den Diskriminator wird das Signal diskretisiert und ein Rauschen wird unterdrückt. In einer Koinzidenz werden die zwei Signale miteinander verglichen und es wird nur ein Signal ausgegeben, wenn beide Eingangssignale zeitgleich eintreffen. Dadurch werden nur Events detektiert, die von beiden Photomultipliern registriert werden.

Nach der Koinzidenz wird das Signal auf drei Wege aufgeteilt. Zwei Wege führen zu zwei verschiedenen AND-Gattern, ein weiterer führt durch eine 30 ns Verzögerungsleitung zu einem Monoflop, dessen negierter Ausgang mit dem ersten AND-Gatter und der normale Ausgang mit dem zweiten AND-Gatter verbunden ist. Der Monoflop konvertiert ein

gepulstes Signal in ein durchgängiges binäres Signal (0 oder 1). Das Ausgangssignal des ersten AND-Gatters startet einen Time-Amplitude-Converter (TAC), das Signal des Zweiten stoppt diesen. Ohne die 30 ns Verzögerungsleitung wäre dies nicht möglich, da ein einziges Signal sowohl den Start, als auch den Stop des TAC auslösen würde. Das Ausgangssignal des TAC ist eine Amplitude, die proportional zur Stoppzeit ist, was über das Ansammeln von Ladung innerhalb der Stoppzeit realisiert wird. Mithilfe dieser Schaltung lässt sich der zeitliche Abstand zweier kurz aufeinanderfolgenden Pulse bestimmen. Die beiden Pulse sind das Eintreten in das Szintillatormaterial und der Zerfall des Myons. Die Logik ist in Tabelle 1 dargestellt.

Das Signal des Time-Amplitude-Converters wird an einem Computer histogrammiert und die Daten werden zur Auswertung gespeichert.

Tabelle 1: Logik der Schaltung des TAC. Zum Zeitpunkt $t = 0$ liegt kein Signal an, bei $t = x$ und $t = x + \Delta x$ wird gerade ein Teilchen detektiert. Die Zeitdifferenz der Verzögerungsleitung beträgt 30 ns. In den Spalten 'Start' und 'Stopp' ist jeweils angegeben, ob die Zeitmessung gestartet ist oder nicht.

t	AND 1		AND 2		Start	Stopp
	1	2	3	4		
0	0	1	0	0	0	1
x	1	1	1	0	1	0
$x + 30 \text{ ns}$	0	0	0	1	1	0
$x + \Delta x$	1	0	1	1	0	1
$x + \Delta x + 30 \text{ ns}$	0	1	0	0	0	1

3.2. Messung

In einem ersten Schritt wird das Signal der Photomultiplier mit einem Oszilloskop überprüft, um die richtige Funktion sicherzustellen. Das Signal wird in einem nächsten Schritt durch den Diskriminator gesendet, welcher so eingestellt wird, dass eine Signalbreite von 10 ns gegeben ist.

Nach dem Anschließen der Verzögerungsleitungen zwischen Photomultiplier und Diskriminator werden die einzelnen Signale an die Koinzidenz angeschlossen. Die aus der Koinzidenz ausgehenden Signale werden mithilfe eines Zählwerks gezählt, wobei die Dauer der einzelnen Verzögerungen variiert wird, damit ein idealer Messbereich ermittelt werden kann.

Im Folgenden wird die Verzögerung so eingestellt, dass die Messung sicher in diesem idealen Bereich stattfindet. Hierzu werden nicht die Photomultiplier, sondern ein Doppelpulsgenerator mit einstellbarem Impulsabstand verwendet. Außerdem wird die Schaltung weiter gemäß des Schaltplan aus Abbildung 1 aufgebaut. An dem Monoflop wird eine Suchzeit eingestellt. Die Suchzeit soll in der Größenordnung der erwarteten mittleren Lebendauer der Myonen liegen, also etwa 1 μs bis 10 μs . Werden die Abstände der Doppelpulse variiert, lassen sich die einzelnen Kanäle des an dem PC angezeigten Histogramms

