

V01

Lebensdauer kosmischer Myonen

Yvonne Kasper
yvonne.kasper@udo.edu

Robert Appel
robert.appel@udo.edu

Durchführung: 15.11.17

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	1
1.1	Kosmische Myonen	1
1.2	Lebensdauer	1
1.3	Versuchsaufbau	2
2	Durchführung	3
2.1	Aufbau, Prüfung und einstellen des Versuchsaufbaus.	3
2.2	Messung	4
3	Auswertung	4
3.1	Bestimmung der Auflösungszeit	4
3.2	Zeitkalibrierung der Messapparatur	6
3.3	Statistische Berechnung des Untergrundes	8
3.4	Bestimmung der Lebensdauer der Myonen	8
4	Diskussion	10
	Literatur	11

Versuchsziel Das Ziel des Versuches ist die Bestimmung der Lebensdauer von kosmischen Myonen.

1 Theorie

1.1 Kosmische Myonen

Durch energiereichen Protonen, die mit den Atomen der Luftmolekülen wechselwirken, entstehen in der hohen Atmosphäre Pionen. Diese zerfallen wiederum wie folgt:

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

Die so entstandenen Myonen die sich nach dem Zerfall in Richtung Erde bewegen, tun dies mit annähernd Lichtgeschwindigkeit.

Myonen können mit einem Szintillationsdetektor nachgewiesen werden. Treffen die Myonen auf den Detektor, können sie auf dem Weg durch die Szintillatormaterie ihre kinetische Energie abgeben. Dies führt dazu, dass die Szintillatormoleküle in einen angeregten Zustand übergehen und bei Rückkehr in den Grundzustand einen Lichtquant emittieren. Dieser kann durch einen, optisch an dem Szintillatormaterial gekoppelten, Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) nachgewiesen werden. Da die Myonen auf dem Weg zur Erde aus der hohen Atmosphäre schon einen Großteil ihrer Energie abgegeben haben, können nun drei Fälle eintreten. Der erste Fall: Das Myon hat soviel Energie verloren, dass es im Szintillatormaterial zerfällt. Dabei kann die Lebensdauer bestimmt werden, da sowohl beim Eintritt in den Detektor als auch beim Zerfall Lichtquanten emittiert werden. Die Lichtquant die beim Zerfall entstehen sind auf das Elektron, dass beim Zerfall entsteht, zurückzuführen, da dieses ebenfalls das Szintillatormaterial anregt. Der zweite Fall: Es handelt sich bei dem Myon um ein negativ geladenes Myon und es wird vom Szintillatormaterial absorbiert, indem sich ein myonisches Atom bildet. Also das negative Myon in eine Fehlstelle im Atomrumpf gesetzt wird. Der dritte Fall: Das Myon hat noch genug Energie, um sich durch das Szintillatormaterial und den Detektor zu bewegen. In den letzten beiden Fällen wird zwar das eintreffende Myon detektiert aber es kann keine Lebensdauer bestimmt werden. Die von den letzten beiden Fällen auftretenden Effekte müssen auch schaltungstechnisch berücksichtigt werden, dazu mehr in Kapitel 1.3.

1.2 Lebensdauer

Zuerst wird die Wahrscheinlichkeit dW , dass ein Zerfall eintritt im infinitesimalen Bereich betrachtet. Es wird angenommen, dass diese proportional zum Beobachtungszeitraum dt ist. Dann folgt der Zusammenhang

$$dW = \lambda dt \quad ,$$

dabei stellt λ eine charakteristische Konstante dar. Es ist zu beobachten, dass die Zerfallswahrscheinlichkeit nicht von dem individual Alter eines Teilchens abhängt, dies folgt aus der Unabhängigkeit von $-t$. Die Zerfälle mehrerer Teilchen sind unabhängig von einander, mit dieser Annahme, folgt aus dem Zusammenhang

$$dN = -NdW = -\lambda N dt \quad ,$$

dabei ist dN die Zahl der Teilchen die im Zeitraum dt zerfallen sind, wenn N Teilchen betrachtet werden. Ist N groß lässt sich der Ausdruck integrieren und es folgt:

$$\frac{N(t)}{N_0} = \exp(-\lambda t) \quad .$$

Das ist das Zerfallsgesetz

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda t) \quad . \tag{1}$$

Dabei bezeichnet λ die Zerfallskonstante, t die Zeit und N_0 die Gesamtanzahl der betrachteten Teilchen. Daraus folgt dann die Exponential-Verteilung der Lebensdauern auf dem Intervall t bis dt :

