

## VERSUCH 01

# Lebensdauer kosmischer Myonen

Toby Teasdale  
toby.teasdale@tu-dortmund.de

Erich Wagner  
erich.wagner@tu-dortmund.de

Durchführung: 03.05.2023

Abgabe: 18.05.2023

# 1 Ziel

In diesem Versuch wird die Lebensdauer kosmischer Myonen mithilfe der Zeitkorrelationsanalyse bestimmt. Diese Methode dient zur Untersuchung der Verteilung der Zeitspannen zwischen dem Zerfall aufeinanderfolgender Myonen. Dabei wird anhand der Information über die Ankunftszeiten kosmischer Myonen eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zeitdifferenzen erstellt. Hierbei wird ein Szintillator in Verbindung mit zwei Photomultipliern als Detektor verwendet, um mithilfe einer Logikschaltung anhand von erzeugten Signalen die Myonenereignisse zu identifizieren. Die Zeitdifferenz zwischen dem Start- und dem Stoppsignal wird gemessen und in einem Vielkanalanalysator aufgetragen, um das Spektrum der Zeitdifferenzen zu erhalten. Aus diesem Spektrum kann die Lebensdauer der Myonen bestimmt werden.

## 2 Theorie

### 2.1 kosmische Myonen

Myonen sind instabile Elementarteilchen der Gruppe der Leptonen. Sie tragen eine negative Ladung, sind etwa 200-mal schwerer als Elektronen und haben eine Lebensdauer von ca.  $2,2\,\mu\text{s}$  [2, S. 125]. Sie entstehen durch die Wechselwirkung hochenergetischer kosmischer Strahlung mit den oberen Schichten der Atmosphäre, auch bekannt als sekundäre kosmische Strahlung. Aus Protonenschauern gehen Pionen hervor, die über die Zerfälle

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad \text{und} \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

schließlich Myonen erzeugen [1].

### 2.2 Reichweite kosmischer Myonen

Wird beispielsweise eine Energie von  $E_\mu = 10\,\text{GeV}$  für kosmische Myonen und eine Ruheenergie von  $E_0 = 150 \cdot 10^{-3}\,\text{GeV}$  angenommen, so haben Myonen nach Eintreten in der Atmosphäre klassisch eine Reichweite von

$$s_{\text{klass}} = v \cdot \tau = c \sqrt{1 - \left(\frac{E_0}{E_\mu}\right)^2} \cdot \tau \approx 660\,\text{m}. \quad (1)$$

Da sich Myonen jedoch mit relativistischen Geschwindigkeiten bewegen, besitzen sie aufgrund von Längenkontraktion eine im Vergleich deutlich größere Reichweite von

$$\begin{aligned} s_{\text{rel}} &= v \cdot t' = v \cdot \tau \gamma = v \cdot \tau \left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right)^{-\frac{1}{2}} \\ &= c \sqrt{1 - \left(\frac{E_0}{E_\mu}\right)^2} \cdot \frac{E_\mu}{E_0} \cdot \tau \approx 62854\,\text{km}, \end{aligned} \quad (2)$$

weswegen sie auch auf Meereshöhe mit einer Ereignisrate von  $1/60\,\text{s cm}^2$  [2, S. 208] messbar sind.

## 2.3 Zerfallsgesetz

Die Lebensdauer eines instabilen Teilchens wird durch die Anzahl der Zerfälle pro Sekunde und pro Teilchen bestimmt, mit der es zerfällt. Sie folgt dem Zerfallsgesetz

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} + U, \quad (3)$$

wobei  $N_0$  die Anzahl der Anfangsteilchen,  $\lambda$  die Zerfallskonstante und  $U$  Anzahl der Ereignisse der Untergrundstrahlung ist, welche hier das allgemeine Zerfallsgesetz modifizieren soll. Diese berücksichtigt die Umgebungsradioaktivität und kosmische Strahlung. Dabei stellt der Erwartungswert von  $t$  die Lebensdauer  $\tau$  dar und ergibt

$$\langle t \rangle = \tau = \int_0^\infty \lambda t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}, \quad (4)$$

siehe [1]. Um die in Gleichung 3 stehende Modifikation der Untergrundrate  $U$  anzunähern, wird ein Untergrundsignal als das Auftreffen eines zweiten Myons innerhalb der Suchzeit angenommen. Diese Untergrundrate berücksichtigt jene Ereignisse, die nicht aus dem Zerfall hervorgehen und daher unerwünscht sind. Unter der weiteren Annahme, dass die Wahrscheinlichkeit für dieses Ereignis poissonverteilt ist, ergibt sich die Anzahl der detektieren Myonen  $n$  innerhalb der Suchzeit  $T_{\text{Such}}$  zu

$$n = \frac{N_0}{T_{\text{Messung}}},$$

wobei  $N_0$  die Anzahl der Startsignale und  $T_{\text{Messung}}$  die Messzeit ist. Mit dem Erwartungswert der gemessenen Ereignisse  $T_{\text{Such}} \cdot n$  ergibt sich die Poissionverteilung zu