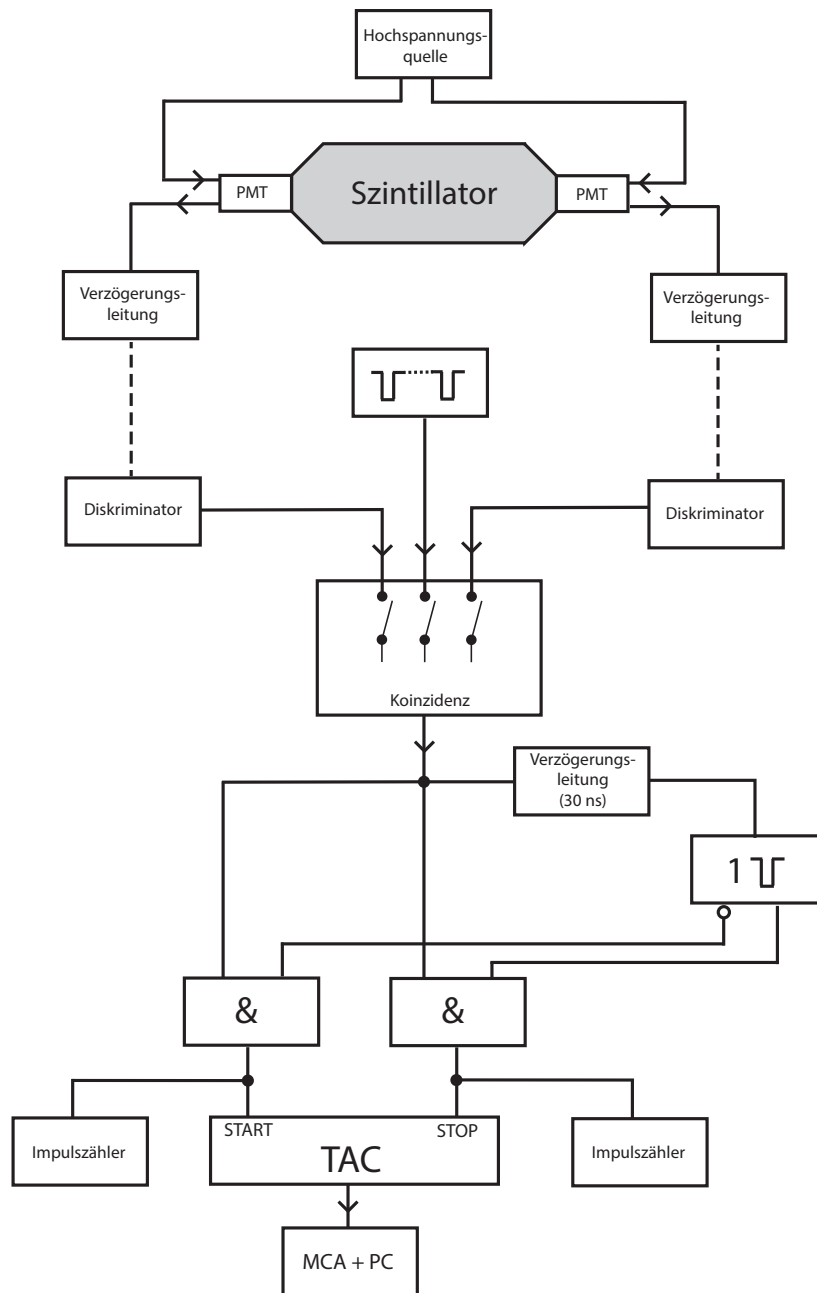


Abbildung 1: Schematische Skizze des Versuchsaufbaus. Über eine Hochspannungsquelle werden PMT betrieben, welche Photonen im Szintillatortank detektieren. Das Signal durchläuft eine Verzögerungsleitung und einen Diskriminator und wird in einer Koinzidenz mit dem Signal des gegenüberliegenden PMT verglichen. Über eine Logikschaltung wird ein TAC gestartet und gestoppt. Dieses Signal wird von einer Software ausgewertet [3].