$$dN(t) = N_0 \cdot \lambda \cdot \exp(-\lambda t) dt .$$

Den Erwartungswert dieser Verteilung zu t identifizieren man mit der Lebensdauer τ , daraus folgt dann:

$$\langle t \rangle = \tau = \frac{1}{\lambda} . \quad (2)$$

1.3 Versuchsaufbau

Grundlegende Messmethode: Der Aufbau ist schematisch in der Abbildung 1 dargestellt. Der Szintillationsdetektor ist aus einem zylinderförmigen Edelstahltank aufgebaut, an beiden Enden ist jeweils ein SEV optisch an das Szintillatormaterial gekoppelt. Der vom Szintillatormaterial abgegebene Lichtimpuls hat eine ungefähre Abklingzeit von 10 ns. Die Zeit zwischen zwei Lichtimpulsen, die als Folge eines Einfalls und Zerfalls eines Myon emittiert wurden, ist die gesuchte Messgröße. Diese kann dann mit einem Zeit-Amplituden-Konverter (TAC) gemessen werden. Der TAC gibt dann ein Spannungsimpuls ab, dessen Höhe proportional zum zeitlichen Abstand der beiden Lichtimpulse ist. Der Impuls wird dann an einen Vielkanalanalysator weitergeleitet, der das Signal entsprechend seiner Höhe in einem Kanal einordnet und einspeichert. Ein Rechner wird dann an den Vielkanalanalysator angeschlossen, dieser speichert die Daten und verarbeitet diese. Dann kann über nicht-linearer Ausgleichsrechnung die Lebensdauer bestimmt werden.

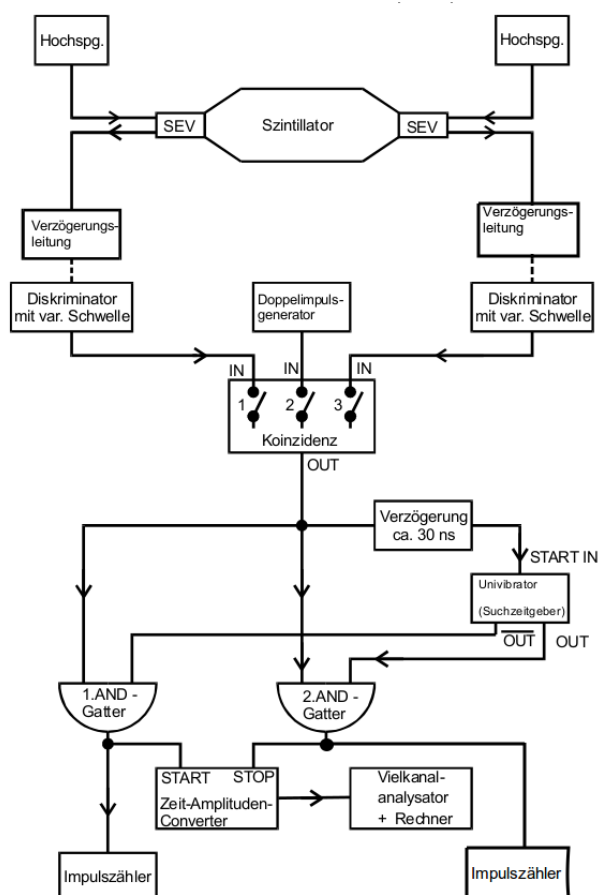


Abbildung 1: Veränderte schematische Abbildung des Aufbaus aus Quelle [2].

