



BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

FORTGESCHRITTENEN PRAKTIKUM

---

# Lebensdauer von Myonen der Höhenstrahlung

---

*Verfasser:*

Henrik JÜRGENS

Frederik STROTHMANN

*Tutoren:*

Max MUSTERMANN

Max MUSTERMANN

**Abstract:**

Ziel dieses Versuches ist es die Myonen-Lebensdauer  
mit einem statistischen Fehler von unter 5 %  
und möglichst geringem systematischen Fehler zu bestimmen

Dies	ist	ein
Platz-	halter	für
die	bewertungs	Tabelle

24. August 2015

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>2</b>
2.1	Standardmodell . . . . .	2
2.2	Zerfallskanäle von $\mu$ , $\pi$ und $K$ . . . . .	3
2.3	Myonen Lebensdauer . . . . .	4
2.4	Relativistische Effekte . . . . .	4
2.5	Bethe-Bloch-Formel . . . . .	4
2.6	Szitillationszähler . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>5</b>
3.1	Diskriminator . . . . .	6
3.2	Analog-Digital-Konverter . . . . .	6
3.3	Delay . . . . .	6
3.4	Time-to-Amplitude-Converter(TAC) . . . . .	6
3.5	Multi-Channel-Analyser . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>7</b>
4.1	Hochspannung der Photomultiplier . . . . .	7
4.2	Schwellspannung . . . . .	7
4.3	Messung der mittleren Lebensdauer . . . . .	7
4.3.1	Maximum Likelihood Methode . . . . .	8
4.3.2	Chiquadrat Fit . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Messergebnisse</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Auswertung</b>	<b>9</b>
<b>7</b>	<b>Diskussion</b>	<b>9</b>
<b>8</b>	<b>Fazit</b>	<b>9</b>

# 1 Einleitung

In diesem Versuch soll die mittlere Lebensdauer von Myonen der Höhenstrahlung mithilfe von Plastik-Szintillationszählern und Photovervielfachern kurzer Anstiegszeit bestimmt werden. Es werden also relativistische Myonen, welche aus Spallationsprozessen von kosmischer Strahlung mit Teilchen in der oberen Atmosphäre stammen, detektiert. Die relativ lange Lebensdauer des Myons deutet dabei auf einen schwachen Zerfall hin. Ziel des Versuches ist es einen möglichst geringen statistischen Fehler und einen kleinen systematischen Fehler zu erreichen. Mit den Szintillationszählern ist es möglich Zerfallszeiten bis zu 10 ns zu bestimmen. Dabei ist die Eichung des Aufbaus eine entscheidende Voraussetzung für eine erfolgreiche Messung.

## 2 Theorie

Die wichtigsten theoretischen Grundlagen für diesen Versuch werden im folgenden zusammengefasst.

### 2.1 Standardmodell

Das Standardmodell der Teilchenphysik beschreibt drei der vier Grundlegenden Wechselwirkungen (WW), die schwache WW, die elektromagnetische WW und die Starke WW. Die Kräfte wechselwirken über Vektorbosonen, welche einen ganzzahligen Spin haben. In Tabelle 1 ist eine Übersicht der drei Kräfte zu sehen.

Tabelle 1: In der Tabelle sind die Grundlegenden WW (außer der Gravitation) und ihre Eigenschaften aufgetragen (entnommen [3] Seite 274)

Wechselwirkung	koppelt an	Austauschteilchen	$\frac{m_0}{GeV}$	$J^P$
stark	Farbe	8 Gluonen ( $g$ )	0	$1^-$
elektromagnetisch	elektrische Ladung	Photon ( $\gamma$ )	0	$1^-$
schwach	schwache Ladung	$W^\pm, Z^0$	$\approx 10^2$	1

Neben den Bosonen gibt es noch zwei weitere fundamentale Teilchenarten, die Quarks und die Leptonen, welche die Grundbausteine der Materie darstellen. Beide gehören zu den Fermionen, haben also einen halbzahligen Spin. Leptonen und Quarks werden mit aufsteigender Masse in drei Generationen aufgeteilt. In Tabelle 2 sind Quarks und Leptonen mit ihren Eigenschaften dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht der Grundlegenden Eigenschaften von Quarks und Leptonen

Fermionen	Familie			elektrische Ladung	Farbe	schwacher Isospin		Spin
	1	2	3			rechtsh.	linksh.	
Leptonen	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	0	—	1/2	—	1/2
	e	$\mu$	$\tau$	-1			0	
Quarks	u	c	t	+2/3	r,g,b	1/2	0	1/2
	d	s	b	-1/3			0	

## 2.2 Zerfallskanäle von $\mu$ , $\pi$ und $K$

Im Folgenden sind die Zerfallskanäle von  $\mu$ ,  $\pi$  und  $K$  bzw. in diesem Fall die wahrscheinlichsten Zerfallsprodukte dargestellt.(vgl. [2] Seite 406 ff.)

