

JUSTUS-LIEBIG-



UNIVERSITÄT
GIESSEN

Versuch 5 des
FORTGESCHRITTENEN-PRAKTIKUMS

Myonenerfall

Versuchstermin Freitag, 31.05.2024

Praktikumsbetreuer:

Marvin Peter

marvin.peter@exp2.physik.uni-giessen.de

Protokoll von:

Frederik Uhlemann

frederik-vincent.uhlemann@physik.uni-
giessen.de

Florian Adamczyk

florian.marius.adamczyk@physik.uni-
giessen.de

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	2
1 Theorie	3
1.1 Myonen	3
1.2 Messung gestoppter Myonen	5
2 Aufbau und Messprinzip	6
2.1 Szintillator und Photomultiplier	6
2.2 elektronische Signalverarbeitung	7
2.2.1 Messprinzip der Energiemessung	7
2.2.2 Messprinzip der Zeitmessung	7
3 Auswertung der Daten	10
3.1 Energieeichung	10
3.2 Zeiteichung	13
3.3 Lebensdauerbestimmung	15
4 Fazit	19
Anhang	22

Einleitung

Das Myon, ein Teilchen der Leptonenfamilie wie das Elektron, ist aufgrund seiner kurzen Lebensdauer und seiner Fähigkeit, die Erdoberfläche zu erreichen, besonders interessant für die Hochenergiephysik. Mit einer Masse, die etwa 200 Mal größer ist als die des Elektrons, bietet das Myon spannende Möglichkeiten für physikalische Untersuchungen. Ziel des Experiments ist es, die Lebensdauer kosmischen Myonen zu bestimmen. Diese Myonen stammen aus der kosmischen Strahlung, die permanent auf die Erde trifft. Um die Lebensdauer zu messen, wird zunächst eine Energieeichung durchgeführt, bei der das Energiespektrum einer ^{60}Co -Quelle aufgenommen wird. Danach wird die Energiedeposition minimal ionisierender Myonen in einem NaI-Szintillationsdetektor ermittelt. Schließlich wird der endgültige Versuchsaufbau eingerichtet, eine Zeiteichung vorgenommen und eine Langzeitdatenaufnahme gestartet.

1. Theorie

1.1 Myonen

Das Myon ist ein Elementarteilchen im Standardmodell der Teilchenphysik, es gehört zu den Leptonen, weist eine negative Elementarladung und eine Masse von etwa $105.658 \text{ MeV}/c^2$ auf, was etwa dem 200-fachen der Elektronenmasse entspricht. Aufgrund seiner Natur als Fermion besitzt es einen Spin von $1/2$ und unterliegt sowohl der elektromagnetischen als auch der schwachen Wechselwirkung, zeigt jedoch keine starke Wechselwirkung. Das Antiteilchen des Myons ist das Antimyon, welches dieselbe Masse und Spin, jedoch eine entgegengesetzte Ladung aufweist.

Myonen entstehen hauptsächlich aus der kosmischen Strahlung, die durch Wechselwirkung hochenergetischer Protonen mit den Gasmolekülen der Erdatmosphäre erzeugt wird. Diese Kollisionen führen zur Entstehung von Pionen, die anschließend in Myonen und Myon-Neutrinos zerfallen. Aufgrund ihrer kurzen Lebensdauer von etwa $2.2 \mu\text{s}$ im Ruhesystem stellt sich die Frage, wie sie die Erdoberfläche erreichen können. Hier kommt die spezielle Relativitätstheorie ins Spiel: Durch die Zeitdilatation wird die Lebensdauer der Myonen relativ zur Erdoberfläche verlängert, sodass sie mehrere Kilometer zurücklegen können, bevor sie zerfallen. Aus Inertialsystem der Myonen betrachtet erfahren sie aufgrund der Lorentz-Kontraktion eine Längenverkürzung in Bewegungsrichtung, was ihre Wahrscheinlichkeit erhöht, die Erdatmosphäre zu durchdringen.

In Experimenten wird die Zerfallszeit der Myonen gemessen, indem die Produkte ihres Zerfalls, ein Elektron und ein Antielektron-Neutrino, detektiert werden. Für diese Messungen werden NaI- eingesetzt, die die Energiedeposition der minimal ionisierenden Myonen bestimmen.

Die zu Feynman Diagramm (siehe Abb. 1.1) gehörende Zerfallsreaktion lautet:

$$\mu_m^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\mu$$

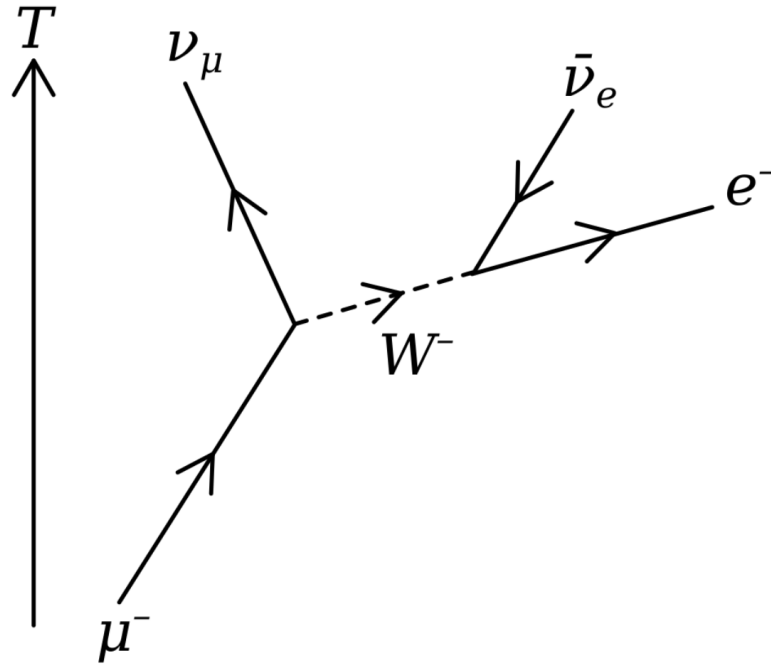


Abbildung 1.1: Feynman-Diagramm des Myonenzerfalls

Es kann auch zusätzlich ein Photon emittiert werden:

$$\mu_m^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\mu + \gamma$$

Negative Myonen sind instabile Elementarteilchen, die sowohl im Vakuum als auch in Materie zerfallen können. Im Gegensatz zu ihrem Verhalten im Vakuum haben negative Myonen in Materie einen zusätzlichen Zerfallskanal.

Ein Myon kann mit einem Atomkern wechselwirken und ein sogenanntes „myonisches Atom“ bilden. Da Myonen und Elektronen im Wesentlichen nur durch ihre Masse unterschieden werden, können sie sich auch an Atomkerne binden. Aufgrund ihrer deutlich höheren Masse sind Myonen jedoch viel stärker an den Kern gebunden. Dadurch haben sie eine etwa siebenfach höhere Wahrscheinlichkeit, sich im Kernbereich aufzuhalten.

