

V01

Lebensdauer kosmischer Myonen

Celina Wieberg

celina.wieberg@tu-dortmund.de

Aaron Schink

aaron.schink@tu-dortmund.de

Durchführung: 5.1.2026

Abgabe: 9.1.2026

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1. Zielsetzung	3
2. Theorie	3
2.1. Myonen	3
3. Durchführung	4
3.1. Szintillationsdetektor	4
3.2. Aufbau	5
3.3. Kalibrierung	7
3.4. Messung der Myonen	8
4. Auswertung	8
4.1. Kalibrierung	9
4.2. Messung der Myonen	10
5. Diskussion	11
5.1. Kalibrierung	12
5.2. Messung der Myonen	12
A. Originaldaten	12
Literatur	12

1. Zielsetzung

In diesem Versuch wird die mittlere Lebensdauer kosmischer Myonen bestimmt. Dafür wird ein Szintillationsdetektor mit Verzögerungsmechanismen und ein Vielkanalanalysator kalibriert.

2. Theorie

Im Folgenden werden Informationen über Myonen gegeben.

2.1. Myonen

Myonen sind geladene Leptonen, die ungefähr 200 mal schwerer als Elektronen sind. Sie besitzen die selbe Ladung von $q = 1e$, wobei e die Elementarladung ist. Myonen entstehen in der Atmosphäre durch sogenannte kosmische Strahlung, ein Prozess, bei dem hauptsächlich Protonen und ionisierte Atomkerne [1] mit einer Energie zwischen $10 \cdot 10^2$ und $10 \cdot 10^{20}$ GeV [2] auf Teilchen in der Atmosphäre in 10 bis 30 km treffen und Teilchenschauer auslösen, vergleiche Abbildung 1 rechts.

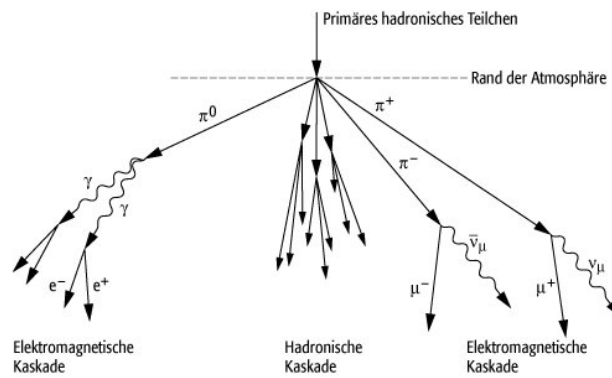


Abbildung 1: Schematische Skizze eines hadronischen Luftschauers. Rechts ist die Entstehung von Myonen und Antimyonen dargestellt [3].

Dabei entstehen Myonen nicht direkt, sondern über einen Zerfall von Pionen, z. B.

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu,$$

dabei ist π^- das negative Pion und $\bar{\nu}_\mu$ ein Myon-Antineutrino, das Pendant zum Elektron-Antineutrino. Myonen sind nicht stabil, sie zerfallen zu Elektronen,

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

Die mittlere Zeit, in der Myonen existieren, ist die sogenannte mittlere Lebensdauer τ . Sie ist verknüpft mit der Halbwertszeit $\tau_{1/2}$ über

$$\tau_{1/2} = \tau \cdot \ln(2).$$

Für Myonen beträgt $\tau = 2,196 \mu\text{s}$ [1]. Nach klassischer Rechnung wären also keine Myonen auf der Erdoberfläche messbar, da diese mit beinahe Lichtgeschwindigkeit in nur ungefähr 2 Mikrosekunden eine Strecke von wenigen hundert Metern zurücklegen. Aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit müssen allerdings relativistische Effekte wie Zeitdilatation oder Längenkontraktion berücksichtigt werden. Für die Myonen vergeht die Zeit also viel langsamer, sodass sie noch bevor sie zerfallen die Erdoberfläche treffen können, oder genau äquivalent formuliert ist die zurückzulegende Strecke zwischen Entstehungsort und Erdoberfläche kontrahiert und somit viel kürzer, also in der Lebensdauer für die Myonen zurücklegbar [1].

