

V01

# Lebensdauer der kosmischen Myonen

Philipp Zolthoff  
philipp.zolthoff@tu-dortmund.de

Moritz Bosse  
moritz.bosse@tu-dortmund.de

Durchführung: 17.11.2021

Abgabe: 24.11.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
1.1	Leptonen und Elementarteilchen . . . . .	3
1.2	Entstehung von Myonen durch kosmische Strahlung . . . . .	4
1.3	Szintillator . . . . .	6
1.4	Zerfall und Lebensdauer . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Aufbau</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>12</b>
4.1	Justierung der Verzögerung . . . . .	12
4.2	Kalibrierung des Vielkanalanalysators . . . . .	13
4.3	Bestimmung der Lebensdauer kosmischer Myonen . . . . .	15
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>Anhang</b>	<b>19</b>
	<b>Literatur</b>	<b>24</b>

# 1 Theoretische Grundlagen

## 1.1 Leptonen und Elementarteilchen

Zu den Elementarteilchen gehören die Quarks und Leptonen. Diese sind anders als die Hadronen „elementar“, dass heißt nicht weiter aus anderen Teilchen zusammengesetzt. Quarks sind sechsteilig in drei Generationen gespalten und bilden durch verschiedene Kombinationen die kurzlebigen Hadronen. Frei kommen diese im Gegensatz zu den Leptonen nicht vor. Leptonen sind also gut, durch zum Beispiell Zerfallprozesse, detektierbar. Charakteristisch für diese Teilchen ist zum einen die „Schwache -“ als auch die „Elektromagnetische Wechselwirkung“. Zusätzlich wirkt, wie auf alles was eine Masse besitzt, die Gravitation. Diese ist in ihrer Größenordnung den anderen Kräften stark unterlegen und wird im folgenden nicht beachtet. Analog zu den Quarks finden sich auch die Leptonen in drei Generationen zusammen. Das einzig stabile Lepton ist das Elektron

**Tabelle 1:** In der Tabelle sind die Leptonen in ihren verschiedenen Generation aufgetragen. In den Spalten sind von links nach rechts die Teilchen und entsprechenden Antiteilchen zu sehen. Das zu jeder Generation passende Neutrino ist rechts neben dem namensgegebenen Lepton zu finden. Die Nomenklatur bietet nur bei Elektronen an das Antiteilchen mit eigenem Namen, dem „Positron“, zu beschreiben. In den anderen Generationen ist es üblich den positiv geladenen Partner mit dem präfix „anti - “ zu nennen.

Generation	Teilchen				Antiteilchen		
1	Elektron	$e^-$	Elektron-Neutrino	$\nu_e$	(Positron)	$e^+$	$\nu_e^+$
2	Myon	$\mu^-$	Myon-Neutrino	$\nu_\mu$		$\mu^+$	$\nu_\mu^+$
3	Tauon	$\tau^-$	Tau-Neutrino	$\nu_\tau$		$\tau^+$	$\nu_\tau^+$

und das Positron. Ein Elektron mit der Masse  $m_e$  ist um den Faktor 206 leichter als ein Myon und 3491 mal leichter als ein Tauon. Sowohl die Myonen als auch die Tauonen, mit Antiteilchen, haben eine statistische Lebensdauer. Maßgebliche Eigenschaften der Leptonen ist das Verhalten nach dem Pauli-Prinzip. Dieses schreibt einem Assamble von gleichen Teilchen vor, welcher Zustand für jedes Individuum möglich ist. Außerdem sind Leptonen ununterscheidbar. Das Pauli-Prinzip und die Ununterscheidbarkeit führen zu Fermi-Dirac Statistik, die Aussagen über Fermionen, Teilchen mit dem Spin  $1/2$ , trifft. Alle drei Bedingungen dieser Statistik treffen auf Leptonen zu, diese seien also auch den Fermionen zuzuordnen.

Experimentell wurde bei Reaktionen mit Leptonen ein Defizit von Energie beobachtet was zur richtigen Annahme führte; es gibt zusätzlich zum eigentlich Teilchen noch ein weiteres. Dieses weitere Teilchen, die „Neutrinos“, wurden später auch nachgewiesen und ihnen kann eine Masse, die deutlich kleiner als  $m_e$  ist, zugewiesen werden. Quantitativ lassen sich die einzelnen Leptonen, vorallem bei Zerfällen, durch die Leptonenzahl beschreiben. Diese soll eine Erhaltungsgröße sein die folglich vor und nach dem Zerfall gleich ist. So sei die elektronische Leptonenzahl  $l_e$  einer Generation genau dann 1, wenn

es sich um ein Elektron handelt. Analog hat das Myon eine myonische Leptonenzahl  $l_\mu$  von 1 aber eine elektronische  $l_e$  von 0. Bei Ladungswechseln zum Antiteilchen ändert sich das Vorzeichen der Quantenzahl. Demnach sieht der Zerfall von Myonen und Antimyonen wie folgt aus:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.$$

Analog gilt für den Antiteilchen Zerfall:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu.$$

Die Leptonenzahl bleibt auf beiden Seiten des Zerfalls erhalten.

## 1.2 Entstehung von Myonen durch kosmische Strahlung

Die Erde ist konstant der kosmischen Strahlung ausgesetzt. Diese entsteht nicht nur durch die erdnahe Sonne, sondern auch durch eine Vielzahl anderer kosmischer Phänomene die weit jenseits unseres Sonnensystem ihren Ursprung haben, nicht zuletzt der durch den Urknall erzeugten Hintergrundstrahlung. Ein Großteil der hochenergetischen Strahlung besteht jedoch aus Protonen die stark mit der Atmosphäre, abhängig von der Dichte, wechselwirken. Es kommt, dass diese Protonen in der Atmosphäre unter anderem zu Pionen, bzw.  $\pi$ -Mesonen, zerfallen und diese wiederum zu Myonen.



### 1.3 Szintillator

Unter einem Szintillator versteht man einen bestimmten Detektortyp, welcher sich in einigen Anwendungsgebieten als Vorteilhaft herausstellt. Dies gilt ebenfalls für das Detektieren von kosmischen Myonen.

Die allgemeine Funktionsweise beruht auf der Ionisation des verwendeten Szintillatorstoffes durch die zu untersuchende Strahlung. In Szintillatoren können je nach Bauart, Teilchen und auch elektromagnetische Strahlung gemessen werden. Durch die Ionisation kommt es zur Anregung des Szintillatorstoffes und anschließend zur Fluoreszenz. Wichtig hierbei ist, dass der Szintillator selbstdurchlässig für das ausgesendete Licht ist. Sonst würde das zu messende Licht vom Stoff selbst nahezu vollständig absorbiert werden. Um dies zu verhindern wird meist ein Aktivatorstoff (Wellenlängenschieber) verwendet.

In der Regel wird zwischen zwei Hauptgruppen von Szintillatoren unterschieden, den anorganischen und organischen Szintillatoren.