"Stopp-Uhr Methode". Nun treten aber auch die in Kapitel 1.2 besprochenen Fälle auf, dass sich ein Myon durch den Tank bewegt ohne zu zerfallen oder mit dem Szintillatormaterial wechselwirkt. Folglich würde es nur einen Impuls geben und es könnte keine Lebensdauer bestimmt werden. Deshalb wird schaltungstechnisch verwirklicht, dass eine Suchzeit T_s mit einem Startimpuls anfängt und dann abgebrochen wird, wenn der Zerfall eingetreten ist oder nach Ablauf von T_s die Messung abgebrochen wird und die Schaltung auf den Ausgangszustand zurückgestellt wird. In diesem Versuchsaufbau wird dies über eine monostabile Kippstufe (auch Univibrator genannt) und zwei AND-Gatter erreicht. Die monostabile Kippstufe hat einen stabilen Zustand und einen instabilen Zustand, deshalb monostabil. Der stabile Zustand gibt ein Signal an das zweite AND-Gatter, dass die Messung abbricht. Deshalb sollte die Zeit die monostabile Kippstufe in den instabilen Zustand ausgelenkt ist ungefähr der Suchzeit T_s entsprechen. Die monostabile Kippstufe wird durch das Signal der Koinzidenz ausgelenkt. Am ersten AND-Gatter liegt nach einem Startimpuls ein H-Signal an. Nach einer Verzögerung wird die Kippstufe angestoßen. Der TAC misst nun die Zeit. Kommt es während der Messzeit T_s kein Stoppimpuls, der über das zweite AND-Gatter an den TAC weitergeleitet wird, dann wird die Messung verworfen und der TAC gibt kein Signal ab. Die Anzahl der verworfenen Messungen werden durch einen weiteren Impulszähler gezählt. Treffen nun zwei Myonen innerhalb T_s im Tank ein, kommt zu einer Fehlmessung, dies wird Untergrundrate U genannt. Der Zeitabstand in dem zwei Myonen eintreffen ist statistisch verteilt und füllt daher die Kanäle des Vielkanalanalysators gleichmäßig auf.

Rauschunterdrückung. Bei endlichen Temperaturen neigen die Photokathoden zur spontaner Elektronenemission, das führt zu einem Spannungsimpuls obwohl kein Lichtquant eingefallen ist. Die Impulse die dabei entstehen sind aber meistens klein gegen die Impulse die auftreten, wenn ein Lichtquant einfällt. Deshalb verwendet man einen Diskriminator, welcher alle Impulse herausfiltert die kleiner sind als eine einstellbare Schwelle. Die Diskriminatoren geben für jeden Impuls der die Schwelle überschreitet, einen Rechteckpuls ab, dies ermöglicht eine Logikschaltung, wie sie im Folgenden geschildert ist. Zudem wird ein zweiter SEV verwendet, da bei zu groß eingestellter Schwelle auch "echte" Impulse herausgefiltert werden. Der zweite SEV wird ebenfalls mit einem Diskriminator versehen und dann über eine Koinzidenzschaltung mit dem zweiten verbunden. Treffen zwei Impulse innerhalb einer Zeit Δt_K ein, dann sendet die Koinzidenz ein Signal aus. Folglich gibt die Koinzidenz ein Impuls, wenn ein Myon von beiden SEV detektiert wurde, dies ist immer der Fall, zubeachten ist, dass der Lichtweg von einem SEV zum anderen SEV ca. 4 ns beträgt. Es ist sehr unwahrscheinlich das beide SEV innerhalb Δt_K jeweils ein Elektron emittieren. Zu beachten ist, dass aufgrund von schaltungstechnischen Unterschieden (z.B. Kabellängen) und Unterschiede der SEV, die Schaltungen von den SEV zur Koinzidenzschaltung aufeinander angepasst werden muss, in diesem Versuchsaufbau wurde dies mit zwei Verzögerungsleitung verwirklicht.

2 Durchführung

2.1 Aufbau, Prüfung und einstellen des Versuchsaufbaus.

Zuerst gilt es sich, unter Zuhilfenahme eines Oszillographen, zu vergewissern, dass die SEV funktionieren. Auf dem Oszillographen sollten dann zufällige Impulse zu betrachten sein, dabei ist zu beachten einen $50\ \Omega$ Widerstand parallel zuschalten um Reflexionen zu vermeiden. Danach schließt man die SEV an die Diskriminatoren an und gibt die Signale der Diskriminatoren auf den Oszillographen. Es sollten Impulse mit gleicher Höhe und Länge zusehen sein, ist die Länge nicht gleich kann sie über den Diskriminator eingestellt werden, ist die Höhe nicht gleich muss Fehlersuche betrieben werden, da diese fest eingestellt ist. Nun kann an Stelle des Oszillographen ein Zählwerk angeschlossen werden, beide Diskriminatoren sollten ungefähr die selbe Anzahl an Impulsen ausgeben. Ist dies nicht der Fall muss die Schwelle des Diskriminators eingeregelt werden. Nun wird die Koinzidenzschaltung und die Verzögerung angeschlossen. Das Signal der Koinzidenzschaltung wird nun auf das Zählwerk gegeben

und die Verzögerung variiert. Die Zählrate wird gegen die Verzögerung aufgetragen. Es ergibt sich ein "Plateau". Die Verzögerung sollte ungefähr auf die Mitte dieses Plateaus eingestellt sein. Jetzt sollte noch die Zählrate nach und vor der Koinzidenzschaltung verglichen werden. Ist kein Unterschied zuerkennen sollte die Schwelle des Diskriminators abgesenkt werden.