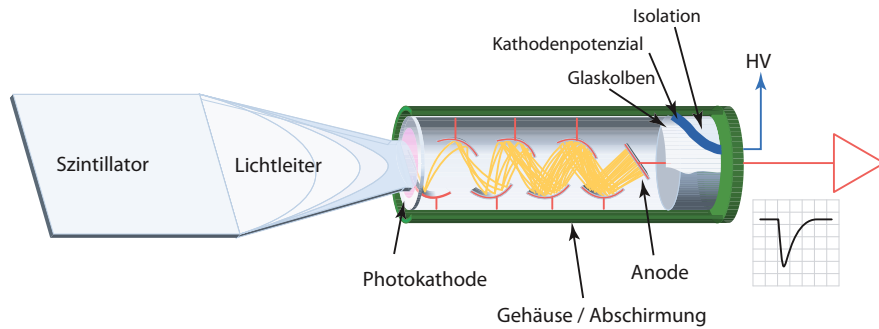


Abbildung 2: Querschnitt eines PMT. Eintretende Photonen lösen über den äußeren Photoeffekt Elektronen aus. Die ausgelösten Elektronen werden beschleunigt und treffen erneut auf eine Elektrode und lösen mehr Elektronen aus. Dies wiederholt sich, sodass am Ende des PMT ein messbarer Puls entsteht [1].

erkennen, sodass die Kanäle jeweils einer bestimmten Zerfallszeit zugeordnet werden können.

Für die Messung der mittleren Lebensdauer von kosmischen Myonen werden die Photomultiplier erneut angeschlossen und es werden für eine hinreichend lange Messdauer Daten genommen. Eine Messdauer von etwa 2 Tagen ist in der Regel ausreichend.

4. Auswertung

Die Auswertung dieses Versuchs erfolgt mit zur Verfügung gestellten Ersatzdaten, da die eigentliche Messung auf Grund eines technischen Problems nicht durchgeführt werden konnte. Lediglich die Messdaten zur Bestimmung der Halbwertsbreite der Messkurve der Verzögerungszeiten wurde im Rahmen der Versuchsdurchführung aufgenommen.

4.1. Bestimmung der Halbwertsbreite der Messkurve der Verzögerungszeiten

Zur Bestimmung der Halbwertsbreite werden die nach der Koinzidenz gemessenen Zählraten der beiden Photomultiplier betrachtet, welche in Tabelle 2 gelistet sind. In Abbildung 3 sind die Zählraten in Abhängigkeit zur Verzögerungszeit T_{VZ} aufgetragen. Als Zählraten-Experiment genügen die Messwerte einer Poissonverteilung. Der statistische Fehler lautet somit \sqrt{N} . Eine negative Verzögerungszeit bedeutet hier eine größere Verzögerung der Leitung zum linken PMT, während eine positive Verzögerungszeit die Verzögerungsleitung des rechten PMT beschreibt. Die Diskriminatoren sind auf eine Pulsbreite von 10 ns eingestellt.

Tabelle 2: Zählraten N der Koinzidenz gegen verschiedene Verzögerungszeiten T_{VZ} der Leitungen. Eine negative Verzögerungszeit beschreibt eine größere Verzögerung der Leitung zum linken PMT. Es sind zwei Messreihen zu verschiedenen Zählzeiten aufgetragen.

T_{VZ} / ns	$N / 10 \text{ s}$	$N / 20 \text{ s}$
0	59	42
-1	76	
-2	42	28
-3	73	
-4	64	36
-5	58	
-6	49	19
-7	63	
-8	40	23
-9	40	
-10	23	9
-11	18	
-12	11	4
-13	6	
-14	0	0
1	65	
2	48	21
3	45	
4	51	16
5	30	
6	32	18
7	33	
8	18	9
9	11	
10	7	3
11	4	
12	4	0
13	0	

