



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

3. September 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 . . . . .	5
2.4	Relativistische Effekte . . . . .	5
2.5	Bethe-Bloch-Formel . . . . .	6
2.6	Szitillationszähler . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>6</b>
3.1	Diskriminator . . . . .	7
3.2	Analog-Digital-Konverter . . . . .	8
3.3	Delay . . . . .	8
3.4	Time-to-Amplitude-Converter(TAC) . . . . .	8
3.5	Multi-Channel-Analyser . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>8</b>
4.1	Hochspannung der Photomultiplier . . . . .	8
4.2	Schwellspannung . . . . .	11
4.3	Delay . . . . .	11
4.4	Kanal-Zeit-Eichung . . . . .	13
4.5	Messung der mittleren Lebensdauer . . . . .	15
4.5.1	Maximum Likelihood Methode . . . . .	15
<b>5</b>	<b>Auswertung</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>Fazit</b>	<b>16</b>

# 1 Einleitung

In diesem Versuch soll die mittlere Lebensdauer von Myonen der Höhenstrahlung mithilfe von Plastik-Szintillationszählern und Photoervielfachern 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 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 [5] 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. [4] 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( $\pm 1$ )	$K_S : 0.892(\pm 2) \times 10^{-10}$ $K_L : 5.18(\pm 4) \times 10^{-8}$		
$K_S$				$\pi^+ \pi^-$	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. Das Feynman-Diagramm für den Zerfall eines Myuons ist in Abb. 1 dargestellt. (vgl. [1])

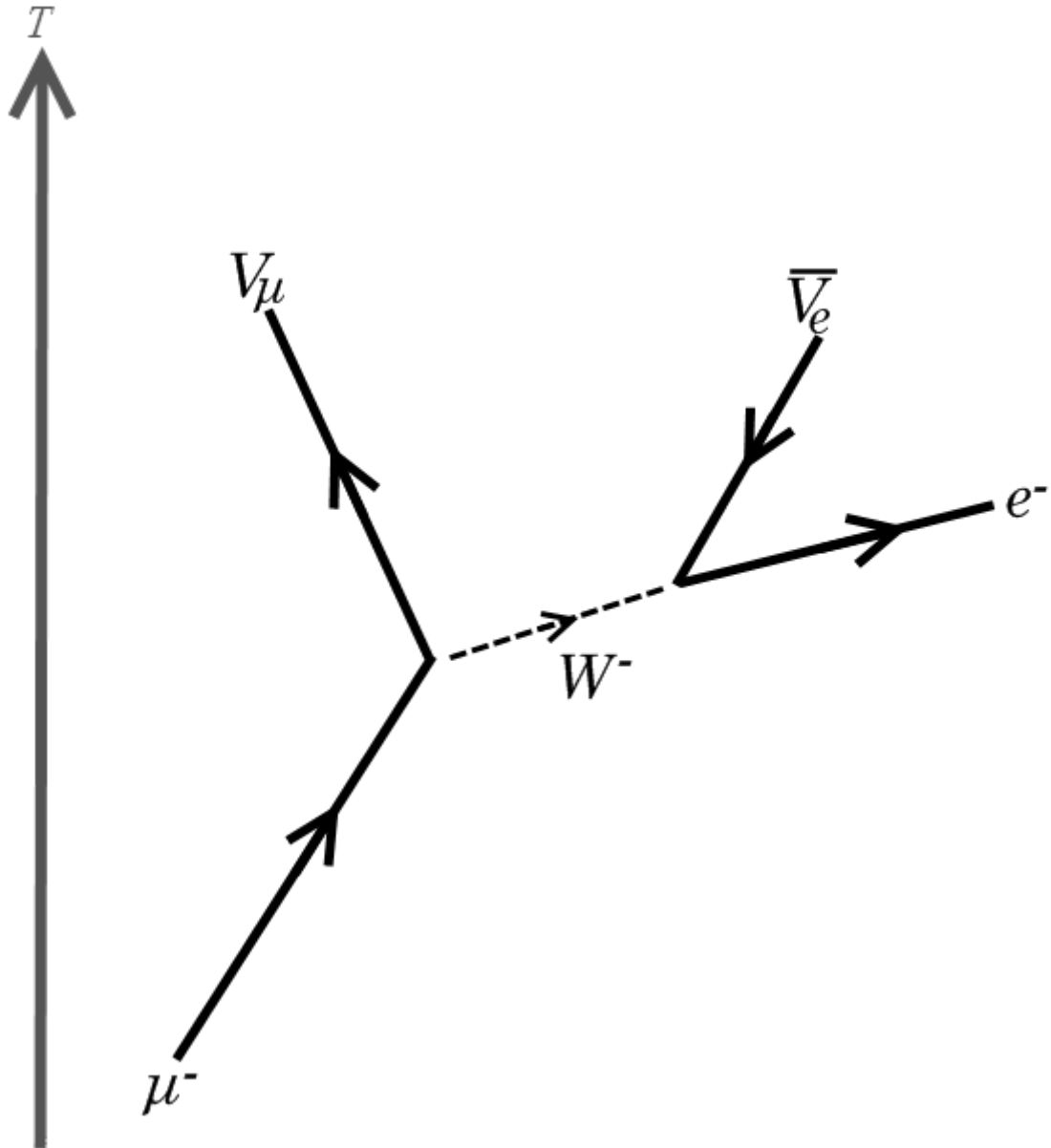


Abbildung 1: Myon Zerfallskanal

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. Myonen entstehen in etwa 10 bis 15 km Höhe aus Zerfällen von Pionen und Kaonen. Kosmische Strahlung besteht zu einem großen Teil aus Spallationsprozessen von Protonen (z.B. aus Sonnenwinden) in der oberen Atmosphäre. Die Targets werden aufgrund der hohen Energie von den Protonen zerschlagen und es entsteht ein sogenannter Teilchenschauer. In Abb. 2 ist ein solcher Schauer dargestellt. (vgl. [3])

