

Lebensdauer kosmischer Myonen

Paul Becker Alina Nasr-Esfahani
(paul.becker@udo.edu) (alina.esfahani@udo.edu)

Durchführung: 16.05.2018, 1. Korrektur: xx.xx.2018

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	2
1.1	Eigenschaften von Myonen	2
1.2	Definition der Lebensdauer	2
2	Durchführung	3
3	Auswertung	5
3.1	Kalibrierung der Messapparatur	5
3.2	Zeitauflösung der Messapparatur	6
3.3	Untergrundrate	6
3.4	Bestimmung der Lebensdauer	8
4	Diskussion	9
5	Messwerte	10

1 Theorie

Myonen werden in der Atmosphäre durch den Zerfall von Pionen und Kaonen erzeugt, welche aus Kollision von Atomkernen dort mit hochenergetischen Teilchen – insbesondere Protonen – aus extragalaktischen Quellen entstehen. Da sie sich mit relativistischer Geschwindigkeit bewegen, erreichen sie trotz ihrer kurzen Lebensdauer den Erdboden. Der Zerfall in ein Elektron und zwei Neutrinos kann mit Hilfe eines geeigneten Versuchsaufbaus gemessen und so die Lebensdauer der Myonen bestimmt werden.

1.1 Eigenschaften von Myonen

Durch die Kollision von Protonen aus extragalaktischen Quellen wie z. B. Supernova-Überresten und aktiven Galaxiekernen werden Pionen erzeugt, welche in Myonen und Myon-Antineutrinos bzw. Antimyonen und Myon-Neutrinos zerfallen.

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad \text{bzw.} \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (1.1.1)$$

Mit einer durchschnittlichen Energie von 4 GeV (auf Meereshöhe) [2] sind Myonen relativistisch und können trotz einer Lebensdauer von $2.197 \mu\text{s}$ [2] den Erdboden erreichen.

Myonen sind Leptonen, besitzen einen Spin von $\hbar/2$ und gehorchen der Fermi-Dirac-Statistik. Sie gehören zur zweiten Leptonengeneration und haben eine Masse von 206 GeV [2]. Sie zerfallen in ein Elektron und zwei Neutrinos:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad \text{bzw.} \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu. \quad (1.1.2)$$

Das Myon kann auch anstelle eines Elektrons durch ein Atom gebunden werden, dieser Prozess ist allerdings sehr selten.

1.2 Definition der Lebensdauer

Die Wahrscheinlichkeit dW , dass ein instabiles Teilchen in einem infinitesimalen Zeitraum dt zerfällt ist konstant λ , wobei diese Konstante spezifisch für eine Teilchensorte ist. Wenn eine Anzahl N Teilchen vorhanden ist, ist die Änderung der Teilchenzahl dN

$$dN = -N dW = -N \lambda dt \quad (1.2.1)$$

lediglich von der Zerfallskonstanten λ und der Zeitdauer dt abhängig. Integration liefert dann die Teilchenzahl zu einem beliebigen Zeitpunkt t

$$N(t) = N_0 \exp -\lambda t. \quad (1.2.2)$$

Da die Verteilung der Lebensdauer t der Teilchen einer Exponentialverteilung

$$\frac{dN(t)}{N_0} = \lambda \exp -\lambda t dt \quad (1.2.3)$$

folgt, ist ihre charakteristische Lebensdauer $\tau = 1/\lambda$.

2 Durchführung

Die Myonen, deren Lebensdauer gemessen werden sollen, entstehen aus Pion- und Kaonzerfällen, die durch Wechselwirkung von Atmosphärenteilchen mit kosmischer Strahlung gebildet werden. Aufgrund ihrer relativistischen Energie erreichen sie den Erdboden. Durch Wechselwirkung mit Materie geben sie einen Teil ihrer kinetischen Energie ab. Bei Durchgang durch einen Szintillator in einem Edeltank regt die abgegebene Energie das Szintillatormaterial an, sodass bei der Rückkehr in den Grundzustand Photonen im kurzwelligen sichtbaren bis UV-Bereich emittiert werden. Diese Photonen werden mit zwei Sekundärelektronenvervielfachern (SEV) detektiert, die an den Enden des Tanks angebracht sind. Niederenergetische Myonen können innerhalb des Detektionsvolumen in ein Elektron zerfallen, welches ebenfalls durch einen Lichtblitz einen Strompuls in den SEVs auslöst. Der zeitliche Abstand zwischen dem Myon- und dem Elektronsignal ist dann die Lebensdauer des Myons im Tank.