Dies führt dazu, dass ein Myon in Materie analog zum Elektroneneinfang vom Kern absorbiert werden kann. Dabei wird ein Proton in ein Neutron umgewandelt, und ein Myonneutrino wird emittiert. Dieser zusätzliche Zerfallskanal beeinflusst die experimentell bestimmte durchschnittliche Lebensdauer von negativen Myonen in Materie, die kürzer ist als im Vakuum.

1.2 Messung gestoppter Myonen

Das Zerfallsgesetz von Myonen lautet:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N(t)$$

und die allgemeine Lösung dieses Gesetzes ist:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Die mittlere Lebensdauer ist die Zeit τ , nach dem voraussichtlich noch $1/e$ Teilchen der Anfangsmenge N_0 übrig sind.

Setzt man das in das Zerfallsgesetz ein, erhält man:

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} = \tau \cdot \ln(2)$$

Um Myonen zu detektieren, werden sie in einem Natriumiodid (NaI)-Detektor eingefangen, und die Zerfallsprodukte werden gemessen. Die Grenzenergie, bei der Myonen in einem 10 cm dicken NaI-Material gestoppt werden können, lässt sich aus Abbildung 7 in der Anleitung [1] ablesen.

Die Dichte des NaI-Materials beträgt $\rho = 3.67 \text{ g/cm}^3$, was einer Dicke von $l = 10 \text{ cm}$ entspricht ($\rho_l = 36.7 \text{ g/cm}^2$). Myonen, deren Reichweite (durch ihre Energie bestimmt) über diesem Wert liegt, werden nicht mehr gestoppt. Diese Reichweite wird als Grenzenergie definiert. Abbildung 7 zeigt, dass diese Reichweite für eine Grenzenergie von etwa E_{max} 90 MeV bis 100 MeV erreicht wird.

Der Begriff „minimal ionisierend“ bezieht sich auf Teilchen, die genau den Impuls aufweisen, bei dem die Änderung der übertragenen Energie pro zurückgelegter Strecke minimal ist. Die Analyse von Abbildung 6 in der Anleitung verdeutlicht, dass dieses Minimum im Bereich von 200 GeV/c bis 300 GeV/c liegt und einen Wert von 1.2 MeV g^{-1} bis 1.3 MeV g^{-1} erreicht.

2. Aufbau und Messprinzip

2.1 Szintillator und Photomultiplier

In diesem Experiment werden die kosmischen Myonen wie im vorangestellten Kapitel 1.2 mittels eines Szintillationsdetektors gemessen. Wie dadurch ein messbares Signal entsteht, soll im Folgenden kurz erläutert werden.

Wenn geladene Teilchen, wie das Myon, durch den Natriumiodid-Kristall fliegen, regen diese die Elektronen in den Hüllen der Atome im Kristall an und heben sie damit auf ein höheres Energieniveau. Im Kristall werden somit Elektronen und Löcher freigesetzt, wenn diese sofort rekombinieren würden, würde ein hochenergetisches Photon entstehen, dieses hätte die gleiche Abregungsenergie wie die Anregungsenergie von NaI , damit kann es nicht im Szintillator gemessen werden.

Die Lösung ist, dass der Kristall dotiert wird, bei NaI typischerweise mit Thallium. Dadurch werden zusätzliche Energieniveaus in dem Kristall hinzugefügt. So wandern die Elektronen und Löcher über diese Niveaus zu den sogenannten Lumineszenzzentren. Dieses angeregte Zentrum regt sich über die Aussendung von optischen Photonen ab. Diese haben nun deutlich geringere Energien im sichtbaren oder UV-Bereich und können durch den Kristall zum Photomultiplier wandern.

Wenn ein optisches Photon auf die Photokathode des Photomultipliers trifft, kann durch den Photoeffekt ein Photoelektron entstehen. Dieser Prozess ist abhängig von der Quanteneffizienz des Anoden Materials, das bedeutet nicht jedes Photon erzeugt ein Photoelektron. Falls ein Elektron entstanden ist, wird es auf eine Elektrode gelenkt, trifft es auf diese sogenannten Dynode, schlägt es weitere Elektronen heraus. Diese treffen erneut auf eine weitere Dynode, der Prozess wiederholt sich einige Male. So entstehen durch ein Schneeballsystem viele Elektronen, die dadurch entstehende Ladung kann gemessen werden.

2.2 elektronische Signalverarbeitung

2.2.1 Messprinzip der Energiemessung

In der ersten Messung wird das Gammaspektrum einer Cobalt-60 Quelle aufgezeichnet. Der verwendete Messaufbau ist in der Abbildung 2.1 schematisch dargestellt. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, gibt der Photomultiplier ein Signal aus, dieses ist negativ. Der Hauptverstärker invertiert das Signal und gibt es dann dem Analog-Digital-Umwandler. Mit diesem kann der Computer ein Histogramm speichern. Der verwendete ADC hat 8064 Kanäle.

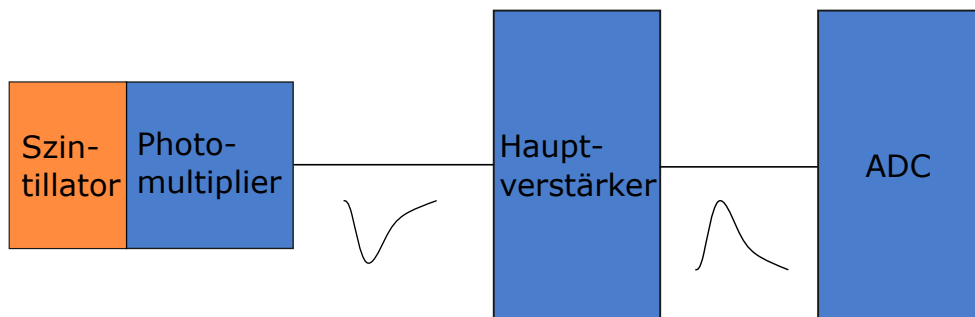


Abbildung 2.1: Messprinzip der Energiemessung, simpler Aufbau aus Szintillator mit PMT, Verstärker und ADC

2.2.2 Messprinzip der Zeitmessung

Das Prinzip der Zeitmessung besteht darin, die Myonen im Szintillator vollständig zu stoppen und dann die Zeit bis zu ihrem Zerfall zu bestimmen. Durch die Zeitdifferenz kann die Lebensdauer bestimmt werden. Wenn ein Signal detektiert wird, ist nicht klar, ob es ein Start- oder Stoppsignal eines Myons war. Deshalb gilt jedes Signal sowohl als Start und Stopp gleichzeitig. In der Abbildung 2.2 ist der Aufbau zu sehen. Durch eine Verzögerung von 150 ns kommt das Startsignal nach dem Stoppsignal im Time-to-Pulse-Height-Converter (TPC) an. Der TPC liefert ein Signal, welches proportional zur Zeitdifferenz zwischen Start und Stopp ist. Mithilfe dieser Differenz kann die Lebensdauer ermittelt werden.