Anorganische Szintillatoren sind häufig Kristalle mit deutlich höheren Ordnungszahlen im Vergleich zu organischen Stoffen. Die Folge dessen ist meist eine längere Dauer bis sich die Moleküle im Kristall abgeregt haben. Für die Untersuchung der Lebensdauer von Myonen muss eine geringe Totzeit des Szintillators gewährleistet sein, wodurch diese Art von Szintillatoren meist ungünstig sind.

Organische Szintillatoren sind oft kunststoffhaltig, oder flüssig. Da die Ereignisrate des Einfalls von Myonen im Vergleich zu anderen Strahlungsquellen eher gering ist, muss meist auch ein großes Volumen mit dem Szintillator ausgefüllt werden. Organische Szintillatoren sind dort deutlich effizienter und kostengünstiger.

Für die Signalverarbeitung wird an beiden Enden des Szintillators ein Photomultiplier verwendet. Die Strahlung, welche durch den Szintillator entsteht, kann über die Photomultiplier verstärkt und in ein Spannungssignal umgewandelt werden. Dazu werden durch die Strahlung an einer Photokathode Elektronen herausgelöst und anschließend über mehrere positiv geladenen Dynoden beschleunigt. An jeder Dynode wird die Anzahl der Elektronen vervielfacht. Am Ende des Photomultipliers ist meist ein Vorverstärker eingebaut, der die kurzen Stromimpulse über einen Kondensator in ein leichter zu messendes Spannungssignal umwandelt.

### 1.4 Zerfall und Lebensdauer

Der Zerfall eines einzelnen Myons ist ein statistischer Prozess und unabhängig von der Zeit die es bereits vorliegt. Es gibt also keinen Alterungsprozess von Myonen. Die Wahrscheinlichkeit das ein Teilchen zerfällt, lässt sich also für einen beliebig kleinen Zeitraum  $dt$  als

$$dW = \lambda_\mu dt \quad (1)$$

angeben. Die Konstante  $\lambda_\mu$  beschreibt die Zerfallswahrscheinlichkeit eines Myons pro Zeiteinheit. Wenn nun eine Anzahl  $N$  an Myonen vorliegt, lässt sich der zeitliche Verlauf

dieser durch

$$dN = -N dW \quad (2)$$

beschreiben. Mit der Beziehung 1 folgt nun

$$dN = -N \lambda_\mu dt.$$

Diese Differentialgleichung wird gelöst durch

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda_\mu t), \quad (3)$$

wobei  $N_0$  die Anzahl der Myonen zum Zeitpunkt  $t = 0$  beschreibt. Um nun eine Verteilungsfunktion zu erhalten wird eine infinitesimale Änderung der Myonenanzahl betrachtet. Es gilt

$$\frac{dN(t)}{N_0} = \frac{N(t+dt) - N(t)}{N_0} = - \left( \frac{dN}{dt} \right) \frac{dt}{N_0}. \quad (4)$$

Wird nun die Ableitung ausgeführt, ergibt sich eine Verteilungsfunktion welche zur Berechnung des Mittelwerts genutzt werden kann. Der Mittelwert über die Zeit entspricht der Lebensdauer der Myonen. Die Lebensdauer folgt also aus

$$\langle t \rangle := \tau = \int_0^\infty t \lambda_\mu \exp(-\lambda_\mu t) dt = \frac{1}{\lambda_\mu}. \quad (5)$$

Für die Bestimmung der Lebensdauer in diesem Versuch wird die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Dazu werden die Individuallebenszeiten der Myonen gemessen und an die Anzahl dieser Lebensdauern an eine Exponentialfunktion der Form 3 angepasst. Analytisch sieht dies folgendermaßen aus

$$\sum_{i=1}^n (N(t_i) - N_0 \cdot \exp(-\lambda_\mu t_i))^2 \stackrel{!}{=} \min \quad (6)$$

Dies lässt sich durch eine bestimmte Wahl von  $\lambda_\mu$  und  $N_0$  minimieren, woraus auch  $\tau$  über Beziehung 5 berechnet werden kann.

## 2 Aufbau

Maßgebend für den Aufbau ist der 50L große, mit Edelstahl umhüllte Szintillator vom Typ „NE 102“ und mit Tuluol gefüllt. Diesem ist ein eigener Abschnitt gewidmet und dort entsprechend erläutert 1.3. Mit ihm werden die einfallenden Myonen für die Detektion sichtbar gemacht. Da die entstehenden Signale schwach sind, bietet es sich an diese durch einen Sekundärelektronenverstärker, kurz SEV, zu verstärken. An diesen Verstärkern ist für die Funktionalität eine Hochspannung angelegt. Dieser Teil des Aufbaus ist symmetrisch an beiden Stirnseiten des Szintillator angebracht. So ist es also möglich die einfallenden Teilchen als Lichtsignal durch die SEVs zu verstärken. Das Signal der zwei Sekundärelektronenverstärker kann durch vielerlei Gründe einseitig verschoben sein, das heißt es tritt durch asymmetrische Verzögerungen eine zeitliche Differenz  $\Delta t$  auf.

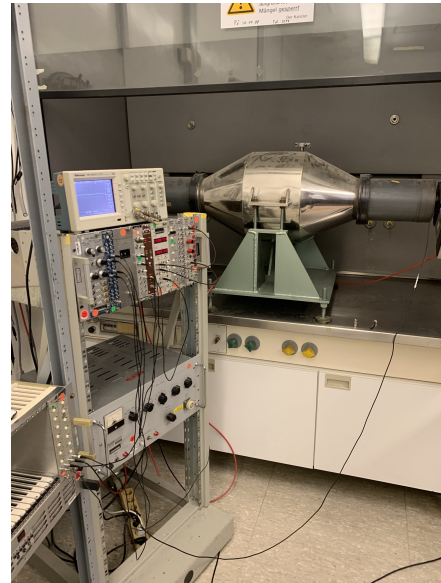


Abbildung 2: Bild des Aufbaus.

Die Zeitliche Differenz zwischen den SEVs kann man durch passend eingesetzte „Delays“ entgegenwirken. Diese sind weitere Kabel, die durch ihre wählbare Länge die Zeit des Signals verzögern. So ist es also, dass ein einfallendes Teilchen ein Signal zeitgleich an beiden Anschlüssen ankommen lässt. Der Aufbau neigt dazu Störeffekte (i.e. durch etwaige spontane Emission von Elektronen an der Photokathode) zuzulassen. Hier wird ein Diskriminator verwendet, um das Rauschen zu filtern. Dieses Bauteil ist direkt mit den SEVs verbunden, es gibt also zwei individuell einstellbare Diskriminatoren. Bei diesem Elementen ist sowohl ein „Threshold“, also eine Art Schwelle für die einlaufenden Impulse, und die Breite „Width“ einstellbar. Die Schwelle ermöglicht es Rauschen aus ungewollten Quellen zu filtern, mit der Gefahr die Impulse selbst nicht mehr wahrzunehmen. Die Breite stellt die elektrische Impulsdauer abhängig von der Einstellung da. Gewählt wurden in dem Versuch Breiten von 10 ns und 20 ns. Als zweite Maßnahme zur Optimierung wird eine Koinzidenzschaltung dazugeschaltet. In diese Schaltung laufen wahlweise mehrere Signale, hier zwei, ein und werden nur dann weitergeleitet wenn dieses Einlaufen gleichzeitig passiert. Vorzustellen ist dieser Vorgang als logische AND Verknüpfung mit beliebig vielen Bedingungen, die ein Zeitfenster von  $t_k$  haben um zu wirken.