Ein Lichtblitz entsteht also zum Einen dadurch, dass ein Myon in das Detektionsvolumen eintritt und zum Anderen dadurch, dass ein Myon zerfällt. Die ausgelösten Signale können durch das Messverfahren mit den SEVs nicht unterschieden werden. Als Basis für die Messung der Lebensdauer wird davon ausgegangen, dass der zeitliche Abstand zweier in den Tank eindringenden Myonen größer ist, als die Zerfallszeit eines Myons. Ein Lichtblitz wird also als Startpuls definiert. Wenn ein weiterer Lichtblitz innerhalb der Suchzeit T_S auf das Startsignal folgt, wird dieser als Stopppuls für die Zeitmessung definiert und die Zeitdifferenz als Messwert für die Lebensdauer verwendet. Ist der Lichtblitz stattdessen außerhalb der Suchzeit T_S , wird er als eintreffendes Myon und damit als Startpuls für die nächste Zeitmessung gewertet.

Dies wird durch eine monostabile Kippstufe realisiert. Durch einen Startpuls wird ein Signal auf das erste AND-Gatter gelegt; dieses erste AND-Gatter leitet das Signal an einen Impulszähler weiter und als Startsignal an einen Zeit-Amplituden-Konverter (TAC). Durch eine Verzögerungsleitung kommt dieser Startpuls erst nach ca. 30 ns an einem Univibrator an, der einen invertierten und einen nicht-invertierten Ausgang hat. Der invertierte Ausgang geht auf das erste AND-Gatter, der nicht-invertierte Ausgang auf das zweite AND-Gatter. Am Eingang des zweiten AND-Gatters liegt außerdem der Ausgang der Koinzidenz, der Ausgang geht als Stoppsignal in den TAC und in einen weiteren Impulszähler. Nach 30 ns liegt also für die Zeit T_S eine 0 am ersten AND-Gatter und eine 1 am zweiten AND-Gatter an. Wenn in dieser Zeit ein weiterer Puls eintrifft, wird dies als Stopppuls interpretiert und die Zeitdifferenz dazwischen gemessen, andernfalls geht die Apparatur in den Grundzustand zurück und das nächste eintreffende Myon fungiert wieder als Startpuls. Der zeitliche Abstand zwischen Start- und Stopppuls wird mit dem TAC in einen Spannungspuls umgewandelt, dessen Höhe linear mit der Dauer zusammenhängt. Die Höhe des Pulses wiederum wird mit einem Vielkanalanalysator ausgewertet. Der gesamte Messaufbau ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt. Dieses Messverfahren gelingt, da die Abklingdauer des organischen Szintillators mit 10 ns kleiner und der zeitliche Abstand verschiedener Myonen größer ist, als die mittlere Lebensdauer, die gemessen werden soll.

Der Diskriminator in Abbildung 1 dient dazu, Dunkelpulse zu filtern. Diese Dunkelpulse werden durch thermische Bewegung von Elektronen ausgelöst und besitzen in der Regel eine geringere Amplitude als Photonenpulse. Um keine echten Pulse zu verlieren, wird die Schwelle, bei der Pulse durchgelassen werden, nicht zu hoch eingestellt. Aufgrund der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts im Tank, kann ein Puls zeitversetzt an den beiden SEVs ankommen. Außerdem ist die Laufzeit der Signale nicht

