

Praktikum V - Kern- und Teilchenphysik
Versuch 518 - Höhenstrahlung

Tom Chelius und Alican Özcagi

07. Mai 2025

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Theorie	3
2.1	Kosmische Strahlung	3
2.2	Energieverlust von Teilchen in Materie	5
2.3	Szintillator und Photomultiplier	6
2.4	Logische Schaltung: Diskriminator, Koinzidenz-Module und FPGA	7
2.5	Zufallskoinzidenz	8
3	Druchführung	8
3.1	Winkelverteilung	8
3.2	Lebensdauer	11
4	Auswertung	14
4.1	Winkelverteilung	14
4.2	Lebensdauer des Myon	19
5	Fazit	22
6	Anhang	24
6.1	LABView-Programm	24
	Literatur	32

1 Einleitung

Die Höhenstrahlung ist eine Form von ionisierender Strahlung, die in der Erdatmosphäre vorkommt. Sie besteht hauptsächlich aus hochenergetischen Teilchen, die aus dem Weltraum auf die Erde treffen. Diese Teilchen können Protonen, Elektronen und Atomkerne sein, die mit sehr hohen Geschwindigkeiten reisen. Die Höhenstrahlung entsteht durch verschiedene astrophysikalische Prozesse, wie z.B. Supernova-Explosionen und die Wechselwirkung von kosmischer Strahlung mit der Erdatmosphäre. In diesem Versuch werden wir die Höhenstrahlung auf seine Winkelverteilung untersuchen. Außerdem werden wir die Lebensdauer der kosmischen Myonen bestimmen.

2 Theorie

Um diesen Versuch verstehen zu können, ist es wichtig, die Grundlagen der Höhenstrahlung und der Teilchen zu kennen, sowie die Messinstrumente die wir verwenden werden.

2.1 Kosmische Strahlung

Die kosmische Strahlung besteht aus hochenergetischen Teilchen, die aus verschiedenen Quellen stammen. Sie kann hauptsächlich in 3 Kategorien unterteilt werden:

- Teilchen die aus der Sonne stammen (Sonnenstrahlung) \approx etwa 1 GeV
- Teilchen die aus dem interstellaren Raum stammen (Galaktische Strahlung) \approx ab 1 GeV
- Teilchen die aus dem intergalaktischen Raum stammen (Extragalaktische Strahlung) \approx bis 10 EeV

Die Teilchen die auf die Erdatmosphäre treffen, sind hauptsächlich Elektronen, Photonen, Protonen und vollständig ionisierte Kerne. Je nach Quelle sind die Energien der Teilchen unterschiedlich. Die kosmische Strahlung wird in primäre und sekundäre Strahlung unterteilt. Die primäre Strahlung sind die Teilchen die direkt aus dem Weltraum auf die Erde treffen. Die sekundäre Strahlung sind die Teilchen die durch die Wechselwirkung der primären Strahlung mit der Erdatmosphäre entstehen. Diese Entstehung der sekundären Strahlungen wird als Teilchenschauer bezeichnet, weil aus einem primären Teilchen viele sekundäre Teilchen entstehen. Sie wird aus den folgenden Prozessen gebildet:

- **Kernreaktion:** Die Primäre Strahlung trifft auf die Atomkerne der Erdatmosphäre und erzeugt Sekundäre Teilchen.
- **Teilchenschauer:** Die Sekundären Teilchen erzeugen weitere Sekundäre Teilchen, die sich in alle Richtungen ausbreiten.

- **Ionisation:** Die Sekundären Teilchen ionisieren die Luftmoleküle und erzeugen weitere Elektronen.

Diese Teilchenschauer bestehen aus 3 Bereichen, wie in der Abbildung 1 dargestellt.

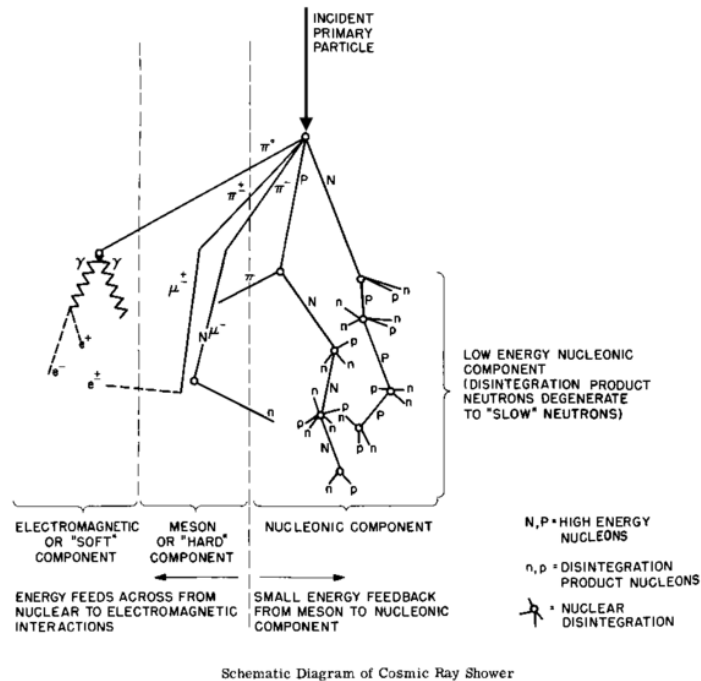


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Teilchenschauers [4]

- Elektomagnetische-Komponente: Diese besteht aus Photonen und Elektronen und wird die „Softe“ Komponente genannt.
- Mesonen-Komponente: Diese besteht aus Myonen und wird die „Harte“ Komponente genannt.
- Nukleonen-Komponente: Diese besteht aus Protonen und Neutronen.

Die Teilchen die wir auf der Erdatmosphäre messen, sind hauptsächlich Myonen, da diese die Teilchen sind die mit am weitesten in die Erdatmosphäre eindringen können und noch in hohen Quantitäten vorhanden sind. In der Abbildung 2 ist der vertikale Fluss zur atmosphärischen Eindringtiefe und zur Höhe der Erdoberfläche dargestellt.

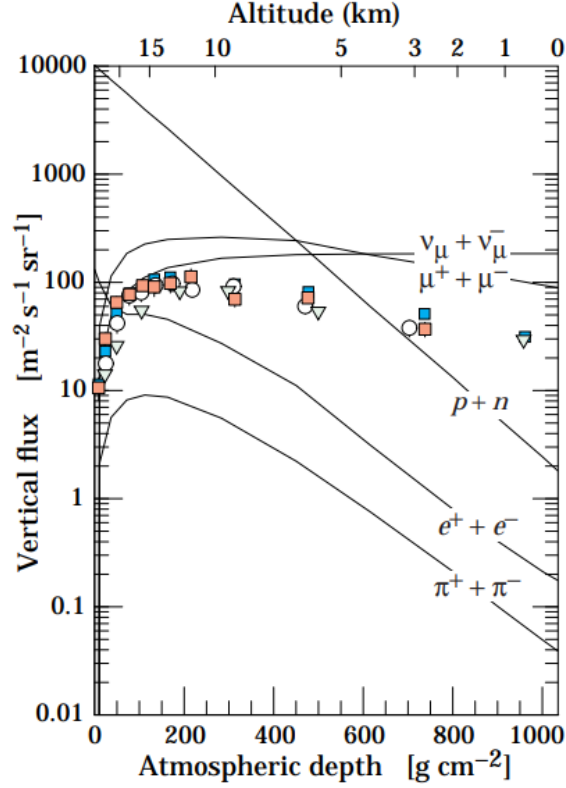


Abbildung 2: Vertikaler Fluss zur atmosphärischen Eindringtiefe [1]

2.2 Energieverlust von Teilchen in Materie

Durch die Wechselwirkung der Teilchen mit der Materie verlieren sie Energie. Der mittlere Energieverlust eines Teilchens in Materie wird durch die Bethe-Bloch-Gleichung ([3]) beschrieben.

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n z^2}{m_e c^2} \cdot \frac{e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2} \cdot \frac{1}{\beta^2} \cdot \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{I \cdot (1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 \right]$$

Dabei ist E die Energie des Teilchens, x die Wegstrecke in der Materie, m_e die Masse des Elektrons, c die Lichtgeschwindigkeit, Z die Ordnungszahl des Materials, A die Massenzahl des Materials, e die Elementarladung, ϵ_0 die elektrische Feldkonstante, $\beta = \frac{v}{c}$ die Geschwindigkeit des Teilchens relativ zur Lichtgeschwindigkeit und I die Ionisationsenergie des Materials.

Die Bethe-Bloch-Gleichung zeigt, dass der Energieverlust von der Geschwindigkeit des Teilchens, der Ordnungszahl des Materials und der Ionisationsenergie des Materials abhängt. Da aber der Energieverlust von Teilchen in Materie ein

statistischer Prozess ist, wird seine Verteilung durch die Landau-Verteilung ([5]) beschrieben.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Dabei ist μ der Mittelwert und σ die Standardabweichung der Verteilung. Wie in der Abbildung 3 zu erkennen ist der Verlauf der Landau-Verteilung nicht symmetrisch, sondern hat einen langen Schwanz in Richtung höherer Energieverluste.