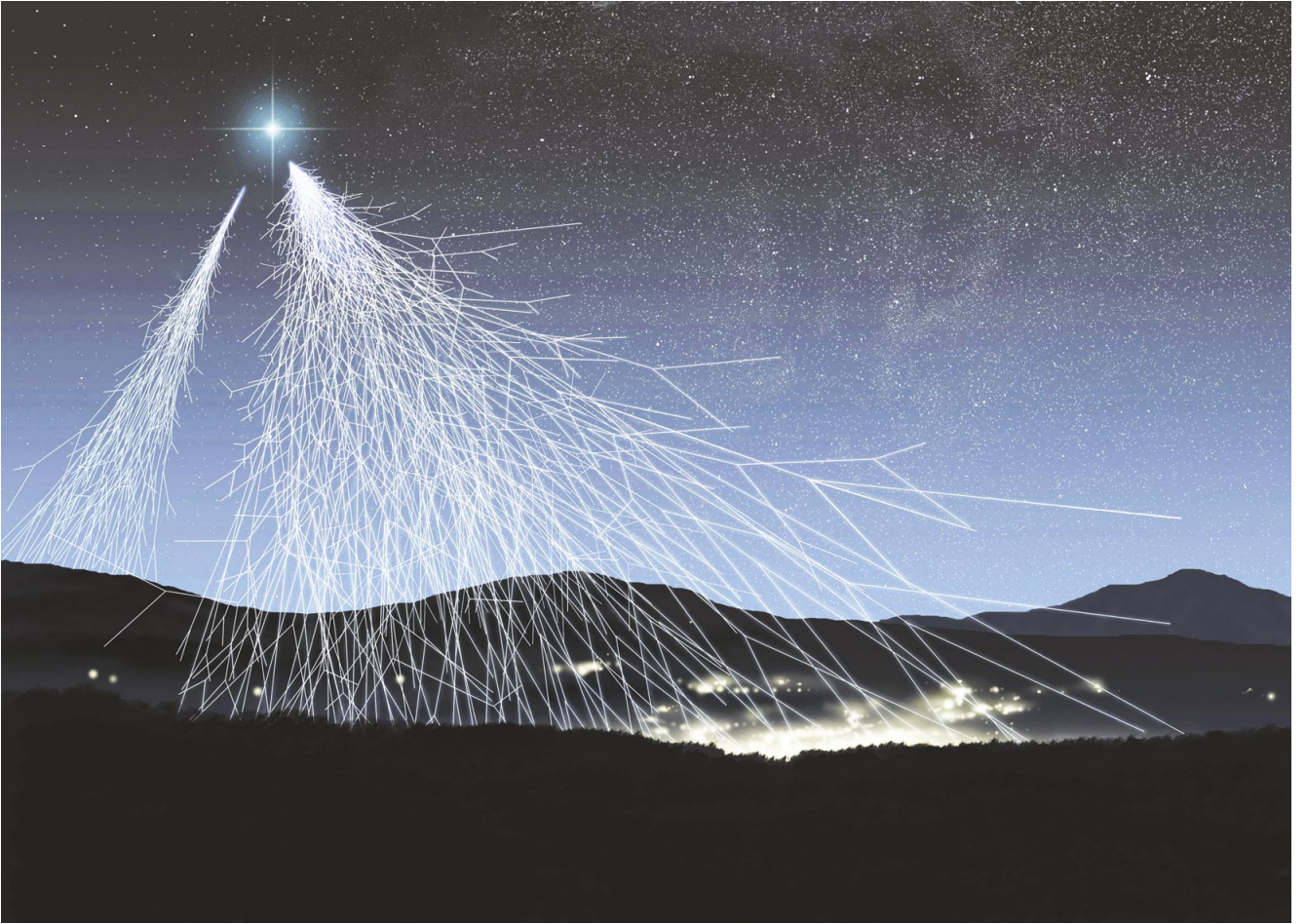


Abbildung 2: Teilchenschauer

## 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. 99.5 % der Lichtgeschwindigkeit relativistische Effekte eine große Rolle (vgl. [2]). 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. Teilchen in der Nähe des Minimums der Bethe-Bloch-Formel werden minimalionisierende Teilchen genannt, und ihr Energieverlust kann als näherungsweise konstant angesehen werden. Myonen der Höhenstrahlung können in diesem Versuch als minimalionisierende Teilchen betrachtet werden, da sie, bevor sie in den Eisen-Filter eintreten, eine Energie von ca. 1 GeV ( $\sim 99.5\%$  der Lichtgeschwindigkeit) besitzen, welche in der Bethe-Bloch-Formel für Myonen etwas über dem Minimum liegt.

