

# **V01: Lebensdauer von Myonen**

Simon Schulte  
simon.schulte@udo.edu

Tim Sedlaczek  
tim.sedlaczek@udo.edu

Durchführung: 23.04.2018

Abgabe: 27.04.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

# 1 Theorie

Ziel des Versuchs ist die Bestimmung der Lebensdauer von Myonen. Myonen entstehen unter anderem in Luftschowern in der Hochatmosphäre durch Pionzerfälle. Diese Pionen wiederum entstehen zum Beispiel aus kosmischen Protonen aus u.A. Aktiven Galaktischen Kernen. Solche Protonen haben eine sehr hohe kinetische Energie. Das führt dazu, dass die entstehenden Myonen relativistische Geschwindigkeiten aufweisen und sie somit trotz ihrer kurzen Lebensdauer auf der Erdoberfläche registrierbar sind.

## 1.1 Standardmodell

Das Standardmodell unterscheidet zwischen zwei Arten von Elementarteilchen. Diese zwei Arten sind zum ersten (Eich)Bosonen und außerdem Fermionen. Während Bosonen als Austauscheteilchen der fundamentalen Wechselwirkungen fungieren, stellen Fermionen die kleinsten aktuell bekannten Bausteine der Materie dar. Die Fermionen werden dabei in Quarks und Leptonen unterteilt. Quarks bilden dabei die fundamentalen Bausteine der Hadronen. Dazu gehören unter Anderem auch Protonen und Pionen, die für diesen Versuch von Relevanz sind. Leptonen und Quarks sind in drei Generationen aufgeteilt. Die Fermionengenerationen sind:

I Elektron ( $e^-$ ) und Elektron-Neutrino ( $\nu_e$ )

II Myon ( $\mu^-$ ) und Myon-Neutrino ( $\nu_\mu$ )

III Tauon ( $\tau^-$ ) und Tauon-Neutrino ( $\nu_\tau$ ).

Dabei haben die Neutrinos eine im Standardmodell verschwindend geringe Masse. All diese Teilchen haben außerdem auch ein Antiteilchen. Das Antiteilchen eines geladenen Fermions hat die gleichen Eigenschaften, wie das Fermion selbst, außer, dass das Vorzeichen der Ladung sich ändert. Antineutrinos kennzeichnen sich durch eine Überstreichung. Antineutrinos sind wichtig, wenn Antifermionen in einem Zerfall eine Rolle spielen, um in dem jeweiligen Zerfall die Leptonzahlerhaltung zu gewährleisten. Die Lebensdauern von Myonen und Tauonen sind verschwindend gering und das Elektron ist das einzige stabile geladene Lepton. Dementsprechend zerfallen die Myonen und Tauonen bevorzugt in Elektronen. Wie bereits am Anfang erwähnt entstehen die meisten Myonen, die uns auf der Erdoberfläche erreichen bei Pionzerfällen in der Erdatmosphäre:

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

## 1.2 Myonen in Szintillationsdetektoren

Myonen werden in diesem Versuch mit einem Szintillationsdetektor nachgewiesen. Myonen deponieren bei ihrem Durchgang durch den Szintillator einen Teil ihrer kinetischen Energie im Szintillatormaterial. Das führt zu Anregungszuständen der Moleküle, bei deren Rückkehr in den Grundzustand Photonen frei werden. Die Photonen werden durch einen Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) nachgewiesen. Ein SEV ist aufgebaut aus

einer Photokathode, Dynoden zur Sekundärelektronenproduktion sowie einer Anode. Nun gibt es drei verschiedene Möglichkeiten, wie sich ein Myon verhält, dass auf den Szintillationsdetektor trifft. Die erste Möglichkeit ist, dass das Myon bereits so viel Energie in der Atmosphäre verloren, dass dieses dann im Detektor zerfällt. Zur Bestimmung der Lebensdauer ist diese Möglichkeit die beste. Myonen, die im Detektor zerfallen, zerfallen meist in ein Elektron und die entsprechenden Neutrinos:

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

Da die Masse des Myons etwa 200 mal größer ist, als die des Elektrons folgt, dass so entstehende Elektronen sehr viel kinetische Energie haben. Diese reicht aus, um das Szintillatormaterial anzuregen. Dabei entstehen Photonen, die als Stoppsignal fungieren. Aus der Differenz von Eintritt des Myons im Szintillator und dem Zerfall des Myons lässt sich dann, mit einigen Methoden der Statistischen Datenanalyse die Lebensdauer der Myonen bestimmen.