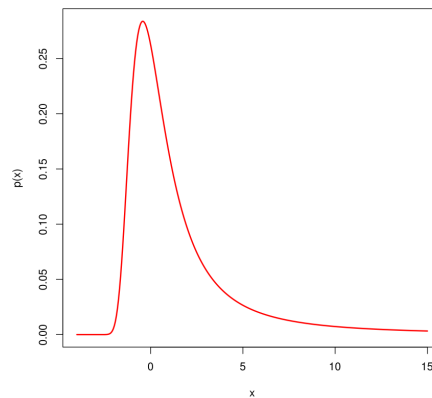


Abbildung 3: Landau-Verteilung [5]

2.3 Szintillator und Photomultiplier

Szintillationsdetektoren basieren auf ausgesendeten Lichtteilchen (Photonen). Ionisierende Strahlung trifft auf das szintillierende Material und erzeugt durch Ionisation eine Kaskade an Elektron-Loch-Paaren. Dies geschieht durch Prozesse, wie im Abschnitt „Materie und Photonen Wechselwirkung“ beschrieben. Die herausgelösten Elektronen überwinden somit die Bandlücke und landen im Leitungsband. Dort sind sie (sowie ihre hinterlassenen Löcher) als frei bewegliche Ladungen delokalisiert und können an anderer Stelle auf aktive Zentren stoßen. Diese aktiven Zentren kommen von der Dotierung mit einem anderen Material (hier Thallium) in unser Gitter. An diesen aktiven Zentren können sich die Elektron-Lochpaare über ein anderes Energieniveau lumineszierend abbauen, wobei Photonen im nahen bis sichtbaren Bereich ausgesendet werden. Wir verwenden in dem Versuch einen Natrium-Iod-Szintillationsdetektor den wir kurz NaI-Detektor nennen.

Der beschriebene Prozess ist auch nochmal in der Abbildung 4 dargestellt.

In dem Photomultiplier lösen die Photonen dann Elektronen aus der Photokathode. Eine Verstärkung wird über ein Dynodensystem realisiert. Hierbei gilt eine Dynode als Kathode, während die nächste als Anode wirkt und zwischen jedem Dynodenpaar wird das Signal verstärkt. Veranschaulicht wird der

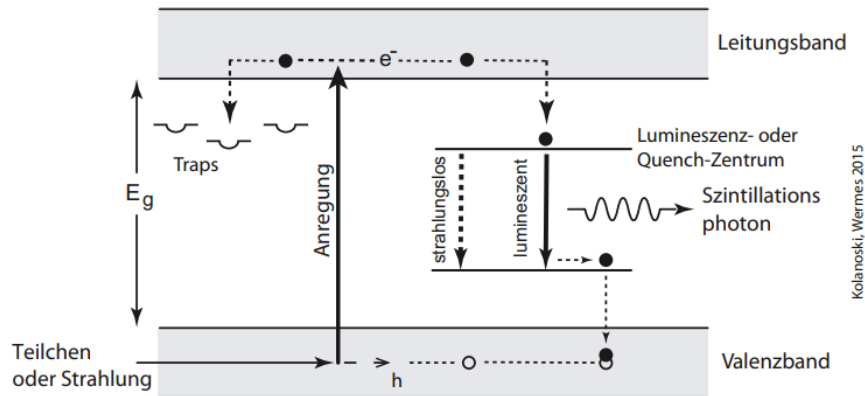


Abbildung 4: Darstellung des Bändermodell eines Szintillators [Wer]

Effekt in der Abbildung 5. Der Photomultiplier ist an eine Hochspannungsquelle angeschlossen und die Dynoden haben über eine Reihe an Spannungsteilern zu immer höhere elektrische Potentiale.

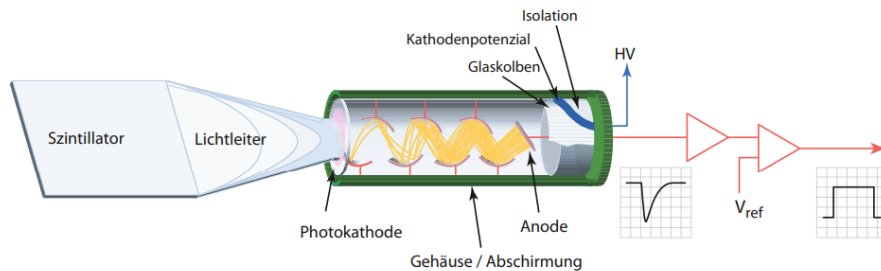


Abbildung 5: Aufbau eines Szintillator [Wer]

2.4 Logische Schaltung: Diskriminator, Koinzidenz-Module und FPGA

Um aus den gemessenen Analogen Signalen digitale Signale zu erzeugen, verwenden wir einen Diskriminator. Dieser trennt die Signale in zwei Bereiche: Ein Signal unterhalb der Schwelle wird als „0“ und ein Signal oberhalb der Schwelle als „1“ gewertet. Hiermit können wir Rauscheffekte vermeiden und zusätzlich gibt der Diskriminator uns die Möglichkeit, die Signaldauer einzustellen.

Das Koinzidenz-Modul wirkt als logisches Und, es nimmt eine Menge an Signalen entgegen und gibt nur dann ein Signal aus, wenn alle Signale gleichzeitig anliegen. Das Koinzidenz-Modul wird verwendet damit einem durchfliegenden Teilchen ein Winkel zugeordnet werden kann, dazu wird geschaut, ob das

Signal durch mehrere Szintillatoren in einer Reihe gleichzeitig ausgelöst wird.

Ein FPGA (Field Programmable Gate Array) ist ein programmierbarer Logikbaustein und wird in diesem Versuch verwendet um Programme zu erstellen, die die Winkelverteilung und die Lebensdauer der Myonen bestimmen können. Die Programmierung wird in der LABView-Umgebung durchgeführt.

2.5 Zufallskoinzidenz

Die Zufallskoinzidenz ist ein Effekt, der auftritt, wenn zwei oder mehr Ereignisse zufällig gleichzeitig auftreten. Dies ist relevant, weil wir bei der Bestimmung der Winkelverteilung und der Lebensdauer der Myonen wissen müssen, wie oft die Signale durch mehr als ein Teilchen ausgelöst werden. Hierzu bestimmen wir die Zufallskoinzidenzrate um die Rate der echten Koinzidenzen zu bestimmen. Diese kann auf 2 Arten bestimmt werden:

- **zeitliche Zufallskoinzidenzrate:** Hierbei wird die Zeit der 3 Detektoren so verschoben, dass ein einzelnes Teilchen keine Koinzidenz erzeugen kann. Es müssen also 3 Teilchen durch die 3 Detektoren fliegen um eine Koinzidenz zu erzeugen.
- **räumliche Zufallskoinzidenzrate:** Hierbei wird die räumliche Anordnung der Detektoren so gewählt, dass ein einzelnes Teilchen keine Koinzidenz erzeugen kann. Dabei müssen mindestens 2 Teilchen durch 2 Detektoren fliegen um eine Koinzidenz zu erzeugen.

3 Durchführung

Dieser Versuch besteht aus 2 Teilen. Im ersten Teil soll die Winkelverteilung der Höhenstrahlung bestimmt werden und im zweiten Teil die Lebensdauer der Myonen.

3.1 Winkelverteilung

Um die Winkelverteilung der Höhenstrahlung zu bestimmen, werden 24 Szintillatoren verwendet, die in einem Kreis angeordnet sind, ein 25. Szintillator ist in der Mitte des Kreises angebracht. Der Kreis hat einen Durchmesser von 1,5 m. Je zwei gegenüberliegende Szintillatoren und der mittlere (Z25) sind mit einem Koinzidenzmodul verbunden, das die Signale der drei Szintillatoren verarbeitet, somit kann der Raum in 12 Sektoren unterteilt werden, welche je einen Raumwinkel von 15° abdecken. Alle Szintillatoren sind mit einem Diskriminator verbunden, der die Signale in digitale Signale umwandelt. Dieser Aufbau ist in der Abbildung 6 dargestellt.

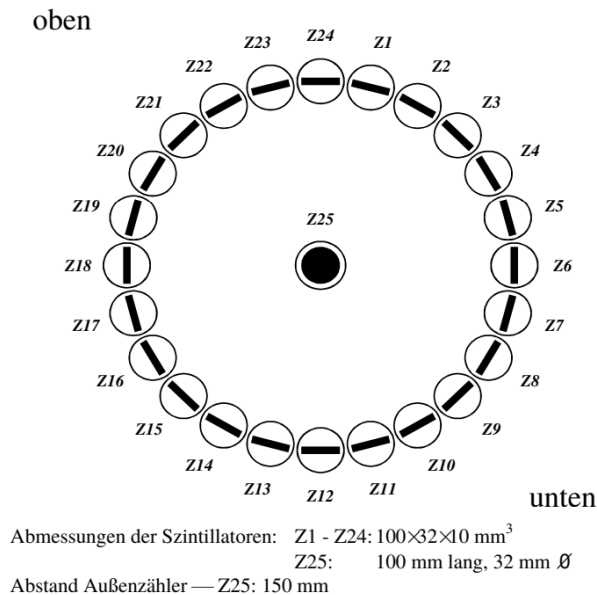


Abbildung 6: Aufbau der Winkelverteilungsmessung[2]

Schwellenspannung D12

Damit die Szintillatoren und der Photomultiplier richtig arbeiten, muss die Schwellenspannung eingestellt werden. Hierzu wurde mit Hilfe von LABView ein Programm geschrieben, dass die Schwellenspannungen von -50 mV bis -200 mV variiert und die Anzahl an Koinzidenzen misst.