Der vollständige Messaufbau mit allen Komponenten ist in 2.3 abgebildet; im Gegensatz zum prinzipiellen Aufbau aus Abbildung 2.2, sind elektronische Komponenten hinzugekommen. Wie zum Beispiel ein Timing Filter Amplifier (TFA), dieser

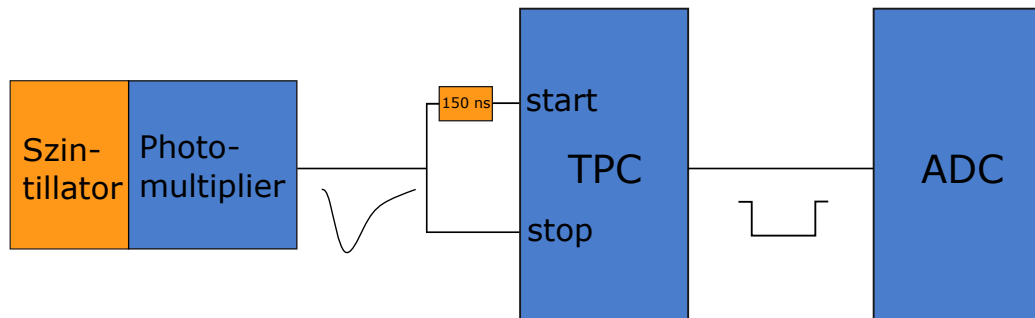


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau der Zeitmessung: Jedes Signal wird als Start- und Stoppsignal verwendet, wobei dem Start ein Delay hinzugefügt wird

verstärkt das Signal, ohne es stark zu verzerren. Der erste Diskriminator soll den natürlichen radioaktiven Untergrund abschneiden. Das 150 ns verzögerte Signal wird in einem weiteren Diskriminator wieder zum guten Rechtecksignal verarbeitet, weil es durch die lange Kabelführung im Delay verzerrt wird. Der TPC welcher die Zeitdifferenz von Start und Stopp ermittelt, gibt zusätzlich zu seiner grundsätzlichen Arbeitsweise noch ein logisches Signal bei jedem *Start* aus. Dieses wird an einen Scaler gegeben, welcher einfach die Ereignisse zählt.

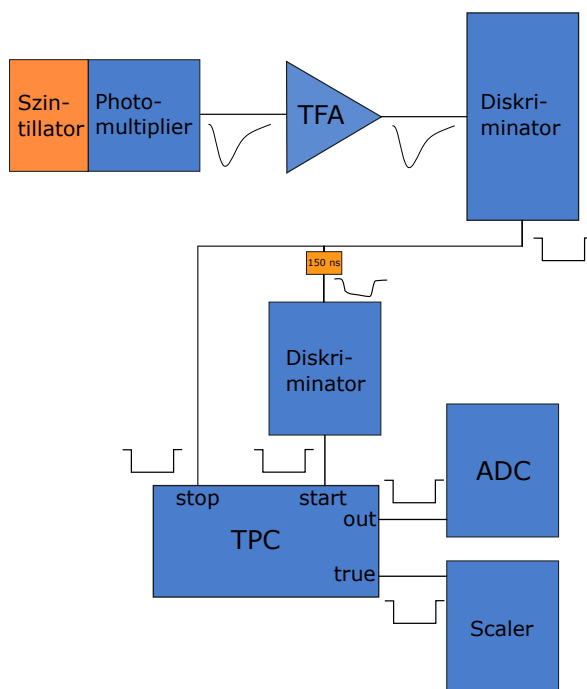


Abbildung 2.3: Vollständiger schematischer Messaufbau

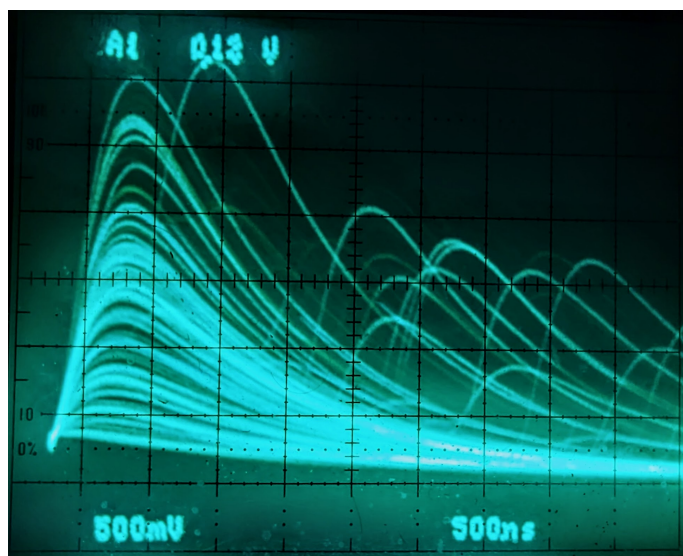


Abbildung 2.4: Hier erkennt man im Oszilloskopdisplay die einzelnen Ausschläge der energetischen kosmischen Teilchen

3. Auswertung der Daten

3.1 Energieeichung

Zu aller erst soll sich mit dem Versuchsaufbau vertraut gemacht werden. Hierfür wird das Energiespektrum einer ^{60}Co -Probe aufgenommen. Der verwendete Messaufbau wurde im Kapitel 2.2.1 erläutert. Das ermittelte Spektrum ist in Abbildung 3.1 dargestellt, das Spektrum ist zweimal abgebildet, wobei das untere mit logarithmischer y-Achse dargestellt ist.

Es sind die beiden typischen Gammapeaks bei 1173.2 keV und 1332.5 keV erkennbar, zusätzlich ist gerade in der logarithmischen Darstellung, gut der Summenpeak dieser beiden zu erkennen. Mithilfe der Kenntnis über die ungefähre Lage des Summenpeaks aus Kapitel 1.2, soll der Verstärker so eingestellt werden, dass ein Energiebereich für die minimal ionisierenden Myonen gewählt wird, da diese das Ziel der eigentlichen Messung sind. Der gesamte Energiebereich ist in Abbildung 3.2 zu erkennen, dieser ist erneut logarithmisch aufgetragen. In [5] befinden sich die Energieeinträge der kosmischen Myonen. Da sie eine hohe Energie besitzen und nur durch eine relativ dünne Schicht zur Ionisation fliegen, sollte ihr Energiedeposit einer Landau-Verteilung entsprechen.

Deshalb wurde in Abbildung 3.3, das Energiespektrum im entsprechenden Bereich erneut geplottet. Zudem wurden jeweils 16 Kanäle zu einem zusammengefasst, sodass nur noch 512 übrig bleiben, weil es sehr wenige Einträge pro Kanal gibt. Qualitativ wurde eine Landau-Verteilung an die Daten gefittet; quantitative Werte können ohne eine komplette Energieeichung nicht angegeben werden. Die Verteilung passt sich gut an die Daten, auf der linken Seite des Spektrums sind vermutlich noch Resteffekte von radioaktiver Strahlung erkennbar.