Der Teil des Aufbaus der bis jetzt aufgebaut ist, wird nun abgeklemmt und ein Doppelimpulsgenerator wird an die Koinzidenzschaltung angeschlossen. Nun wird die Verzögerung und der Univibrator angeschlossen. Jetzt kann mit einem Oszillographen die Messzeit T_s gemessen werden, diese sollte der Messzeit des TAC entsprechen. Jetzt können die AND-Gatter angeschlossen werden, wie in Abbildung 1 dargestellt. Mit einem Oszillographen wird jetzt überprüft, ob auch die Signale die in den TAC hineingehen den vom Doppelimpulsgenerator generierten Abstand haben. Die Messzeit am TAC wurde bei dem verwendeten Versuchsaufbau auf 20 μ s eingestellt.

Indem der Abstand zwischen den Doppelimpulsen des Impulsgenerators variiert wird, kann notiert werden, welcher Kanal des Vielkanalanalysators welcher Zeit entspricht. Danach kann der Versuchsaufbau, zusammengebaut werden wie in Abbildung 1 dargestellt. Die Messung kann nun begonnen werden.

2.2 Messung

Die Messung beginnt, wenn das Zählwerk und die Aufzeichnung des Vielkanalanalysators gleichzeitig gestartet wird. Ab dem Zeitpunkt wird dann 20 bis 30 h gemessen. Danach wird wieder das Zählwerk und die Aufzeichnung gleichzeitig gestoppt. Eine Messreihe besteht aus den Aufzeichnungen des Vielkanalanalysators, der Anzahl der detektierten Myonen, der Anzahl der Fehlmessungen und der Messzeit.

3 Auswertung

Die im folgenden dargestellten Ausgleichs- und Fehlerrechnungen sowie die Diagramme wurden mit den Paketen Numpy [6], Uncertainties [5], Matplotlib [3] und Scipy [4] in der Programmierumgebung Pyhton erstellt bzw. durchgeführt.

3.1 Bestimmung der Auflösungszeit

Um die optimale Verzögerungszeit zu finden, wurde T_{Vz} variiert und gegen die Anzahl an Startimpulsen pro 10s aufgetragen.

In Abb. 2 sind die Messwerte aus Tabelle 1 aufgetragen. Da kein scharfes Maximum zu erwarten war, wurde ein Plateau gefittet und die Halbwertsbreite bestimmt.

Die Fehler der Counts wird mit dem \sqrt{N} -Gesetz abgeschätzt.

Die maximale Anzahl an Counts $N_{\max} = (232 \pm 15)$ wurde bei einer Verzögerungszeit von $T_{Vz} = 4$ ns gemessen, weshalb diese an der Verzögerungsleitung eingestellt wurde. Die in Abb. 2 bestimmte Halbwertsbreite entspricht der Toleranzzeit Δt_k der Koinzidenzeinheit und ergibt sich aus den Längen der Diskriminatorimpulsen. Diese Zeit, bildet die untere Schranke, dass zwei eingehende Rechteckimpulse aus dem Diskriminator als ein Signal an die Logikschaltung weiter gegeben wird. Hierbei sollte die Breite des Plateaus der doppelten Breite der Diskriminatorimpulsen entsprechen. Die Halbwertsbreite wurde Anhand des Plots zu

$$\Delta t_k = (|-9| + |17|) \text{ ns} = 26 \text{ ns}$$

bestimmt.