Das Programm ist im Anhang zu finden in den Abbildungen 18 bis 21. In diesem Programm wird zunächst die NIM-Box eingelesen. Anschließend werden die Diskriminatoren der Szintillatoren D1, D2, D23, D24, D25 und D12 initialisiert, sodass das FPGA diese erkennen kann. Die Schwellenspannungen der Diskriminatoren D1, D2, D23 und D24 sind bereits vorgegeben. Nun werden folgende Signale gezählt:

- **Z25**
- **Z12**
- ODER Signal von **D24**, **D23**, **D1** und **D2** gebildet
- Koinzidenzsignal von **D12** und **ODER Signal**

Dann wird in einer Schleife die Schwellenspannung von D12 von -50 mV bis -200 mV in Schritten von -10 mV variiert. Im letzten Schritt werden die gemessenen Zählwerte in ein Array geschrieben und in eine Txt-Datei gespeichert. Hieraus kann dann die geeignete Schwellenspannung abgeleitet werden und damit kann dann eine vom Höhenstrahlungsfluss unabhängige Analyse von der Schwellenspannung durchgeführt werden.

Langzeitmessung

Wenn die Schwellenspannung eingestellt ist, wird eine Langzeitmessung durchgeführt. Bevor die Messung zur Winkelverteilung durchgeführt wurde, wurde die Koinzidenz der Signale am Oszilloskop überprüft, wie zu sehen in der Abbildung 7. Man kann erkennen, dass das Diskriminatorsignal, hier in Gelb, das analoge Signal des Szintillators in Grün komplett einschließt.



Abbildung 7: Aufnahme des Oszillosgraphen für den Signalverlauf der zeitlichen Zufallskoinzidenz im Winkelverteilungsteil des Versuchs

Für die Langzeitmessung wurde ein Programm zur Winkelverteilungsmessung vorgegeben. Dieser funktioniert nach dem Prinzip der Koinzidenzmessung, der genaue Aufbau ist in der Abbildung 8 schematisch dargestellt.

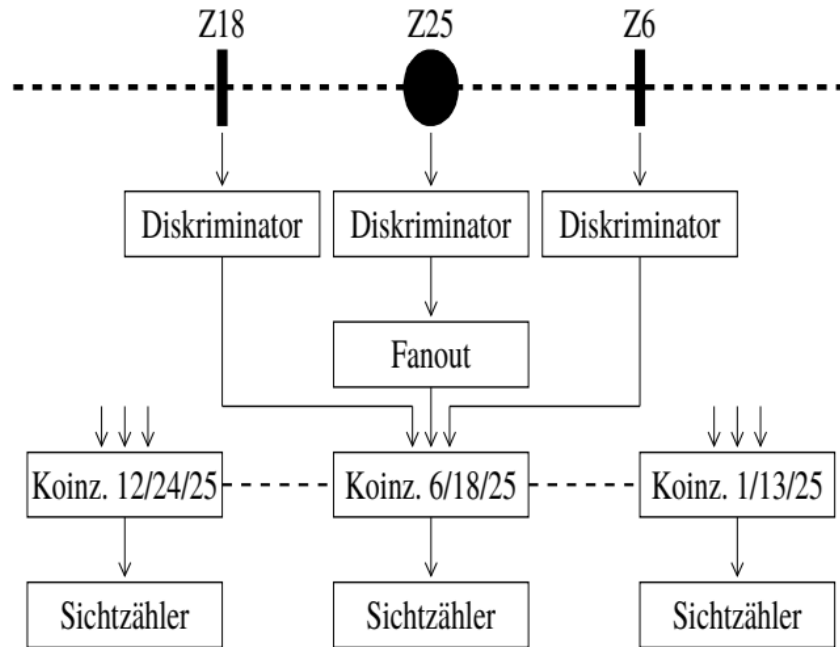


Abbildung 8: Schematischer Aufbau der Winkelverteilungsmessung

Es werden also je 2 Detektoren die sich gegenüberliegende Detektoren mit dem mittleren Szintillator Z25 durch Diskriminatoren in ein Kooinzidenzmodul geschickt und dort von einem Stichzähler gezählt.

Diese Messung wurde mit einer Dauer von 598 215 s durchgeführt, dies entspricht etwa einer Messzeit von einer Woche.

3.2 Lebensdauer

Auch bei der Lebensdauerermessung der Myonen müssen erst die Schwellenspannungen der Diskriminatoren eingestellt werden. Dabei wurde ein anderes Verfahren verwendet, als bei der Winkelverteilungsmessung. Bei dieser Methode wurde jeder Szintillator an 2 Diskriminatoren angeschlossen, diese bilden den Messkreis (in Abbildung 9 dunkel Blau) und den Monitorkreis (in Abbildung 9 Rot).

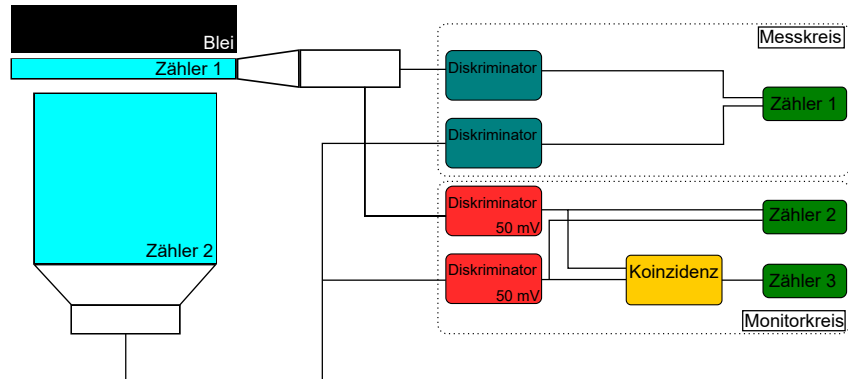


Abbildung 9: Schematischer Aufbau für die Bestimmung der Schwellenspannung bei der Lebensdauerermessung

Dann wurde im Messkreis die Schwellenspannung des einen Szintillators variiert, während die Schwellenspannung des anderen Szintillators konstant gehalten wurde. Die Schwellenspannungen im Monitorkreis wurden auf -50 mV eingestellt und festgehalten. Es wurde mit der variierten Schwellenspannung im Messkreis des einen Szintillators, die Anzahl an Ereignissen gezählt. Damit kann dann die Schwellenspannung des Szintillators über den Monitorkreis normiert werden. Da während unserer Durchführung der dicke Szintillator defekt war konnten wir nur die Zählrate des dünnen Szintillators messen. Daher konnten wir auch nicht die Messung zur Lebensdauer der Myonen durchführen. Die Daten zur Auswertung erhielten wir von den Tutoren. Nachdem die Schwellenspannungen eingestellt wurden, kann mit der Schaltung aus der Abbildung 10 die Lebensdauer der Myonen bestimmt werden.

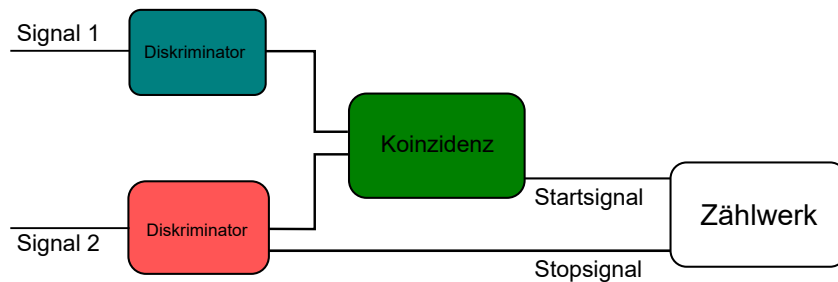


Abbildung 10: Aufbau der Lebensdauerermessung mit Start- und Stop-Signal

Hierzu wird ein Start Signal ausgelöst, wenn ein Myon durch beide Szintillatoren fliegt und somit das Koinzidenzmodul auslöst. Wenn dies geschehen ist wird durch ein Schalt-Flip-Flop ein Gate geöffnet. Durch dieses Gate gelangt eine 20 MHz-Pulsfrequenz auf zehn kaskadierte 1:20-Untersetzer mit zugeordneten Sichtzählern. Nun kann es zu zwei Szenarien kommen, Ein Myon fliegt durch den Szintillator und löst das Koinzidenzmodul aus. Das Gate öffnet sich und die Zählrate wird gezählt, wenn:

- ein Stop Signal innerhalb von $10\mu\text{s}$ ausgelöst wird, wird das Gate geschlossen und der Sichtzähler bleibt bei der Kodierung stehen. In dieser Zeit wird eine Totzeit-Generator gestartet und es kann für eine gewisse Zeit kein weiteres Start-Signal ausgelöst werden. Wenn die Totzeit abgelaufen ist, wird ein Reset-Impuls erzeugt und der Untersetzer auf Null zurückgesetzt.
- kein Stop-Signal innerhalb der $10\mu\text{s}$ erscheint, wird am Ende des Zählers ein Overflow-Impuls gesetzt, dieser löst direkt ein Reset-Impuls aus, der den Zähler auf Null zurückgesetzt.