Tabelle 3: Zerfallskanäle von  $\mu$ ,  $\pi$  und  $K$ 

Particle	$J^P$	$\frac{m_0}{\text{MeV}}$	$\frac{\tau}{\text{s}}$	Decay	Fraction
$\mu^\pm$	$\frac{1}{2}$	105.6595( $\pm 2$ )	$2.1971(\pm 1) \times 10^{-6}$	$e\nu\bar{\nu}$	100 %
$\pi^\pm$	$0^-$	139.567( $\pm 1$ )	$2.603(\pm 2) \times 10^{-8}$	$\mu\nu$	$\simeq 100$ %
$\pi^0$	$0^-$	134.963( $\pm 4$ )	$0.83(\pm 6) \times 10^{-16}$	$\gamma\gamma$	98.8 %
				$\gamma e^+ e^-$	1.17 %
$K^\pm$	$0^-$	493.67( $\pm 2$ )	$1.237(\pm 3) \times 10^{-8}$	$\mu^\pm \nu$	63.5 %
				$\pi^\pm \pi^0$	21.2 %
				$\pi^\pm \pi^+ \pi^-$	5.6 %
				$\pi^\pm \pi^0 \pi^0$	1.7 %
				$\mu^\pm \pi^0 \nu$	3.2 %
				$e^\pm \pi^0 \nu$	4.8 %
$K^0, \bar{K}^0$	$0^-$	497.7( $\pm 1$ )	$K_S : 0.892(\pm 2) \times 10^{-10} \quad K_L : 5.18(\pm 4) \times 10^{-8}$		
$K_S$				$\pi^+ \pi^-$	68.6 %
				$\pi^0 \pi^0$	31.3 %
$K_L$				$\pi^0 \pi^0 \pi^0$	21.5 %
				$\pi^+ \pi^- \pi^0$	12.6 %
				$\pi \mu \nu$	26.8 %
				$\pi e \nu$	38.8 %

$\tau$  entspricht dabei der mittleren Lebensdauer. Pionen sind aus einem u-d Paar aufgebaut und Kaonen aus einem u-s oder d-s Paar. Die Teilchen mit unterschiedlichen Indizes unterscheiden sich in der Kombination von Quark und Antiquark, auf die hier nicht genauer eingegangen werden soll.

## 2.3 Myonen Lebensdauer

Myonen sind Fermionen, welche zur Familie der Leptonen gehören. Sie entstehen durch Reaktionen hochenergetischer kosmischer Strahlung mit Atomen und Molekülen in der oberen Atmosphäre. Bei diesen Reaktionen entstehen kurzlebige Pionen und Kaonen, welche zu einem großen Teil in Myonen zerfallen. Bevor diese weiter Zerfallen, können sie aufgrund der Zeitdilatation zum Großteil die Erdoberfläche erreichen (vgl. Tabelle 3). Die Zerfallsrate von Myonen ist Zeitunabhängig, sodass die Zerfallszeit einer Exponentialverteilung folgt. Bei einer Gesamtzahl von  $N_0 = N(t_0)$  Myonen zu einer Zeit  $t_0 := 0$  s gilt also:

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

## 2.4 Relativistische Effekte

Aus Tabelle 3 liest man eine Myonen Lebensdauer von  $2.1971 \mu\text{s}$  ab. Klassisch hätte das Myon mit annähernder Lichtgeschwindigkeit also eine Reichweite von ungefähr 600 m, sodass nur sehr wenige Myonen die Erdoberfläche erreichen könnten. Allerdings spielen bei ca. 0.995 % der Lichtgeschwindigkeit relativistische Effekte eine große Rolle (vgl. [1]). Durch die Zeitdilatation vergeht die Zeit des Myons aus der Sicht eines Beobachters im Laborsystem langsamer:

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2)$$

Dabei entspricht  $t'$  der beobachteten Zeitspanne im Laborsystem,  $t$  der vergangenen Zeitspanne im Ruhesystem und  $v$  der Geschwindigkeit des Myons im Laborsystem. Im System der Myonen ergibt sich dagegen aufgrund der hohen Relativgeschwindigkeit eine Längenkontraktion. Unabhängig von der Betrachtungsweise ergibt sich, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreffen der Myonen auf der Erdoberfläche deutlich steigt, sodass genügend Myonen die Erdoberfläche erreichen.