$$P(k) = \frac{(T_{\text{Such}} \cdot n)^k}{k!} e^{-T_{\text{Such}} \cdot n}.$$

Mithilfe der Wahrscheinlichkeit für ein weiteres Ereignis  $P(1)$ , kann die Anzahl der unerwünschten Ereignisse zu

$$N_{\text{Fehl}} = N_{\text{start}} \cdot P(1)$$

abgeschätzt werden. Somit ergibt sich für ein Messkanal  $N_{\text{Kanal}}$  die Untergrundrate

$$U = \frac{N_{\text{Fehl}}}{N_{\text{Kanal}}}. \quad (5)$$

## Bauteile

In dem Folgenden werden die bei dem Versuch verwendeten Komponenten in ihrer prinzipiellen Funktionsweise erläutert. Abbildung 1 zeigt die Schaltung und die Bauteile.

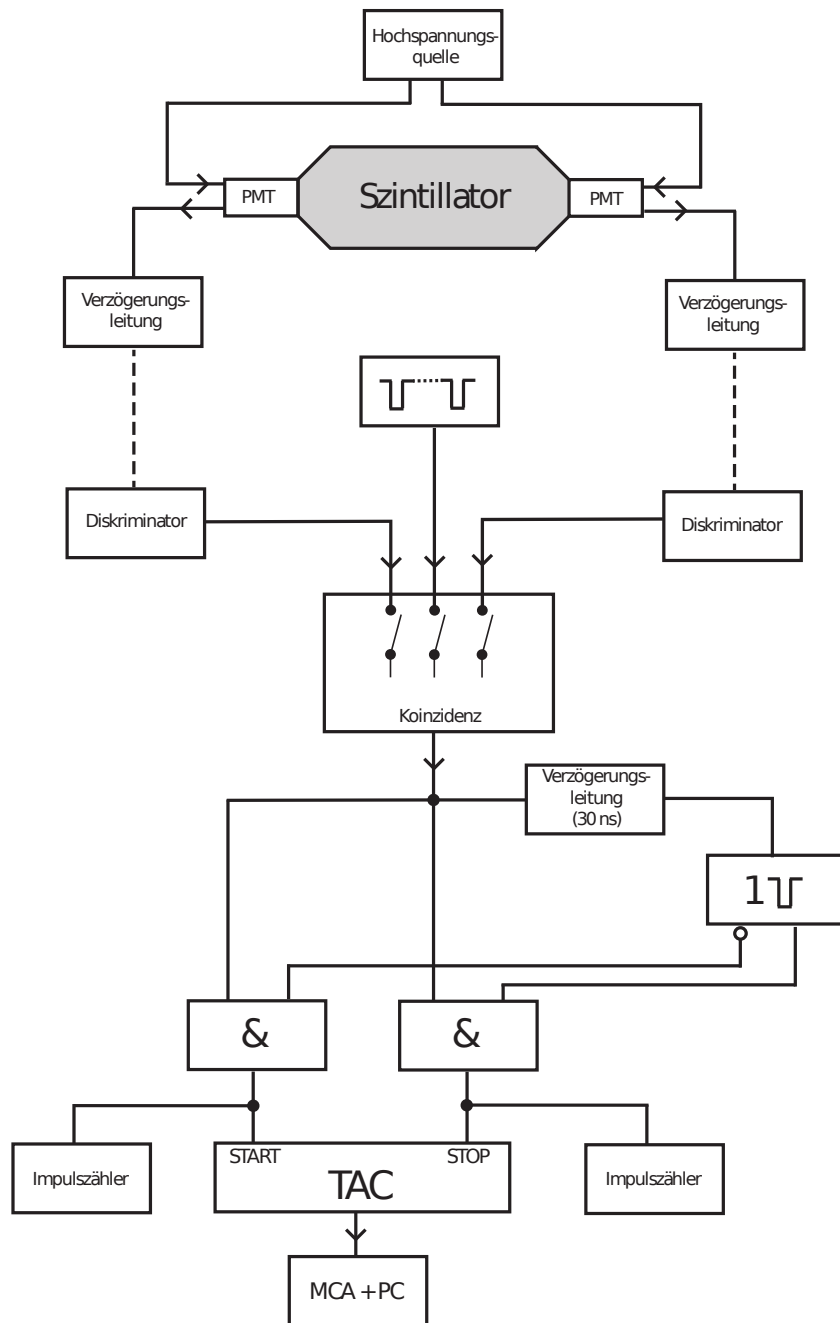


Abbildung 1: Blockschaltbild des Versuchsaufbaus [8, S. 3].

## **Photomultiplier**

Ein Photomultiplier (engl. *photomultiplier tube*, PMT) ist ein Detektor, der in der Teilchenphysik, der Astronomie und anderen Bereichen eingesetzt wird, um einzelne Photonen zu erfassen und zu verstärken. Ein Photomultiplier ist eine Vakuumröhre, die schwache Lichtsignale misst. Sie enthält eine Photokathode, auf die eintreffende Photonen Elektronen auslösen. Diese Elektronen werden durch eine Spannung beschleunigt und treffen auf mehrere Elektrodenreihen, die weitere Elektronen freisetzen. Dieser Prozess führt zu einer exponentiellen Verstärkung des Signals. Bei der Messung der Lebensdauer kosmischer Myonen wird ein Photomultiplier verwendet, um das Lichtsignal zu registrieren, das entsteht, wenn ein Myon in einem Szintillationsdetektor zerfällt.