Damit das Stop-Signal nicht durch Zufallskoinzidenzen sofort ausgelöst wird, wird das Start-Signal zeitverzögert. Die Einstellung für den dünnen Szintillator ist in der Abbildung 11 zu sehen, hier kann man eine Signaldauer von etwa $\approx 20\text{ ns}$ ablesen.

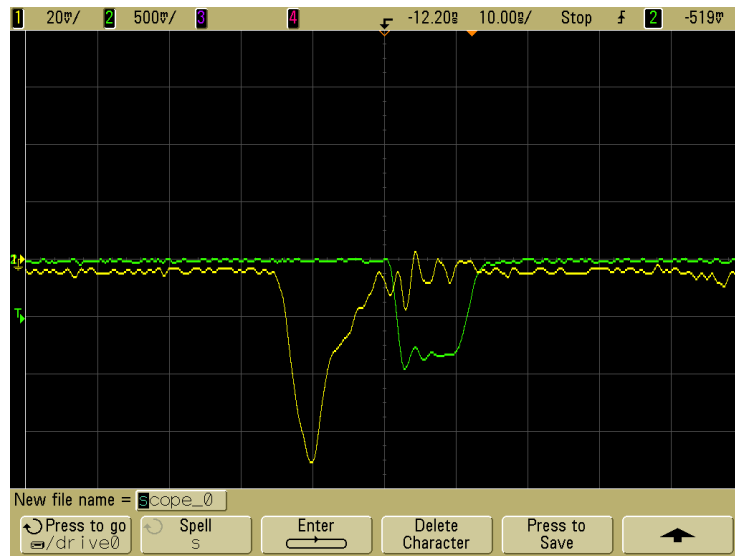


Abbildung 11: Aufnahme des Oszillosgraphen für den Signalverlauf des dünnen Szintillators im Lebensdauer Teil des Versuchs

4 Auswertung

4.1 Winkelverteilung

Schwellenspannung D12

Aus der Messung der Schwellenspannung D12 (??) ergibt sich eine geeignete Schwellenspannung von -70 mV . Dieser wurde ermittelt, indem der erste Sattelwert aus der Auftragung von N_{koin}/N_{25} gegen die Schwellenspannungen betrachtet wurde, dies ist zu sehen in der Abbildung 12.

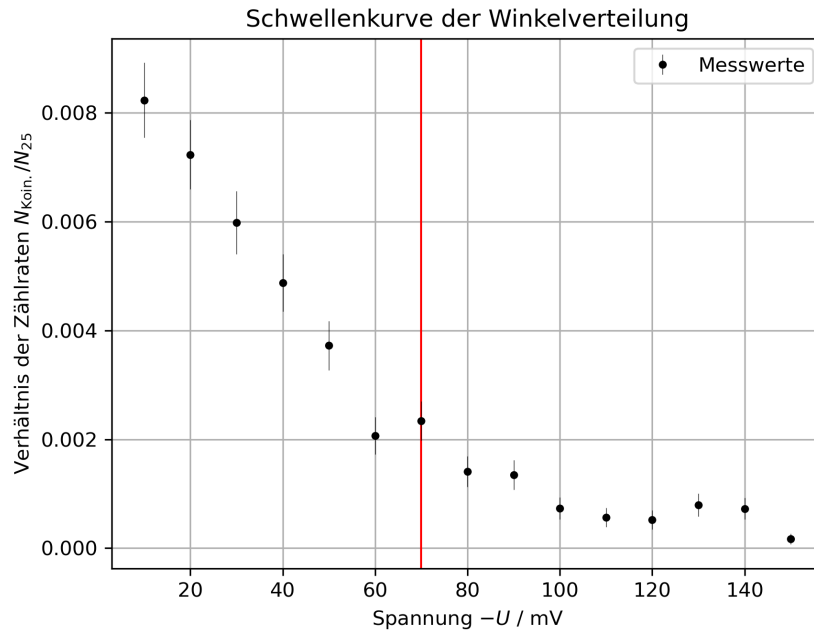


Abbildung 12: Auftragung zur Bestimmung der Schwellenspannung des Szintillators D12

Anpassung der Winkelverteilung

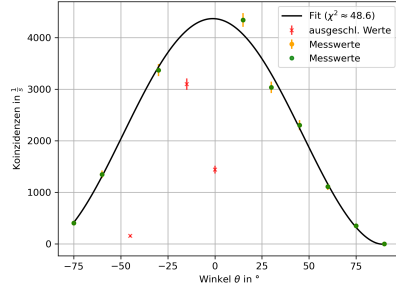
Nachdem die Schwellenspannung bestimmt und eingestellt wurde, wurde die Langzeitmessung durchgeführt, die gemessenen Werte sind im Anhang in der Tabelle 11 hinterlegt. An diese Werte wurde eine Cosinus und eine Gaussanpassung durchgeführt, diese sind in den Abbildungen 13a und 13b dargestellt. Bei den Anpassungen wurden die Rot markierten Werte nicht berücksichtigt, da diese offensichtlich ausreißer sind, wie diese Zustände kommen wird nachher im Abschnitt „Pulshöhenspektrum“ genauer erklärt. Die Anpassungsfunktionen sind zu sehen in den Gleichungen für die Cosinusfunktion 4.1 und die Gaussfunk-

tion 4.1.

$$C(x) = A \cdot \cos(x + \phi)^n + c \cdot x + d$$

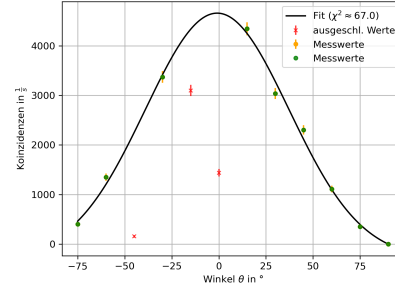
$$G(x) = A \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} + b$$

Koinzidenzen in Abhängigkeit vom Winkel angepasst an eine Cosinus Funktion



(a) Cosinus-Anpassung an die Winkelverteilung

Koinzidenzen in Abhängigkeit vom Winkel angepasst an eine Gaußverteilung



(b) Gauss-Anpassung an die Winkelverteilung

Die Parameter der Cosinus-Anpassung sind in der Tabelle 1 und die der Gauss-Anpassung in der Tabelle 2 zu finden.

Tabelle 1: Cosinus-Anpassung an die Winkelverteilung

Parameter	Wert
A	4378(50)
ϕ	0,020(8)
n	1.82(6)
c	-08(35)
d	03(20)

Tabelle 2: Gauss-Anpassung an die Winkelverteilung

Parameter	Wert
A	4949(49)
μ	-0,016(4)
σ	-0,667(6)
b	-291(16)

Wie zu erwarten war, ist die Cosinus-Anpassung besser geeignet als die Gauss-Anpassung, da die Winkelverteilung einer Cosinus-Verteilung entspricht. Dies ist zu erkennen an den χ^2 -Werten der Anpassungen. Genauer wurde eine \cos^2 Abhängigkeit festgestellt, da die Cosinus-Anpassung eine $n = 1,82(6)$ -Abhängigkeit hat, die nahe bei 2 liegt.

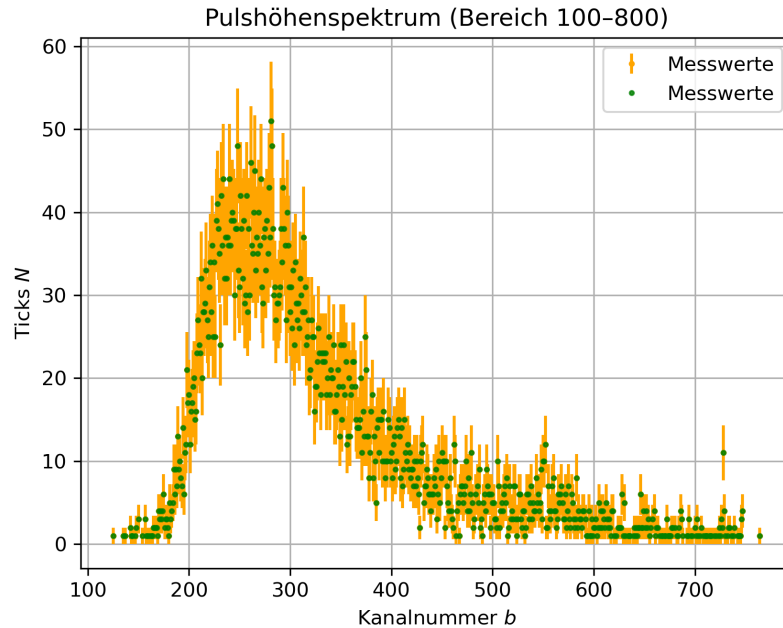


Abbildung 14: Pulshöhenspektrum gezoomt auf den Landauanteil

Pulshöhenspektrum

Die Messung des Pulshöhenspektrums wurde in der Abbildung 22 aufgetragen. Hierbei ist keine Landau-Verteilung zu erkennen, was aber auffällt ist, dass der Rauschanteil am Anfang des Spektrums sehr hoch ist.