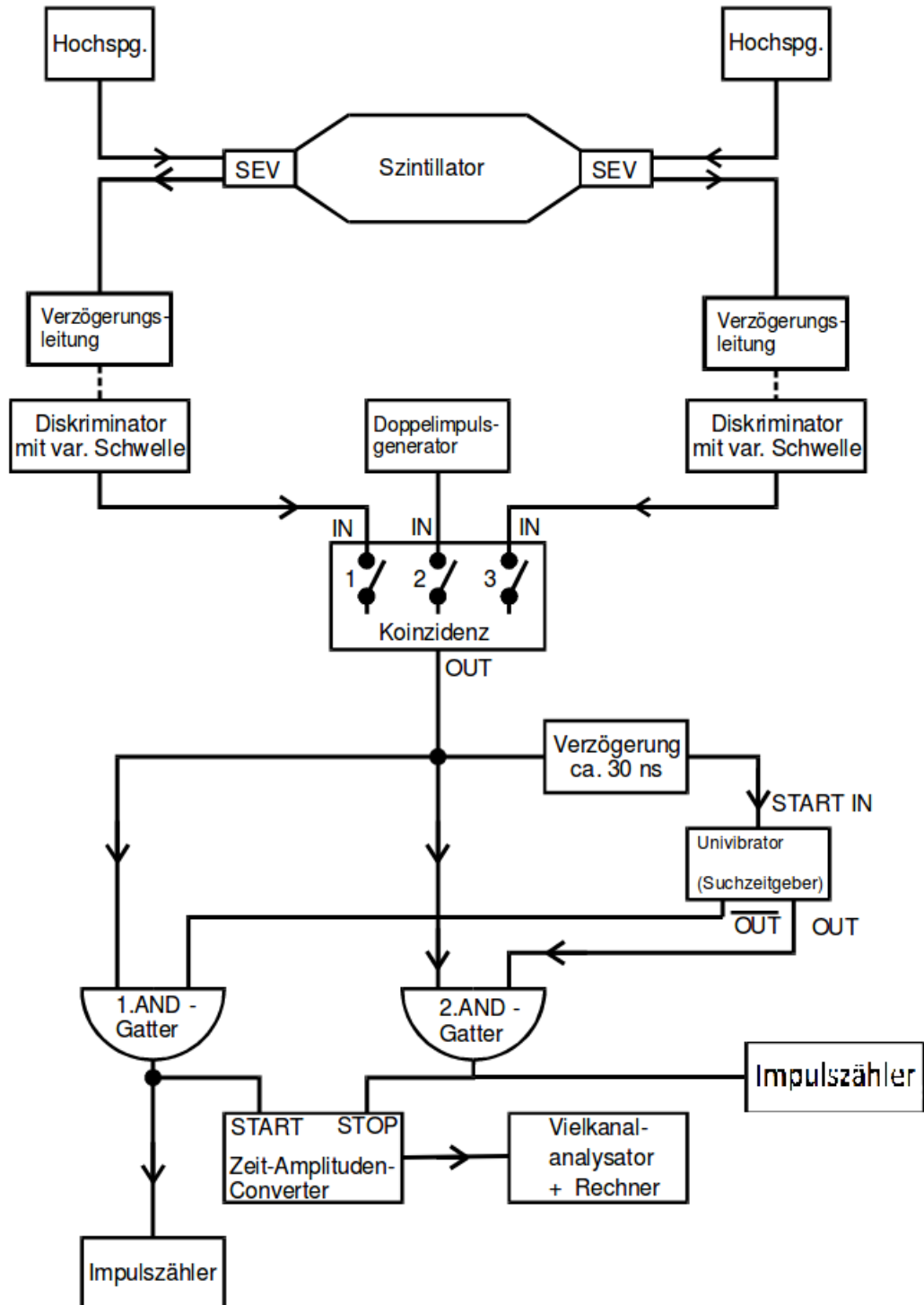


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Messapparatur [3]

identisch. Deshalb wird die Breite des Diskriminators so eingestellt, dass ein Signal trotz dieses Zeitversatzes als koinzidentes Ereignis erkannt wird. Als weiterer Filter wird eine Koinzidenz verwendet; nur wenn ein Signal von beiden SEVs eintrifft, wird es als Myonsignal akzeptiert, da die Wahrscheinlichkeit, in beiden SEVs gleichzeitig einen Dunkelpuls zu messen, gemäß einer Poissonverteilung abnimmt.