## **Szintillationsdetektor**

Im Zusammenspiel mit zwei PMTs, ist ein Szintillator ein Detektor, der in der Lage ist, ionisierende Strahlung wie beispielsweise kosmische Strahlung zu detektieren. Es gibt verschiedene Arten von Szintillatoren wie organische und anorganische Szintillatoren, die sich in ihrer Funktionsweise und ihrem Anwendungsgebiet unterscheiden.

Organische Szintillatoren bestehen aus organischen Materialien, wie polymeren Festkörpern und Flüssigkeiten. Die organischen Materialien funktionieren darüber, dass die Moleküle innerhalb des Materials durch die eingedrungenen Teilchen angeregt werden und bei Rückkehr in den Grundzustand ein Photon emittieren. Die Moleküle innerhalb des Materials werden durch die eingedrungenen Teilchen angeregt. Nach Abgabe eines Photons gehen die angeregten Moleküle wieder in den Grundzustand über. Ein Vorteil dieses Materials besteht deswegen in der Zeitauflösung, während eine Energieauflösung aufgrund der breiten Frequenzmodenverteilung benachteiligt ist. Diese Verteilung entsteht aufgrund verschiedener Schwingungsmoden im angeregten Zustand.

Anorganische Szintillatoren bestehen aus anorganischen Materialien wie Kristallen oder Keramik. Dabei ionisiert sich das Material und erzeugt ähnlich wie bei organischen Szintillatoren nach Rückkehr in den ursprünglichen energieärmeren Zustand ein Lichtsignal. Anders als beim organischen Material, liegen hier diskrete Ionisationsenergien vor, weswegen eine höhere Energieauflösung möglich ist.

## **Verzögerungsleitung**

Die Verzögerungsleitungen gleichen Unterschiede in der Signalübermittlung aus und werden durch anpassbare bzw. zuschaltbare Kabel realisiert. Sie sind nötig, um eine präzise Synchronisation von Signalen zu ermöglichen oder, wie in diesem Versuch, in Verbindung mit dem Univibrator die Suchzeit durch Zeitverschiebung des Signals vorzugeben.

## **Diskriminator**

Das durch die Verzögerungsleitung gehende Signal wird durch Diskriminatoren geleitet. Dabei wird das schwankende Signal der Photomultiplier ab einer gewissen Schwelle in

diskrete Ereignissignale umwandelt, um für die Koinzidenzmessung ein möglichst definiertes Logiksignal zu gewinnen. Ein Diskriminator ist im Wesentlichen ein Komperator, welcher in der Analogtechnik zwei anliegende Spannungen vergleicht und ausgibt, welcher der beiden die höhere ist.

### **Koinzidenz**

Anschließend erreichen beide Signale eine Koinzidenzschaltung, welche ein Ausgangssignal erzeugt, sobald zwei Photomultiplier gleichzeitig ein Signal aussenden. Sie verwendet Verzögerungsleitungen, um die Signale zu synchronisieren, und eine Logikschaltung, um festzustellen, ob ein Zusammenfallen stattfindet.

### **Univibrator**

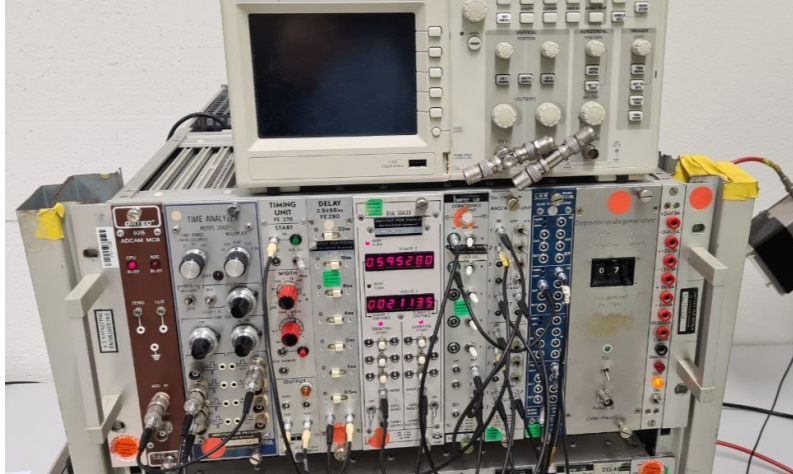
Der Univibrator, oder auch Monoflop bzw. monostabile Kippstufe genannt, bleibt nach Eingang eines Signal nur für eine voreingestellte Zeit eingeschaltet und wird durch eine Schaltung von Kondensatoren und Widerständen realisiert. Nach Ende der mit der Verzögerungsleitung vorgegebenen Suchzeit, gibt der Univibrator ein zweites Signal aus, welches das zweite AND-Gatter erreicht und die Zeitmessung stoppt. Dadurch wird schließlich ungewünschtes Rauschen der Untergrundstrahlung unterdrückt.