Die zweite Möglichkeit ist, dass das Myon den Detektor durchquert ohne zu zerfallen. Dann wird trivialerweise immernoch das erste Signal detektiert, aber das zweite nicht. Das führt auch zu einem Untergrundrauschen, dem, mit Hilfe des Versuchsaufbaus, versucht wird entgegenzuwirken.

Die letzte Möglichkeit ist, dass negative Myonen durch die Szintillatoratome eingefangen werden. Genau wie beim Einfang von Elektronen können, mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, negative Myonen unter Bildung eines myonischen Atoms eingefangen werden. Wie bei der zweiten Möglichkeit wird dann ebenfalls nur das erste Signal detektiert.

### 1.3 Teilchenzerfälle

Teilchenzerfälle sind statistische Prozesse. Die Wahrscheinlichkeit  $dW$ , dass ein Zerfall im Zeitraum  $dt$  eintritt, ergibt sich zu:

$$dW = \lambda dt,$$

$\lambda$  stellt hier eine charakteristische Konstante dar. Dabei muss außerdem eine Proportionalität zwischen  $dW$  und  $dt$  gegeben sein. Es fällt auf, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Zerfall unabhängig vom individuellen Alter des Teilchens ist. Die Lebensdauer eines Teilchens ist also nur eine Angabe für den wahrscheinlichsten Zeitpunkt des Zerfalls von dem jeweiligen Teilchen. Außerdem sind die Zerfälle einer Vielzahl von Teilchen unabhängig voneinander. Für die Zahl der Teilchen  $dN$ , die im Zeitraum  $dt$  zerfallen sind folgt dann:

$$dN = -N dW = -\lambda N dt,$$

Für große  $N$ , also eine große Anzahl an beobachteten Teilchen, lässt sich durch Integration auf das exponentielle Zerfallsgesetz schließen:

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

Dabei bezeichnet  $\lambda$  in diesem Fall die teilchenspezifische Zerfallskonstante,  $t$  bezeichnet die Zeit und  $N_0$  die Anzahl vorhandener Teilchen zum Zeitpunkt  $t = 0$ . Die Verteilungsfunktion in einem Intervall  $[t, dt]$  ergibt sich dann zu:

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

Wenn der erste Moment dieser Verteilung bestimmt wird, ergibt sich ein Erwartungswert für die Lebensdauer:

$$\langle t \rangle = \tau = \int_0^\infty \lambda t \exp(-\lambda t) dt = \left| \lambda \left( -\frac{t}{\lambda} - \frac{1}{\lambda^2} \right) \exp(-\lambda t) \right|_0^\infty = \frac{1}{\lambda}. \quad (2)$$

## 1.4 Statistische Probleme

Wäre es möglich,  $N \rightarrow \infty$  zu betrachten würden die Messwerte gegen die im Kapitel 1.3 bestimmte Verteilungsfunktion (1) konvergieren. Gemessen wurde allerdings nur für etwa 42 Stunden. Dadurch ergibt sich das arithmetische Mittel als gute Näherung, um den Erwartungswert der Stichprobe zu bestimmen. Durch nichtlineare Ausgleichsrechnung kann diese Näherung allerdings noch präzisiert werden. Dafür wird die Methode der kleinsten Fehlerquadrate genutzt. Die Lebensdauer wird also durch Regression durch die Messwerte mit der Verteilungsfunktion abgeschätzt.

# 2 Durchführung

## 2.1 Versuchsaufbau

Abbildung 1 zeigt die im Versuch verwendete Schaltung. Der hier verwendete organische Szintillator besteht dabei aus einem Edelstahlzylinder, an dessen Enden jeweils ein SEV optisch angekoppelt ist. Dabei ist dieser Szintillator ein organischer Szintillator, weil das Szintillatormedium in Toluol gelöst ist. Die Abklingzeit der im Szintillator angeregten Elektronen liegt im Bereich von 10 ns.