Möglich ist es immer noch für zwei zeitgleich auftretende Emissionen von Elektronen in



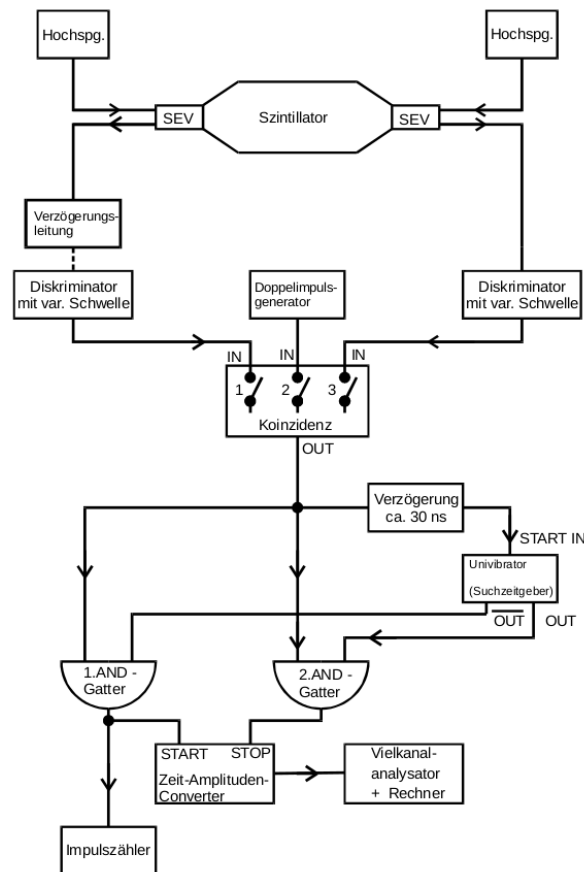
den SEVs ein fälschliches Signal auszulösen. Die Wahrscheinlichkeit dazu ist aber hinreichend gering und somit zu vernachlässigen. An dieser Stelle ermöglicht der Aufbau also die hinreichend sichere Detektion von einfallenden Myonen und deren Zerfall, zwischen dem noch nicht unterschieden werden kann.

Aussagen über die Lebensdauer von Myonen werden nach (5) durch die Zeit getroffen, die dem Teilchen zwischen dem Einfall in den Szintillator und dem gemessenen Zerfall bleibt. Eine Stoppuhr kommt dieser Aufgabe nach, mit der jedoch eine wichtige Bedingung einhergeht. Nicht alle Myonen, sogar die wenigsten, zerfallen dort wo ihr Zerfallsimpuls messbar ist. Der Rest geht eben nur mit einem Initialimpuls einher und verlässt wieder, auf grund zu hoher Energie, den Szintillator. Es gilt also den Einfall und Zerfall von den Teilchen zu erkennen und messen. Mit der Annahme, der erst gemessene Impuls kommt durch ein einfallendes Teilchen, lässt sich durch den statistischen Fluss an Myonen eine Zeit finden, in der ein weiterer Einfall nahezu unmöglich oder zumindest unwahrscheinlich ist. In diesem Zeitfenster bietet es sich also an, ungestört nach Zerfallsimpulsen zu suchen. Die Wahl der Suchzeit  $\Delta T_s$  ist dabei Maßgebend für den Erfolg des Versuchs. Sollte die durchschnittliche Lebensdauer der Myonen überhalb des Zeitfensters liegen, bricht die Stoppuhr auch durchschnittlich zu früh die Messung ab und der Zerfall wird als Initialimpuls gewertet. Im Aufbau leisten verschiedene Elemente diesen Dienst und liefern so passende Signale die in logischen AND-Gattern entweder die Lebensdauer Messen oder nicht.

Das primäre Signal aus der Koinzidenzschaltung läuft also ungestört in zwei verschiedene AND-Gatter und zusätzlich löst es nach einer Verzögerung von ca 30 ns das Zeitfenster für die Suche aus. Die zeitliche Abstimmung findet in einem „Monoflop“, einer Monostabilen Kippstufe, statt. Dieser Monoflop hat einen Eingang und zwei Ausgänge, wovon einer Invers ist, die für die eingestellte Zeit  $\Delta T_s$  ein Signal weitergeben. Also sendet ein Ausgang, der mit dem ersten AND-Gatter verbunden ist, nur bei Aktivierung kein Signal aus. Durch diese Inversität ist gewährleistet, dass nach dem Initialimpuls kein weiteres Signal die logische und-Bedingung erfüllen kann, bis der Monoflop zur Ausgangseinstellung zurückkehrt. Die Verzögerung zum Monoflop erlaubt dem Initialimpuls die Stoppuhr zu starten. Parallel zum ersten AND-Gatter läuft ein zweites Signal vom Monoflop, dieses mal nicht invers, zu einem zweiten AND-Gatter. Diesem ist also für den Zeitraum  $\Delta T_s$  ein Signal gegeben und es bedarf nur einem logischen Partner um die und-Bedingung zu erfüllen. Das Partnersignal wird hier durch etwaige Impulse im Szintillator gegeben und von der Koinzidenzschaltung direkt zum zweiten AND-Gatter geleitet. Sollte die Zeit  $\Delta T_s$  bei einem solchen Event im Monoflop noch nicht abgelaufen sein, so ist die und-Bedingung erfüllt, also das Signal läuft weiter und löst den Stopp für die Zeitmessung aus. Diese Stoppuhr wird in einem Bauelement namens „Time to Amplitude Converter“, kurz TAC, realisiert. Die hier herausgehende Amplitude ist also proportional zur gemessenen Zeit, die das Myon gebraucht hat um zu zerfallen. Bei erneutem Auslösen des ersten AND-Gatter wird im TAC die Zeit neu gestartet. So ist mit diesem Aufbau möglich Myonen erfolgreich zu detektieren und sogar die, vor dem Zerfall, im Szintillator verbrachte Zeit zu messen. Um Aufschluss über alle detektierten

Teilchen zu bekommen, bietet es sich an gleich hinter dem ersten AND-Gatter zusätzlich einen Impulszähler anzubringen. Dieser reagiert auf jedes Signal und erhöht entsprechend den aktuellen Zählerstand. Durch den vorherigen Aufbau lässt es sich so erreichen, dass eben nur die Impulse gezählt werden, die in den Szintillator einfallen, keine Zerfälle.