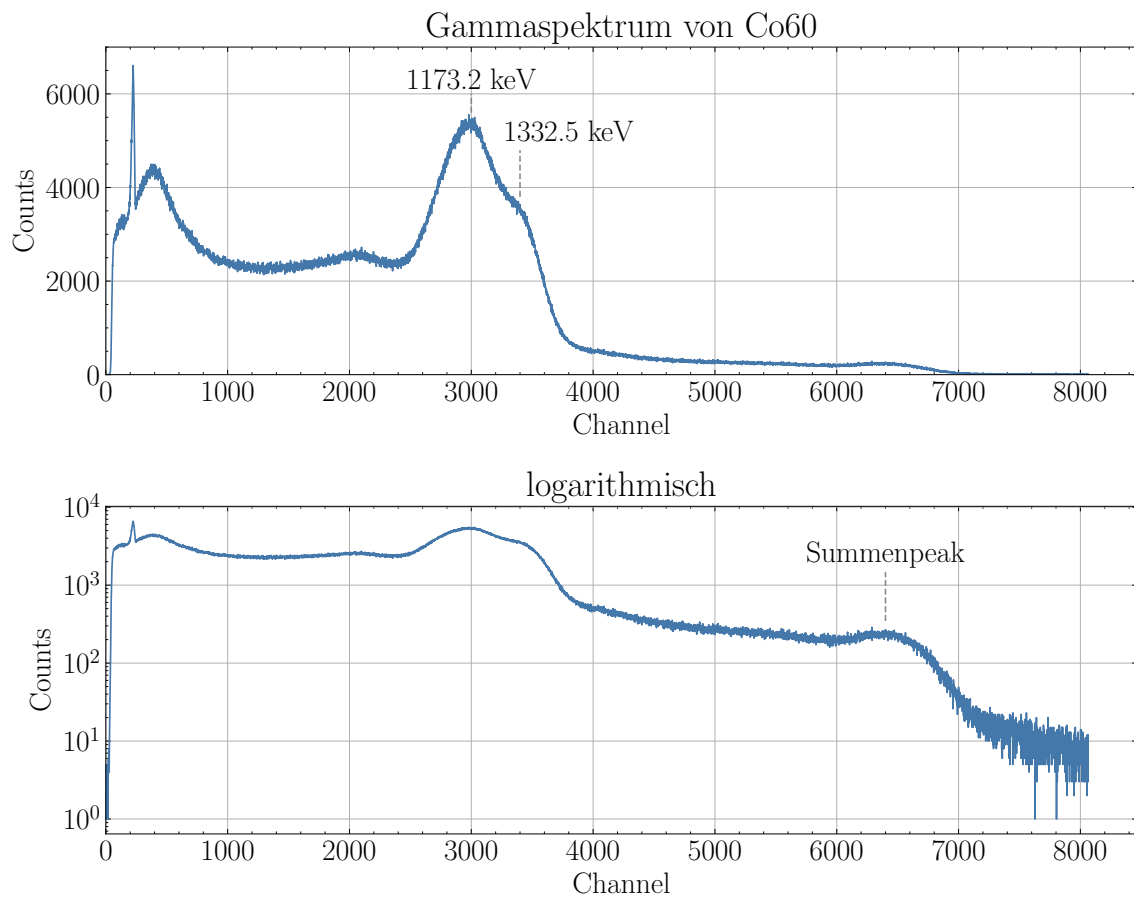


Abbildung 3.1: Gammaspektrum der ^{60}Co -Probe, es lassen sich die zwei Gamma Peaks erkennen, in der logarithmischen Darstellung, ist auch der Summenpeak deutlich sichtbar

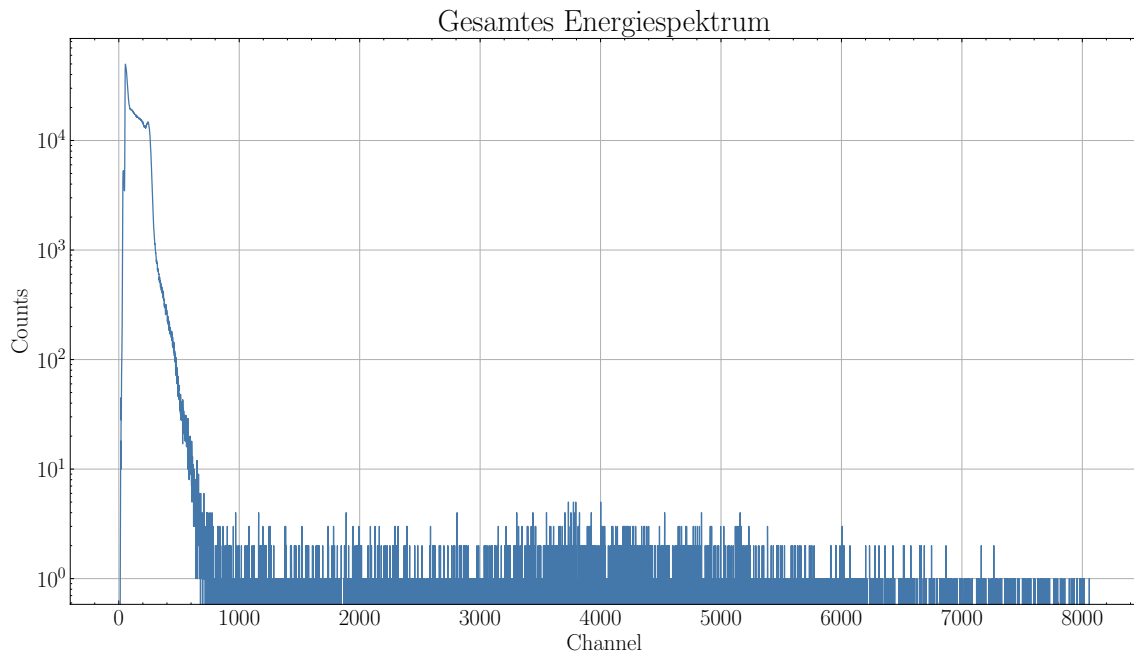


Abbildung 3.2: Gesamtes Energiespektrum, welches während der Zeitmessung verwendet wird