## 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 eine Analog-Digital-Konverter digitalisiert und an den Computer weitergegeben werden können, umzusetzen.

## 3 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 zu sehen. Die Hauptbestandteile sind die vier Szintillatoren (PM 1-4), welche jeweils noch mit einem Photomultiplier verbunden sind.

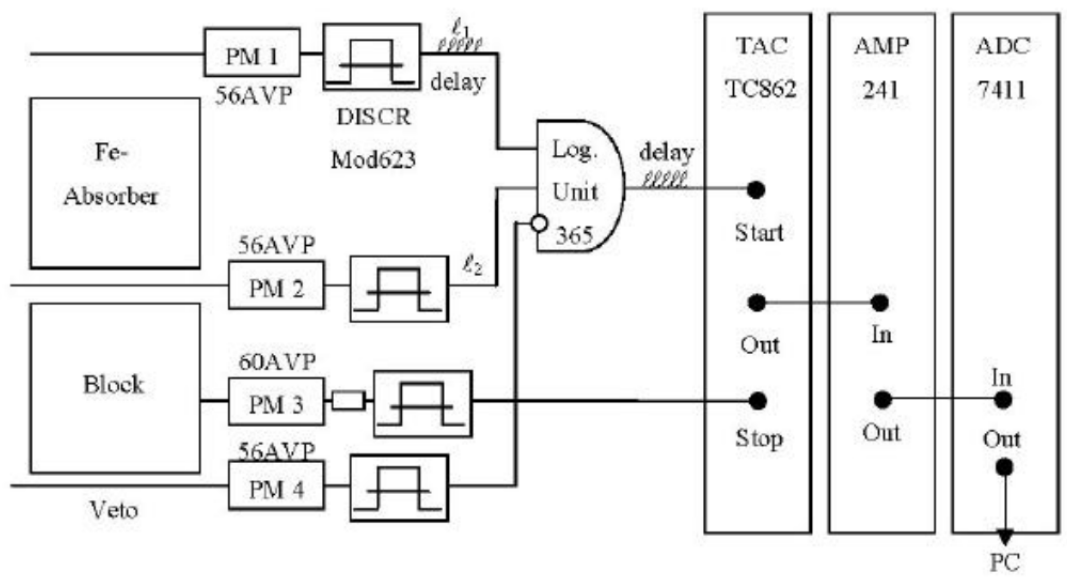


Abbildung 3: Schaltskizze des Versuchsaufbaus

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 schrittweiser 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**

Im folgenden wird erläutert, wie in diesem Versuch vorgegangen wird und was dabei zu beachten ist.

### **4.1 Hochspannung der Photomultiplier**

Ein exaktes Einstellen der Photomultiplier ist essenziell für eine gute Messung. Die Spannungen von PM2 und PM4 sollen dabei einen Wert von 2200 V nicht überschreiten. Die Spannung von PM1 soll 2000V nicht übersteigen. Der Arbeitspunkt von PM3 liegt im Bereich von 2700-3000 V, dabei soll ein Wert von 3000V nicht überschritten werden. Für die Bestimmung des optimalen Arbeitspunktes wird die Schwelle des Diskriminators auf einen möglichst geringen Wert eingestellt. Es wird der Logarithmus der Zählrate in Abhängigkeit der Spannung untersucht und nach dem Punkt, an dem die Steigung abknickt, gesucht, da sich der Photomultiplier dann am optimalen Arbeitspunkt befindet. Da die Zählrate logarithmisch aufgetragen wird,

wurde ein  $^{60}\text{Co}$ -Präparat verwendet, um die Zählrate zu erhöhen. Die aufgenommenen Spannungskennlinien sind in Abbildung 4 bis 7 zu sehen.