## 2.5 Bethe-Bloch-Formel

Die Bethe-Bloch-Formel beschreibt den Energieverlust pro Weglängeneinheit schneller und – verglichen mit einem Elektron – schwerer geladener Teilchen beim Durchgang durch Materie durch inelastische Stöße mit den Elektronen, wodurch eine Anregung oder Ionisation des Materials bewirkt wird. Die genaue Formel wird in diesem Versuch nicht benötigt und kann ggf. in geeigneter Fachliteratur nachgeschlagen werden.

## 2.6 Szintillationszähler

Szintillationszähler werden zum detektieren von Strahlung verwendet. Sie sind aus einem Materialien aufgebaut, welche von ionisierender Strahlung angeregt werden können und die absorbierte Energie in Form von Photonen abstrahlen. Sie müssen gegen äußeren Lichteinfall

geschützt werden. Bestenfalls ist dabei die Intensität des abgestrahlten Lichtes direkt proportional zur Energie der einfallenden Strahlung. Dabei ist zu beachten, dass jeder Szintillator eine gewisse Totzeit besitzt, sodass nur Ereignisse, deren Zeitdifferenz größer als die Totzeit des Szintillationszählers ist, detektiert werden können. Die abgestrahlten Photonen werden meistens mit Photomultipliern verstärkt, um die Lichtintensitäten in messbare Stromstärken, welche über einen Analog-Digital-Konverter digitalisiert und an den Computer weitergegeben werden können, umzusetzen.

### 3 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 1 zu sehen. Die Hauptbestandteile sind die vier Szintillatoren (PM 1-4), welche jeweils noch mit einem Photomultiplier verbunden sind.