Zusätzlich gibt es noch einen Doppelimpuls-generator um wichtige Eigenschaften bei der Auswertung der Amplituden richtig einordnen zu können. Der Generator muss alternativ zum Szintillator an die Koinzidenzschaltung geschlossen werden, wo er dann zeitlich abgestimmte Impulse gibt. Diese sind einer Skala am Bauelement zu entnehmen. Die weitergeleitete Amplitude wird mit einem System ausgewertet und einem Kanal zugewiesen. Dieser Kanal ist abhängig von der Impulsdauer. So lässt sich mit einigen bekannten Impulsabständen aus dem Generator und dem entsprechend angezeigten Kanälen feststellen, welcher Kanal bei der echten Messung für welches Zeitintervall  $\Delta T$  steht.



**Abbildung 3:** Schematischer Aufbau zur Bestimmung der Lebensdauer von Myonen.  
[7]

### 3 Durchführung

Der in 3 gezeigte Aufbau wird schrittweise aufgebaut, was ermöglicht, die einzelnen Elemente frühzeitig zu kalibrieren. Zu Beginn werden die Diskriminatoren eingestellt um ein Rauschen zu vermeiden und die Impulsbreite zu definieren. Hierbei wird mit einem Schraubenzieher eine kleine Stellschraube in dem Bauelement verstellt. Die Schwelle für einkommende Signale wird durch die „Threshold“-Schraube geändert und die Breite durch „Width“. Das Ziel ist eine möglichst flache und ungestörte Linie neben den einfallenden Impulsen am Oszillographen zu beobachten. Dieser Impuls soll eine Breite von 10 ns und 20 ns haben.

Es folgen die „Delays“, deren Verzögerungen angepasst werden müssen. Als Impuls werden einfallende Myonen und deren Zerfälle benutzt, die in ihrem Signal keinen Unterschied haben. Weiter wird der Aufbau so verändert, dass die Koinzidenzschaltung direkt in eine Zählereinheit läuft. Zu erwarten sind bei einer perfekten Abstimmung der Delays maximale Zählraten. Es gilt analog, dass eine schlechte Abstimmung zu niedrigen Raten führt. Die Verzögerungen an den Delays sind in Nanosekunden als zweier Potenzen, wobei zusätzlich 0.5 Möglich ist, einstellbar und lassen sich addieren. So kann pro Delay ein Maximum von 63,5 ns Verzögerung erreicht werden. Zur Bestimmung des optimalen Verhältnis werden beide Delays auf einen gleichen Wert über 0 ns eingestellt und von dort in mehreren Schritten variiert. Der Zähler soll für eine Länge von 10 Sekunden suchen und das Ergebnis gilt es zu notieren. Nach hinreichender Beobachtung werden die Delays für eine maximale Zählrate eingestellt.

Die restlichen Elemente werden hinzugenommen und an dem „Monoflop“ wird die Suchzeit  $\Delta T_s = 15 \mu s$  eingestellt. Das gelingt mit einem Oszillographen der an den Monoflop angeschlossen. Um die Auswertung durch den TAC zu ermöglichen muss vor der eigentlichen Messreihe der Doppelimpulsgenerator alleine an die Koinzidenzschaltung geschlossen werden. Der Aufbau ab dem Ausgang der Koinzidenzschaltung ändert sich dabei nicht. Jetzt werden mehrere Doppelimpulse bei bekannter zeitlicher Länge erzeugt und durch den TAC ausgewertet. Die entsprechenden Kanäle können am PC, der mit der TAC-Einheit verbunden ist, ausgelesen und notiert werden. So ist bekannt, welchem Kanal eine Impulsdauer zugeordnet ist. Final wird der Synchronisator wieder an die Koinzidenzschaltung angeschlossen und die eigentliche Messreihe kann beginnen. Es müssen alle Messvorgänge zur gleichen Zeit gestartet werden. Dazu gehört die Zählung der einfallenden Teilchen und die Messung der Lebensdauer am PC. Nach einer beliebigen Zeit, wahlweise groß um die Mittellung zu verbessern, wird der Messvorgang gestoppt und die Daten entnommen.

## 4 Auswertung

In der folgenden Versuchsauswertung werden für die Methode der kleinsten Quadrate als auch lineare Regressionen, die Bibliotheken NumPy [5] und SciPy [3] in Python verwendet. Die Fehlerrechnungen wurden ebenfalls über die Bibliothek „uncertainties“ [4] bestimmt.

### 4.1 Justierung der Verzögerung

Da an dem Szintillator zwei Photomultiplier angeschlossen sind, müssen diese Signale zeitlich aneinander angepasst an die Koinzidenzschaltung gelangen. An beiden Leitungen lässt sich durch eine variable Kabellänge eine Verzögerung generieren, sodass dies gewährleistet ist. Im folgenden wurden die ankommenden Spannungsimpulse über einen Diskriminator angepasst. Dazu wurde eine hinreichend große Schwellspannung zum herausfiltern des Rauschens und eine Impulsbreite eingestellt. Die Verzögerungsanpassung wurde im Folgenden für zwei unterschiedliche Impulsbreiten von 10 ns und 20 ns durchgeführt.

Die Messreihen mit unterschiedlich eingebauten Verzögerungen und den dazu gemessenen Zählraten pro 10 s hinter der Koinzidenz, sind in den Tabellen 5 und 6 notiert.

Zusätzlich gilt eine Poissonverteilung der Messwerte, da es sich um Zählraten handelt. Die Fehler der einzelnen Werte werden also mit  $\sqrt{N}$  angegeben. Von Interesse ist nun die Halbwertsbreite der Verzögerungseinstellung. Diese lässt sich über zwei Lineare Regressionen an den jeweiligen Flanken für je eine Impulsbreite bestimmen.

Die Lineare Ausgleichsgerade hat dabei die Form

$$N(t) = at + b.$$

In den Tabelle 2 und 3 sind die ermittelten Werte der Parameter aufgelistet.

**Tabelle 2:** Parameter der Linearen Regression für die Bestimmung der Halbwertsbreite bei einer Impulsbreite von 10 s.

Flanke	a [1/ns]	b
Links	$15,87 \pm 0,69$	$302,49 \pm 8,43$
Rechts	$-16,33 \pm 0,85$	$306,60 \pm 11,21$

**Tabelle 3:** Parameter der Linearen Regression für die Bestimmung der Halbwertsbreite bei einer Impulsbreite von 10 s.

Flanke	a [1/ns]	b
Links	$12,85 \pm 0,61$	$132,21 \pm 4,06$
Rechts	$-15,26 \pm 0,88$	$150,28 \pm 6,05$

Aus den Messreihen 5 und 6 lassen sich nun die Maxima ablesen und in die jeweiligen halben Maxima in die Ausgleichsgeraden einsetzen. Wenn diese nach  $t$  umgeformt werden,