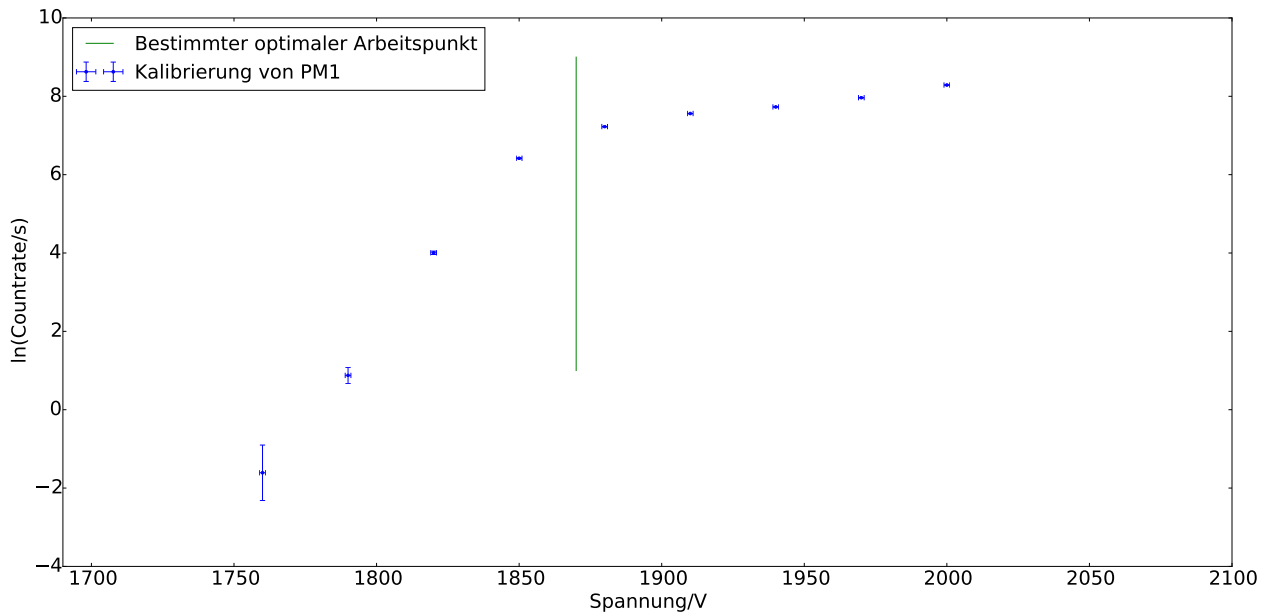


Abbildung 4: Messung der Zählrate in Abhängigkeit der Spannung für die ersten Photomultiplier. Es wurde ein  $^{60}\text{Co}$ -Präparat verwendet, um die Zählrate zu erhöhen. Der Abknick wurde bei einer Spannung von 1870V bestimmt.

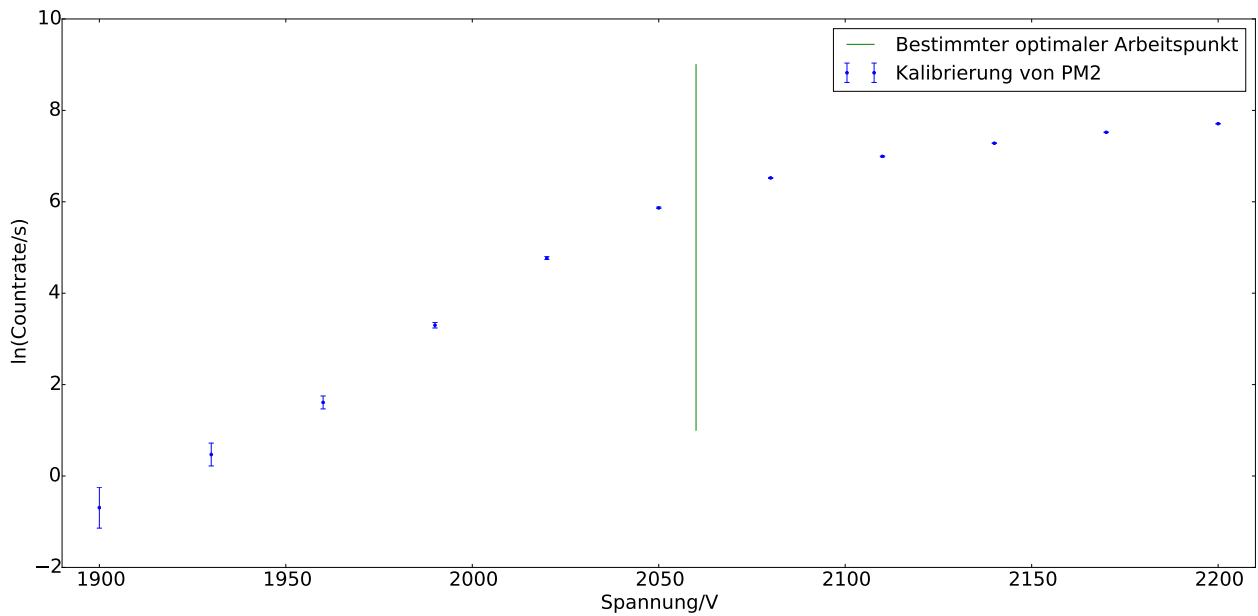


Abbildung 5: Messung der Zählrate in Abhängigkeit der Spannung für die zweiten Photomultiplier. Es wurde ein  $^{60}\text{Co}$ -Präparat verwendet, um die Zählrate zu erhöhen. Der Abknick wurde bei einer Spannung von 2060V bestimmt.