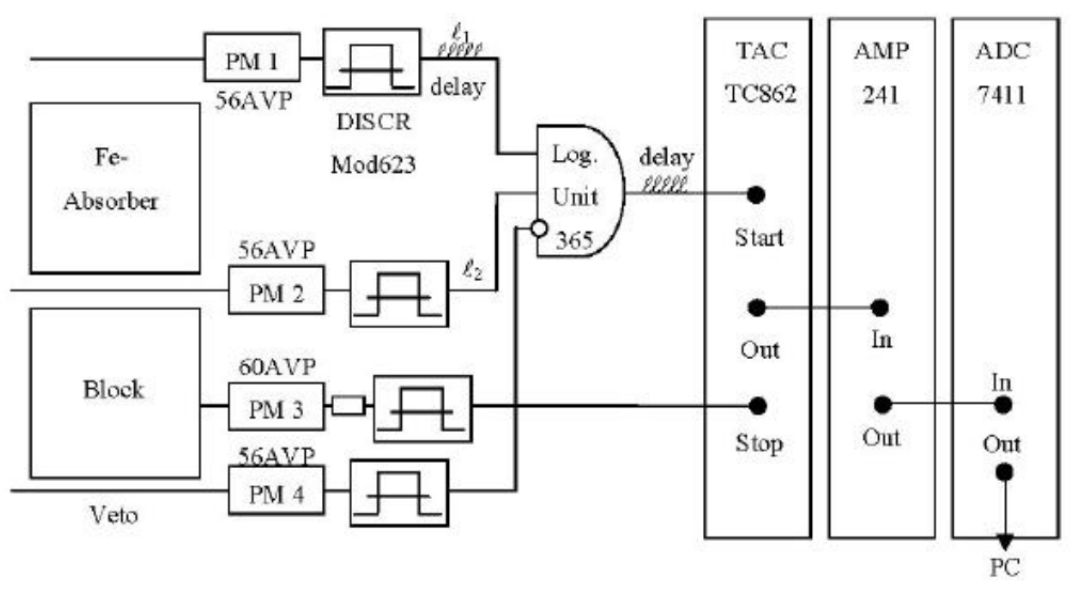


Abbildung 1: Schaltskizze des Versuchsaufbaus

Der Szintillator für die Registrierung der Myonen ist PM3, es handelt sich um einen 25x25x25 cm<sup>3</sup> Plastikblock-Szintillator. PM1, PM2 und PM4 sind flach Szintillatoren, wobei PM4 als Veto fungiert, so dass nur Ereignisse die von PM3 noch registriert werden, jedoch nicht von PM4. PM1, PM2 und PM4 sind über eine logische Einheit an den Start-Pin des TAC angeschlossen. Der TAC wird gestartet, falls PM1 und PM2 ein Ereignis registrieren und PM4 keins registriert. Wenn PM4 auch noch das Myon registriert wird der TAC nicht gestartet, da das Myon nicht zerfallen ist. PM3 ist über den Photomultiplier an den Stop-Pin des TAC angeschlossen. Das Signal des TAC wird an einen Verstärker (AMP) weiter geleitet, welche das Signal an einen Analog-Digital-Konverter (ADC) weitergibt. Es wurde noch ein Delay eingebaut, da die Szintillatoren ein unterschiedliches Baujahr haben (größere Auflösungszeit) und die sich die Kabellänge unterscheiden. Neben dem Universitätsgebäude wird noch ein Eisenblock als Absorber verwendet, wodurch Myonen mit niedriger Energie vollständig absorbiert werden und sich das

Energiespektrum nach oben verschiebt. Der Vorteil des Absorbers ist, dass andere Strahlung zum Teil vollständig geblockt wird.

### **3.1 Diskriminator**

Ein Diskriminator wandelt ein analoges Signal in ein digitales Signal mit einer Auflösung von einem Bit um. Es kann eine untere Schranke eingestellt werden, ab welcher eine 0 ausgegeben wird. Zusätzlich kann auch eine obere Schranke eingestellt werden, sodass nur bei einer Spannung zwischen den Schranke eine 1 ausgegeben wird. Es ist auch einstellbar wie lange das Signal ausgegeben wird.

### **3.2 Analog-Digital-Konverter**

Ein Analog-Digital-Konverter wandelt ein analoges Spannungssignal in ein digitales Spannungssignal um. Das Auflösungsvermögen wird in Bit angegeben, je größer die Anzahl der Bits ist, desto so kleinschrittiger kann das analoge Signal aufgelöst werden. Die Umsetzungsgeschwindigkeit gibt an, wie lange es dauert eine Änderung des analogen Signals zu digitalisieren.

### **3.3 Delay**

Da verschiedene Signale nahezu zeitgleich ankommen müssen, werden einzelne Signale mit einem Delay versehen, damit sie zeitgleich ankommen. Das Delay wird meistens über längere Kabel realisiert.

### **3.4 Time-to-Amplitude-Converter(TAC)**

Ein TAC wird verwendet, um den zeitlichen Abstand zwischen zwei Ereignissen zu bestimmen. Dafür wird beim Eintreffen eines Startsignals ein Kondensator linear aufgeladen, solange bis ein Stoppsignal kommt und die Spannung an den Ausgang weitergegeben wird. Dadurch erhält man einen Spannungspuls, der proportional zu der Zeitdifferenz zwischen Start- und Stoppsignal ist. Als Besonderheit sei noch erwähnt, dass der TAC im Jahr 1942 von Bruno Rossi zur Bestimmung der Lebensdauer von Myonen erfunden wurde.

### **3.5 Multi-Channel-Analyser**

Mit einem Multi-Channel-Analyser werden Folgen von elektrischen Impulsen nach Größe geordnet und die Anzahl aufsummiert. Diese Daten können als Histogramm dargestellt werden. Dabei wird jedem Kanal ein Energieintervall zugeordnet.

## 4 Versuchsdurchführung

### 4.1 Hochspannung der Photomultiplier

Ein exaktes einstellen der Photomultiplier ist essenziell für eine gute Messung. Die Spannungen von PM1, PM2 und PM4 sollen dabei einen Wert von 2100 V nicht überschreiten. Der Arbeitspunkt von PM3 liegt im Bereich von 2600-2700 V. Für die Bestimmung des optimalen Arbeitspunktes wird die Schwelle des Diskriminators auf einen möglichst geringen Wert eingestellt. Es wird die Zählrate in Abhängigkeit der Spannung untersucht und nach einem Plateau im Bereich von 100 bis 1000 Counts/s gesucht, da sich der Photomultiplier dann am optimalen Arbeitspunkt befindet. Falls die Zählraten zu niedrig sind kann ein  $^{60}\text{Co}$ -Präparat verwendet werden, um die Zählrate zu erhöhen.

Die aufgenommenen Spannungskennlinien sind in Abbildung ?? bis ?? zu sehen.

Die bestimmten Spannungen für die Photomultiplier sind in Tabelle 4 aufgetragen.