Die Messwerte sind exponentiell abfallend verteilt, wie es aus Zerfallsprozessen bekannt ist. Ein exponentieller Fit der Form

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda(t - T)) + U \quad (1)$$

mit der Zerfallskonstanten λ , die der Kehrwert der Lebensdauer ist, kann die Messung beschreiben.

3. Durchführung

In diesem Abschnitt wird die Funktionsweise vom verwendeten Szintillationsdetektor, der Aufbau und die Kalibrierung sowie Messung beschrieben.

3.1. Szintillationsdetektor

Ein Szintillationsdetektor besteht im Kern aus einem Szintillator, also einem Material, das in der Lage ist, im optischen oder UV-Bereich zu leuchten. Es existieren verschiedene Arten von Szintillatoren, z. B. anorganische Kristalle wie Bismutgermanat, organische Kristalle wie Anthracen, Gase (insbesondere Helium, Xenon, Krypton und Argon) und organische Flüssigkeiten mit Lösungsmittel wie 2,5-Diphenyloxazol in Benzol gelöst. Verschiedene Szintillator-Materialien haben verschiedene Vor- und Nachteile, so haben Flüssigkeiten eine schnelle Fluoreszenzzeit von ca. 3 ns und passen in beliebige Detektorformen, sind aber sensibel gegenüber Verunreinigungen; organische Kristalle sind mechanisch widerstandsfähig; Edelgase haben sehr schnelle Fluoreszenzzeiten von unter einer nanosekunde. Der hier verwendete Szintillator im Tank ist Toluol.

Das Hauptprinzip der Szintillation ist die Ionisierung durch Stöße, in diesem Versuch also Stöße von

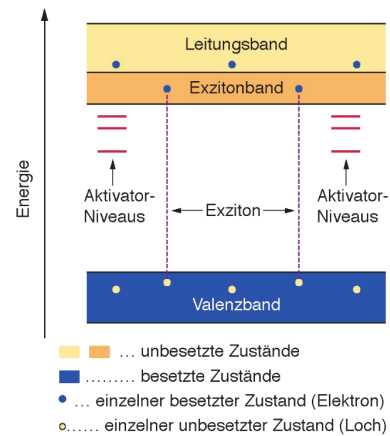


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Anregung eines Exzitons in einem anorganischen Kristall im Bandstrukturmodell [4].

Myonen vor dem Zerfall bzw. Elektronen nach dem Zerfall mit den Atomen und Molekülen im Szintillatortank. Abbildung 2 ist eine schematische Darstellung des Szintillationsprozesses in einem anorganischen Kristall.

Im Falle von Edelgasen ist dies ein rein atomarer Prozess, der aber analog verläuft. Organische Kristalle haben ähnliche Vorgänge auf molekularer Ebene mit sogenannten HOMO- und LUMO-Übergängen [4].

Die entstandenen Photonen werden mit Photomultipliern verstärkt. Ein Photomultiplier (PM) besteht grundlegend aus einer Kathodenschicht, die den photoelektrischen Effekt ausnutzt, um ein Elektron zu erzeugen, und viele Dynoden, die über elektrische Felder Elektronen beschleunigen und mehr Elektronen erzeugen [5]. Der prinzipielle Aufbau eines PMs und ein realisierter Aufbau sind in Abbildung 3 dargestellt.

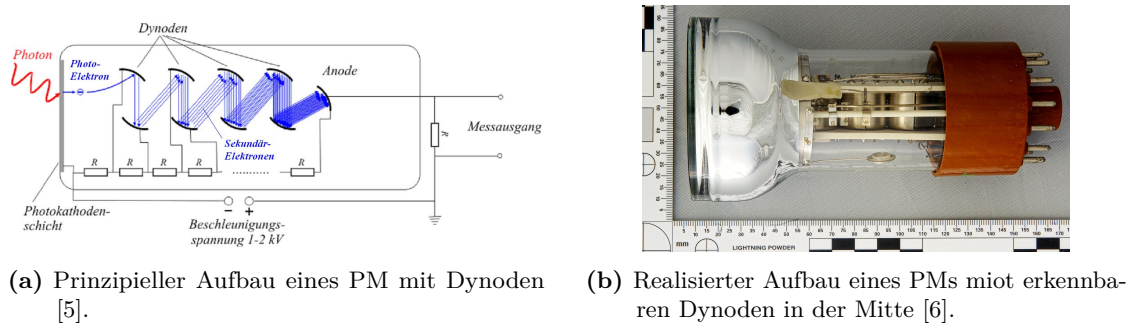


Abbildung 3: Darstellungen eines Photomultipliers.