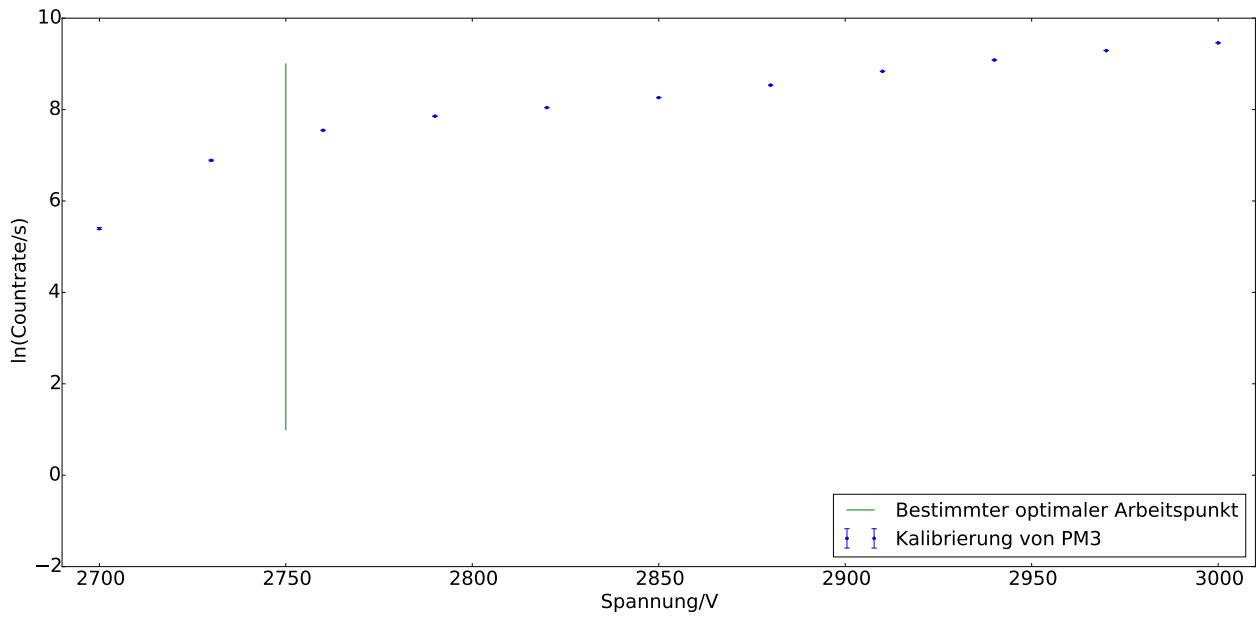


Abbildung 6: Messung der Zählrate in Abhängigkeit der Spannung für die dritten Photomultiplier. Es wurde ein  $^{60}\text{Co}$ -Präparat verwendet, um die Zählrate zu erhöhen. Der Abknick wurde bei einer Spannung von 2750V bestimmt.

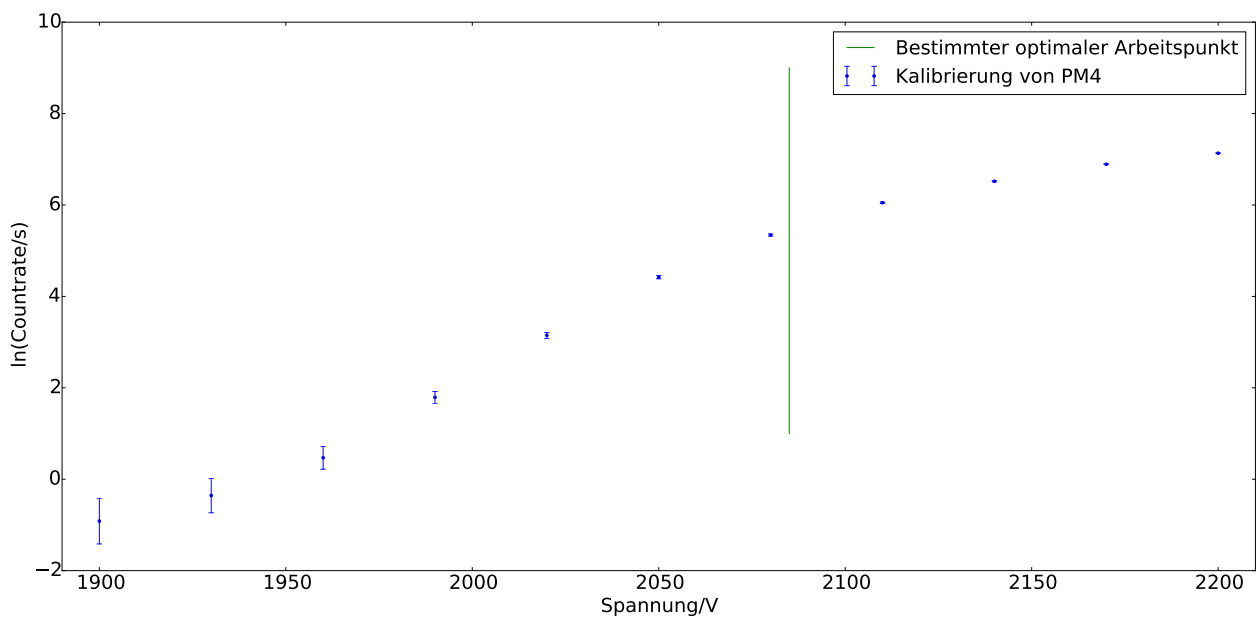


Abbildung 7: Messung der Zählrate in Abhängigkeit der Spannung für die vierten Photomultiplier. Es wurde ein  $^{60}\text{Co}$ -Präparat verwendet, um die Zählrate zu erhöhen. Der Abknick wurde bei einer Spannung von 2085V bestimmt.

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

Tabelle 4: Verwendete Spannungen für die Photomultiplier

Photomultiplier	Spannung[V]
PM1	1870
PM2	2060
PM3	2750
PM4	2085

## 4.2 Schwellspannung

Mit den Szintillatoren soll nur minimal ionisierende Strahlung gemessen werden. Dafür werden die Schwellen etwas unterhalb des Energieverlustes der Flach szintillatoren, 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 Delay

Da PM1, PM2 und PM4 sind über eine logische Einheit verbunden, welche den TAC startet. Deshalb muss sichergestellt werde, dass die Signale der drei Photomultiplier Zeitgleich ankommen. Die Zeitversetzung (Delay) der Signale wir über die Kabellänge der Photomultiplier zur logischen Einheit eingestellt.