Dies fiel uns schon direkt nach der Messung auf, daher haben wir auch hier einen weiteren Datensatz von einer anderen Gruppe erhalten, die das gleiche Experiment durchgeführt hat. Im Vergleich zu unserem Spektrum 22 sieht man im Spektrum der anderen Gruppe 23 eine Landau-Verteilung und der Rauschpeak ist deutlich kleiner.

Wir gehen davon aus, dass unsere Schwellenspannung zu niedrig eingestellt war, sodass auch ein starker Rauschanteil im Spektrum zu sehen ist. Daher ist auch die Landau-Verteilung „verwaschen“, da der Rauschanteil auch bei höheren Pulshöhen zu sehen ist und damit sich mit dem der Landau-Verteilung überlappt. Dies kann auch der Grund sein, warum bei der Winkelverteilung einige Detektoren deutlich mehr Rauschanteil gemessen haben und damit die Ausreißer in der Winkelverteilung entstanden sind. Bei der weiteren Auswertung wurde der Datensatz der anderen Gruppe verwendet.

Das Pulshöhenspektrum ohne den Rauschanteil ist in der Abbildung 14 zu sehen.

Hier wurde ein Bereich von Kanal 100 bis 800 betrachtet. In der Abbildung

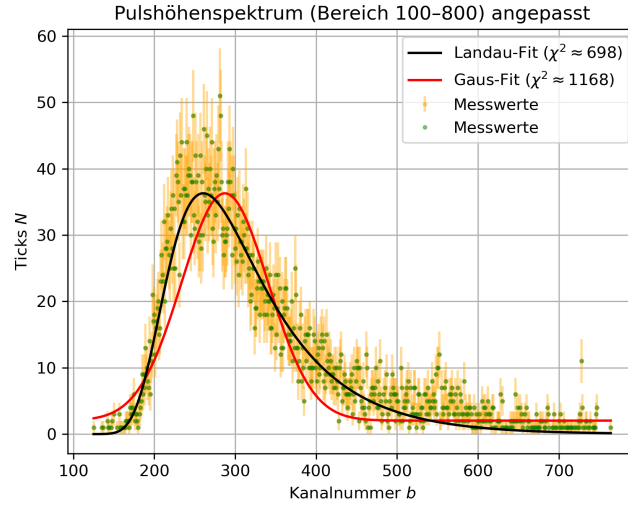


Abbildung 15: Pulshöhenspektrum mit Gaussanpassung und Landauanpassung

?? ist das Pulshöhenspektrum mit der Landau- und Gauss-Anpassung zu sehen. Die Angepassten Funktionen sind in den Gleichungen 4.1 und 4.1 zu finden.

$$L(x) = A \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) + \exp \left(-\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]$$

$$G(x) = A \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} + b$$

Die Parameter der Anpassungen sind in den Tabellen 4 und ?? zu finden.

Tabelle 3: Landau-Anpassung an das Pulshöhenspektrum

Parameter	Wert
μ	257,54(83)
σ	38.78(52)
A	62,6(11)

Tabelle 4: Gauss-Anpassung an das Pulshöhenspektrum

Parameter	Wert
μ	260,47(83)
σ	41,5(5)
A	59(1)

Durch die Anpassungen ist zu erkennen, dass die Landauverteilung besser passt als die Gaussverteilung, da die χ^2 -Werte der Anpassungen deutlich kleiner sind. Dies deutet wie erwartet darauf hin, dass es sich um ein dünnes Szintillationsmaterial handelt, da die Landau-Verteilung für dünne Materialdicken typisch ist.

Zufallskoinzidenz

Wie im Abschnitt „Zufallskoinzidenz“ beschrieben, wurde die Zufallskoinzidenzrate auf 2 Arten bestimmt. Für die zeitliche Zufallskoinzidenzrate wurde eine Zeitverzögerung von $20\text{ }\mu\text{s}$ für den Diskriminator D25, $90\text{ }\mu\text{s}$ für den Diskriminator D14 und $165\text{ }\mu\text{s}$ für den Diskriminator D2 gewählt, dabei kommen je $5\text{ }\mu\text{s}$ durch die minimal Verzögerungszeit [2]. Die räumliche Zufallskoinzidenz war für die Verteilung der Detektoren vorausgewählt, diese waren in einem rechtwinkligen Dreieck angeordnet (D11, D14 und D25), sodass ein einzelnes Teilchen keine Koinzidenz erzeugen kann. Damit die Zufallskoinzidenz bestimmt werden kann muss zunächst eine theoretische Zufallskoinzidenzrate berechnet und anschließend das Ergebnis interpretiert werden.

Die durchschnittliche Überlagerung für n -Signale der Szintillatoren ist gegeben mit:

$$\frac{1}{\Delta t} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\Delta t_i}$$

Dabei ist Δt die Zeit der überlagerten Signale, n die Anzahl der Signale und Δt_i die Zeit, in der das i -te Signal vorhanden ist. Die Rate daraus erhalten wir durch:

$$f = \prod_{i=1}^n (f_i \Delta t_i) \cdot \frac{1}{\Delta t_i}$$

Die Gesamtzahl an Ereignissen N ist gegeben als:

$$N = f \cdot T$$

Wobei $T = 598\,215\text{ s}$ die Gesamtmesszeit der Messung ist. Daraus folgt die theoretische Zufallskoinzidenzrate für 3 Signale:

$$N_3 = T \prod_{i=1}^3 (f_i \Delta t_i) \cdot \frac{1}{\Delta t_i}$$

Dabei gilt noch $N_{25} = f_1 \cdot T$ und es folgt:

$$N_3 = \frac{N_{25}^3}{T^2} \cdot \prod_{i=1}^3 \Delta t_i \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\Delta t_i}$$

Mit $N_{25} = 2993503$ und $T = 598\,215\text{ s}$ ergibt sich für die zeitliche Zufallskoinzidenzrate:

$$N_3 \approx 1,5 \cdot 10^{-6}$$

Da für die räumlichen Zufallskoinzidenzrate auch bei 2 gleichzeitige Signale eine Koinzidenz erkannt wird, ergibt sich für die räumliche Zufallskoinzidenzrate:

$$N_2 \approx 2,28$$

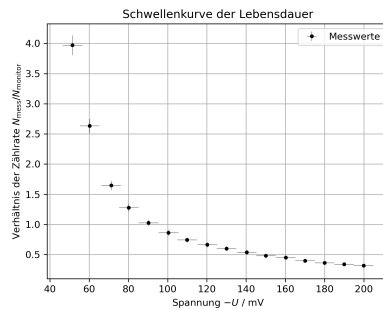
Gemessen wurde eine Rate von $N_{\text{Koin,Zeit}} = 3$ und $N_{\text{Koin,Raum}} = 2569$. Wie durch Vergleich mit den theoretischen Werten zu sehen ist, hat die niedrige Schwellenspannung auch hier einen Einfluss, da die Anzahl an Zufallskoinzidenzen deutlich höher sind als die theoretischen Zufallskoinzidenzen. Aber qualitativ entspricht das schon noch unseren Erwartungen, da die zeitliche Zufallskoinzidenz fast bei 0 ist und die räumliche im gegensatz zu Theorie eine viel höhere Rate hat, dass folgt dadurch, dass die räumliche Zufallskoinzidenz nicht nur für 3 koinzidierten sondern auch für 2 koinzidierten Signale schon auslöst. Abgesehen davon sind erneut wieder viele Ereignisse gemessen worden, die wahrscheinlich durch Rauschen in den Detektoren ausgelöst wurden.

4.2 Lebensdauer des Myon

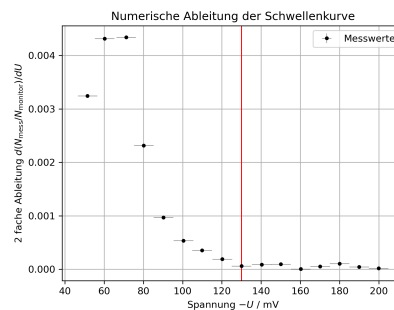
Wie vorher schon erwähnt konnte nur die Schwellenspannung für Z_1 von uns bestimmt werden, da der Dicke Szintillator Defekt war. Die weitere Auswertung wurde anhand der von der Tutorin zur Verfügung gestellten Daten ausgeführt. Diese sind in der Tabelle 10 zu finden und wurden über eine Gesamtmesszeit von $T = 598\,756\text{ s}$ und bei Schwellenspannungen von $Z_1 = -115\text{ mV}$ $Z_2 = -105\text{ mV}$ aufgenommen.