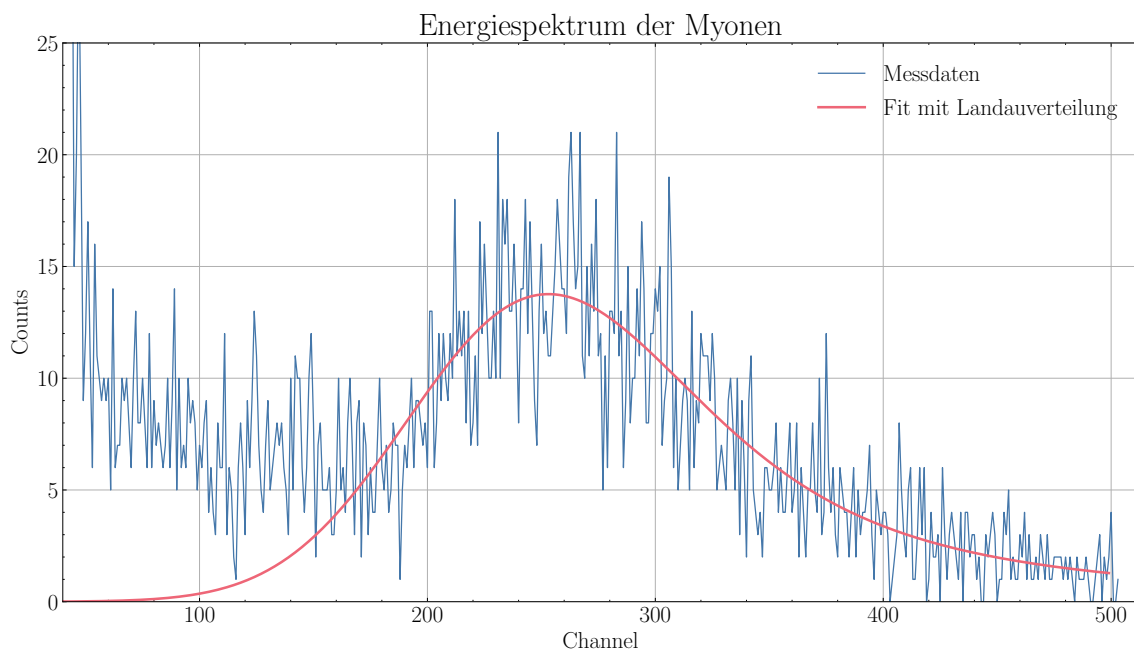


Abbildung 3.3: Energiedepositspektrum der kosmischen Myonen im Szintillator, mit einer qualitativer Landauverteilung

3.2 Zeiteichnung

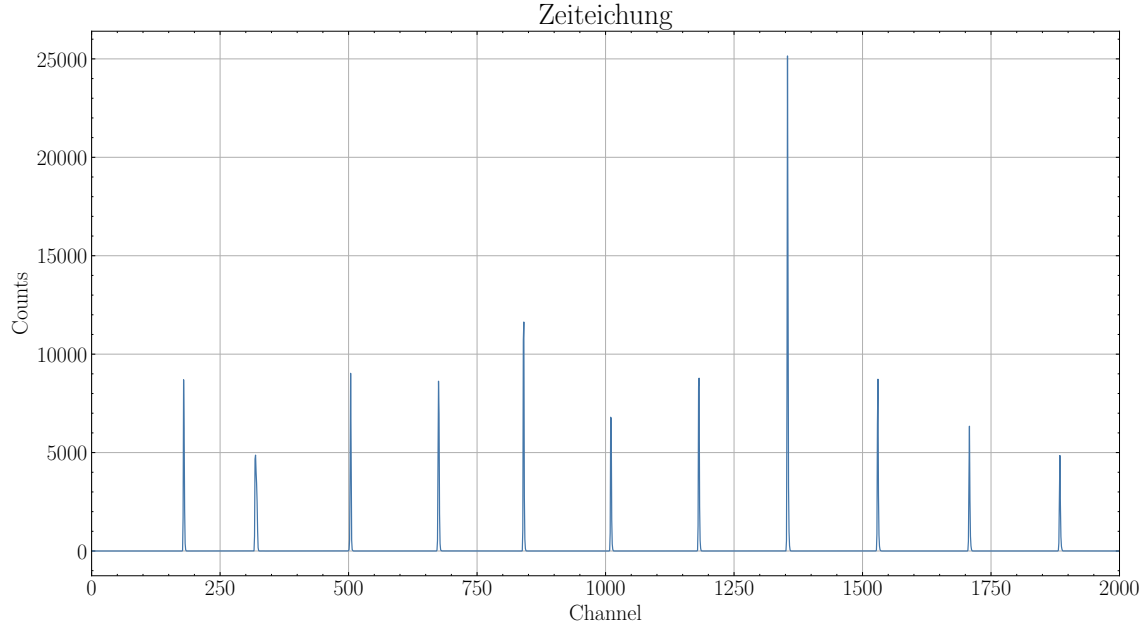


Abbildung 3.4: Spektrum der Zeiteichnung, zu sehen sind die einzelnen Peaks für die jeweiligen Verzögerungen, angefangen bei 300 ns und in 150 ns Schritten bis 1800 ns

Der ADC gibt lediglich Kanäle an den Computer; diese müssen mittels einer Zeiteichnung in Zeitwerte [s] umgerechnet werden. Dafür werden bekannte Verzögerungen vor dem Stoppsignal in die Messstrecke eingebaut. Im aufgenommenen Spektrum 3.4 sind die Zeitpeaks für die jeweiligen Verzögerungen erkennbar.

Diese Messdaten haben einen statistischen Fehler; dies hat zur Folge, dass die Messdaten gaußverteilt sind. Die Gaußverteilung ist gegeben durch:

$$f(x) = A \cdot \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.1)$$

Wobei A die Höhe des Peaks ist, μ die Lage, beziehungsweise der Erwartungswert und σ die Standardabweichung. Die Ereignisse für den Erwartungswert der Kanallagen für die Fits sind in Tabelle 3.1 aufgelistet. Die Fits mit allen Parametern sind im Anhang des Protokolls zu finden: 4.1. Zwischen dem Kanal und der bekannten Verzögerung besteht ein linearer Zusammenhang. Diese lineare Funktion wurde mittels einer gewichteten linearen Regression ermittelt, anzumerken sei, dass die Fehler der Kanallagen sehr klein sind, sodass sie kaum einen Einfluss auf den Fit haben 3.5. Damit besteht nun folgender Zusammenhang zwischen Zeitdifferenz Δt

Verzögerung [ns]	Kanallage mit Fehler
300	179.365 ± 0.032
450	319.563 ± 0.143
600	503.994 ± 0.005
750	675.221 ± 0.017
900	840.574 ± 0.014
1050	1010.521 ± 0.014
1200	1181.558 ± 0.014
1350	1354.155 ± 0.020
1500	1529.726 ± 0.017
1650	1707.906 ± 0.021
1800	1883.973 ± 0.023

Tabelle 3.1

und dem Kanal K :

$$\Delta t(K) = (0.875\,551 \pm 0.000\,008) \text{ ns} \cdot K + (159.529\,662 \pm 0.007\,652) \text{ ns} \quad (3.2)$$

Die Fehler der Eichung sind sehr klein, was an der hohen Zahl von Eichpunkten liegen kann.