Es kann angenommen werde, das die Signale von PM3 und PM4 zur selben Zeit ankommen, deshalb kann das Signal von PM3 gut als Referenz für die ersten beiden verwendet werden. Für die Bestimmung des Delays werden PM1 (bzw. PM2) und PM3 an die logische Einheit angeschlossen, jedoch ohne ein Veto. Es wir erwartet, das sich ein Plateau ausbildet, das Delay in der Mitte des Plateaus ist die optimale Einstellung. Damit sich ein möglichst kleines Plateau ausbildet, müssen die Pulse der Diskriminatoren minimal sein. In Abbildung 8 ist zu sehen, dass für den ersten Photomultiplier kein eindeutiges Plateau identifiziert werden konnte. Deshalb wurde das Delay mit dem Oszilloskop bestimmt, dafür wurden die beide Signale beobachtet und das Delay so eingestellt, das sich die Signale überlappen. Für den ersten Photomultiplier wurde so ein Delay von 9ns bestimmt. In Abbildung 9 sind die Messdaten für den zweiten Photomultiplier zu sehen. Im Bereich von 20 bis 28ns ist ein Plateau zu erkennen, das Delay wurde mit dem Wert (24ns) in der Mitte des Plateaus angenommen. Das Delay von 24ns für den zweiten Photomultiplier wurde zusätzlich noch mit dem Oszilloskop bestimmt und konnte so noch einmal bestätigt werden.

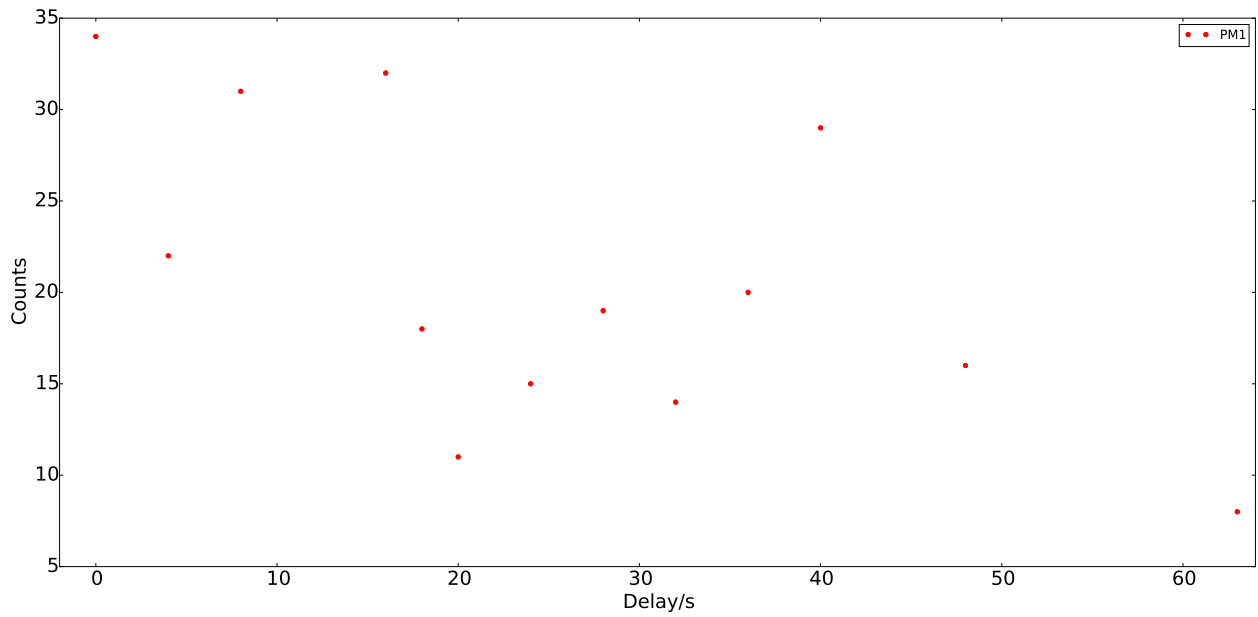


Abbildung 8: Counts in Abhängigkeit vom Delay für die ersten Photomultiplier, es ist kein eindeutiges Plateau zu erkennen. Deshalb wurde das Delay mit eine Oszilloskop vorgenommen und ein Delay von 9ns bestimmt.