Tabelle 1: Messwerte zur Bestimmung der Auflösungszeit der Messapparatur

T_{VZ} in ns	N
-12	41
-9	114
-6	167
-5	192
-4	180
-3	192
-2	227
-1	210
0	203
0,5	203
1	242
1,5	214
2	203
3	216
3,5	205
4	232
5	213
6	202
7	197
8	208
9	205
10	198
11	190
12	202
13	197
14	190
15	201
16	151
17	136
18	169
19	83
20	36

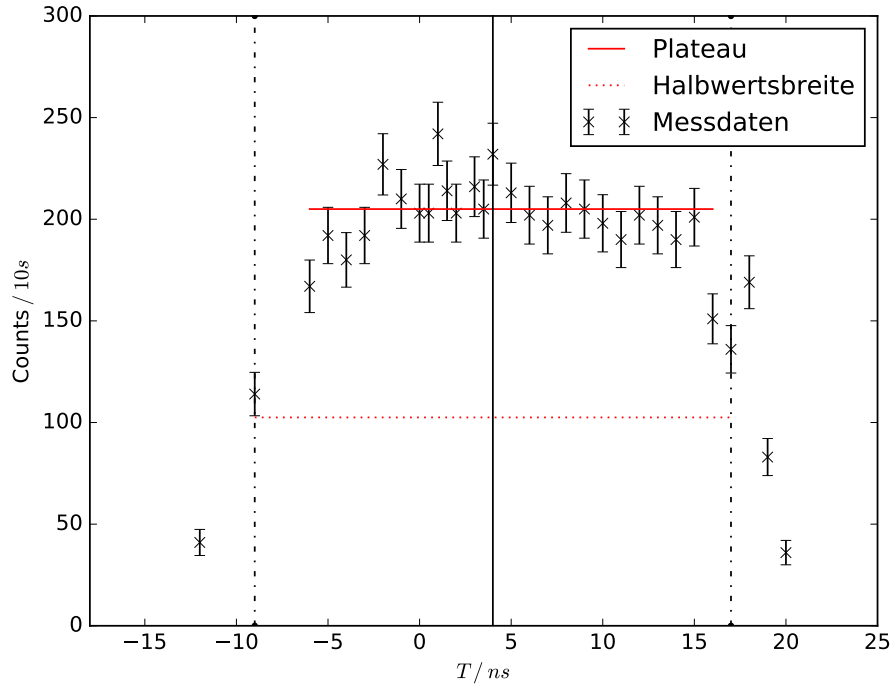


Abbildung 2: Messwerte und Fit des Plateaus zur Bestimmung der Verzögerungszeit.

3.2 Zeitkalibrierung der Messapparatur

Um den Vielkanalanalysator zu kalibrieren werden mit Hilfe eines Doppelimpuls-Generators Impulse mit unterschiedlichem zeitlichem Abstand eingelesen. Die belegten Kanäle sind in Tabelle 2 dargestellt und in Abbildung 3 gegen die Impulsabstände aufgetragen.

Tabelle 2: Messwerte zur Bestimmung der Zeitkalibrierung der Messapparatur

Kanal	T_{VZ} in μs
23	0.5
45	1.0
68	1.5
90	2.0
112	2.5
135	3.0
157	3.5
179	4.0
202	4.5
224	5.0
246	5.5
269	6
291	6.5
313	7
336	7.5
358	8
381	8.5
402	9
443	9.9