Tabelle 4: Verwendete Spannungen für die Photomultiplier

Photomultiplier	Spannung[V]
PM1	
PM2	
PM3	
PM4	

### 4.2 Schwellspannung

Mit den Szintillatoren soll nur minimal ionisierende Strahlung gemessen werden. Dafür werden die Schwellen etwas unterhalb des Energieverlustes der Flachszintillatoren, im Bereich von 1,2MeV eingestellt. Für die Justierung wird ein  $^{60}\text{Co}$  Präparat verwendet. Die Schwelle für den Blockdiskriminator, im Bereich von 1,5-2MeV soll möglichst niedrig eingestellt werden, jedoch hoch genug, um den Untergrund der Praktikumsräume auszublenden. Dabei soll das Signal-Untergrund-Verhältnis maximal werden.

Für die Einstellung von PM3 wird bei unterschiedlichen Schwellspannungen mit und ohne Präparat gemessen und das Signal-Untergrundverhältnis bestimmt.

### 4.3 Messung der mittleren Lebensdauer

Nachdem die umfangreichen Kalibrationen beendet sind, soll die Lebensdauer der Myonen anhand der Messdaten bestimmt werden. Dazu werden die folgenden Methoden verwendet und deren Resultat verglichen.



### 4.3.1 Maximum Likelihood Methode

Um die mittlere Lebensdauer von Myonen zu bestimmen eignet sich die Maximum Likelihood Methode. Wie in Abschnitt 2.3 besprochen sind Zerfallszeiten mit Zeitunabhängiger Zerfallsrate exponentialverteilt, sodass sich die einparametrische Wahrscheinlichkeitsdichte

$$P(t_i|\tau) = \frac{1}{\tau} \frac{e^{-\frac{t_i}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \quad (3)$$

ergibt. Da die Messung des Zeitintervalls nach oben und unten beschränkt ist, wurde die Wahrscheinlichkeitsdichte normiert, wobei  $T$  die obere Schranke der Zeitmessung ist. Es wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Zeitmessungen unabhängig voneinander sind, sodass sich für die gesamte Messung die  $n$ -dimensionale Wahrscheinlichkeitsdichte

$$L = \prod_{i=1}^N P(t_i|\tau) = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\tau} \frac{e^{-\frac{t_i}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \quad (4)$$

ergibt. Es wird davon ausgegangen, dass die gemessenen Zerfallszeiten der wahrscheinlichsten Messung entsprechen, sodass die Messung einem Maximum der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion bezüglich  $\tau$  entspricht. Um das Maximum von  $L$  zu bestimmen betrachtet man die Funktion

$$\ln L = \ln \left[ \prod_{i=1}^N P(t_i|\tau) \right] = \sum_{i=1}^N \ln[P(t_i|\tau)] = - \left[ \sum_{i=1}^N \ln(\tau) + \frac{t_i}{\tau} + \ln(1 - e^{-\frac{T}{\tau}}) \right] \quad (5)$$

und bestimmt die Nullstelle der Ableitung nach  $\tau$ . Schließlich erhält man die beste Approximation für die Lebensdauer  $\tau$ :

$$\hat{\tau} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i + \frac{T e^{-\frac{T}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \quad (6)$$

Da es nur  $M$  Kanäle und damit  $M$  mögliche Zeiten  $t_k$  gibt, kann die erste Summe umgeschrieben werden,

$$\sum_{i=1}^N t_i = \sum_{k=1}^M N_k t_k \text{ wobei } N = \sum_{k=1}^M N_k \quad (7)$$

sodass der Fehler von  $\hat{\tau}$  über den statistischen Fehler auf  $N_k$ , welcher  $\sqrt{N_k}$  beträgt, bestimmt werden kann. Es ergibt sich also

$$\hat{\tau} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^M N_k t_k + \frac{T e^{-\frac{T}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \quad (8)$$

mit einem Fehler von

$$\Delta \hat{\tau} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{k=1}^M N_k t_k^2} \quad (9)$$

Formel 8 muss dabei rekursiv angewendet werden.

#### 4.3.2 Chiquadrat Fit

## 5 Messergebnisse

## 6 Auswertung

## 7 Diskussion

## 8 Fazit

## Literatur

- [1] [https://de.wikipedia.org/wiki/zeitdilatation\\_bewegter\\_teilchen](https://de.wikipedia.org/wiki/zeitdilatation_bewegter_teilchen).
- [2] Donald H. Perkins. *Introduction to High Energy Physics*.
- [3] Scholz Zetsche Povh, Rith. *Teilchen und Kerne*.