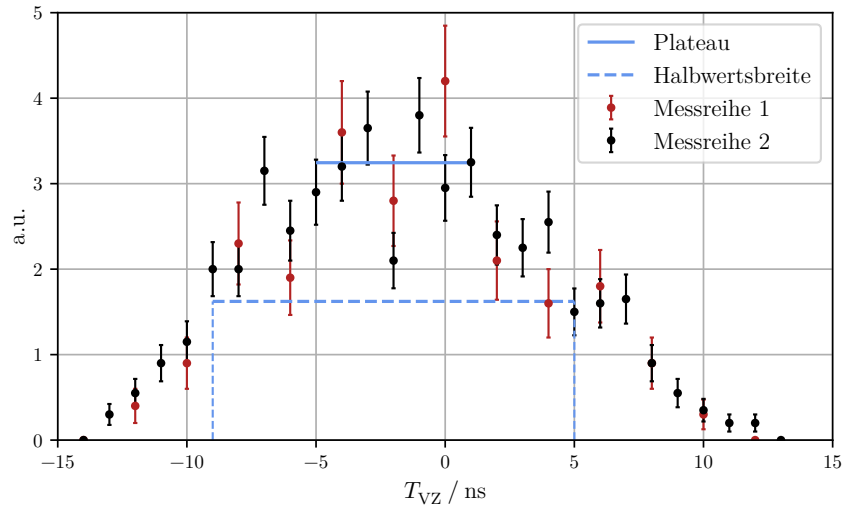


Abbildung 3: Zählraten nach der Koinzidenz gegen verschiedene Zeiten der Verzögerungsleitungen. Es sind die Messwerte aus zwei verschiedenen Messreihen aufgetragen (rot: 20 s Messintervall, schwarz: 10 s Messintervall). Das Plateau und die Halbwertsbreite der Kurve sind markiert.

Um die Halbwertsbreite der Verteilung zu bestimmen wird der Bereich zwischen -5 ns und 1 ns als Plateaubereich betrachtet und der Mittelwert der Zählraten dieser Messdaten

gebildet. Durch das Einzeichnen einer Horizontalen auf halber Höhe des Mittelwerts wird graphisch die Halbwertsbreite abgelesen. Es ergibt sich ein Wert von $\Delta t = 14 \text{ ns}$.

4.2. Kalibrierung des Vielkanalanalysators

Um die Kanalnummern des Vielkanalanalysators (VKA) einer Lebensdauer eines gemessenen Myons zuordnen zu können, wird eine Kalibrierungsmessung des VKA durchgeführt. Die angesprochenen Kanalnummern sind in Tabelle 3 gegen die eingestellten Impulsabstände gelistet und in Abbildung 4 graphisch aufgetragen. Mit Hilfe einer linearen

Tabelle 3: Angesprochene Kanalnummern gegen eingestellte Impulsabstände.

Kanal	$t / \mu\text{s}$
37	0,8
81	1,8
126	2,8
171	3,8
216	4,8
261	5,8
306	6,8
350	7,8
395	8,8
440	9,8

Ausgleichsrechnung kann so eine Umrechnungsfunktion der Kanalnummern in Zeiten ermittelt werden.

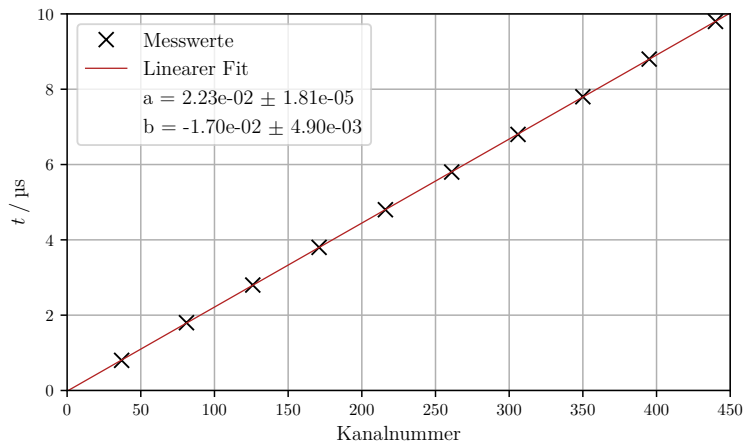


Abbildung 4: Lineare Ausgleichsrechnung zur Kalibrierung der Kanalnummern des VKA. Es sind eingestellte Impulsabstände gegen die Kanalnummer aufgetragen. Die lineare Regression wurde mit *scipy* [4] durchgeführt.