Ziel ist es, die Zeit zwischen dem ersten Lichtimpuls, der durch das Eindringen des Teilchens in den Detektor erzeugt wird und dem zweiten Lichtimpuls, der durch den Zerfall des Teilchens im Detektor erzeugt wird, zu bestimmen. Dies wird mit einem Zeit-Amplituden-Konverter (TAC) realisiert. Der TAC gibt einen Spannungsimpuls ab, dessen Höhe proportional zum zeitlichen Abstand der beiden Signale ist. Zum Bestimmen dieser Zeitabstände wird eine Stopp-Uhr genutzt. Der erste Impuls startet das Zählwerk, der zweite Impuls stoppt es. Der am TAC entstehende Impuls wird anschließend in einem Vielkanalanalysator entsprechend seiner Höhe in einen Kanal eingeordnet und gespeichert. Die Daten werden über einen Rechner mit dem Programm MAESTRO ausgelesen.

### 2.1.1 Filtern von nicht-zerfallenden Myonen.

Die oben beschriebene Messmethode ist nicht geeignet, um die in Kapitel 1.3 beschriebenen Fälle auszuschließen, in denen das Myon nicht zerfällt, also nur der Eintrittslichtimpuls im Szintillator entsteht. Durch diese Fälle entsteht ein ungewolltes Untergrundrauschen. Durch das Einbauen einer Suchzeit  $T_s$  über eine monostabile Kippstufe, auch Univibrator genannt, wird dieses Rauschen gefiltert. Die monostabile Kippstufe wird dabei durch den vom SEV über eine Koinzidenzschaltung einlaufenden Impuls nach einer Verzögerung angestoßen und in einen instabilen Zustand gehoben. Im instabilen Zustand wird das an den beiden Ausgängen des Univibrators anliegende Signal so getauscht, dass ein H-Signal auf das 2. AND-Gatter und ein L-Signal auf das 1. AND-Gatter gegeben wird. Nachdem die Suchzeit abgelaufen ist, werden die Signale wieder zurückgetauscht. Das Signal der Koinzidenz wird ebenfalls an das 1. und 2. AND-Gatter gegeben.

Läuft nun der Einfallimpuls in die Schaltung, so liegen am 1. AND-Gatter zwei H-Signale an. Die Verzögerung vor dem Univibrator sorgt dafür, dass die Ausgänge einige ns später umgetauscht werden. Das 1. AND-Gatter schaltet daher durch und den TAC erreicht das Start-Signal. Die monostabile Kippstufe schaltet nun um und am 2. AND-Gatter liegt ein H-Signal. Läuft in der Suchzeit nun das Zerfallssignal ein, liegen am 2. AND-Gatter 2 H-Signale an und das Stopp-Signal für den TAC wird gegeben. Passiert dies nicht, schaltet die Kippstufe wieder um und die Messung wird verworfen.

Die Suchzeit muss so gewählt werden, dass sie groß gegenüber der Lebensdauer, die in der Größenordnung von s liegt, aber klein gegenüber dem zeitlichen Abstand zwischen zwei einfallenden Myonen, der in der Größenordnung ms) liegt, ist, damit das Stopp-Signal nicht durch ein zweites Myon gegeben wird. Dies ist letztlich jedoch nicht absolut auszuschließen und durch diese Schaltung auch nicht filterbar. Die Dauer zwischen zwei Myonen ist jedoch statistisch verteilt, wodurch alle Kanäle gleich stark von solchen Fehlmessungen betroffen sind. Es ergibt sich eine kontinuierliche Untergrundrate  $U$ , die alle Kanäle gleichermaßen betrifft.

### 2.1.2 Rauschunterdrückung

Neben dem bereits im vorherigen Kapitel erwähntem Rauschen, welches durch zu schnell einfallende Myonen entsteht gibt es außerdem noch andere Rauschquellen. Dazu gehören spontane, thermische Elektronenemissionen der Photokathoden der SEVs. Diese führen zu Spannungssignalen, obwohl kein Myon eingefallen ist. Die entstehenden Signale sind jedoch meistens kleiner als die, die von Myonen verursacht werden. Zur Unterdrückung dieser Signale werden zum ersten Diskriminatoren eingesetzt. Den beiden SEVs sind dabei Diskriminatoren nachgeschaltet. Die Diskriminatoren geben nur dann ein Signal ab, wenn das einlaufende Signal eine gewisse Schwelle überschreitet. Die Diskriminatoren leisten dabei weiterhin eine Umwandlung der einfallenden Pulse in ein H-Signal der NIM-Logik. Zum zweiten wird eine Koinzidenzschaltung genutzt. Auch hier sind zwei SEVs verbaut, deren Signale über die Koinzidenzschaltung abgeglichen werden. Gefilter wird hier, indem nur wenn von beiden SEVs innerhalb einer Zeit  $\Delta t_K$  ein Signal an den Eingängen der Koinzidenz ankommt, ein Signal weitergegeben wird. Spontane Emissionen betreffen in