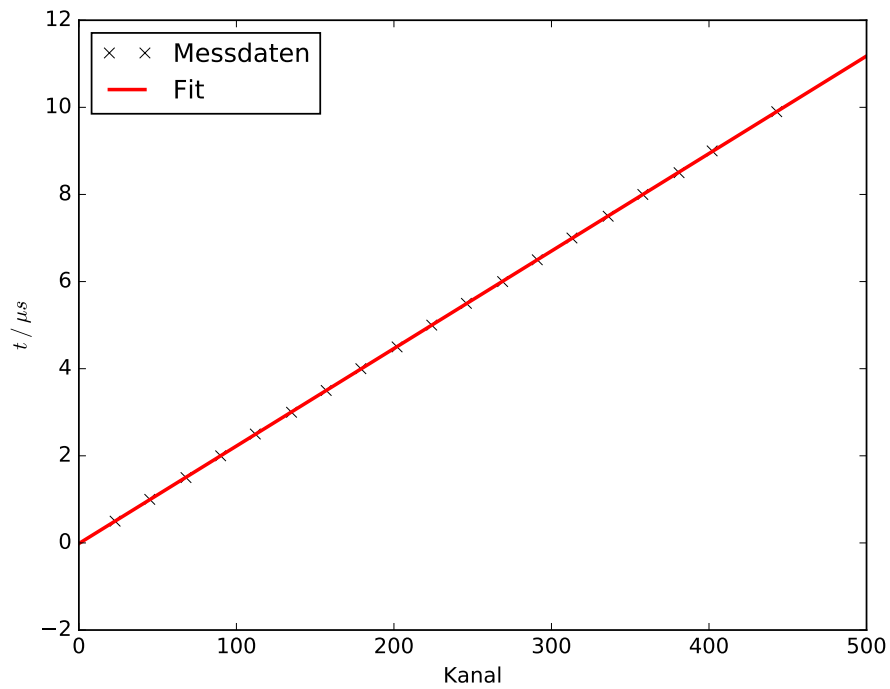


Abbildung 3: Messdaten und Fit zur Zeitkalibrierung der Apparatur.

Die lineare Regression der Form $f(x) = a \cdot x + b$ wird mit [4] bestimmt und liefert für den

Zusammenhang von Kanalnummer und Zeitabstand

$$\Delta t = (0,02238 \pm 1,4 \times 10^{-5}) \mu\text{s} \cdot K + (-0,014 \pm 0,003) \mu\text{s}. \quad (3)$$

3.3 Statistische Berechnung des Untergrundes

Um den Untergrund zu bestimmen wird die Startimpulsrate

$$n = \frac{N_{\text{Start}}}{t_{\text{Gesamt}}} = (25,05 \pm 0,01) \frac{1}{\text{s}} \quad (4)$$

aus der gesamten Messdauer $t_{\text{Gesamt}} = 83930\text{s}$ und der Anzahl an Startimpulsen $N_{\text{Start}} = (2102553 \pm 1450)$ bestimmt.

Mit der poissonverteilten Wahrscheinlichkeit, dass n Teilchen während der Suchzeit $T_{\text{S}} = 11,2 \mu\text{s}$ den Tank durchqueren kann die Anzahl an Fehlmessungen N_{F} mit

$$N_{\text{F}} = P \cdot N_{\text{Start}} = \frac{n \cdot T_{\text{S}}}{1!} e^{-n \cdot T_{\text{S}}} \cdot N_{\text{Start}} \quad (5)$$

berechnet werden.

Da diese Werte statistisch gleichverteilt sind kann die Untergrundrate pro Kanal mit

$$U = \frac{N_{\text{F}}}{512} \quad (6)$$

bestimmt werden.

Damit ergeben sich folgende Werte:

$$\begin{aligned} P &= (0,0002805 \pm 0,0000002)\% \\ N_{\text{F}} &= (589,8 \pm 0,8) \\ U &= (1,152 \pm 0,002) \frac{1}{\text{Kanal}} \end{aligned}$$

3.4 Bestimmung der Lebensdauer der Myonen

Zur Bestimmung der Lebensdauer τ der Myonen wird die Anzahl an Stoppsignalen in den Kanälen des Vielkanalanalysators gespeichert. In Abbildung 4 sind die Counts N gegen die Kanäle aufgetragen. Mit Gleichung 3 wird aus den belegten Kanälen die Zeitdifferenz Δt bestimmt und in Abbildung 5 sowie 6 aufgetragen. Die Werte aus Abb. 5 wurden mit der Funktion

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} + U_{\text{fit}} \quad (7)$$

gefitet. Dabei ergeben sich für die Parameter folgende Werte:

$$\begin{aligned} N_0 &= (163 \pm 3) \\ \lambda &= (0,495 \pm 0,009) \frac{1}{\mu\text{s}} \\ U_{\text{fit}} &= (0,8 \pm 0,2) \frac{1}{\text{Kanal}} \end{aligned}$$

Daraus lässt sich die Lebensdauer mit $\tau = \frac{1}{\lambda}$ zu

$$\tau = (2,02 \pm 0,04) \mu\text{s}$$

bestimmen.