Schwellenspannung

Die Schwellenspannung wurde nach der Methode aus dem Abschnitt „Durchführung“ bestimmt. Die Rohdaten der Messung sind in der Tabelle 12 im Anhang zu finden. Da in dem Verlauf der Schwellenspannungskurve optisch kein Sattelpunkt erkannt werden kann, wurde die 2 fache numerische Ableitung gebildet und in der Ableitung nach einem Nullpunkt gesucht, da dieser einem Sattelpunkt entspricht.



(a) Schwellenspannung aufgetragen gegen die nach dem Monitorkreis normierte Messkreis werte aus Tabelle ??



(b) 2 fache numerische Ableitung der Schwellenkurve von dem Z_1 Szintillator

Wie in der Abbildung 16b zu sehen finden wir unseren Sattelpunkt bei einer Schwellenspannung von $Z_{1,\text{Schwelle}} = -130 \text{ mV}$, wir haben uns für diesen entschieden, da dieser den ersten Sattelpunkt darstellt. Weil wir den ersten erkennbaren Sattelpunkt nutzen sollen, fiel unsere Wahl auf diesen, obwohl dieser nicht der Sattelpunkt ist, der am nächsten an der Null war.

Zufallskoinzidenz

Damit die richtige Lebensdauer der Myonen ermittelt werden kann, muss noch die Zufallskoinzidenz bestimmt werden. Hierzu bestimmen wir zunächst die Anzahl an Ereignissen, die mit Start-Signal aber ohne Stopp-Signal erfolgten und nennen diese N_1 und die Anzahl an Ereignissen mit Stopp-Signal aber ohne Start-Signal, nennen wir N_2 . Diese können wir durch die folgenden Zusammenhänge ausrechnen:

$$\begin{aligned} N_{\text{Start}} &= N_{\text{tot}} + N_1 \\ N_{\text{Stopp}} &= N_{\text{tot}} + N_1 + N_2 \end{aligned}$$

Durch umformen erhalten wir anschließend:

$$\begin{aligned} N_1 &= N_{\text{Start}} - N_{\text{tot}} \\ N_2 &= N_{\text{Stopp}} - N_{\text{Start}} \end{aligned}$$

Deren Fehler lassen sich durch gaussische Fehlerfortpflanzung bestimmen zu:

$$\begin{aligned} \Delta N_1 &= \sqrt{\Delta N_{\text{Start}}^2 - \Delta N_{\text{tot}}^2} \\ \Delta N_2 &= \sqrt{\Delta N_{\text{Stopp}}^2 - \Delta N_{\text{Start}}^2} \end{aligned}$$

Damit folgt eine Anzahl an Zufallskoinzidenzen für jeden Zähler schritt von:

$$N_{\text{Zufall}} = \frac{\Delta t N_1 N_2}{T}$$

mit dem Fehler

$$\Delta N_{\text{Zufall}} = \frac{\Delta t}{T} \sqrt{\left(\Delta N_2 \frac{N_1}{T}\right)^2 + \left(\Delta N_1 \frac{N_2}{T}\right)^2}$$

Dabei ist $\Delta t = 1 \text{ } \mu\text{s}$. Die berechneten Ereignisse sind in der Tabelle 5 hinterlegt. Dabei wurde der Fehler von N_{Zufall} auf 1 gesetzt, da es hier nur um ganzzahlige Zählungen geht. Berechnet wurde ein Fehler von $\Delta N_{\text{Zufall}} = 0,02$

Tabelle 5: Auswertung Lebensdauermessung

Signal	N	ΔN
N_{tot}	13366	116
N_{Start}	2330927	1527
N_{Stop}	9371864	3061
N_1	2317561	1531
N_2	7040937	3421
N_{Zufall}	27	1

Bestimmung der Lebensdauer

Aus den korrigierten Zählereignissen kann dann mit Hilfe des Zerfallsgesetzes die Lebensdauer der Myonen berechnet werden. Hierzu wird die Anzahl an Ereignissen gegen die Zeit aufgetragen, wobei jeder Kanal einer Zeit von $\Delta t = 1 \mu\text{s}$ entspricht. An diese Auftragung wird dann das Zerfallsgesetz ?? ([7]) angepasst.

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

Hier ist N_0 die Anzahl an Teilchen zum Beginn, t die vergangene Zeit, τ die Lebensdauer. Die Anpassung ist in der Abbildung 17 zu sehen, die daraus erhaltenen Parameter sind in der Tabelle 6 aufgetragen.

Tabelle 6: Anpassungsparameter zur Lebensdauer des Myons

Parameter	Wert
Anzahl an Teilchen zum Beginn N_0	7854(142)
Lebensdauer τ / μs	2,08(4)
Hintergrund b	48(11)

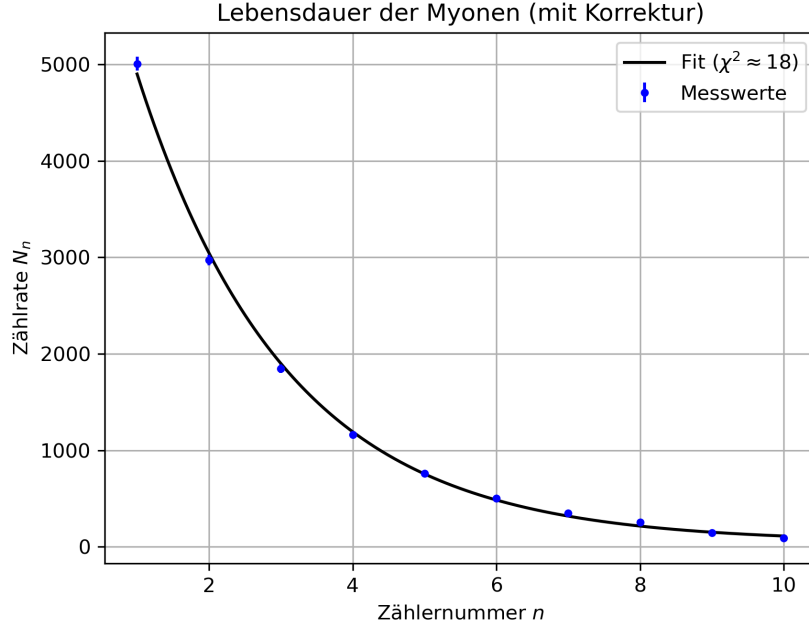


Abbildung 17: Anpassungsfunktion an die Messdaten der Lebensdauerermessung

Wir erhalten also eine Lebensdauer für das Myon von:

$$\tau_{\text{Myon}} = (2,08 \pm 0,04) \mu\text{s}$$

Dieser entspricht nicht ganz dem Literaturwert von $\tau_{\text{Myon,Lit}} = (2,196\,981\,1 \pm 0,000\,002\,2) \mu\text{s}$ ([6]) und weicht um einen $3\text{-}\sigma$ Bereich ab, aber im Rahmen der Genauigkeit der Experiments ist es ein qualitativ akzeptables Ergebnis, da hier die großen Ordnung die richtige ist und der Wert relativ nah am Literaturwert ist.

5 Fazit

Insgesamt kann davon gesprochen werden, dass die Durchführung gut gelungen ist, die Ergebnisse sind aussagekräftig und mögliche Fehlerquellen konnten identifiziert werden und deren Konsequenzen analysiert werden. Für die Schwellspannung des D12 Szintillators konnte eine Schwellspannung von -70 mV bestimmt werden, im nachhinein betrachtet ist dieser wohl zu niedrig eingestellt worden und die folgen dieser wurden an gegebener Stelle diskutiert.

Die Winkelverteilung konnte als \cos^2 verteilt ermittelt werden, die Anpassung an die Daten durch eine Cosinusfunktion ergab folgende Parameter, aufgelistet in der Tabelle 7.

Tabelle 7: Cosinus-Anpassung an die Winkelverteilung

Parameter	Wert
A	4378(50)
ϕ	0,020(8)
n	1.82(6)
c	-08(35)
d	03(20)

Auch der Vergleich mit einer Gaussanpassung zeigte, dass die Winkelverteilung, tatsächlich einer \cos^2 Verteilung entspricht.

Durch die Analyse des Pulshöhenspektrums konnte gezeigt werden, dass die Szintillatoren aus dünnen Materialien bestehen, da eine Landauförmige Verteilung ermittelt wurde, dies erfolgte durch Anpassung der Messdaten an eine Landau- und eine Gausverteilung und der Vergleich zeigte eindeutig, dass die Verteilung Landauverteilt war. Die Ergebnisse der Anpassung sind in der Tabelle 8 zu sehen.

