

# **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

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theorie</b>	<b>1</b>
1.1	Standardmodell . . . . .	1
1.2	Myonen in Szintillationsdetektoren . . . . .	1
1.3	Teilchenzerfälle . . . . .	2
1.4	Statistische Probleme . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Durchführung</b>	<b>3</b>
2.1	Versuchsaufbau . . . . .	3
2.1.1	Filtern von nicht-zerfallenden Myonen. . . . .	3
2.1.2	Rauschunterdrückung . . . . .	5
2.2	Versuchsdurchführung . . . . .	6
2.2.1	Aufbau und Justage des Versuchsaufbaus . . . . .	6
2.2.2	Messung . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>7</b>
3.1	Fehlerrechnung . . . . .	7
3.2	Bestimmung der Verzögerungszeit . . . . .	7
3.3	Kalibrierung der Kanäle . . . . .	9
3.4	Bestimmung des Untergrundes . . . . .	11
3.5	Bestimmung der Lebensdauer . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>13</b>

# 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 Austauschteilchen 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. Dadurch 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. Nach Ablauf von  $T_s$  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 (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 Zeit  $T_s$  nun das Zerfallssignal ein, liegen am 2. AND-Gatter 2 H-Signale 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 (Größenordnung s), aber klein gegenüber dem zeitlichen Abstand zwischen zwei einfallenden Myonen (Größenordnung ms) ist, damit das Stopp-Signal nicht durch ein zweites Myon gegeben wird. Dies ist letztlich jedoch nicht 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

Eine weitere Rauschquelle stellen spontane, thermische Elektronenemissionen der Photokathoden der SEVs dar. 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 zwei Methoden verwendet:

1. Diskriminatoren:

Beiden SEVs sind Diskriminatoren nachgeschaltet. Diese geben nur dann ein Signal ab, wenn das einlaufende Signal eine gewisse Schwelle überschreitet. Diese muss so gewählt werden, dass echte Signale möglichst nicht gefiltert werden. Die Diskriminatoren leisten weiterhin eine Umwandlung der einfallenden Pulse in eine H-Signal der NIM-Logik.

2. Koinzidenzschaltung:

Weiterhin sind gleich zwei SEVs verbaut, deren Signale über eine Koinzidenzschaltung abgeglichen werden. Nur wenn von beiden SEVs innerhalb einer Zeit  $\Delta t_K$  ein