Zur Einstellung der richtigen Diskriminatorschwelle wird zunächst ein Zählwerk angeschlossen und die beiden SEVs werden so eingeregelt, dass in beiden Kanälen jeweils eine Rate von 20 bis 40 pro Sekunde gemessen wird. Dazu werden die Breite und die Höhe des Diskriminators, sowie die Länge der Verzögerungsleitungen zwischen SEV und Diskriminator eingestellt. Daraufhin wird die Koinzidenz eingestellt, dass die Suchzeit maximal ist, ohne dass die Zählrate durch Untergrundereignisse dominiert wird. Der TAC wird mit Hilfe eines Doppelpulsgenerators kalibriert; die Pulse werden mit einer Frequenz von 1 kHz erzeugt und die Linearität zwischen dem Abstand der Pulse und der Amplitude der resultierenden Spannung gezeigt. Die eigentliche Messung wird über mindestens 24 Stunden durchgeführt, um eine ausreichende Statistik zu erhalten, außerdem wird zum Ende der Messung notiert, wie viele Startpulse ohne Stoppulse und wie viele Startpulse mit Stoppulsen an den Impulszählern jeweils aufgetreten sind.

3 Auswertung

In diesem Abschnitt wird die Lebensdauer kosmischer Myonen aus den Messdaten gewonnen. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es erforderlich die Messapparatur zu kalibrieren. Alle Fehler werden im Folgenden mit Hilfe des `python`-Paktes `uncertainties` [1] berechnet, welches eine automatische Gauß'sche Fehlerfortpflanzung bereitstellt.

3.1 Kalibrierung der Messapparatur

Die Daten über die Lebensdauer wird mit Hilfe eines Vielkanalanalysators (VKA) gewonnen. Der VKA teilt die gemessenen Lebensdauern in 512 Kanäle (Bins) eines Histogrammes ein. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Zusammenhang zwischen gemessener Lebensdauer und Kanal linear zusammenhängt. Somit ist es sinnvoll dieses Zusammenhang über eine lineare Funktion

$$f(c) = Ac + B \quad (3.1.1)$$

anzunehmen.

Die Ausgleichsrechnung in Abbildung 2 an die Werte in Tabelle 1 liefert somit

$$t(c) = (0.0454 \pm 0.00003) \frac{\mu\text{s}}{\text{Kanal}} - (0.035 \pm 0.004) \mu\text{s} \quad (3.1.2)$$

Im der weiteren Auswertung ist lediglich der Parameter A von Interesse, da dieser die Wartezeit pro Kanal beschreibt und somit den Zusammenhang zwischen VKA Kanal und Wartezeit liefert. Sollten mehrere Kanäle im VKA gefüllt worden sein, wurde über die betroffenen Kanalnummern gemittelt.