Tabelle 8: Landau-Anpassung an das Pulshöhenspektrum

Parameter	Wert
μ	257,54(83)
σ	38.78(52)
A	62,6(11)

Die Zufallskoinzidenzen konnten bemessen und mit den theoretischen Erwartungen verglichen werden, hier haben wir deutlich mehr Koinzidenzen beobachtet als erwartet. Die nötige Diskussion wurde in geeigneter Stelle in dem Protokoll vorgenommen, die Ergebnisse sind in der Tabelle 9 aufgetragen.

Tabelle 9: Ergebnisse Zufallskoinzidenz

	theo. Wert	gemessener Wert
räumlich	$1,5 \cdot 10^{-6}$	3
zeitlich	2,28	2569

Für die Schwellenspannung des dünnen Szintillators wurde eine Schwellenspannung von $Z_1 = -130 \text{ mV}$ ermittelt. Die Anzahl an Zufallskoinzidenzen pro Zeitschritt wurde mit

$$N_{\text{Zufall}} = (27,00 \pm 0,02)$$

Wobei hier ein Fehler von 1 angenommen wurde, da es nur ganzzahlige Ereignisse geben kann.

Schlussendlich konnte eine Lebensdauer des Myons mit

$$\tau_{\text{Myon}} = (2,08 \pm 0,04) \text{ s}$$

bestimmt werden, dieser weicht um $3\text{-}\sigma$ vom Literaturwert ab ist aber im Rahmen der Genauigkeit des Experiments noch vertretbar und kann als Hinweis auf die Richtigkeit des Literaturwertes betrachtet werden.