### **Time-Amplitude-Converter**

Nachdem die Signale die AND-Gatter passieren, gelangen sie zeitversetzt zum Time-Amplitude-Converter (TAC). Dabei wird das Eingangssignal als Startsignal verwendet, um einen Ladevorgang eines Kondensators zu initiieren. Die Amplitude des geladenen Kondensators wird dann als Ausgangssignal des TAC verwendet, das proportional zur Dauer des Eingangssignals ist.

### **Multi-Channel-Analyzer**

Der Multi-Channel-Analyzer (MCA) oder Vielkanalanalysator ordnet mithilfe eines Computerprogramms die eingehenden Signale abhängig von ihrer Amplitude als Histogramm in Kanälen an. Im Rahmen dieses Versuchs werden die Myonenereignisse gegen die Zeit aufgetragen. Die erwartete Verteilung sollte eine charakteristische exponentielle Abnahme der Ereignisanzahl mit zunehmender Zeit aufgrund des exponentiellen Zerfalls der Myonen zeigen.



**Abbildung 2:** Die Messapparatur nach dem Schaltbild in Abbildung 1 am Ende der Messung.

### 3 Durchführung

Zur Durchführung des Versuchs wird die Messapparatur in Abbildung 2 zunächst vorjustiert. Zu Beginn werden die PMTs mithilfe eines Oszilloskops auf ihre Funktion überprüft. Die Schwellspannungen der Diskriminatoren werden so eingestellt, dass der Impulszähler etwa 30 Impulse pro Sekunde zählt. Zur Justierung der Koinzidenzschaltung wird an den Diskriminatoren eine Pulsdauer von  $\Delta t_1 = 20 \text{ ns}$  und  $\Delta t_2 = 30 \text{ ns}$  eingestellt. Aufgrund von starken Signalschwankungen wird hierbei von den vorgegebenen Pulsdauern [8] abgewichen. Nun werden die Verzögerungsleitungen in Schritten von 1 ns variiert und mithilfe des Impulszählers die Ereignisse für beide Pulsdauern nach 20 s gezählt. Dabei wird zunächst die erste Verzögerung maximiert und als größter Wert der negativen Skala gesetzt, während die zweite auf 0 ns eingestellt bleibt. Nachdem die erste auf Null reduziert und festgesetzt wurde, wird die zweite Leitung schrittweise erhöht und die positive Skala der Verzögerung markiert. Nach Verkabelung der restlichen Schaltung wird der Univibrator mit dem Oszilloskop auf die Suchzeit  $T_{\text{Such}} = 10 \mu\text{s}$  eingestellt. Der MCA wird anschließend mithilfe eines Doppelimpulsgenerators am Eingang der Koinzidenz justiert. Dieser generiert Doppelimpulse mit einem variablen Zeitabstand bei einer Frequenz von 1 kHz und ermöglicht zu sehen, welche Kanäle für verschiedene Zeitabstände befüllt werden. Hierbei wird für Sieben Abstände innerhalb  $\Delta t \in [0, 7; 5, 4] \mu\text{s}$  gemessen.

Schließlich wird der Doppelimpulsgenerators wieder entfernt und die eigentliche Messung der Lebensdauer über einen PC mit einer Messsoftware gestartet.

## 4 Fehlerrechnung

Im Folgenden wird die allgemeine Fehlerrechnung und alle wichtigen Größen der entsprechenden Rechnung erklärt. Die wichtigsten Werte dabei sind der

$$\text{Mittelwert} \quad \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^n x_i \quad \text{und die} \quad (6)$$

$$\text{Standardabweichung} \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (7)$$

Dabei entspricht  $N$  der Anzahl an Werten und  $x_i$  ist jeweils ein mit einem Fehler gemessener Wert. Es ergibt sich ebenfalls die statistische Messunsicherheit

$$\Delta \bar{x} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=0}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (8)$$

Entstehen mehrere Unbekannte in einer Messung, folgen daraus auch mehrere Messunsicherheiten, die in dem weiteren Verlauf der Rechnung berücksichtigt werden müssen. Es gilt die *Gaußsche Fehlerfortpflanzung*

$$\Delta f(y_1, y_2, \dots, y_N) = \sqrt{\left(\frac{df}{dy_1} \Delta y_1\right)^2 + \left(\frac{df}{dy_2} \Delta y_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{df}{dy_N} \Delta y_N\right)^2}. \quad (9)$$

Desweiteren wird in diesem Experiment der Fehler auf eine Zählrate benötigt. Dieser kann durch die Formel

$$\Delta N = \sqrt{N} \quad (10)$$

angegeben werden. Dabei ist  $N$  die gemessene Zählrate.