Mittels *scipy* [4] werden die Geradenparameter bestimmt. Es ergibt sich die Funktion

$$t[\mu\text{s}] = 0,022\,30 \pm 0,000\,02 \cdot K - 0,017 \pm 0,003$$

zur Umrechnung der Kanalnummer K in einen zeitlichen Messwert.

4.3. Bestimmung der Lebensdauer kosmischer Myonen

Die Messdaten zur Bestimmung der Lebensdauer der Myonen liegen in Zählraten pro Kanal vor. Anhand der soeben ermittelten Umrechnungsfunktion werden die Kanalnummern in Zeiten konvertiert. Die daraus folgenden Datenpunkte sind in Abbildung 5 und in Abbildung 6 logarithmisch dargestellt. Die Zählraten der Myonen folgen einem Exponentialgesetz. Es wird der Ansatz

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau} + U_0 \quad (2)$$

gewählt. Dabei wird mit dem Parameter U_0 eine konstante Untergrundrate berücksichtigt. Durch eine nicht-lineare Ausgleichsrechnung mittels *scipy* [4] ergeben sich die Werte

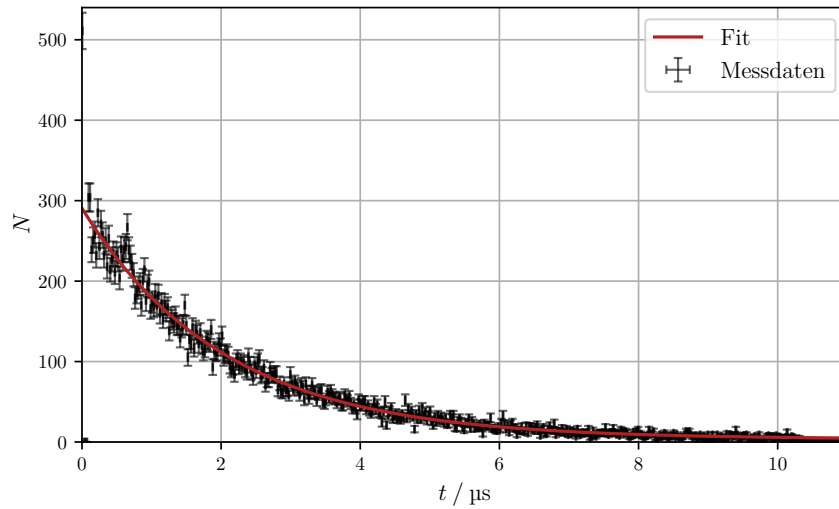


Abbildung 5: Messdaten zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen. Die gemessenen Zählraten N sind gegen die Lebensdauer aufgetragen. Die Ausgleichsrechnung wird mit *scipy* [4] durchgeführt.

$$N_0 = 287 \pm 2, \quad \tau = (2,04 \pm 0,03) \mu\text{s}, \quad U_0 = 3,65 \pm 0,77$$

für die freien Parameter. Die Exponentialfunktion 2 ist ebenfalls in den Abbildungen 5 und 6 eingezeichnet.