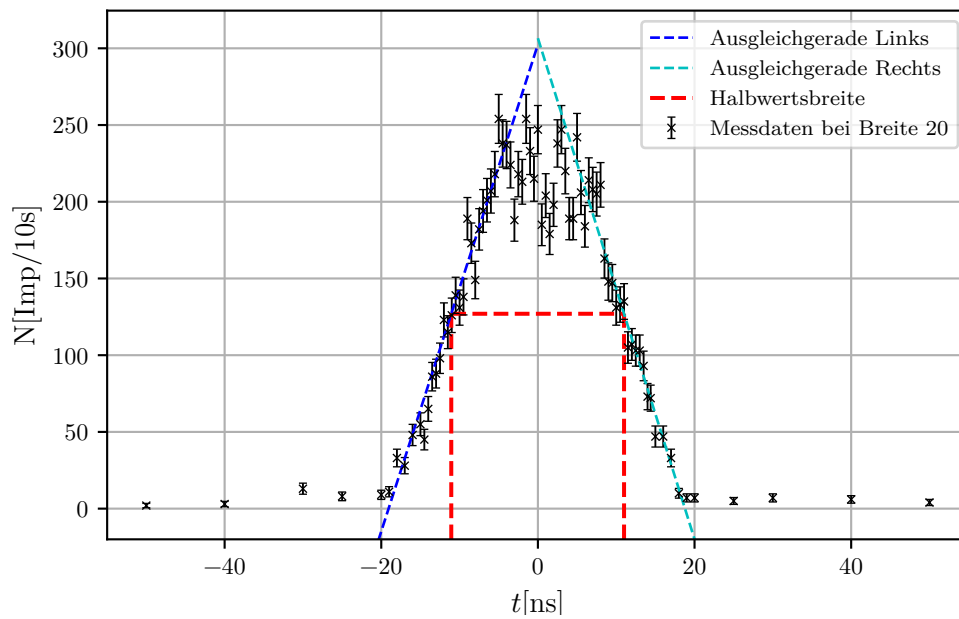
ergeben sich die Werte

$$\begin{aligned} t_{\text{links}, 10} &= (-5,07 \pm 0,40) \text{ ns}, \\ t_{\text{rechts}, 10} &= (5,46 \pm 0,51) \text{ ns}, \\ t_{\text{links}, 20} &= (-11,06 \pm 0,72) \text{ ns}, \\ t_{\text{rechts}, 20} &= (11,00 \pm 0,90) \text{ ns}. \end{aligned}$$

Aus den Differenzen der Beträge folgen somit die beiden Halbwertsbreiten

$$\begin{aligned} T_{10} &= (10,53 \pm 0,64) \text{ ns}, \\ T_{20} &= (22,06 \pm 1,15) \text{ ns}. \end{aligned}$$

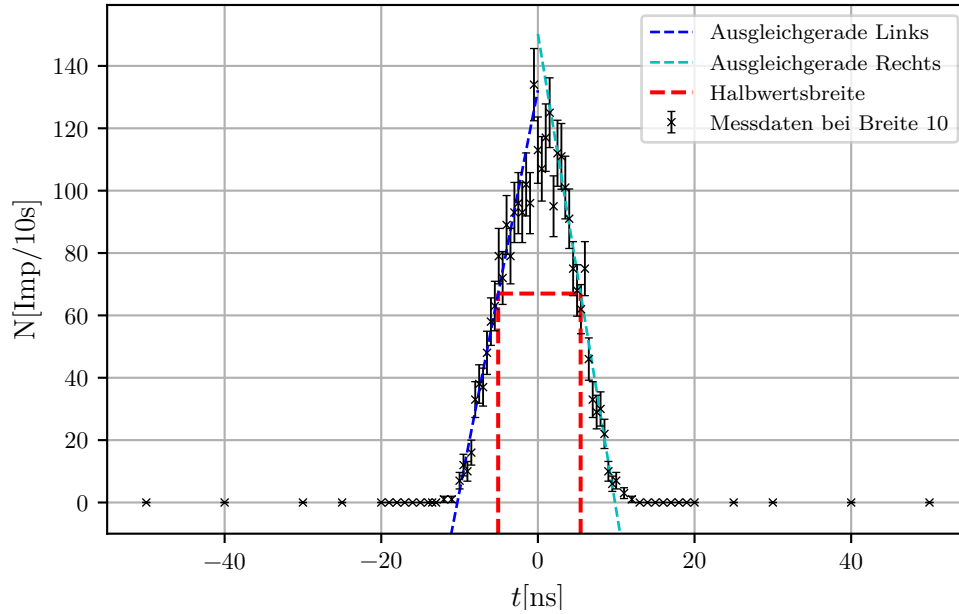
In den Abbildungen 4 und 5 sind die Messwerte mit poissonverteiletem Fehlerbalken, sowie Ausgleichgeraden und Halbwertsbreite für beide Impulsbreiten aufgetragen.



**Abbildung 4:** Gemessene Impulse pro 10 Sekunden mit Fehlerbalken, Ausgleichsgeraden und Halbwertsbreite für eine Impulsbreite von 20 ns.

## 4.2 Kalibrierung des Vielkanalanalysators

Um die Spannungsimpulse hinter dem TAC einer Zeit zuzuordnen, werden mit einem Doppelimpulsgenerator feste Zeitabstände generiert. Die am Rechner abgelesenen Kanäle



**Abbildung 5:** Gemessene Impulse pro 10 Sekunden mit Fehlerbalken, Ausgleichsgeraden und Halbwertsbreite für eine Impulsbreite von 10 ns.

pro Zeitabstand  $\Delta t$  sind in der Tabelle 4 eingetragen. Sie zeigen einen linearen Verlauf. Es lässt sich also durch die Messwerte eine lineare Ausgleichgerade bestimmen. Durch diese kann dann einem beliebigen Kanal eine Zeitdifferenz  $\Delta t$  zugeordnet werden. Die Form der Ausgleichgeraden sieht folgendermaßen aus

$$\Delta t(C) = aC + b. \quad (7)$$

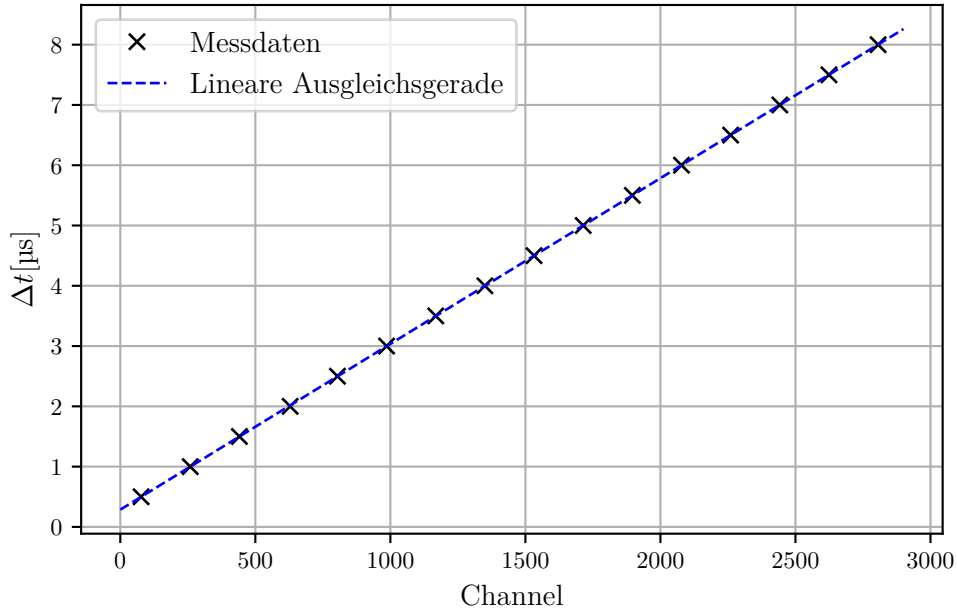
Dabei steht C für den jeweiligen Channel. Es ergeben sich die folgenden Parameter

$$\begin{aligned} a &= (2,750 \pm 0,001) \text{ ns/Channel}, \\ b &= (0,286 \pm 0,226) \mu\text{s}. \end{aligned}$$