6 Anhang

6.1 LABView-Programm

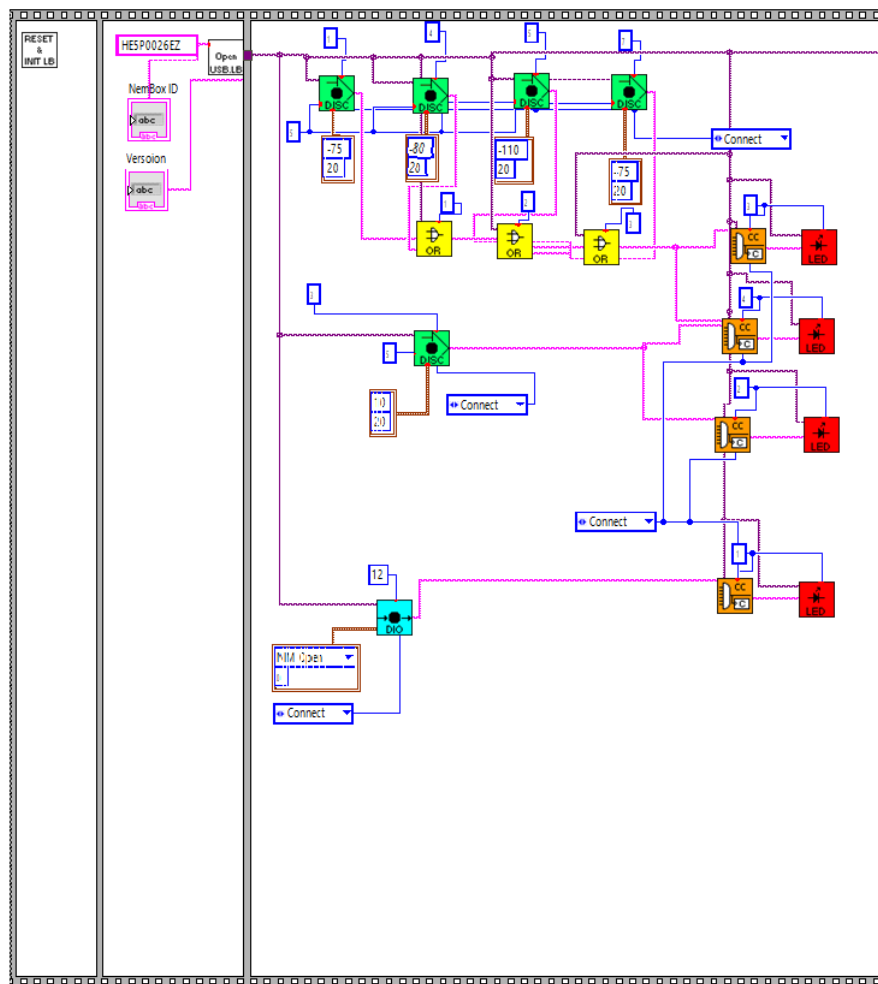


Abbildung 18: LABView-Programm zur Schwellenspannungseinstellung Teil 1

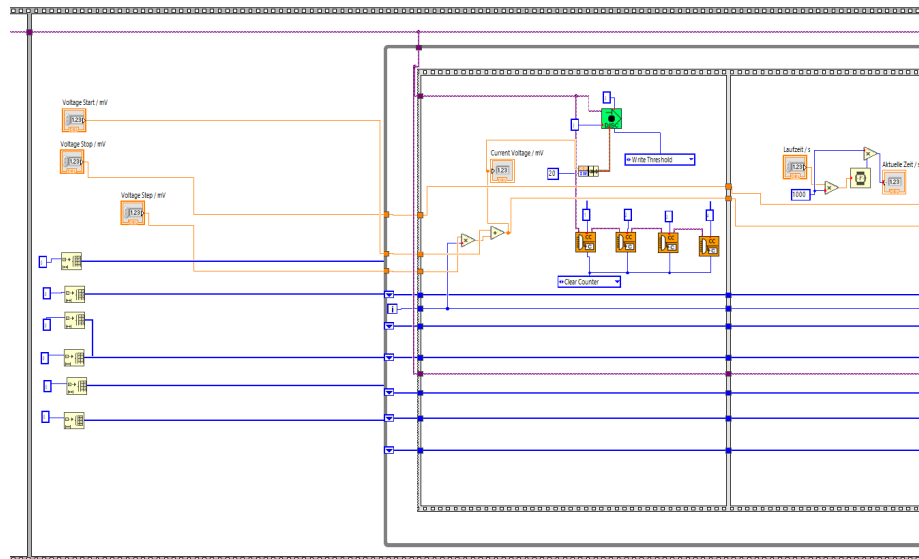


Abbildung 19: LABView-Programm zur Schwellenspannungseinstellung Teil 2

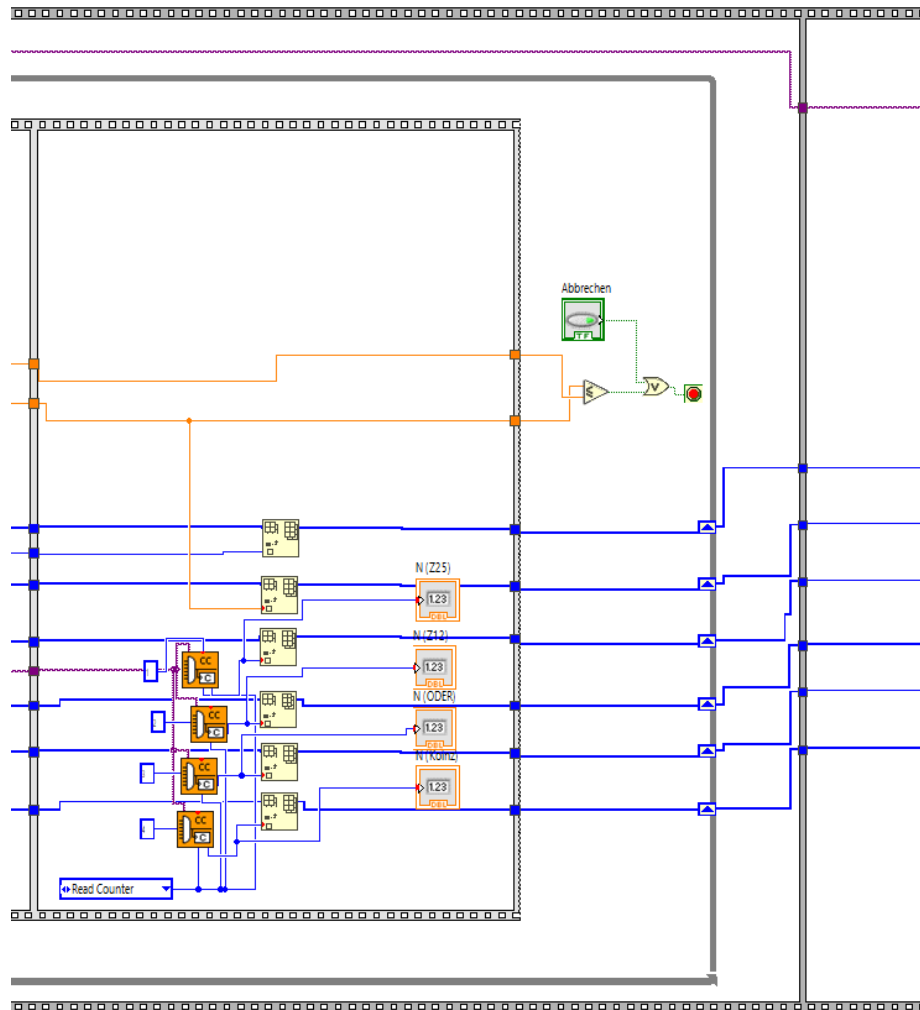


Abbildung 20: LABVIEW-Programm zur Schwellenspannungseinstellung Teil 3

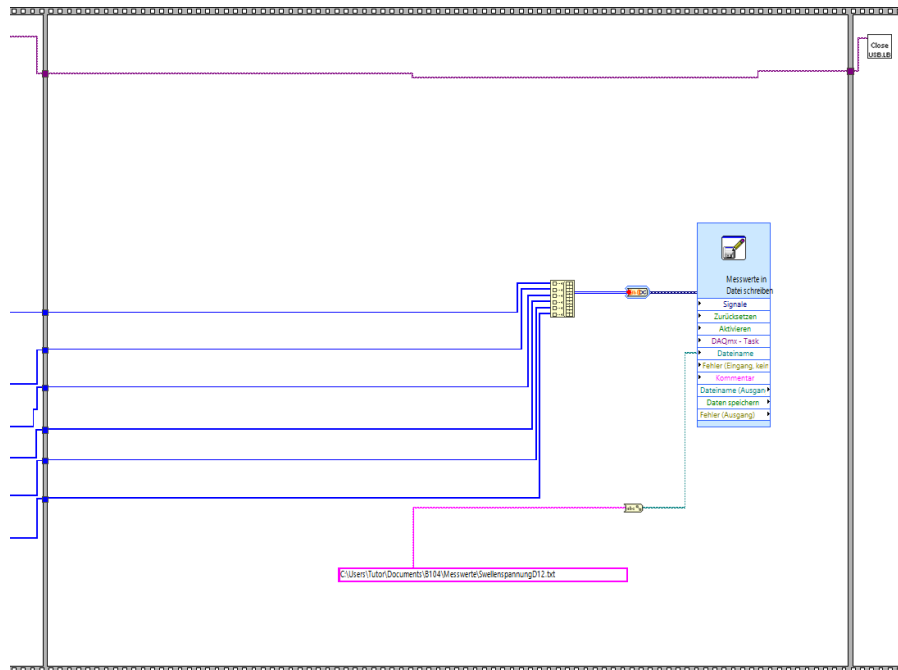


Abbildung 21: LABView-Programm zur Schwellenspannungseinstellung Teil 4

Winkelverteilung

Tabelle 10: Anpassungsparameter der Bestimmung der Schwellenspannung für die Winkelverteilung

$-U$ / mV	$N_{\text{Koin.}}/N_{25}$	$\Delta(N_{\text{Koin.}}/N_{25})$
10	8.24e-03	6.89e-04
20	7.23e-03	6.39e-04
30	5.98e-03	5.83e-04
40	4.88e-03	5.27e-04
50	3.72e-03	4.56e-04
60	2.07e-03	3.40e-04
70	2.34e-03	3.61e-04
80	1.40e-03	2.81e-04
90	1.35e-03	2.75e-04
100	7.29e-04	2.02e-04
110	5.65e-04	1.79e-04
120	5.20e-04	1.73e-04
130	7.92e-04	2.12e-04
140	7.27e-04	2.02e-04
150	1.68e-04	9.71e-05

Tabelle 11: Messwerte der Winkelverteilung

Winkel /	$N_{\text{Koin.}}$	$\Delta(N_{\text{Koin.}})$
-75	405	20
-60	1349	37
-30	3372	58
15	4344	66
30	3037	55
45	2304	48
60	1111	33
75	351	19
90	0	0

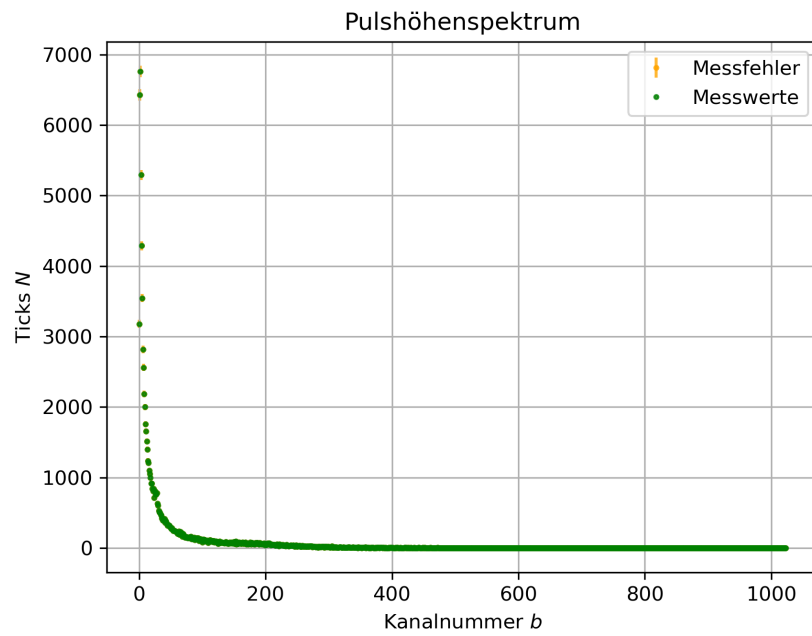


Abbildung 22: Pulshöhenspektrum der Winkelverteilungsmessung

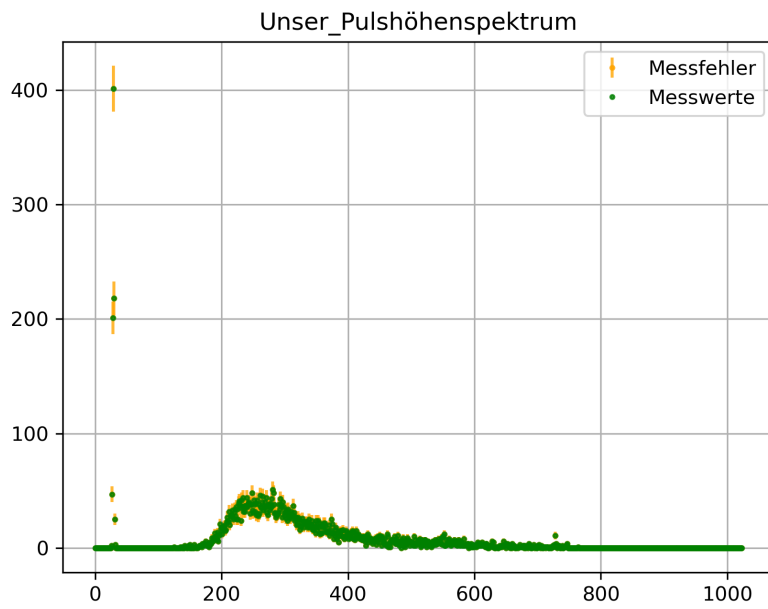


Abbildung 23: Pulshöhenspektrum der Winkelverteilungsmessung einer anderen Gruppe

Lebensdauer

Tabelle 12: Rohdaten Schwellenspannung für den dünnen Szintillator im Teil zur Lebensdauer

Spannung / mV	N_{Mess}	N_{Mon}
-51,5	29079	7326
-60,2	18989	7209
-71,2	12430	7538
-80,2	9197	7186
-90,2	7380	7192
-100,4	6172	7166
-109,9	5434	7290
-120,2	4754	7152
-130,0	4395	7315
-140,3	3932	7274
-150,1	3471	7217
-160,2	3283	7269
-170,1	2904	7168
-180,0	2604	7138
-190,0	2555	7517
-199,9	2317	7268

Tabelle 13: Rohdaten Lebensdauerermessung über eine Gesamtmesszeit von $T = 598\,756$ und bei Schwellenspannungen von $Z_1 = -115\text{ mV}$ $Z_2 = -105\text{ mV}$

Zähler	Zählungen
1	5035
2	3001
3	1873
4	1191
5	786
6	531
7	377
8	281
9	173
10	118

Literatur

- [1] K. Nakamura et al. (Particle Data Group). „Review of Particle Physics“. In: *J, Phys. G* 37.075021 (2010).
- [2] *Physikalisches Praktikum Teil V: Kern- und Teilchenphysik - Versuchsbeschreibung*. April 2025. Universität Bonn.
- [3] Wikipedia. *Bethe-Bloch-Gleichung*. letzter Zugriff: 17.05.2025. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Bethe-Bloch-Gleichung>.
- [4] Wikipedia. *Kosmische Strahlung*. letzter Zugriff: 17.05.2025. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Kosmische_Strahlung.
- [5] Wikipedia. *Landauschverteilung*. letzter Zugriff: 17.05.2025. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Landauverteilung>.
- [6] Wikipedia. *Muon*. letzter Zugriff: 27.05.2025. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Myon>.
- [7] Wikipedia. *Zerfallsgesetz*. letzter Zugriff: 27.05.2025. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Zerfallsgesetz>.