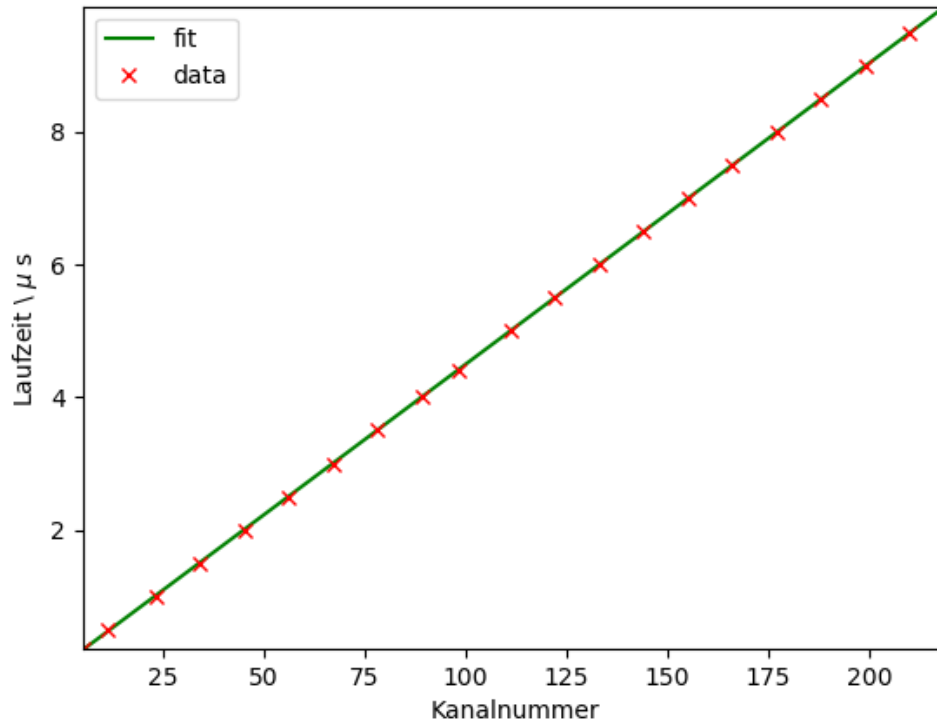


Abbildung 2: Lineare Ausgleichsrechnung zur Bestimmung der Proportionalität zwischen Kanälen und Zeit

3.2 Zeitauflösung der Messapparatur

Um verschiedene Signallaufzeiten zwischen den SEV's und der Koinzidenz ausgleichen zu können, werden Verzögerungsleitungen benutzt, um weitere Verzögerungen in das System einbringen zu können. Durch Messung der Myonen-Zählrate unter Variation der Verzögerungszeiten lässt sich die Auflösungszeit Δt_K der Koinzidenzschaltung als Breite der Verteilung der Zählrate in Abhängigkeit von der Verzögerung bestimmen. Die Verteilung hat im Allgemeinen abfallende Flanken zu größeren Verzögerungszeiten und erreicht dazwischen einen Plateauwert. Statt einer Trapezfunktion wurde aus Gründen der Einfachheit eine Gaußglocke der Form

$$\text{Zählrate} = A \cdot \exp \left\{ \frac{-(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (3.2.1)$$

an die Messwerte gefittet. Die Fitparameter sind $A = 258.8 \pm 10.5$, $\mu = 2.0 \pm 0.5$ und $\sigma = 10.21 \pm 0.56$. Aus Abbildung 3 ergibt sich aus der Halbwertsbreite eine Zeitauflösung von $\Delta t_k = 24.03 \text{ ns}$.

3.3 Untergrundrate

Um die Untergrundrate N_B abschätzen zu können, wird die Wahrscheinlichkeit betrachtet, mit der ein Myon im Tank bei gestarteter Messung in einem Zeitintervall von