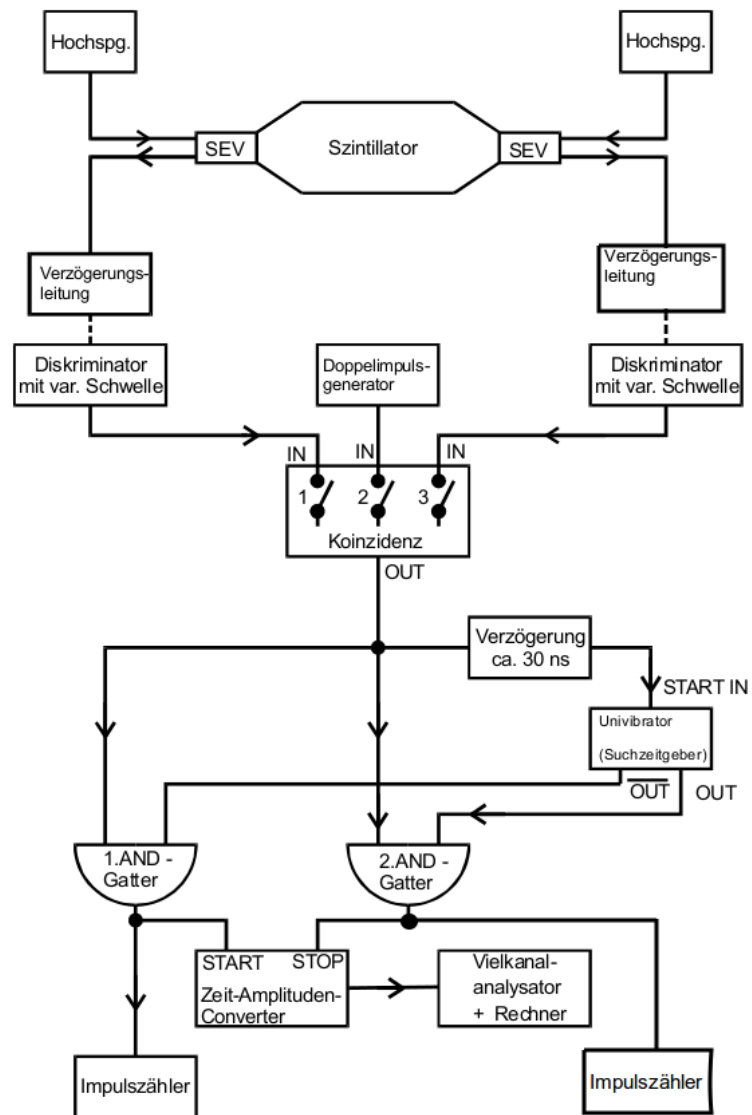


Abbildung 1: Ein Blockschaltbild des Versuchsaufbaus. [anleitung].

der Regel nur einen SEV. Die Wahrscheinlichkeit, dass es nun an beiden SEVs gleichzeitig zu einer spontanen Emission kommt ist relativ gering. Die Zeit  $\Delta t_K$  ist durch Variation der Diskriminatorlänge so zu wählen, dass Sie sowohl den Lichtweg zwischen den beiden SEVs, der bei ca. 4 ns für den Fall, dass ein Signal unmittelbar an einem SEV entsteht, liegt, als auch Unterschiede in den Kabellängen der beiden Leitungen der SEVs zur Koinzidenz berücksichtigt. Letzteres wird durch eine Verzögerungsschaltung aufeinander abgeglichen. Eine vollkommene Rauschunterdrückung ist damit allerdings immernoch nicht möglich.