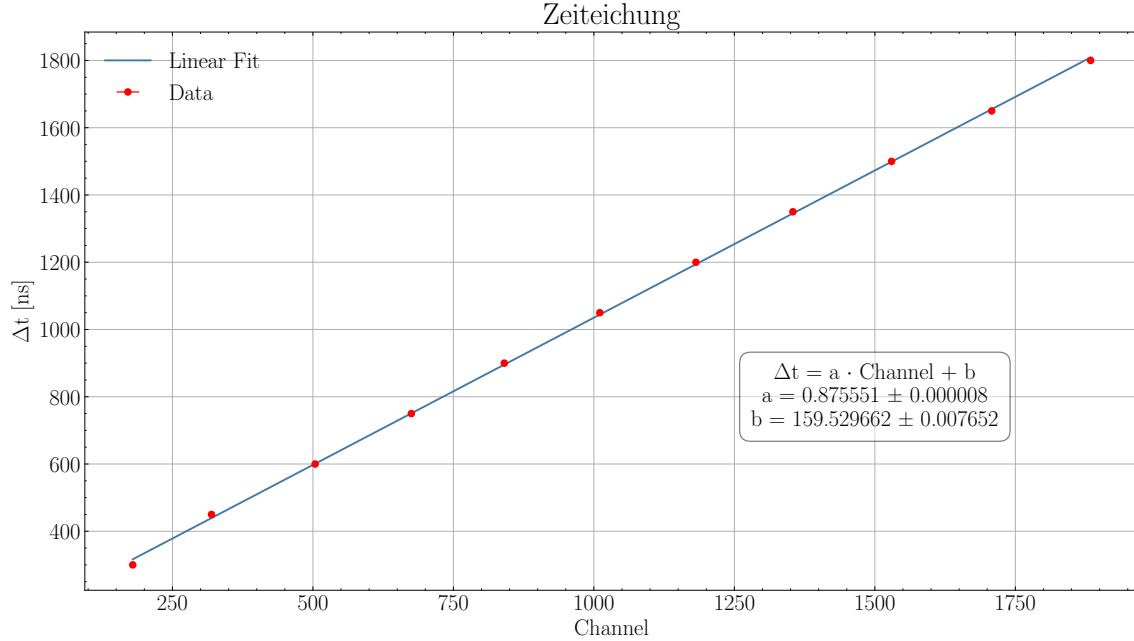


Abbildung 3.5: Gewichteter linearer Fit der Kanallagen zu den Verzögerungen, wobei die Fehler der Kanallagen sehr klein sind und deshalb nicht im Plot erkennbar sind

3.3 Lebensdauerbestimmung

Nach den beiden beschriebenen Eichprozessen, kann die eigentliche Langzeitmessung beginnen. Start der Messung war am 31.05.2024 um 13:45, beendet wurde die Messung 24 Tage später am 24.06.2024 um 13:52. Daraus folgt eine Messdauer von:

$$T_{ges} = 2\,074\,020\text{ s} \quad (3.3)$$

Dabei sind insgesamt 4.486550 Mio. Myonen durch den Szintillator geflogen, aber nur 9643 von diesen, sind als im Szintillator feststeckendes Ereignis aufgezeichnet wurden.

- $N_{ges} = 4.487E6$
- $N_{mess} = 9643$

Wie schon mal beschreiben hat der ADC 8064 Kanäle, diese feine Auflösung, führt dazu, dass in den hinteren Kanälen keine oder sehr wenige Einträge sind, da die Messergebnisse exponentiell abfallen. Die Lösung ist das sogenannte *rebinning*, hierfür werden mehrere Kanäle zu einem neuen Zusammengefasst, ihrer Einträge dafür addiert. Es wurde in dieser Auswertung die Binning 128, 144 und 168 ausprobiert wobei

letztendlich der Faktor 144 gewählt wurde. Dieses Binning lieferte das genaueste Ergebnis. Dadurch wird die Messung auf 56 Bins reduziert, keiner der neuen Bins hat den Eintrag null.

Diese Bins haben einen statistischen Fehler, dieser ermittelt sich gerade aus der Quadratwurzel ihrer Einträge \sqrt{N} . Zudem muss die im vorherigen Kapitel ermittelte Zeiteichung angewandt werden, sodass den Bins Zeitwerte zugeordnet werden können. Dafür wird die ermittelte lineare Zeiteichung auf die Kanäle angewandt, wichtig hierbei ist, dass die neue Binbreite beachtet wird. Weil die Eichung für 8064 Kanäle durchgeführt wurde, muss nun noch mit dem Faktor 144 Multipliziert werden, damit die richtigen Zeitwerte ermittelt werden können. Der Fehler dieser Eichung wird vernachlässigt, weil er um viele Größenordnungen kleiner ist, als der statistische Fehler der jeweiligen Bineinträge.

Zuletzt muss das Ereignis betrachtet werden, dass es passieren kann, dass zwei voneinander unabhängige Myonen ein Zeitsignal auslösen, weil sie in einem sehr kurzen Abstand durch den Detektor fliegen. Ermittelt kann dieser Effekt mittels der Poisson-Statistik, sie gibt an, wie Wahrscheinlich es ist, dass Ereignisse unabhängig voneinander in einem Zeitintervall geschehen. Der hier relevante, zu betrachtende Fall ist, wie hoch die Wahrscheinlichkeit für mindestens ein unabhängiges Ereignis in einem Zeitintervall ist:

$$P_{\mu}(\Delta t, n \geq 1) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\mu \Delta t)^n}{n!} e^{-\mu \Delta t} = 1 - e^{-\mu \Delta t} \quad (3.4)$$

Dabei ist Δt das zu betrachtende Zeitintervall, dieses entspricht der Breite eines Kanals, nach dem *rebinning* ist ein Kanal 112 ns Breit, zudem ist μ die mittlere Ereignisrate, sie bestimmt sich folgendermaßen:

$$\mu = \frac{\text{Ereignisse}}{\text{Messzeit}} = \frac{N_{ges}}{T_{ges}} = \frac{4.5E6}{2074020 \text{ s}} = 2.163 \text{ s}^{-1} \quad (3.5)$$

Damit bestimmt sich die Wahrscheinlichkeit zu:

$$P_{\mu}(\Delta t, n \geq 1) = 1 - e^{-\mu \Delta t} = 2.727E-07 \quad (3.6)$$

Aus dieser Wahrscheinlichkeit, kann mit der Anzahl aller Ereignisse die Anzahl an benötigten Untergrundereignissen berechnet werden:

$$N_{Poiss} = N_{ges} \cdot P_{\mu}(\Delta t, n \geq 1) = 0.464 \quad (3.7)$$

Dies bedeutet im Durchschnitt, sind jedem Bin 0.46 Einträge dem Untergrund zuzuordnen, diese Anzahl wird jedem Eintrag abgezogen. Dies ist im Vergleich zu den jeweiligen Einträgen der Bins ein geringer Untergrund. Die Daten, mit den gerade erläuterten Bearbeitungsschritten sind in Abbildung 3.6 aufgetragen.