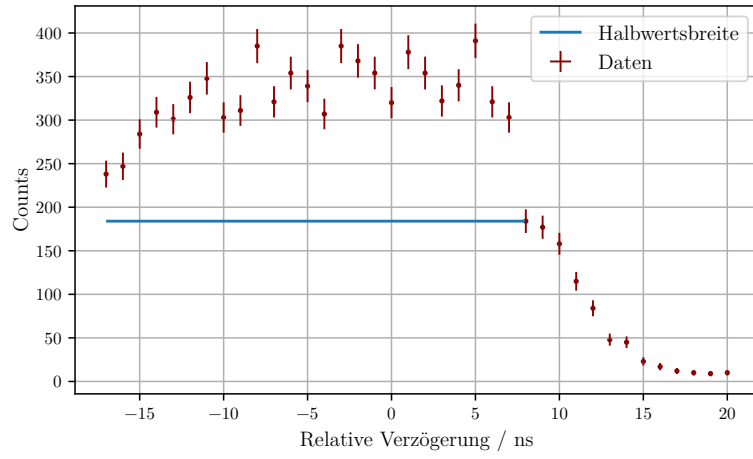
## 5 Auswertung

Im folgenden werden die Daten analysiert, die während einer Messzeit von ungefähr  $T_{\text{Messung}} = 4,7 \text{ d}$  aufgenommen wurden. Die Plots und Fits sind alle mit den Python-Bibliotheken [3],[6],[4],[5],[7] erstellt worden.

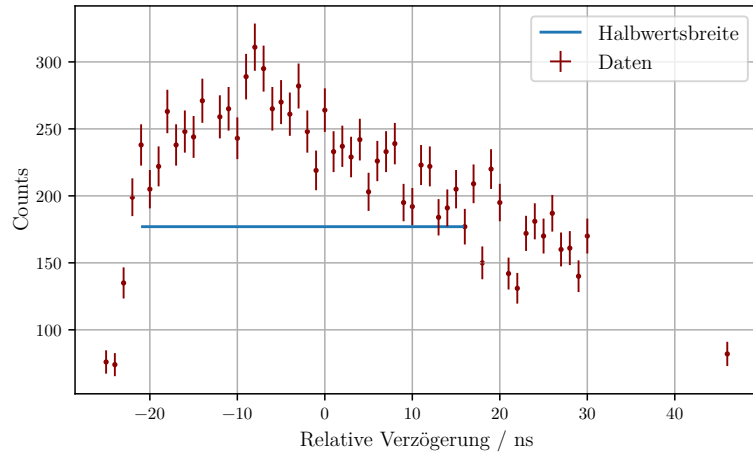
### 5.1 Kalibrierung der Messgeräte

Bei der Kalibrierung der Geräte trat ein Problem bei der Einstellung der Pulsdauer auf. Aus diesem Grund wurde die Pulsdauer statt auf 10 ns und 20 ns auf 20 ns und 30 ns eingestellt. Die Messdaten dazu sind im Anhang in Tabelle 1 und Tabelle 2 zu finden. Die Plots der Daten und der entsprechenden Halbwertsbreiten sind in Abbildung 3 und Abbildung 4 abgebildet. Auch bei der Aufnahme der Daten kam es zu Problemen, siehe dafür Abschnitt 6. Hier sei allerdings angemerkt, dass die Halbwertsbreiten deshalb nur abgeschätzt werden können. Als Erwartung für die Halbwertsbreite ergibt sich in etwa die





**Abbildung 3:** Plot der Messung der Zählrate in Abhängigkeit der relativen Verzögerung bei einer Pulsdauer von 20 ns.



**Abbildung 4:** Plot der Messung der Zählrate in Abhängigkeit der relativen Verzögerung bei einer Pulsdauer von 30 ns.

doppelte Pulsdauer. Dies hängt mit der Einstellung der Diskriminatoren zusammen. Hier wird erwartet, dass die Kurve zunächst wie eine um die Pulsdauer verschobene Gaußglocke ansteigt und dann ein Plateau ausbildet. Dieser Anstieg ist bei einer relativen Verzögerung von der negativen Pulsdauer zu erwarten. Dieses Plateau wird dann wieder gaußartig abfallen, sobald die relative Verzögerung wieder der Pulsdauer entspricht.

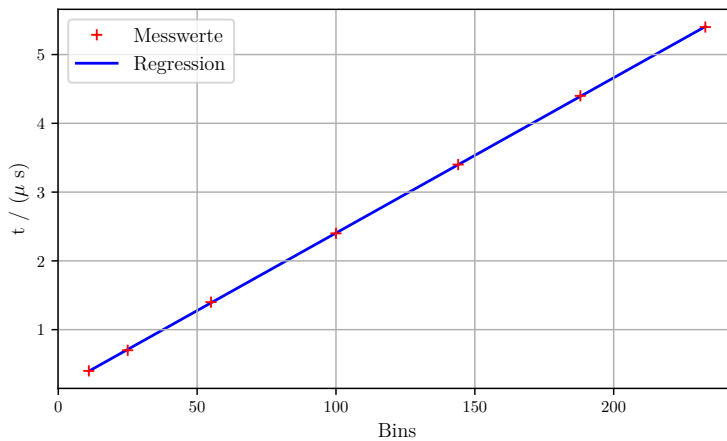
Für eine Pulsdauer von 20 ns ergibt sich eine Halbwertsbreite von  $\Delta_{\text{Breite}} = 25$  ns. Weiterhin ergibt sich für eine Pulsdauer von 30 ns eine Halbwertsbreite von  $\Delta_{\text{Breite}} = 37$  ns.