## **2.2 Versuchsdurchführung**

### **2.2.1 Aufbau und Justage des Versuchsaufbaus**

Die Schaltung wird wie in 1 aufgebaut und unter Zuhilfenahme eines Oszillographen überprüft und justiert. Dabei wird mit dem zur Rauschunterdrückung gedachten Teil des Aufbaus begonnen: Nach Einschalten der Hochspannung sollen zunächst an den SEV Ausgängen Impulse unterschiedlicher Höhe abfallen. Dabei wird die Länge der Diskriminatorpulse gemessen. Die Diskriminatoren werden so eingestellt, dass zwischen 20 und 40 Myonen pro Sekunde gemessen werden. Dabei ist es wichtig, dass an beiden Diskriminatoren etwa die gleiche Rate abfällt. Danach wird die Koinzidenzschaltung angeschlossen und der Ausgang auf ein Zählwerk gelegt. Die Zählrate wird abhängig von der Verzögerung gemessen, am entsprechenden Graphen 3 ist das so entstehende "Plateau" zu erkennen. Aus der Halbwertsbreite der Kurve lässt sich auf die Verzögerungszeit schließen. Zuletzt wird die Zählrate vor der Koinzidenz und hinter der Koinzidenz verglichen. Die Koinzidenz wäre wirkungslos, wenn die beiden Zählraten annähernd gleich wären. Dann muss die Diskriminatorschwelle gesenkt werden um die Myonenrate zu erhöhen. Danach wird vor der Koinzidenzschaltung abgeklemmt. Ein Doppelimpulsgenerator wird auf den an der Koinzidenz verbleibenden Eingang gelegt. Die Dauer zwischen zwei vom Doppelimpulsgenerator abgegebenen Impulsen ist einstellbar und lässt sich gut zum Überprüfen der Schaltung nutzen. Über die Verzögerungsleitung wird der Univibrator angeschlossen. An den Ausgängen der Kippstufe kann nun die Suchzeit gemessen werden. Diese sollte den Zeitmessbereich des TAC nur leicht überschreiten. Die von den AND-Gattern auf die Eingänge des TAC gehenden Signale müssen den selben Abstand haben, der zwischen den Impulsen am Doppelimpulsgenerator eingestellt ist. Der TAC wird überprüft und dabei soll die Höhe der am Ausgang abfallenden Signale proportional zum eingestellten Impulsabstand sein. Als letztes wird durch Änderung der Impulsabstände überprüft, welcher Kanal am Vielkanalanalysator jeweils welcher Messzeit entspricht. Dann kann die Messung beginnen. Dafür werden das Zählwerk und der Vielkanalanalysator gleichzeitig gestartet. Die Messzeit beträgt etwa 42 h. Zum Beenden der Messung werden Zählwerk und Vielkanalanalysator gleichzeitig gestoppt. Aufgezeichnet werden die Ergebnisse des Vielkanalanalysators, die Anzahl der detektierten Myonen, die Anzahl der Fehlmessungen sowie die Messzeit.

## 3 Auswertung

### 3.1 Fehlerrechnung

Für die Auswertung wird als Punktschätzer der arithmetische Mittelwert

$$\bar{T}_{\text{arith.}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (3)$$

genutzt. Für die Fehlerrechnung sowie den mathematischen Teil der Auswertung wird auf PYTHON zurückgegriffen:

Arithmetische Mittelwerte werden durch die Funktion MEAN aus dem Paket NUMPY nach (3), gewichtete Mittelwerte durch manuelles implementieren der jeweiligen Funktion berechnet. Fehlerfortpflanzung wird durch die Bibliothek UNCERTAINTIES automatisiert. Regressionen sowie deren Fehler wurden durch die NUMPY Funktion CURVE-FIT durchgeführt. Grafiken wurden mit MATPLOTLIB erstellt.