Die gemessenen Werte aus der Tabelle 4 sind zusammen mit der Ausgleichgerade in der Abbildung 6 aufgetragen.

Im folgenden Auswertungsteil wird eine weitere Messreihe verwendet, die unter den gleichen Umständen gemessen wurde. Dabei ergab sich bei Kalibrierung des Vielkanalanalysators eine lineare Ausgleichgerade mit den Parametern

$$\begin{aligned} a &= 0,0223 \mu\text{s/Channel}, \\ b &= -0,0148 \mu\text{s}. \end{aligned}$$



**Abbildung 6:** Zuordnung von Zeitintervallen zu den Kanälen über eine Lineare Regression der Messwerte.

Diese werden im Folgenden für die weitere Auswertung verwendet.

### 4.3 Bestimmung der Lebensdauer kosmischer Myonen

Zunächst muss zu den gemessenen Counts, notiert in den Tabellen 7, 8, 9 eine Untergrundrate pro Channel berechnet werden. Diese Korrektur ist statistischer Natur und ergibt sich durch eine Poissonverteilung [2]

$$P(r) = \frac{\mu^r}{r!} \exp(-\mu).$$

Hierbei steht  $\mu$  für einen Erwartungswert. Dieser ist in diesem Fall die gemittelte Anzahl der Startsignale in der Suchzeit  $T$ . Das  $r$  gibt dabei eine Ereigniszahl an. Für  $r = 1$  lässt sich also die Wahrscheinlichkeit bestimmen, in einer Suchzeit  $T$  zwei Myonen zu messen. Gemessen wurde über einen Zeitraum von

$$T_{\text{ges}} = 272\,190 \text{ s.}$$

Dabei wurden

$$N_{\text{start}} = 3\,256\,768 \text{ Imp}$$

Startsignale gemessen. Nun lässt sich eine Zählrate von

$$R = \frac{N_{\text{start}}}{T_{\text{ges}}} = (11,965 \pm 0,007) \text{ Imp/s}$$

angeben. Bei einer Suchzeit von  $T = 10\text{ }\mu\text{s}$  ergibt sich nun die gemittelte Anzahl an Impulsen pro Suchzeit zu

$$N_{\text{such}} = R \cdot T = (0,119\,65 \pm 0,000\,07) \cdot 10^{-3} \text{ Imp.}$$

Dieser Wert kann nun als Mittelwert, zusammen mit einer Ereigniszahl von  $r = 1$ , in die Poissonverteilung eingesetzt werden. Die Wahrscheinlichkeit zwei Myonen in einem Messintervall zu messen ist somit

$$P(r = 1) = N_{\text{such}} \cdot \exp(-N_{\text{such}}) = (0,119\,64 \pm 0,000\,07) \cdot 10^{-3}.$$

Für die gesamte Messdauer ist die Untergrundrate nun also

$$U_{\text{ges}} = N_{\text{start}} \cdot P(1) = (389,6 \pm 0,4) \text{ Imp.}$$

Da sich diese Untergrundrate auf alle Channel statistisch gleichmäßig verteilen sollte, wird pro gemessenem Channel eine Untergrundrate von

$$U_{\text{channel}} = \frac{U_{\text{ges}}}{511} = (0,7625 \pm 0,0008) \text{ Imp}$$

subtrahiert.

In der Abbildung 7 sind die Messwerte aus den Tabellen 7, 8, 9 aufgetragen. Dabei wurde die Untergrundrate pro Channel  $U_{\text{channel}}$  zunächst abgezogen und die Messwerte dann poissonfehlerbehaftet. Die eingezeichnete Ausgleichfunktion besitzt die Form einer Exponentialfunktion wie in Gleichung 3. Hier wird also zunächst eine Form

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda t)$$

angenommen und an die Werte über die Bibliothek SciPy [3] gefittet. Es ergeben sich die Parameter

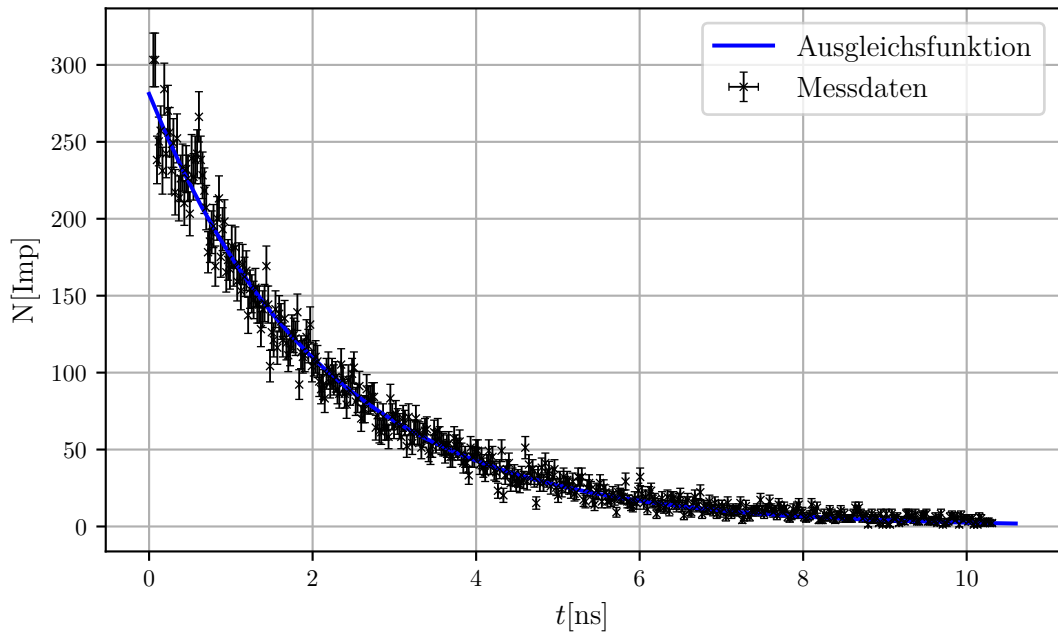
$$\begin{aligned} N_0 &= (281,147 \pm 1,820) \text{ Imp,} \\ \lambda &= (0,4707 \pm 0,0042) \frac{1}{\mu\text{s}}. \end{aligned}$$