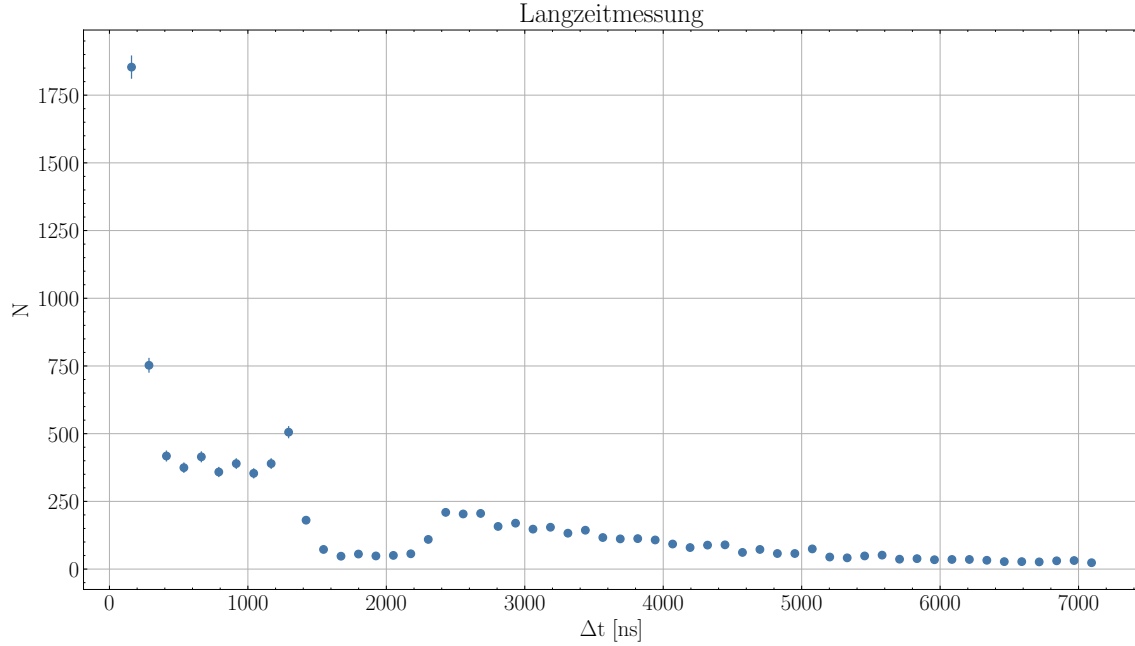


Abbildung 3.6: Daten der Langzeitmessung mit, *rebinning*, statistischen Fehler, Zeitskalierung und dem Abzug des Poisson-Untergrunds

Wie im Theorieteil beschrieben folgen die Messdaten einer Exponentialfunktion, in Abbildung 3.6, ist zu erkennen, dass solch eine Funktion sinnvoll erst ab einer Zeitdifferenz von etwa 2400 ns gefittet werden kann. Dadurch verschlechtert sich die Statistik, von den ursprünglichen 9643 Einträgen, kann nur an etwa 2799 gefittet werden. Es wird folgende Funktion mit einem gewichteten Fit verwendet:

$$N(\Delta t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \Delta t} \quad (3.8)$$

Das Ergebnis des Fits ist in Abbildung 3.7, sowohl mit linearer Achse, als auch logarithmisch aufgetragen. Die Konstante λ hat den Wert $(4.900 \pm 0.166) \times 10^{-4} \text{ ps}$. Die mittlere Lebensdauer lässt sich einfach durch ihr reziprokes bestimmen:

$$\tau_{exp} = \frac{1}{\lambda} = (2040.702 \pm 68.934) \text{ ns} \quad (3.9)$$

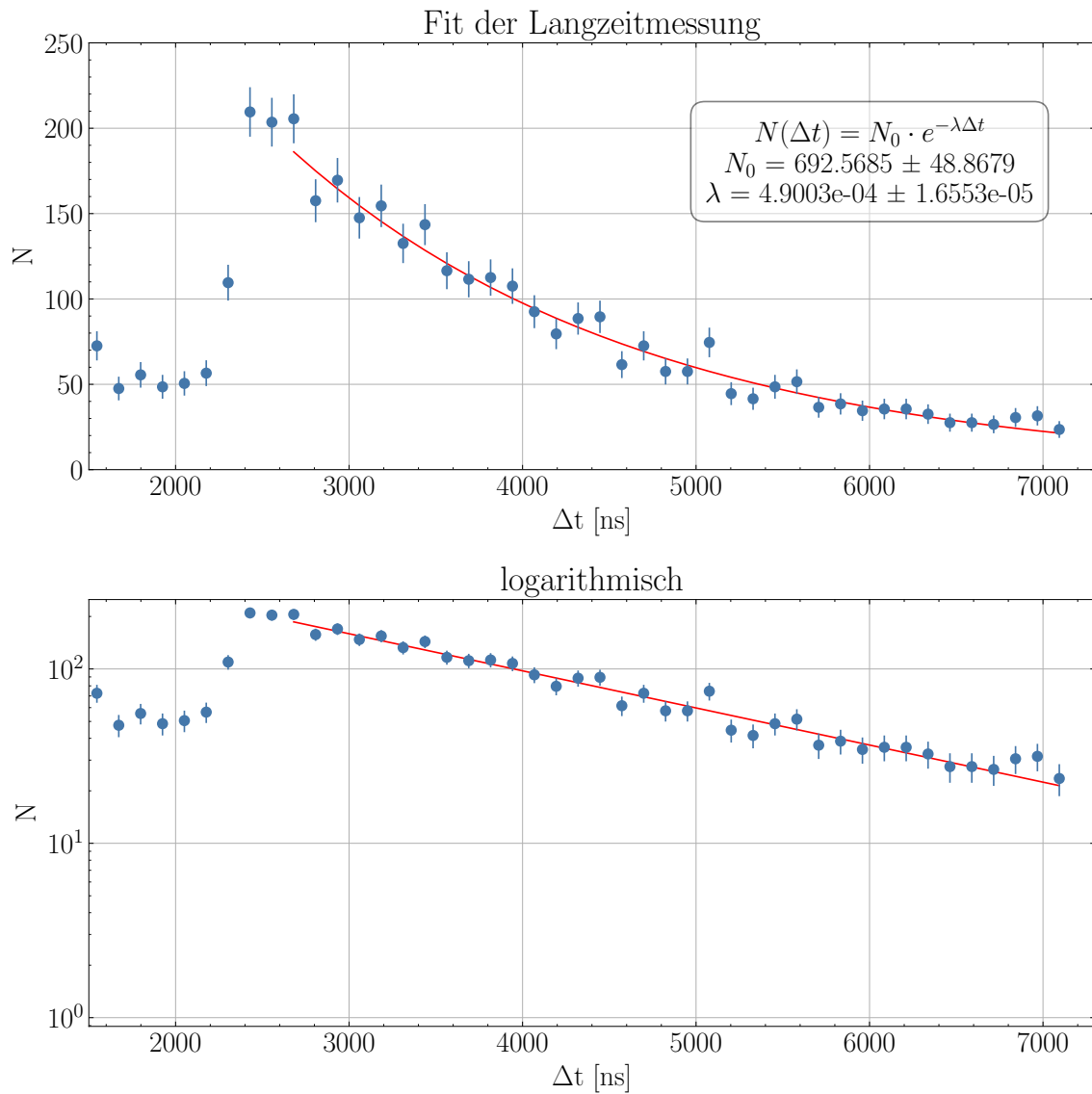


Abbildung 3.7: exponentieller gewichteter Fit des ausgewählten Bereichs für die Datenpunkte, unten auch in logarithmischer Darstellung