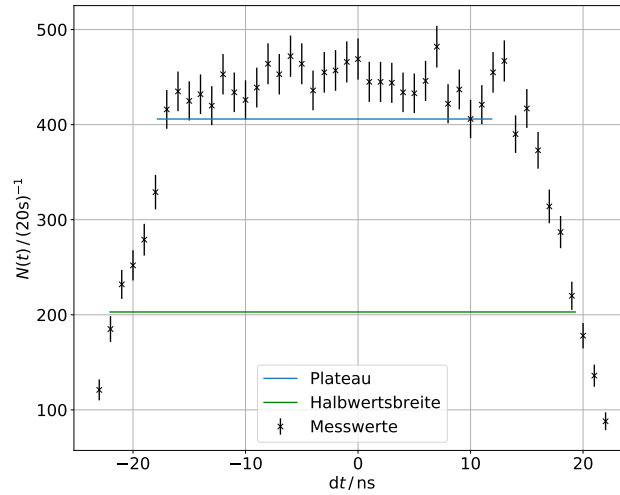
### 3.2 Bestimmung der Verzögerungszeit

Um die Verzögerungszeit  $T_{VZ}$  zu bestimmen, wurde an einer Verzögerungsleitung eine feste Verzögerung von 30 ns eingestellt und die Verzögerung der anderen Verzögerungslinie von 0 bis 22 ns variiert und das jeweilige  $N(t)$  bestimmt. Genauso wurde dann die andere Verzögerung auf 30 ns eingestellt, die vorher variiert wurde und die Verzögerung, die in vorheriger Messung konstant bei 30 ns blieb wurde von 0 bis 23 ns variiert. Auch hier wurde wieder das  $N(t)$  bestimmt. Tabelle 1 beinhaltet die Messwerte, die für das  $N(t)$  aufgenommen wurden. Abbildung 3 zeigt die zugehörige grafische Darstellung. Die Fehler sind nach  $\sqrt{N}$  gebildet worden, also dem Poisson-Fehler für Zählexperimente.



dt / ns	N /10s	
22	88	
21	136	
20	178	
19	220	
18	287	
17	314	
16	373	
15	417	
14	390	
13	467	
12	455	
11	421	
10	406	
9	437	
8	422	
7	482	
6	446	
5	433	
4	434	
3	444	
2	445	
1	445	
0	469	
-1	466	
-2	457	
-3	455	
-4	436	
-5	464	
-6	472	
-7	453	
-8	464	
-9	439	
-10	426	
-11	434	
-12	453	
-13	420	
-14	432	
-15	425	
-16	435	
-17	416	
-18	329	
-19	279	
-20	252	
-21	232	
-22	185	
-23	8	121

**Tabelle 1:** Die Messwerte zur Bestimmung von  $N(t)$ .



**Abbildung 2:** Die graphische Darstellung der Messwerte.

Aus der Grafik 3 wird schwer ersichtlich, dass das Maximum so liegt, dass insgesamt von einer Verzögerung von 1 ns ausgegangen werden kann. Außerdem ist in Abbildung 3 die Halbwertsbreite eingetragen. Diese ist gleichbedeutend mit der Auflösungszeit  $\Delta t_K$  der Koinzidenzeinheit. Es folgt

$$\Delta t_K = |-23| + |19| = 42 \text{ ns} . \quad (4)$$

Die Breite der Diskriminatoren ist 60 ns. Das führt zu einer Abweichung von 42%.

### 3.3 Kalibrierung der Kanäle

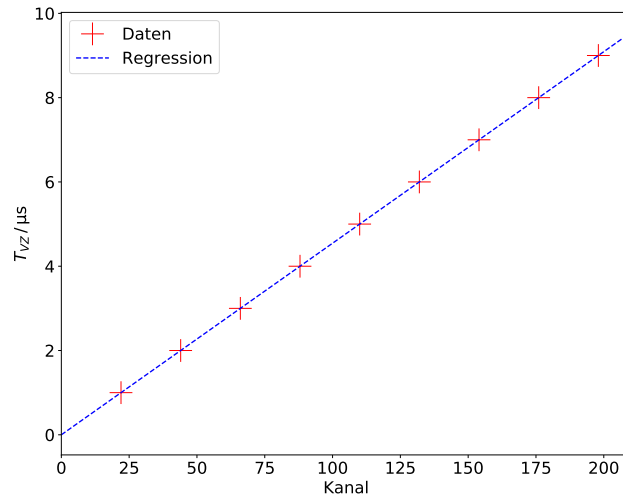
Um die Kanäle zu kalibrieren, wird ein Doppelimpuls mit verschiedenen langen Impulsabständen durch den Messaufbau geschickt und vom Vielkanalanalysator verarbeitet. Aus eben jenen Impulsabständen  $t_{\text{kal}}$  und der Auswertung des Vielkanalanalysators lässt sich bestimmen, welcher Kanal mit welchem Impulsabstand korrespondiert. Da sich diese proportional zueinander verhalten, wird eine lineare Regression mit den Messwerten in Tabelle 2 durchgeführt. Dabei wurden von den doppelt gefüllten Kanälen das gewichtete arithmetische Mittel gebildet. Die Anzahl der Hits ist in Abbildung 2 dargestellt. Die lineare Regression

$$f(x) = mx + b$$

ist in Abbildung 3 zu sehen.