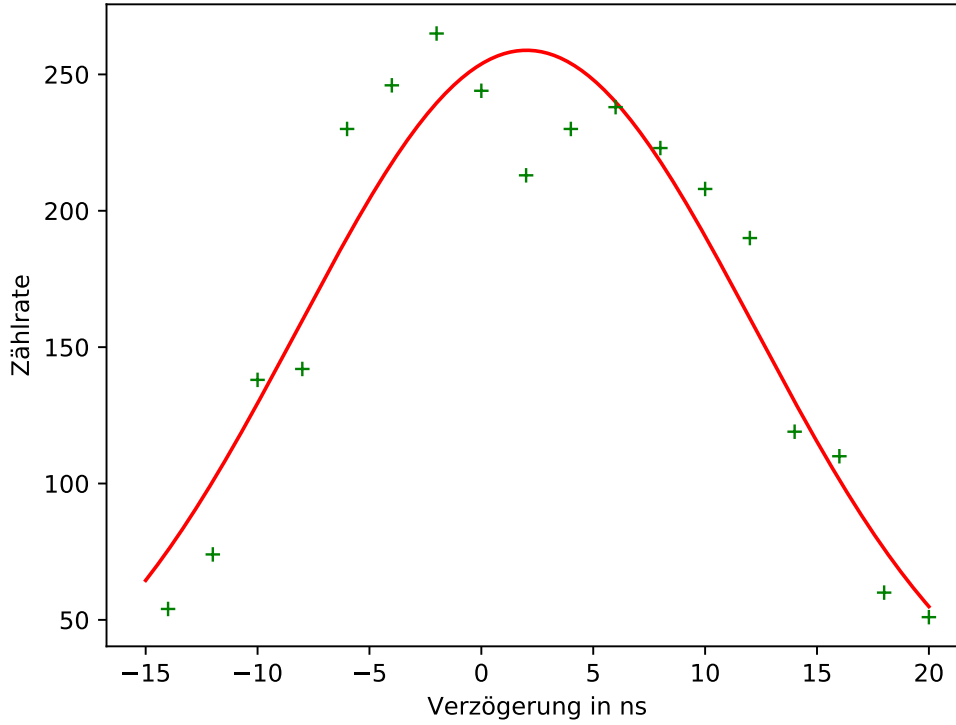


Abbildung 3: Myon-Zählraten unter Variation der Verzögerungszeit

$T_S = 10 \mu\text{s}$ ein Stopp-Signal erzeugt. Unter der Annahme dass das Auftreten von Myonen normalverteilt ist, lässt sich die Wahrscheinlichkeit p_i einer Messung von i Myonen durch eine Poissonverteilung abschätzen:

$$p_i = \frac{\lambda^i}{i!} e^{-\lambda}, \quad (3.3.1)$$

wobei der Erwartungswert der Messung eines Myons mit λ bezeichnet wird. Dieser Erwartungswert wird mit der Myonenzählrate identifiziert. Somit liefert die Poissonverteilung die Wahrscheinlichkeit für die Messung eines Myons.

Zur Berechnung der Untergrundrate ist es notwendig, die durchschnittliche Anzahl an Myonen zu bestimmen, die in einer Sekunde den Tank passieren. Die durchgeführte Messung liefert $N_{\text{Start}} = 1426728$ und $t_{\text{Messung}} = 513670 \text{ s}$.

$$f = \frac{N_{\text{Start}}}{t_{\text{Messung}}} = 2,28 \frac{\text{Myonen}}{\text{s}} \quad (3.3.2)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass genau ein weiteres Myon innerhalb der Suchzeit den Tank durchquert, berechnet sich gemäß

$$P = \frac{(T_s \cdot f)^k}{k!} \exp(-f \cdot T_s) = 2.28 \cdot 10^{-5}, \quad (3.3.3)$$

wobei $k = 1$ gilt. Somit ergeben sich bezogen auf die Startimpulse

$$N_{Err} = 32.53 \quad (3.3.4)$$

Fehlmessungen. Werden jetzt noch die einzelnen Kanäle berücksichtigt ergibt sich folgende Untergrundrate pro Kanal:

$$U_B = 0,07 \frac{\text{Ereignisse}}{\text{Kanal}}. \quad (3.3.5)$$

3.4 Bestimmung der Lebensdauer

Zur bestimmung der Individuallebensdauer der Myonen werden in Abbildung 4 die Daten an eine Exponentialfunktion gemäß

$$f(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda t) + U_B \quad (3.4.1)$$

gefittet, wobei U_B die Untergrundrate und λ die Zerfallskonstante ist. Die Ausgleichs-