Aus der Beziehung 5 lässt sich nun sofort die Lebensdauer der Myonen angeben als

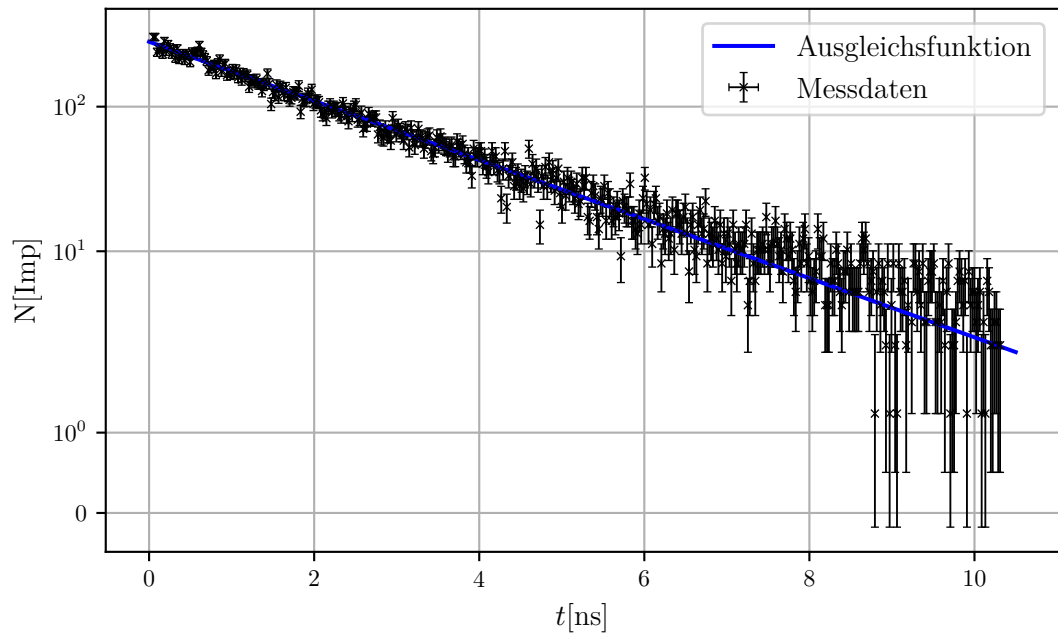
$$\tau_{\mu} = (2,125 \pm 0,019) \mu\text{s}. \quad (8)$$

Der Plot der Messdaten lässt sich ebenfalls noch halblogarithmisch darstellen. Diese Darstellung ist in Abbildung 8 gezeigt.





**Abbildung 7:** Gemessene Impulse mit Fehlerbalken und Ausgleichsgerade unter Berücksichtigung der Untergrundrate.



**Abbildung 8:** Gemessene Impulse mit Fehlerbalken und Ausgleichsgerade in halblogarithmischer Darstellung unter Berücksichtigung der Untergrundrate.

## 5 Diskussion

Bei der Justierung der Verzögerungszeit vor der Koinzidenzschaltung zeigt sich ein Plateau in einem Intervall, welches von der eingestellten Impulsbreite abhängt. Dabei ist das Maximum an Zählungen pro 10 Sekunden bereits bei nur kleinen Verzögerungen aufzufinden. Es zeigt sich, je größer die eingestellte Impulsbreite, desto größer auch die Halbwertsbreite. Dieses Ergebnis war zu erwarten.

Der Zusammenhang zwischen angezeigtem Kanal und Zeitdifferenz lies sich sehr gut bereits durch einige Werte angeben. Dies liegt an dem quasi perfekten linearen Verlauf, welcher in Abbildung 6 zu erkennen ist.

Bei der statistischen Berechnung der Untergrundrate stellt sich ein nur kleiner Effekt, im Verhältnis zur allgemeinen Größenordnung der Zählraten, heraus. Dies liegt vor allem an der nur sehr geringen Anzahl an Startsignalmessungen pro Suchzeit  $T$ .

Die Berechnung der Lebensdauer der Myonen, über die Methode der kleinsten Quadrate, liefert ein im Vergleich zum Theoriewert sehr gutes Ergebnis. Der Theoriewert [6] beträgt

$$\tau_{\text{theo}} = 2,197 \mu\text{s}. \quad (9)$$

Somit liegt die prozentuale Abweichung zum Theoriewert bei

$$\tau_{\%} = (3,29 \pm 0,87) \%. \quad (10)$$

## 6 Anhang

**Tabelle 4:** Messreihe zur Bestimmung der Zeitabhängigkeit von den Kanälen.

$\Delta t[\mu\text{s}]$	Channel
0.5	77
1.0	259
1.5	441
2.0	629
2.5	804
3.0	986
3.5	1168
4.0	1350
4.5	1532
5.0	1714
5.5	1896
6.0	2078
6.5	2260
7.0	2442
7.5	2624
8.0	2806

**Tabelle 5:** Messreihe zur Bestimmung der „Delays“  $\Delta t$  bei einer Grundeinstellung von je 8 ns und einer Impulsbreite von 20 ns.

$\Delta t[\text{ns}]$	$ \Delta t  < 0$	Impulse /10s	$\Delta t[\text{ns}]$	$ \Delta t  > 0$	Impulse /10s
-50.0		2	0.0		247
-40.0		3	0.5		185
-30.0		13	1.0		204
-25.0		8	1.5		179
-20.0		9	2.0		198
-19.0		11	2.5		238
-18.0		33	3.0		247
-17.0		28	3.5		220
-16.0		48	4.0		189
-15.0		55	4.5		189
-14.5		45	5.0		242
-14.0		65	5.5		206
-13.5		86	6.0		184
-13.0		88	6.5		214
-12.5		98	7.0		208
-12.0		123	7.5		205
-11.5		115	8.0		211
-11.0		126	8.5		163
-10.5		139	9.0		148
-10.0		131	9.5		147
-9.5		138	10.0		131
-9.0		189	10.5		133
-8.5		173	11.0		135
-8.0		149	11.5		105
-7.5		182	12.0		107
-7.0		194	12.5		103
-6.5		201	13.0		103
-6.0		207	13.5		93
-5.5		218	14.0		73
-5.0		254	14.4		72
-4.5		238	15.0		47
-4.0		237	16.0		47
-3.5		224	17.0		33
-3.0		188	18.0		10
-2.5		218	19.0		7
-2.0		213	20.0		7
-1.5		254	25.0		5
-1.0		233	30.0		7
-0.5		215	40.0		6
0.0		247	50.0		4

**Tabelle 6:** Messreihe zur Bestimmung der „Delays“  $\Delta t$  bei einer Grundeinstellung von je 8 ns und einer Impulsbreite von 10 ns.