## 5.2 Bestimmung der Zeiteinteilung der Bins am TCA

Die Messdaten sind in Abbildung 5b zu finden. Um den Bins des TCAs eine Zeit zuzuordnen, wird eine Regressionsrechnung durchgeführt. Dafür wird der Ansatz

$$t = m \cdot b + c$$

gewählt. Der entsprechende Plot ist in Abbildung 5a abgebildet. Der Fit ergibt  $m = (0,02257 \pm 0,00005) \mu\text{s}$  und  $c = (0,148 \pm 0,006) \mu\text{s}$ .



(a) Abbildung der Messdaten zur Bestimmung der Zeiteinteilung der Kanäle. Die Gerade zeigt den linearen Fit zur Zuordnung der Kanäle.

t / (μs)	Bins
5.4	233
4.4	188
3.4	144
2.4	100
1.4	55
0.7	25
0.4	11

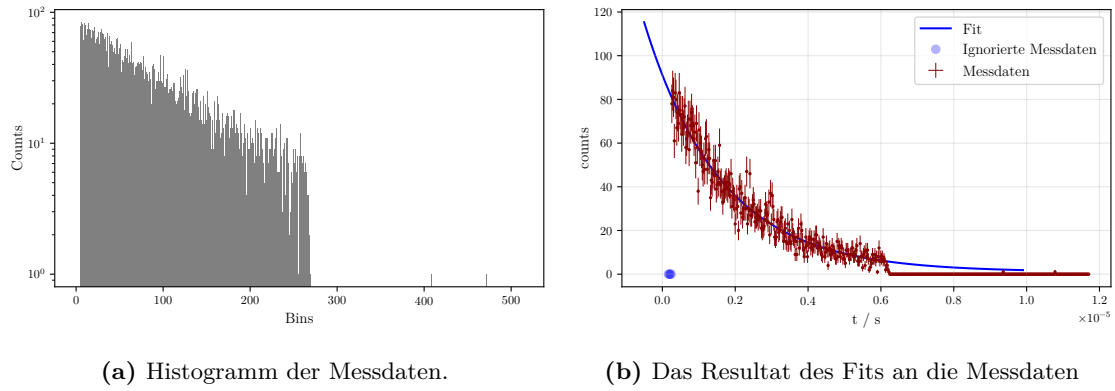
(b) Messdaten zur Bestimmung der Zeiteinteilung der Kanäle.

**Abbildung 5:** Bestimmung der Zeiteinteilung der Bins.

## 5.3 Bestimmung der Lebenszeit von Myonen

Die Messdaten zu diesem Versuch sind im Anhang in Tabelle 3, Tabelle 4 und Tabelle 5 zu finden. Die Daten wurden außerdem histogrammiert in Abbildung 6a aufgetragen. Die gezählten Ereignisse und Ereignisse, die verworfen wurden, sind in Abbildung 6b abgebildet. Dabei muss beachtet werden, dass der Counter, der die Events zählt, einmal durchgelaufen ist. Als Fit wird nach Vorgabe des Zerfallsgesetzes plus Untergrund die Funktion

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



**Abbildung 6:** Abbildungen zur Ermittlung der Lebenszeit eines Myons. Links sind die Messwerte histogrammiert auf einer logarithmischen Skala abgebildet. Rechts ist der entsprechende Fit abgebildet.

angesetzt. Dabei wird stets beachtet, dass die Konstanten größer null sein müssen. Außerdem werden die ersten vier Bins nicht beachtet, da diese mit null gefüllt sind. Dies liegt an der vorgeschalteten Verzögerung, somit kann hier kein Ereignis gezählt werden. Der Fit ergibt  $N_0 = 90.1 \pm 1.4$ ,  $\lambda = (4,75 \pm 0,23) \cdot 10^5 \frac{1}{s}$  und  $U = 1 \pm 1,3$ . Es gilt  $U \in [0; 2,3]$ , da der Untergrund stets positiv ist. Der entsprechende Plot ist in Abbildung 6b abgebildet. Hier wurde auch bereits mit der Formel für die Zeit aus Unterabschnitt 5.2 dem jeweiligen Bin eine Zeit zugeordnet. Aus  $\lambda$  lässt sich nun mithilfe Gleichung 4 die Lebenszeit bestimmen. Es ergibt sich

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = (2,11 \pm 0,1) \mu s. \quad (11)$$

## 5.4 Bestimmung des Untergrundes

Nachdem bereits der Untergrund gefittet wurde, soll dieser auch nach der theoretischen Formel Gleichung 5 berechnet werden. Es ergibt sich mit

$$n = (26,092 \pm 0,008) \frac{1}{s}$$

und

$$P(1) = (2,6098 \pm 0,0008) \cdot 10^{-4}$$

der theoretische Untergrund von

$$U_{\text{theo}} = 5,4008 \pm 0,0033.$$

## 6 Diskussion

In der Kalibrierung der Messgeräte ergaben sich einige Schwierigkeiten. Zum einen ließ sich mithilfe des Schraubendrehers keine Pulsdauer von 10 ns einstellen, weshalb auf eine Messung bei 30 ns zurückgegriffen wurde. Allerdings ist auch die 20 ns Messung nicht gut verlaufen, da hier große Schwankungen erkennbar sind. Das erwartete Plateau blieb aus.