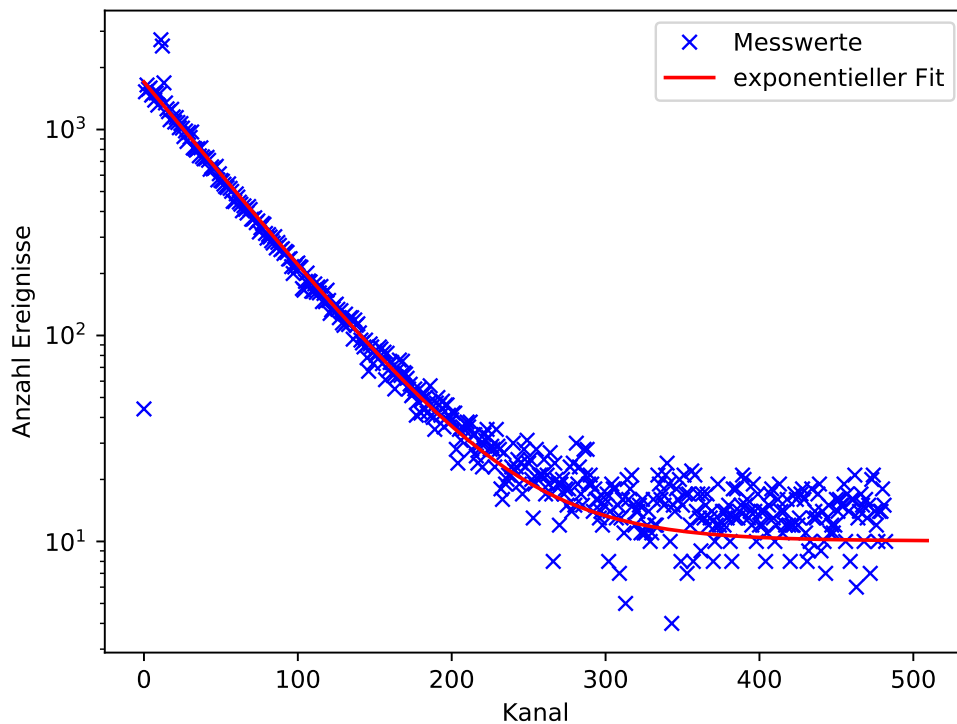


Abbildung 4: Exponentielle Ausgleichsrechnung zur Bestimmung der Zerfallskonstante

rechnung liefert die Parameter $N_0 = 1691.34 \pm 31.88$, $\lambda = 0.0208 \pm 0.0006 \text{ 1/Kanal}$ und $U_B = 10.05 \pm 6.32$. Hierbei ist zu beachten, dass die Zerfallskonstante in Abhängigkeit des Kanals des VKA bestimmt wurde. Mithilfe der Kalibration durch die lineare Ausgleichsrechnung in Unterabschnitt 3.1 wird des Kanal in eine Zeit umgerechnet. Mit dem Umrechnungsfaktor $F = (0.0454 \pm 0.00003) \text{ } \mu\text{s/Kanal}$ ist die Lebensdauer $\tau = F/\lambda$, also

$$\tau = (2.1789 \pm 0.0014) \text{ } \mu\text{s}. \quad (3.4.2)$$

4 Diskussion

Der experimentell bestimmte Wert für die Myonlebensdauer beträgt $(2.1789 \pm 0.0014) \mu\text{s}$. Dieser stimmt mit einem relativen Fehler von 0.8 %, gut mit dem Theoriewert $2.196981 \mu\text{s}$ [2] überein, obwohl die Werte für die Untergrundrate mit den zwei unterschiedlichen Methoden – Abschätzung über die Poisson-Wahrscheinlichkeit und der exponentielle Fit an die Messwerte – eine extrem große Diskrepanz aufweisen.

Literatur

- [1] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. 2018. URL: <http://uncertainties-python-package.readthedocs.io/en/latest/#>.
- [2] C. Patrignani u. a. „Review of Particle Physics“. In: *Chin. Phys.* C40.10 (2016), S. 100001. DOI: 10.1088/1674-1137/40/10/100001.
- [3] Fortgeschrittenen Praktikum. *Versuchsanleitung Versuch 59*. TU Dortmund. Dortmund, Deutschland, 2018. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/MASTER/SKRIPT/V59.pdf>.

Datum:
16.05.2018

Lebensdauer kosmischer Myonen
von Paul Becker,
Alina Nasr-Esfahani

Versuchs Nummer:
V01

Kanalnummer	Laufzeit / ns
5.0	0.2
11.0	0.5
22.0	1.0
34.0	1.5
44.0	2.0
56.0	2.5
66.0	3.0
78.0	3.5
88.0	4.0
98.0	4.4
110.0	5.0
122.0	5.5
132.0	6.0
144.0	6.5
155.0	7.0
166.0	7.5
177.0	8.0
188.0	8.5
199.0	9.0
210.0	9.5
219.0	9.9

Tabelle 1: Modifizierte Messdaten zur Kalibration der Messkanäle des VKA

5 Messwerte