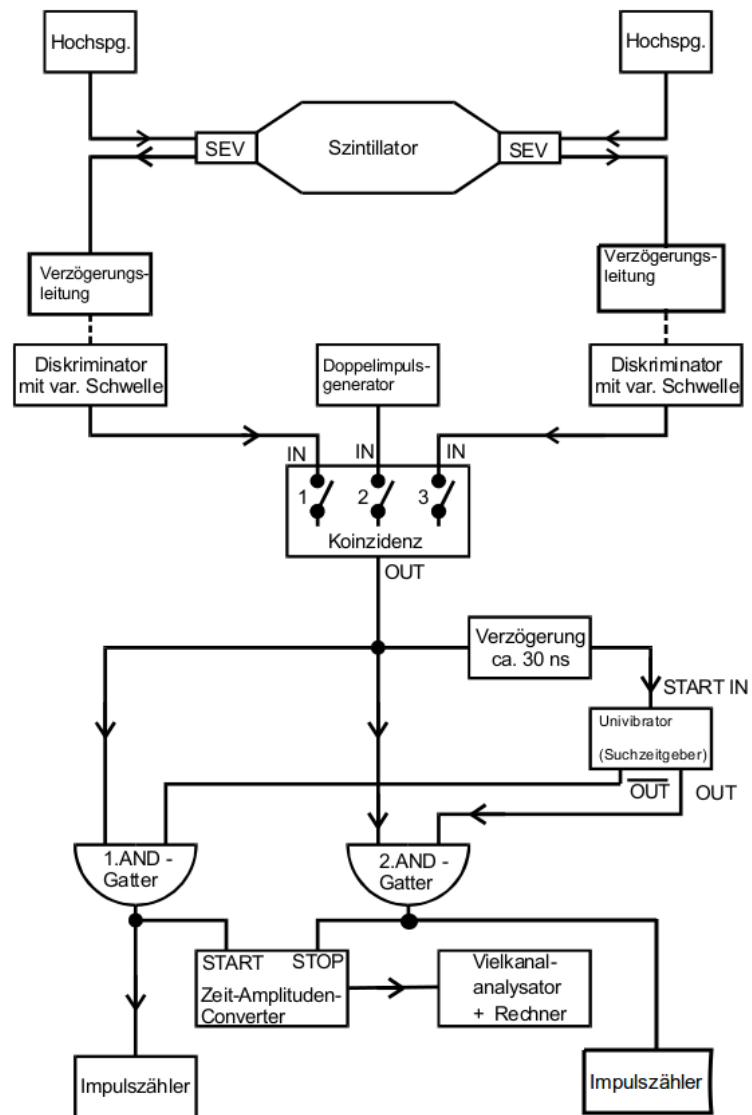


Abbildung 1: Ein Blockschaltbild des Versuchsaufbaus. [anleitung].

Signal an den Eingängen der Koinzidenz ankommt, wird ein Signal weitergegeben. Da spontane Emissionen jeweils nur einen SEV betreffen und die Wahrscheinlichkeit, dass es an beiden SEVs gleichzeitig zu spontaner Emission kommt relativ gering ist, stellt dies eine gute Möglichkeit zur Signalfilterung dar. Die Zeit  $\Delta t_K$  ist durch Variation der Diskriminatorlänge jedoch so zu wählen, dass Sie sowohl den Lichtweg zwischen den beiden SEVs (ca. 4 ns für den Fall, dass ein Signal unmittelbar an einem SEV entsteht), als auch Unterschiede in den Kabellängen der beiden Leitungen der SEVs zur Koinzidenz berücksichtigt. Letztere können durch eine Verzögerungsschaltung aufeinander abgeglichen werden.

Auch durch diese beiden Möglichkeiten ist eine totale Rauschunterdrückung nicht möglich.

## 2.2 Versuchsdurchführung

### 2.2.1 Aufbau und Justage des Versuchsaufbaus

Die Schaltung wird schrittweise aufgebaut und unter Zuhilfenahme eines Oszillographen überprüft und justiert. Es wird mit dem zur Rauschunterdrückung gedachten Teil des Aufbaus begonnen:

1. Nach Einschalten der Hochspannung sollen an den SEV Ausgängen Impulse unterschiedlicher Höhe abfallen.
2. Die Länge der Diskriminatorpulse wird gemessen.
3. Über ein Zählwerk wird die Zahl der pro Zeitintervall einfallenden Myonen gemessen. Die Diskriminatoren werden so eingeregelt, dass sie zwischen 20 und 40 Myonen pro Sekunde liegt. An beiden Diskriminatoren sollte in etwa die gleiche Rate abfallen.
4. Es wird die Koinzidenzschaltung angeschlossen und der Ausgang auf ein Zählwerk gelegt. Die Zählrate wird abhängig von der Verzögerung gemessen, am entsprechenden Graphen sollte sich ein "Plateau" bilden. Bei der zum Maximum korrespondierenden Verzögerung wird die Messung durchgeführt, aus der Halbwertsbreite der Kurve lässt sich später die Verzögerungszeit rekonstruieren.
5. Zuletzt wird die Zählrate vor und hinter der Koinzidenz verglichen. Sollte diese annähernd gleich sein, muss die Diskriminatorschwelle gesenkt werden um die Myonenrate zu erhöhen. Ansonsten ist die Koinzidenz wirkungslos.

Zum weitem Aufbau wird der Teil vor der Koinzidenzschaltung abgeklemmt und ein Doppelimpulsgenerator auf den an der Koinzidenz verbleibenden Eingang gelegt. Die Dauer zwischen zwei von Doppelimpulsgenerator gegebenen Impulsen ist einstellbar und lässt sich gut zum Überprüfen der Schaltung nutzen.

1. Der Univibrator wird über die Verzögerungsleitung angeschlossen. An den Ausgängen der Kippstufe kann nun die Suchzeit gemessen werden. Diese sollte den Zeitmessbereich des TAC nur leicht überschreiten.