$t_{\text{kal}} / \text{s}$	Kanal	# Ereignisse
1	22	1552
2	44	1328
3	66	1761
4	88	1015
5	110	1369
6	132	1266
7	154	1017
8	176	1549
9	198	2623

**Tabelle 2:** Die Anzahl der Hits auf den einzelnen Kanälen.



**Abbildung 3:** Die grafische Darstellung der Messwerte für die Kalibrierung.

Aus der linearen Regression folgen die Parameter

$$m = 0,045\,45 \quad (5)$$

$$b = -0,000\,000\,000\,000\,21\,\text{s} . \quad (6)$$

Dabei sind die Fehler dieser Zahlen so klein, dass sie nicht berücksichtigt werden müssen. Also lassen sich die zu den einzelnen Kanälen gehörenden Zeitdauern aus einer linearen Funktion mit den errechneten Parametern bestimmen. Dazu wurde angenommen, dass sich auch die Kanäle  $> 200$  linear mit den errechneten Parametern verhalten.

### 3.4 Bestimmung des Untergrundes

Als erstes müssen alle Myonen, die den Szintillator durchqueren bestimmt werden. Dies ergibt sich aus der Anzahl der Startimpulse und der gesamten Messzeit zu

$$\bar{N} = \frac{N_{\text{start}}}{T_{\text{gesamt}}} . \quad (7)$$

Während der Suchzeit  $T_S$  tun dies im Mittel  $n = \bar{N} \cdot T_S$  Myonen. Die Wahrscheinlichkeit, dass dies genau  $n$  Teilchen während der Suchzeit  $T_S$  tun, ist poissonverteilt. Möchte man die Fehlmessungen  $N_{\text{fehl}}$  erhalten, so muss man genau die Fälle einbeziehen, in denen während der Suchzeit zwei Myonen direkt aufeinander gefolgt sind, also die Anzahl aller Startimpulse mit der zugehörigen Wahrscheinlichkeit, die man aus der Poissonverteilung erhält, multiplizieren. Mit  $N_{\text{start}} = (3,393 \pm 0,017) \cdot 10^6$ ,  $T_S = 30 \text{ s}$  und  $T_{\text{gesamt}} = 153\,426 \text{ s}$  folgt

$$N_{\text{fehl}} = \bar{N} \cdot T_S \cdot e^{-\bar{N} \cdot T_S} \cdot N_{\text{start}} = 2251,9 \pm 1,8 . \quad (8)$$

Der Fehler von  $N_{\text{start}}$  bestimmt sich dabei ebenfalls als Poisson-Fehler. Da diese Ereignisse statistisch unabhängig voneinander sind, lässt sich die Untergrundrate bestimmen aus

$$U = \frac{N_{\text{fehl}}}{\text{Anzahl Kanäle}} = 2,375 \pm 0,004 . \quad (9)$$

Dabei wurden 474 Kanäle betrachtet.

### 3.5 Bestimmung der Lebensdauer

Um die Lebensdauer zu bestimmen, werden als erstes die benutzten Kanäle in Zeitdauern umgerechnet, mit der linearen Regression aus Kapitel 3.3. Die gemessenen Ereignisse werden dann in Abhängigkeit der bestimmten Zeitdauern durch eine Funktion der Gestalt

$$f(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} + U_{\text{fit}} , \quad (10)$$

welche im Wesentlichen (1) plus der Untergrundrate entspricht, mit CURVE-FIT gefittet. Dabei wurde  $(N)^{-1/2}$  als Gewichtung genutzt, sodass die Werte mit viel Statistik (durch einen aussagekräftigeren, weil mit mehr Werten unterlegten Fehler) stärker gewichtet werden als Werte mit niedrigem  $N(t)$ . Es wurden insgesamt 38 der 512 Werte aus der Regression rausgenommen, da diese keine Informationen (leere Kanäle oder außerhalb der Suchzeit) enthielten. Die Messwerte und die Regression mit (10) sind in Abbildung 4 zu sehen.