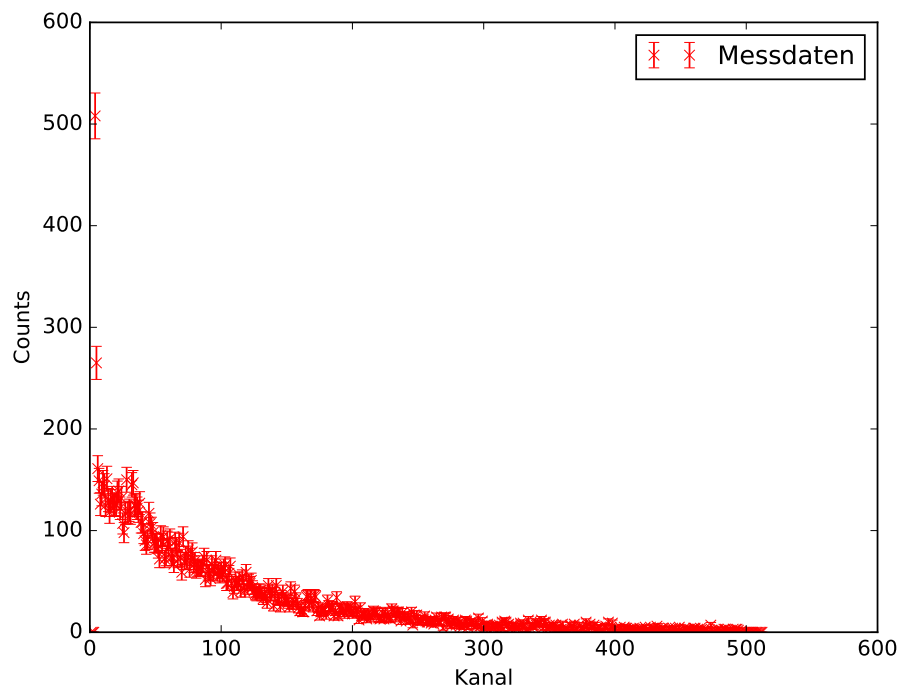


Abbildung 4: Messdaten des Vielkanalanalysators.

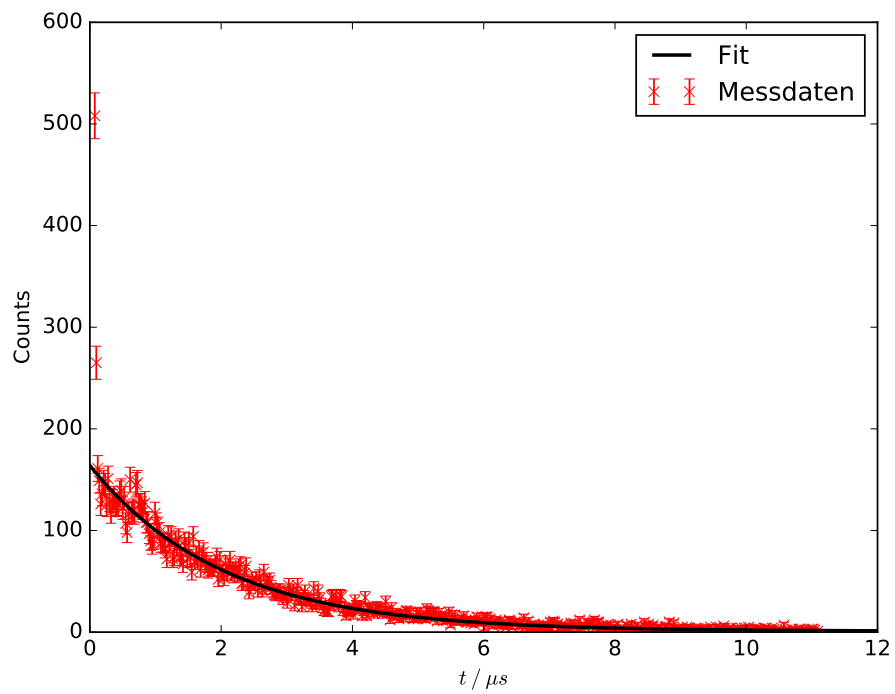


Abbildung 5: Zur Bestimmung der Lebensdauer wurden die gemessenen Counts gegen den berechneten zeitlichen Abstand aufgetragen und mit einer Exponentialfunktion gefittet.