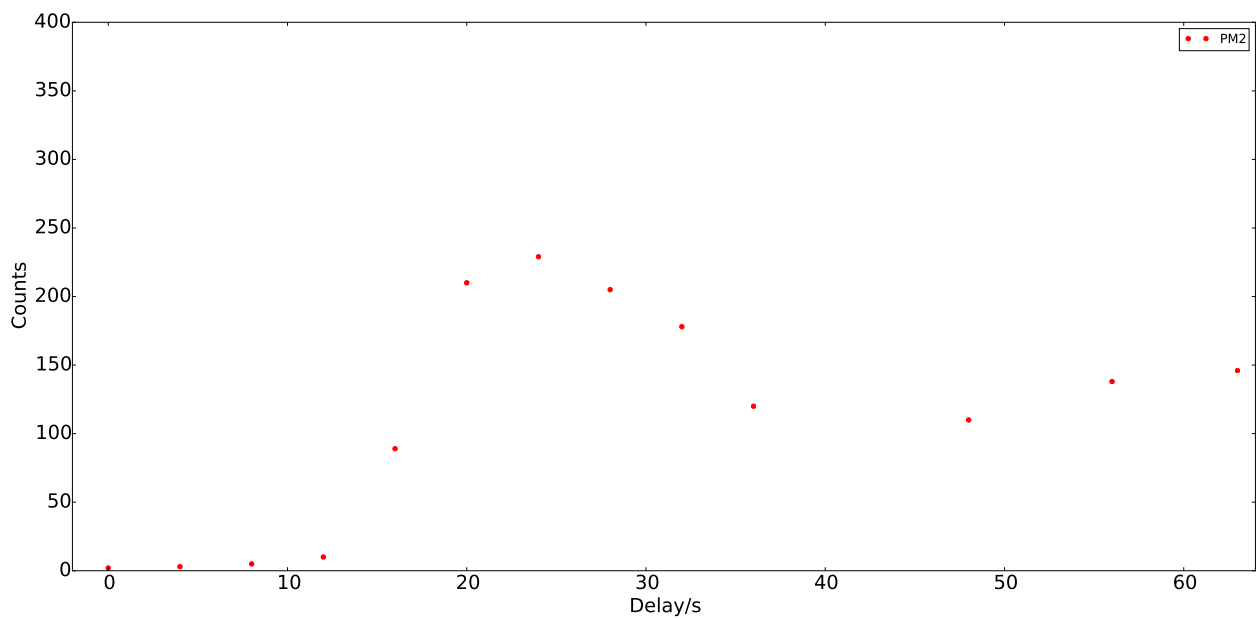


Abbildung 9: Counts in Abhängigkeit vom Delay für die ersten Photomultiplier, es ist im Bereich von 20 bis 28 ns zu erkennen. Das Delay wurde mit 24 ns, in der Mitte des Plateaus angenommen, dieser Wert wurde mit dem Oszilloskop zusätzlich verifiziert.

Es ergeben sich die Delays in Tabelle 5.

Tabelle 5: Optimal bestimmtes Delay für PM1 und PM2

Photomultiplier	Delay [ns]
PM1	9
PM2	24

Das Oszilloskopbild Abb. 10 zeigt, dass die Signale beim zweiten Photomultiplier übereinander liegen. Auffällig war, dass trotz Abschlusswiderstand verschobene Signale angezeigt wurden, die eigentlich nicht zu sehen sein sollten.



Abbildung 10: Oszilloskopbild Delay PMT 2

#### 4.4 Kanal-Zeit-Eichung

Für eine genaue Bestimmung der Lebensdauer von Myonen ist eine exakte Zeiteichung extrem wichtig. Für die Zeiteichung wird ein TAC, ein dual Timer und ein Oszilloskop verwendet. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 11 zu sehen.

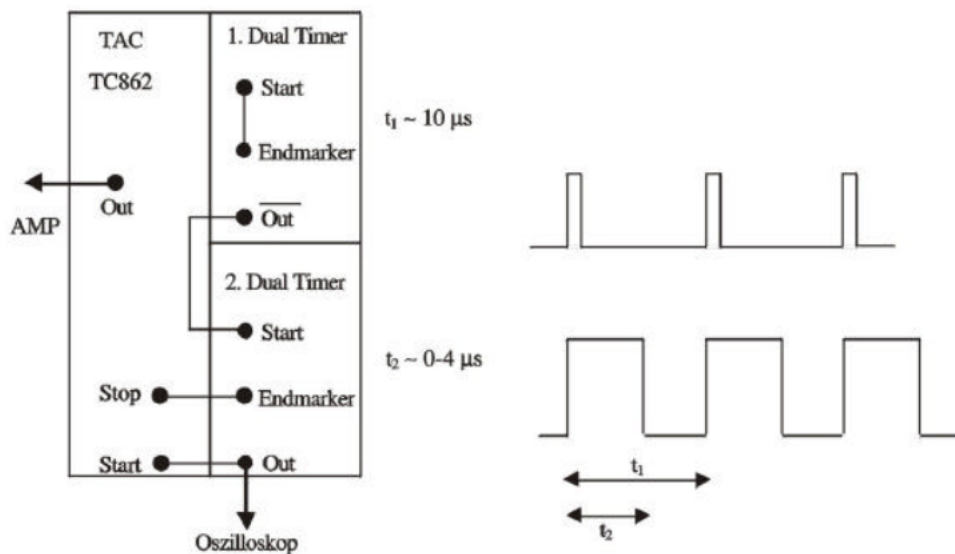


Abbildung 11: Schematischer Aufbau für die Kanal-Zeit-Eichung

Der dual Timer wird verwendet, um kurze Signale mit bekannter Länge zu erzeugen. Über die High und Lows des Signals wird der TAC gesteuert, wodurch eine Spannung in Abhängigkeit

der Länge des Signals erzeugt wird. Das Signal wird verstärkt und mit dem ADC digitalisiert, damit es vom Multichannel-Analyser verwertet werden kann. Durch variieren der Signallänge lassen sich die verschiedenen Kanäle ansprechen, wodurch eine Beziehung zwischen einer Zeit und einem Kanal hergestellt wird. Die Zeitintervalle werden gegen die Kanäle aufgetragen und mit Gleichung 3 gefittet. Die Parameter und Variablen des Fits sind in Tabelle 6

$$t = A * k + B \quad (3)$$

Tabelle 6: Parameter des Fits

t	Zeitintervall
k	Kanal
A	Proportionalitätsfaktor
B	Offset

In Abbildung 12 sind die Messwerte zu sehen. Für die Fitparameter ergaben sich dabei die Werte in Tabelle 7. Das  $\chi^2_{red}$  hat einen Wert von 0,02, was einem sehr guten Fit entspricht.