Zudem wurde die Messung nicht mit einer genügend großen Verzögerung gestartet. Die fehlenden Messwerte wollten die Experimentatoren dann im Anschluss messen, jedoch kam es dann zu Schwierigkeiten bei der Apparatur, die die Messung verhinderte. Mit Hilfe des Betreuers des Versuchs gelang es die Messungen wieder aufzunehmen. Allerdings konnte die Messung bei 20 ns nicht beendet werden und somit fehlen entscheidende Messwerte zur exakten Bestimmung der Halbwertsbreite. Aus diesem Grunde ist die Halbwertsbreite nur grob abschätzbar, da es sich nur erraten lässt, wie breit diese tatsächlich ist. Bei der Messung zu 30 ns kam es auch zu massiven Schwankungen, jedoch trat ein weiteres Problem auf. Die Messdaten flachten kaum ab, so dass nach einer angemessenen Anzahl an Messwerten die Experimentatoren die Messung als abgeschlossen ansahen. Ein exponentieller Abfall konnte nicht bestätigt werden. Dies ist in Abbildung 4 zu erkennen. Dadurch ist auch die Abschätzung der Halbwertsbreite bei 30 ns mit Vorsicht anzusehen. Als Theoriewert kann die doppelte Pulsdauer betrachtet werden. Für die Halbwertsbreite bei 20 ns ergab sich  $\Delta_{\text{Breite}} = 25 \text{ ns}$  und somit eine Abweichung von 15 ns zu  $\Delta_{\text{theorie}} = 40 \text{ ns}$ . Für eine Pulsdauer von 30 ns ergab sich eine Halbwertsbreite von  $\Delta_{\text{Breite}} = 37 \text{ ns}$  und eine Abweichung von 23 ns zu  $\Delta_{\text{theorie}} = 60 \text{ ns}$ .

Die Lebenszeit wurde zu  $\tau = (2,11 \pm 0,1) \mu\text{s}$  bestimmt. Als Literaturwert wird  $\tau_{\text{Lit}} = 2,2 \mu\text{s}$  angegeben. Damit ergibt sich eine Abweichung von 4,09 %.

Der Untergrund durch den Fit ergab  $U \approx 1 \pm 1,3$  und aus der theoretischen Überlegung  $U_{\text{theo}} = 5,4008 \pm 0,0033$ . Es ergibt sich eine Abweichung von  $\Delta_U = 81,48\%$ .

## Literatur

- [1] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 4. Kern-, Teilchen- und Astrophysik*. Springer Spektrum, 2017. ISBN: 978-3-662-52883-9.
- [2] Claus Grupen. *Einstieg in die Astroteilchenphysik*. Springer Spektrum, 2018. ISBN: 978-3-662-55270-4.
- [3] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [4] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [5] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [6] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [7] The pandas development team. *pandas-dev/pandas: Pandas*. Version latest. Feb. 2020. DOI: 10.5281/zenodo.3509134. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3509134>.
- [8] *Versuchsanleitung „Lebensdauer kosmischer Myonen“*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2023.

## 7 Anhang

**Tabelle 1:** Messreihe bei einer Impulsdauer von 20ns.

Relative Verzögerung / ns	Zählrate	Relative Verzögerung / ns	Zählrate
-17	238	2	354
-16	247	3	322
-15	284	4	340
-14	309	5	391
-13	301	6	321
-12	326	7	303
-11	348	8	184
-10	303	9	177
-9	311	10	158
-8	385	11	115
-7	321	12	84
-6	354	13	48
-5	339	14	45
-4	307	15	23
-3	385	16	17
-2	368	17	12
-1	354	18	10
0	320	19	9
1	378	20	10

**Tabelle 2:** Messreihe bei einer Impulsdauer von 30ns.

Relative Verzögerung / ns	Zählrate	Relative Verzögerung / ns	Zählrate
-25	76	4	242
-24	74	5	203
-23	135	6	226
-22	199	7	233
-21	238	8	239
-20	205	9	195
-19	222	10	192
-18	263	11	223
-17	238	12	222
-16	248	13	184
-15	244	14	191
-14	271	15	205
-12	259	16	177
-11	265	17	209
-10	243	18	150
-9	289	19	220
-8	311	20	195
-7	295	21	142
-6	265	22	131
-5	270	23	172
-4	261	24	181
-3	282	25	170
-2	248	26	187
-1	219	27	160
0	264	28	161
1	233	29	140
2	237	30	170
3	229	46	82