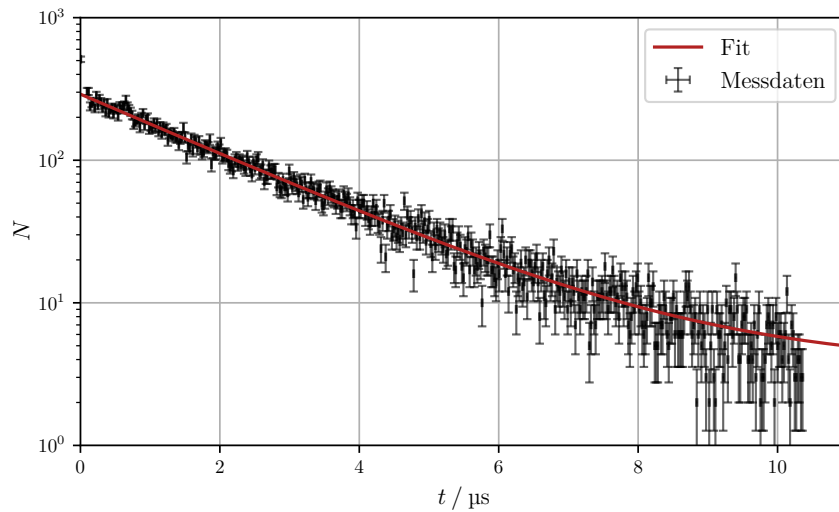


Abbildung 6: Messdaten zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer von Myonen in halblogarithmischer Darstellung. Die gemessenen Zählraten N sind gegen die Lebensdauer aufgetragen. Die Ausgleichsrechnung wird mit *scipy* [4] durchgeführt.

5. Diskussion

Der in diesem Experiment ermittelte Wert der Lebensdauer kosmischer Myonen lautet $\tau_{\text{exp}} = (2,04 \pm 0,03) \mu\text{s}$. Der Literaturwert ist durch $\tau_{\text{Lit}} = (2,196\,981\,1 \pm 0,000\,002\,2) \mu\text{s}$ [2] gegeben. Dies bedeutet eine Abweichung von 7,1 %. Diese Abweichung lässt sich nicht mit der angegebenen - rein statistischen - Unsicherheit des Messwertes erklären. Eine potentielle Fehlerquelle ist die Bildung myonischer Atome, die eine kürzere Lebensdauer als die kosmischen Myonen aufweisen, was die Abweichung zu kleineren Werten erklären könnte. Ebenfalls werden statistische Unsicherheiten aus der Umrechnung der Kanalnummern in Messzeiten nicht inkludiert, da die verwendete Minimierung mittels *scipy* auf einer nicht-linearen Least-Squares Optimierung beruht, welche nur die Abweichungen in y-Richtung berücksichtigt.

Bei der Bestimmung der Kalibrierung der Koinzidenz wurde eine Halbwertsbreite von 14 ns bestimmt. Allgemein lässt sich feststellen, dass die Messwerte zur Bestimmung der Halbwertsbreite starken Schwankungen unterliegen, deren Ursache nicht ermittelt werden konnte. Es lässt sich nur schwer ein Plateaubereich festlegen. Eine genauere Messung mit längeren Messintervallen könnte aussagekräftigere Ergebnisse liefern.

Es kann und soll aber mit eurer Erwartung zu der Breite in Verbindung gebracht werden.

Literatur

- [1] Hermann Kolanoski und Norbert Wermes. Springer Spektrum Berlin, Heidelberg, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-45350-6>.

- [2] *The Review of Particle Physics (2023)*. Particle Data Group. 2023. URL: https://pdg.lbl.gov/2023/tables/contents_tables.html (besucht am 18.06.2023).
- [3] *V01 - Lebensdauer kosmischer Myonen*. TU Dortmund.
- [4] Pauli Virtanen u. a. „SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python“. In: *Nature Methods* 17 (2020), S. 261–272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.

A. Anhang

A.1. Originaldaten

V01: Lebensdauer kosmischer Myonen

Justage der Diskriminatoren

1. $220 / 20s = 11/s$

2. $225 / 20s = 11,25/s$

Koinzidenz / Verzögerungsleitungen (links -, rechts +)

VZ / us	count (/10s)	count (/20s)
0	42 ?	59
-1		76
-2	28	42
-3		73
-4	36	64
-5		58
-6	19	45
-7		63
-8	23	40
-9		40
-10	9	23
-11		18
-12	4	11
-13		6
-14	0	0
1		65
+2	27	48
3		45
+4	16	51
5		30
+6	18	32
7		33
+8	9	18
9		11
+10	3	7
11		4
+12	0	4
13		0