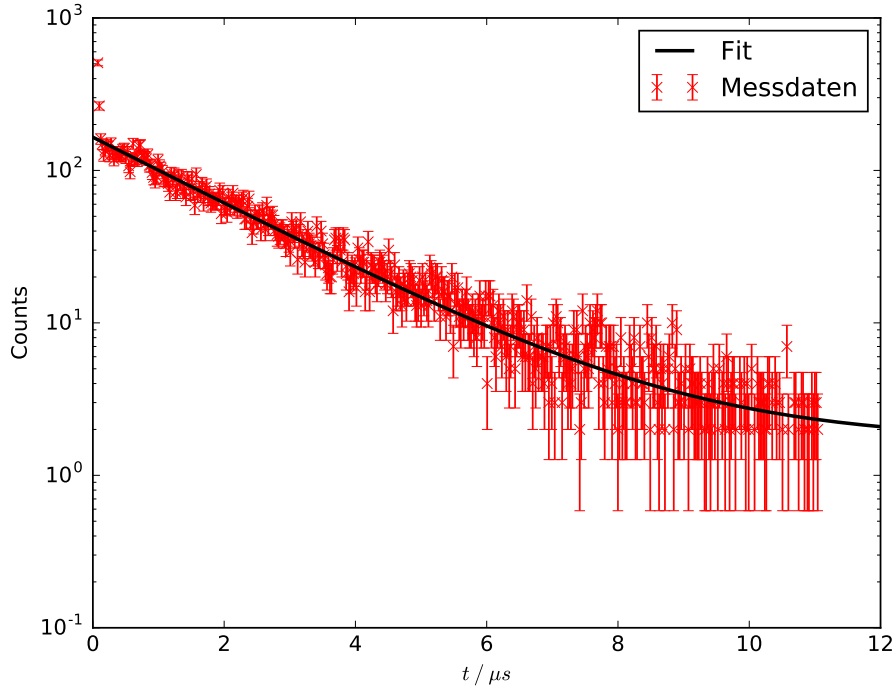


Abbildung 6: Der Übersichtlichkeit halber wurden die Messdaten und der Fit aus Abb. 5 mit logarithmischer y-Achse dargestellt.

4 Diskussion

Bei der Betrachtung der Untergrundwerte fällt auf, dass diese sich leicht von einander unterscheiden. Die Werte

$$U_{\text{stat}} = (1,1519 \pm 0,0016) \frac{1}{\text{Kanal}}$$

$$U_{\text{fit}} = (0,8 \pm 0,2) \frac{1}{\text{Kanal}}$$

zeigen einen relativen Fehler von $(26 \pm 19)\%$ auf.

Mögliche Fehler bei der Bestimmung des Untergrundes können durch die statistische Auswertung entstehen, da in der Berechnung der Poissonverteilung fehlerbehaftete Größen benutzt wurden.

Der Theoriewert für die Lebensdauer der Myonen beträgt $\tau_{\text{theo}} = (2,1969811 \pm 0,0000022) \mu\text{s}$ [1]. Die relative Abweichung zu dem von uns bestimmten Wert $\tau = (2,02 \pm 0,04) \mu\text{s}$ beträgt $(8,1 \pm 1,7)\%$. Durch die unternommenen Schritte zur Rauschunterdrückung können in mehreren Stellen echte Signale rausgefiltert worden sein. So kann durch eine zu hoch eingeregelterte Diskriminatorschwelle verhindert werden, dass alle Signale aufgenommen werden.

Die Auflösungszeit der Koinzidenzeinheit konnte nur abgeschätzt werden da gerade im Bereich außerhalb des Plateaus in Abbildung 2 nicht genug Messwerte zu finden waren. Dadurch, dass zusätzlich die Breiten der Diskriminatorimpulse bei den Messergebnissen fehlen, kann der Wert von Δt_k auch nicht in Verbindung der Breiten gesetzt werden. Qualitativ wäre zu erwarten gewesen, dass ein breiterer Diskriminatorimpuls dazu führt, dass das Plateau breiter wird und somit eine höhere Halbwertsbreite auftritt.

Auch durch die eingestellte Suchzeit können Signale verpasst werden die ausserhalb dieser Zeit liegen und damit eine größere Lebensdauer besitzen.

Eine weitere Fehlerquelle ist die Tatsache, dass stark abgebremste negative Myonen nicht zerfallen sondern von einem Atomkern eingefangen werden kann. Außerdem können auch durch mögliche Unsicherheiten in den elektrischen Bauteilen Verluste auftreten.

Literatur

- [1] C. Patrignani et al. (Particle Data Group). *list muon*. 2017. URL: <http://pdg.lbl.gov/2017/listings/rpp2017-list-muon.pdf>.
- [2] TU Dortmund. *Versuchsanleitung: Lebensdauer der Myonen*. 2014. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/FP/SKRIPT/V01.pdf>.
- [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/>.