**Tabelle 3:** Messdaten der Lebenszeitmessung der Myonen.

Bin	Counts	Bin	Counts	Bin	Counts	Bin	Counts
1	0	41	56	81	34	121	27
2	0	42	50	82	23	122	24
3	0	43	47	83	30	123	33
4	0	44	53	84	35	124	18
5	78	45	48	85	31	125	37
6	84	46	62	86	20	126	23
7	81	47	63	87	39	127	36
8	61	48	48	88	40	128	31
9	83	49	53	89	28	129	25
10	80	50	57	90	37	130	17
11	67	51	53	91	26	131	16
12	74	52	35	92	30	132	17
13	69	53	43	93	30	133	24
14	83	54	42	94	35	134	25
15	75	55	46	95	30	135	19
16	73	56	52	96	47	136	20
17	64	57	45	97	23	137	24
18	73	58	52	98	30	138	26
19	67	59	39	99	29	139	26
20	72	60	41	100	46	140	19
21	77	61	47	101	27	141	15
22	58	62	42	102	27	142	20
23	62	63	59	103	31	143	21
24	65	64	41	104	34	144	15
25	71	65	42	105	32	145	14
26	57	66	38	106	24	146	23
27	71	67	33	107	26	147	14
28	68	68	38	108	26	148	20
29	74	69	39	109	27	149	15
30	69	70	41	110	25	150	14
31	68	71	42	111	29	151	25
32	62	72	40	112	26	152	19
33	65	73	39	113	29	153	17
34	51	74	42	114	21	154	16
35	69	75	41	115	20	155	9
36	58	76	36	116	21	156	15
37	38	77	46	117	22	157	9
38	66	78	31	118	25	158	17
39	57	79	38	119	32	159	21
40	60	80	35	120	28	160	12



**Tabelle 4:** Messdaten der Lebenszeitmessung der Myonen.

Bin	Counts	Bin	Counts	Bin	Counts	Bin	Counts
161	15	201	10	241	11	281	0
162	23	202	11	242	8	282	0
163	20	203	10	243	11	283	0
164	15	204	7	244	7	284	0
165	11	205	7	245	2	285	0
166	8	206	15	246	3	286	0
167	12	207	8	247	6	287	0
168	17	208	13	248	5	288	0
169	13	209	12	249	9	289	0
170	8	210	8	250	7	290	0
171	14	211	13	251	7	291	0
172	16	212	12	252	9	292	0
173	17	213	7	253	6	293	0
174	12	214	9	254	8	294	0
175	16	215	7	255	1	295	0
176	11	216	5	256	8	296	0
177	13	217	11	257	12	297	0
178	16	218	11	258	6	298	0
179	13	219	11	259	8	299	0
180	18	220	9	260	7	300	0
181	18	221	7	261	8	301	0
182	12	222	9	262	6	302	0
183	12	223	9	263	7	303	0
184	14	224	12	264	6	304	0
185	13	225	12	265	2	305	0
186	12	226	8	266	4	306	0
187	9	227	8	267	4	307	0
188	8	228	9	268	2	308	0
189	17	229	11	269	1	309	0
190	12	230	13	270	0	310	0
191	8	231	6	271	0	311	0
192	10	232	6	272	0	312	0
193	14	233	6	273	0	313	0
194	11	234	14	274	0	314	0
195	4	235	8	275	0	315	0
196	11	236	8	276	0	316	0
197	12	237	3	277	0	317	0
198	9	238	9	278	0	318	0
199	9	239	10	279	0	319	0
200	13	240	4	280	0	320	0

**Tabelle 5:** Messdaten der Lebenszeitmessung der Myonen.

Bin	Counts	Bin	Counts	Bin	Counts	Bin	Counts
361	0	399	0	437	0	475	0
362	0	400	0	438	0	476	0
363	0	401	0	439	0	477	0
364	0	402	0	440	0	478	0
365	0	403	0	441	0	479	0
366	0	404	0	442	0	480	0
367	0	405	0	443	0	481	0
368	0	406	0	444	0	482	0
369	0	407	0	445	0	483	0
370	0	408	1	446	0	484	0
371	0	409	0	447	0	485	0
372	0	410	0	448	0	486	0
373	0	411	0	449	0	487	0
374	0	412	0	450	0	488	0
375	0	413	0	451	0	489	0
376	0	414	0	452	0	490	0
377	0	415	0	453	0	491	0
378	0	416	0	454	0	492	0
379	0	417	0	455	0	493	0
380	0	418	0	456	0	494	0
381	0	419	0	457	0	495	0
382	0	420	0	458	0	496	0
383	0	421	0	459	0	497	0
384	0	422	0	460	0	498	0
385	0	423	0	461	0	499	0
386	0	424	0	462	0	500	0
387	0	425	0	463	0	501	0
388	0	426	0	464	0	502	0
389	0	427	0	465	0	503	0
390	0	428	0	466	0	504	0
391	0	429	0	467	0	505	0
392	0	430	0	468	0	506	0
393	0	431	0	469	0	507	0
394	0	432	0	470	0	508	0
395	0	433	0	471	1	509	0
396	0	434	0	472	0	510	0
397	0	435	0	473	0	511	0
398	0	436	0	474	0	512	0