Tabelle 7: Fitparameter mit Fehlern und  $\chi^2_{red}$

Parameter	Wert
A	0,002106(6)
B	0,12(2)
$\chi^2_{red}$	0,002

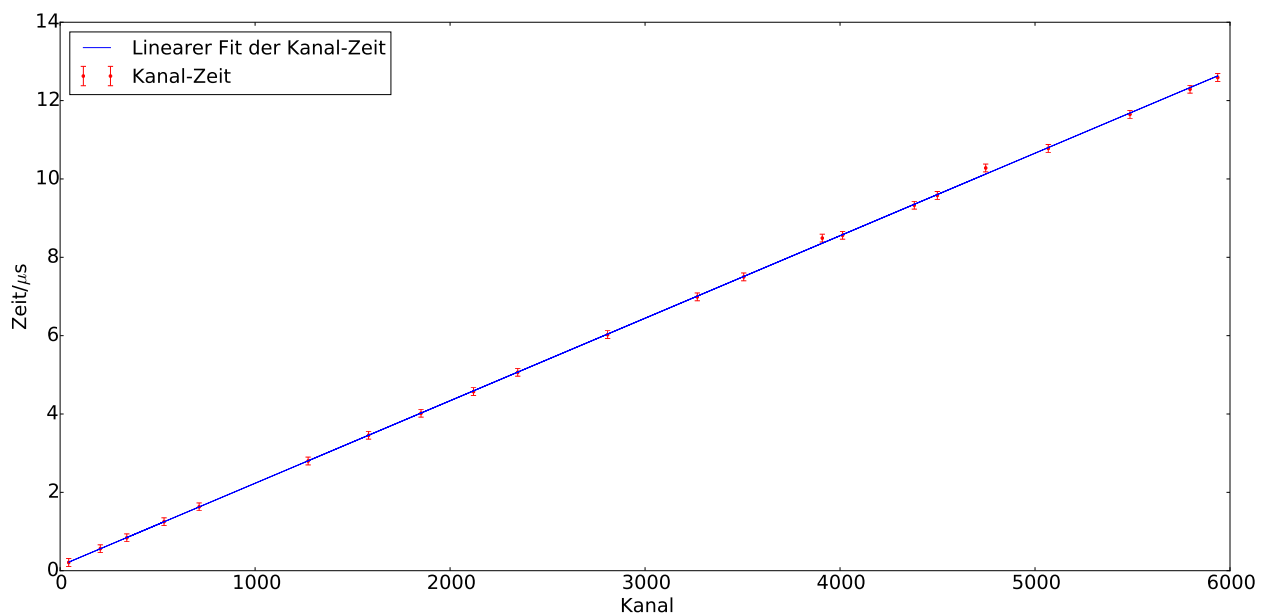


Abbildung 12: Kanal-Zeit-Eichung

## 4.5 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.

### 4.5.1 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

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

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

$$L = \prod_{i=1}^N P(t_i|\tau) = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\tau} \frac{e^{-\frac{t_i}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \quad (5)$$

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

$$\ln L = \ln \left[ \prod_{i=1}^N P(t_i|\tau) \right] = \sum_{i=1}^N \ln[P(t_i|\tau)] = - \left[ \sum_{i=1}^N \ln(\tau) + \frac{t_i}{\tau} + \ln(1 - e^{-\frac{T}{\tau}}) \right] \quad (6)$$

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

$$\hat{\tau} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i + \frac{T e^{-\frac{T}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \quad (7)$$

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

$$\sum_{i=1}^N t_i = \sum_{k=1}^M N_k t_k \text{ wobei } N = \sum_{k=1}^M N_k \quad (8)$$



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

$$\hat{\tau} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^M N_k t_k + \frac{T e^{-\frac{T}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}} \quad (9)$$

mit einem Fehler von

$$\Delta \hat{\tau} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{k=1}^M N_k t_k^2} \quad (10)$$

Formel 9 muss dabei rekursiv angewendet werden, da  $\tau$  unbekannt ist. Als Startwert für  $\tau$  kann das arithmetische Mittel verwendet werden:

$$\tau_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^M N_k t_k \quad (11)$$

## 5 Auswertung

## 6 Diskussion

## 7 Fazit

## Literatur

- [1] <https://de.wikipedia.org/wiki/myon>, 02.09.2015.
- [2] [https://de.wikipedia.org/wiki/zeitdilatation\\_bewegter\\_teilchen](https://de.wikipedia.org/wiki/zeitdilatation_bewegter_teilchen), 22.08.2015.
- [3] <http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=news2011>, 02.09.2015.
- [4] Donald H. Perkins. *Introduction to High Energy Physics*.
- [5] Scholz Zetsche Povh, Rith. *Teilchen und Kerne*.