4. Fazit

In diesem Versuch konnte die Lebensdauer von Myonen aus der kosmischen Strahlung relativ genau bestimmt werden. Die in dieser Messung ermittelte Lebensdauer von $\tau_{exp} = 2.04 \mu\text{s}$ weicht um etwa 7.11 % von dem Literaturwert $\tau_{lit} = 2.196 \mu\text{s}$ ab. Leider liegt der Literaturwert nicht im Fehlerbereich der Messung. Dies könnte an fehlender Statistik liegen, auch wenn unsere Messdaten einen Zeitraum abbilden der mehr als doppelt so lang ist wie in der Anleitung [1] empfohlen. Trotzdem hat der längere Messzeitraum die Genauigkeit des Ergebnisses Erheblich erhöht. Um noch genauere Ergebnisse zu erhalten wäre eventuell eine noch längere Messdauer oder empfindlichere Szintillationsdetektoren vonnöten.

Zusammenfassend zeigt der Versuch trotz der Abweichungen, dass die experimentellen Methoden zur Bestimmung der Myonenlebensdauer grundsätzlich geeignet sind und mit entsprechenden Anpassungen und Verbesserungen noch präzisere Ergebnisse liefern können. Die gewonnenen Erkenntnisse bieten eine solide Grundlage für weiterführende Untersuchungen und Experimente im Bereich der Teilchenphysik.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Feynman-Diagramm des Myonenzerfalls	4
2.1	Messprinzip Energiemessung	7
2.2	Schematischer Aufbau der Zeitmessung	8
2.3	schematischer Messaufbau	9
2.4	Oszilliskop	9
3.1	Gammspektrum der ^{60}Co -Probe	11
3.2	Energiespektrum	12
3.3	Energiedepositspektrum	12
3.4	Spektrum der Zeiteichung	13
3.5	linearer Fit der Kanallagen	15
3.6	Langzeitmessung	17
3.7	Fit der Langzeitmessung	18
4.1	Übersicht der Gaußfits	22

Literaturverzeichnis

- [1] Dr. Hans Georg Zaunick, Stefan Diehl. „Bestimmung der Lebensdauer von Myonen“. Überarbeitete und aktualisierte Version. Aus: II. Physikalisches Institut Uni Gießen (2024).
- [2] Pdg. (2024) pdgLive. Retrieved June 24, 2024, from <https://pdglive.lbl.gov/Particle.action?node=S004&init=0>
- [3] Griffiths, D. (2008). Introduction to Elementary Particles. Wiley-VCH.
- [4] Amsler, C. et al. (2008). Review of Particle Physics. Physics Letters B, 667(1-5), 1-1340.
- [5] Nakamura, K. et al. (2010). Review of Particle Physics. Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 37(7A), 075021.
- [6] Beringer, J. et al. (2012). Review of Particle Physics. Physical Review D, 86(1), 010001.
- [7] Leo, W. R. (1994). Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach. Springer Science & Business Media.

Anhang

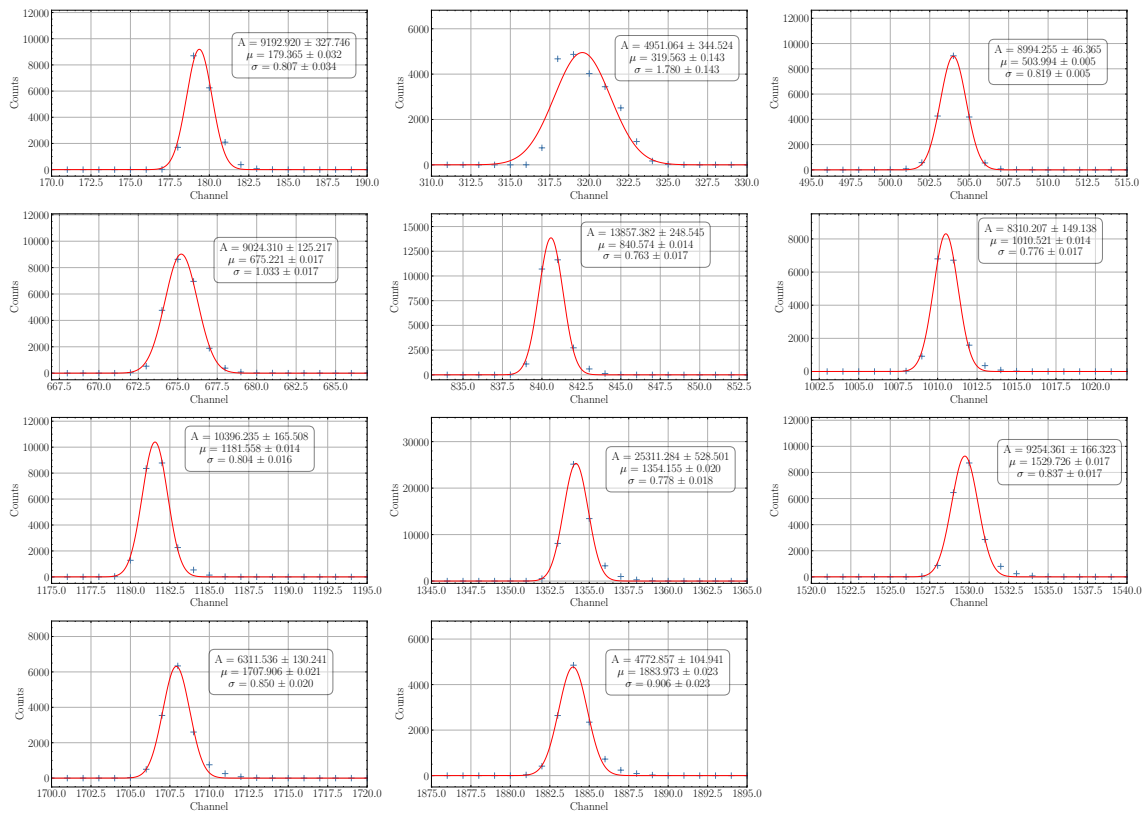


Abbildung 4.1: Gaußfits der einzelnen Zeitmessungen für die Zeiteichung