Es ergeben sich für die Parameter

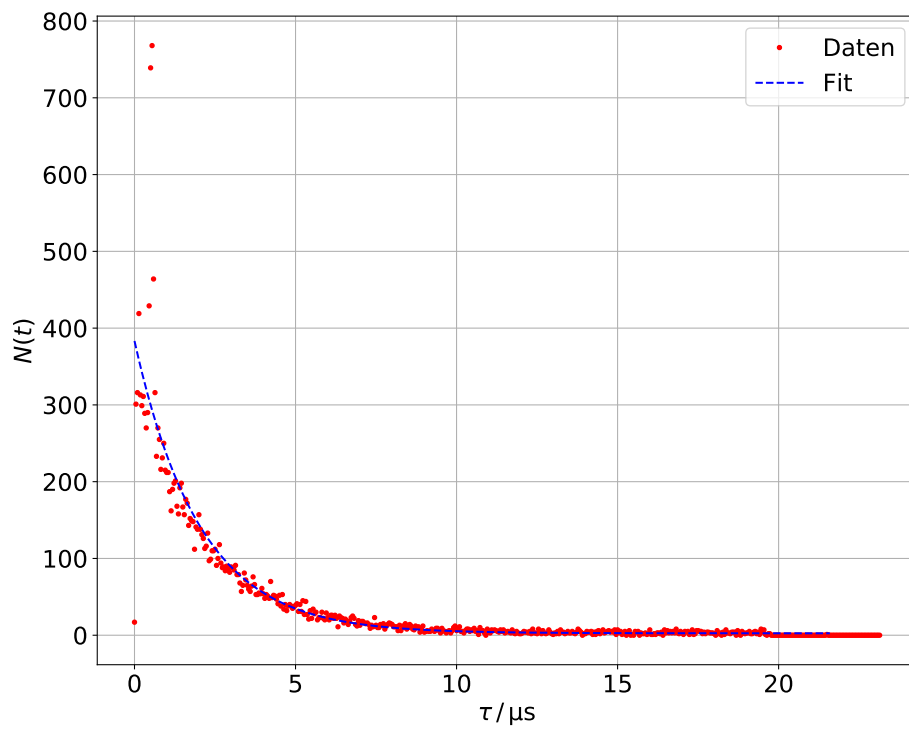
$$N_0 = 358 \pm 11 \text{ pro Kanal} \quad (11)$$

$$\lambda = (0,451 \pm 0,023) \frac{1}{\text{s}} \quad (12)$$

$$U_{\text{fit}} = 1,5 \pm 2,2 \text{ pro Kanal} . \quad (13)$$

Aus (2) ergibt sich für die Lebensdauer

$$\tau = (2,22 \pm 0,11) \text{ s} . \quad (14)$$



**Abbildung 4:** Der Fit aller registrierten Myonen.

## 4 Diskussion

**Tabelle 3:** Errechnete und gefittete Werte für die Lebensdauer und die Untergrundrate.

	Wert aus Fit	Wert aus Literatur / Berechnung
$\tau$	$(2,22 \pm 0,11) \text{ s}$	2,197 s [ <b>literaturwert</b> ]
$U$	$1,5 \pm 2,2$ pro Kanal	$2,375 \pm 0,004$ pro Kanal

Es wird ersichtlich, dass die Untergrundraten stark voneinander abweichen, aber der theoretisch bestimmte Wert auch einen sehr großen Fehler hat. Der Fehler ist sogar größer als der Wert selbst. Dies liegt an den statistischen Schwankungen bei den hohen Lebensdauern. Insgesamt passen die Werte allerdings, unter Berücksichtigung der Fehlerbereiche, zusammen.

Der Literaturwert für die Lebensdauer liegt sehr gut in dem Fehlerbereich der errechneten Lebensdauer. Diese gute Übereinstimmung ließ schon Abbildung 4 vermuten. Zu den nicht-betrachteten Werten lässt sich sagen, dass nur der Wert an der Stelle (0,0) rausgelassen wurde, da dieser schlichtweg physikalisch nicht sinnvoll ist. Insgesamt lässt sich vermuten, dass vorallem die hohe Anzahl an Ereignissen für gute statistische Werte und verhältnismäßig kleine Fehler sorgt. Insgesamt lässt sich als Fehlerquelle vermuten, dass die Breite der Diskriminatoren ungenau ist, da diese mit einer Stoppuhr und von Hand vermessen wurde. Die Auflösungszeit  $\Delta t_K$  weicht stark von den erwarteten 60 ns ab. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Messwerte sich unterhalb des Plateaus nicht linear verhalten.

Die Summe aller Ereignisse aus dem Vielkanalanalysator beträgt  $(1,84 \pm 0,20) \cdot 10^4$  mit einem Poissonfehler, die am Zählwerk 17818. Die Anzahl am Zählwerk liegt sehr gut in der Fehlertoleranz der Summe aus dem Vielkanalanalysator.