$\Delta t[\text{ns}]$	$ \Delta t  < 0$	Impulse /10s	$\Delta t[\text{ns}]$	$ \Delta t  > 0$	Impulse /10s
-50.0		0	0.0		113
-40.0		0	0.5		107
-30.0		0	1.0		117
-25.0		0	1.5		125
-20.0		0	2.0		95
-19.0		0	2.5		112
-18.0		0	3.0		111
-17.0		0	3.5		101
-16.0		0	4.0		91
-15.0		0	4.5		75
-14.0		0	5.0		68
-13.0		0	5.5		62
-12.0		1	6.0		75
-11.0		1	6.5		46
-10.0		7	7.0		33
-9.5		12	7.5		29
-9.0		10	8.0		30
-8.5		16	8.5		22
-8.0		33	9.0		10
-7.5		38	9.5		6
-7.0		37	10.0		7
-6.5		48	11.0		3
-6.0		58	12.0		1
-5.5		63	13.0		0
-5.0		79	14.0		0
-4.5		72	15.0		0
-4.0		89	16.0		0
-3.5		79	17.0		0
-3.0		93	18.0		0
-2.5		96	19.0		0
-2.0		93	20.0		0
-1.5		102	25.0		0
-1.0		96	30.0		0
-0.5		134	40.0		0
0.0		113	50.0		0

**Tabelle 7:** Gemessene Anzahl an Counts pro Channel 1-199.

0 – 39		40 – 79		80 – 119		120 – 159		160 – 199	
N	C	N	C	N	C	N	C	N	C
0	0	176	40	125	80	90	120	58	160
0	1	194	41	123	81	83	121	55	161
0	2	199	42	140	82	83	122	54	162
304	3	166	43	93	83	85	123	49	163
304	4	174	44	114	84	85	124	53	164
239	5	168	45	111	85	65	125	55	165
251	6	183	46	112	86	73	126	46	166
258	7	170	47	124	87	63	127	46	167
232	8	182	48	118	88	62	128	58	168
285	9	160	49	132	89	72	129	53	169
243	10	172	50	105	90	65	130	51	170
271	11	154	51	109	91	65	131	56	171
257	12	171	52	111	92	59	132	48	172
232	13	163	53	108	93	84	133	42	173
250	14	167	54	95	94	72	134	46	174
218	15	138	55	90	95	66	135	42	175
253	16	155	56	93	96	74	136	34	176
214	17	152	57	84	97	69	137	52	177
227	18	148	58	100	98	66	138	46	178
234	19	156	59	104	99	59	139	46	179
211	20	145	60	94	100	71	140	50	180
233	21	145	61	100	101	68	141	50	181
227	22	129	62	96	102	53	142	41	182
204	23	142	63	98	103	72	143	45	183
240	24	146	64	90	104	62	144	39	184
228	25	170	65	87	105	55	145	36	185
239	26	145	66	106	106	62	146	41	186
243	27	105	67	96	107	71	147	50	187
267	28	127	68	87	108	62	148	41	188
239	29	122	69	80	109	61	149	46	189
229	30	142	70	96	110	52	150	37	190
219	31	117	71	89	111	60	151	36	191
208	32	139	72	100	112	63	152	24	192
179	33	134	73	104	113	64	153	38	193
186	34	122	74	82	114	50	154	50	194
192	35	136	75	84	115	48	155	21	195
196	36	120	76	92	116	53	156	34	196
170	37	112	77	71	117	62	157	38	197
201	38	116	78	77	118	56	158	42	198
214	39	127	79	77	119	63	159	29	199

**Tabelle 8:** Gemessene Anzahl an Counts pro Channel 200-399.

200 – 239		240 – 279		280 – 319		320 – 359		360 – 399	
N	C	N	C	N	C	N	C	N	C
33	200	17	240	15	280	9	320	7	360
35	201	26	241	14	281	12	321	6	361
29	202	29	242	19	282	11	322	7	362
32	203	25	243	13	283	11	323	8	363
28	204	18	244	14	284	12	324	15	364
34	205	15	245	20	285	16	325	10	365
31	206	24	246	11	286	5	326	10	366
52	207	23	247	19	287	7	327	13	367
30	208	29	248	19	288	14	328	5	368
41	209	17	249	16	289	9	329	5	369
34	210	26	250	14	290	7	330	5	370
38	211	23	251	18	291	11	331	9	371
32	212	17	252	21	292	11	332	7	372
16	213	20	253	14	293	11	333	7	373
34	214	18	254	8	294	12	334	11	374
29	215	22	255	16	295	11	335	9	375
39	216	19	256	18	296	18	336	6	376
29	217	10	257	11	297	11	337	5	377
42	218	23	258	10	298	9	338	8	378
32	219	21	259	16	299	12	339	8	379
37	220	20	260	20	300	12	340	11	380
27	221	20	261	14	301	17	341	6	381
33	222	30	262	15	302	12	342	9	382
38	223	17	263	23	303	10	343	6	383
26	224	17	264	9	304	11	344	6	384
21	225	15	265	14	305	8	345	6	385
31	226	14	266	13	306	15	346	6	386
25	227	19	267	12	307	13	347	9	387
33	228	16	268	17	308	10	348	13	388
28	229	24	269	13	309	13	349	11	389
31	230	33	270	11	310	11	350	13	390
27	231	22	271	16	311	7	351	9	391
24	232	16	272	9	312	6	352	6	392
30	233	20	273	14	313	8	353	7	393
22	234	12	274	10	314	12	354	8	394
23	235	22	275	14	315	9	355	2	395
33	236	24	276	12	316	13	356	6	396
29	237	17	277	7	317	15	357	9	397
33	238	18	278	16	318	9	358	5	398
18	239	9	279	11	319	10	359	7	399

**Tabelle 9:** Gemessene Anzahl an Counts pro Channel 400-464.

400 – 413		414 – 427		428 – 441		442 – 455		456 – 464	
N	C	N	C	N	C	N	C	N	C
6	400	0	414	4	428	7	442	7	456
3	401	4	415	4	429	5	443	6	457
9	402	9	416	5	430	7	444	3	458
2	403	9	417	4	431	2	445	3	459
5	404	6	418	7	432	8	446	4	460
9	405	8	419	3	433	5	447	4	461
3	406	5	420	6	434	6	448	3	462
2	407	9	421	9	435	6	449	3	463
9	408	4	422	2	436	4	450	0	464
6	409	4	423	3	437	5	451	0	465
6	410	7	424	3	438	6	452	0	466
7	411	8	425	4	439	2	453	0	467
3	412	8	426	7	440	4	454	0	468
5	413	9	427	8	441	2	455	0	469

## Literatur

- [1] *Einführung in die Astroteilchenphysik*. Springer, Claus Grupen. 2018.
- [2] *Frequently used statistics formulas*. Hagerstown College. URL: <https://www.hagerstowncc.edu/sites/default/files/documents/13-statistics-packet.pdf>.
- [3] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [4] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [5] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [6] *Review of Particle Physics*. M. Tanabashi et al. (Particle Data Group). URL: <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.98.030001>.
- [7] *V01 Kosmische Myonen*. Fakultät Physik, TU Dortmund. 2021.