3.2. Aufbau

Die Schaltskizze der einzelnen Komponenten ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Umsetzung ist in Abbildung 5 dargestellt.

Die Power Supply (B) versorgt die Photomultiplier mit dem nötigen Strom. Diese detektieren die Lichtblitze, die beim Eintreten und Zerfallen der Myonen entstehen. Über einen Discriminator (E) werden zu schwache Signale rausgefiltert. Diese entstehen hauptsächlich durch spontane Emissionen von Elektronen in den Dynoden der Photomultiplier. Da diese aber nicht die volle Verstärkung der PMs erfahren, ist dieses Signal entsprechend schwächer und kann ignoriert werden. Die Ursache für die spontane Emission ist die endlich hohe Temperatur der Dynoden, die diese Emission ermöglicht. Über eine Verzögerungsschaltung (Delay) (C) kann die Verzögerung zwischen zwei Signalen für die Coincidence-Schaltung (D) reguliert werden.

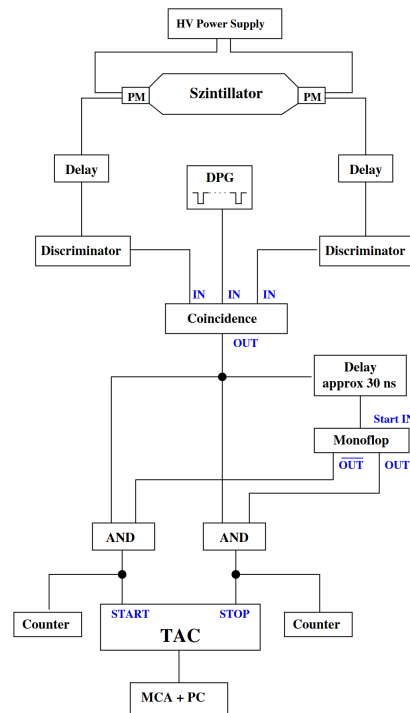
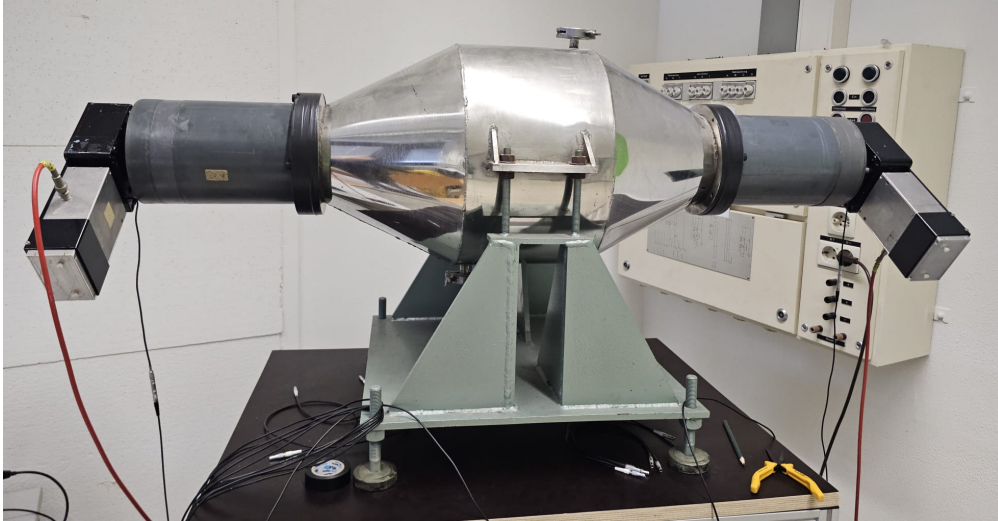
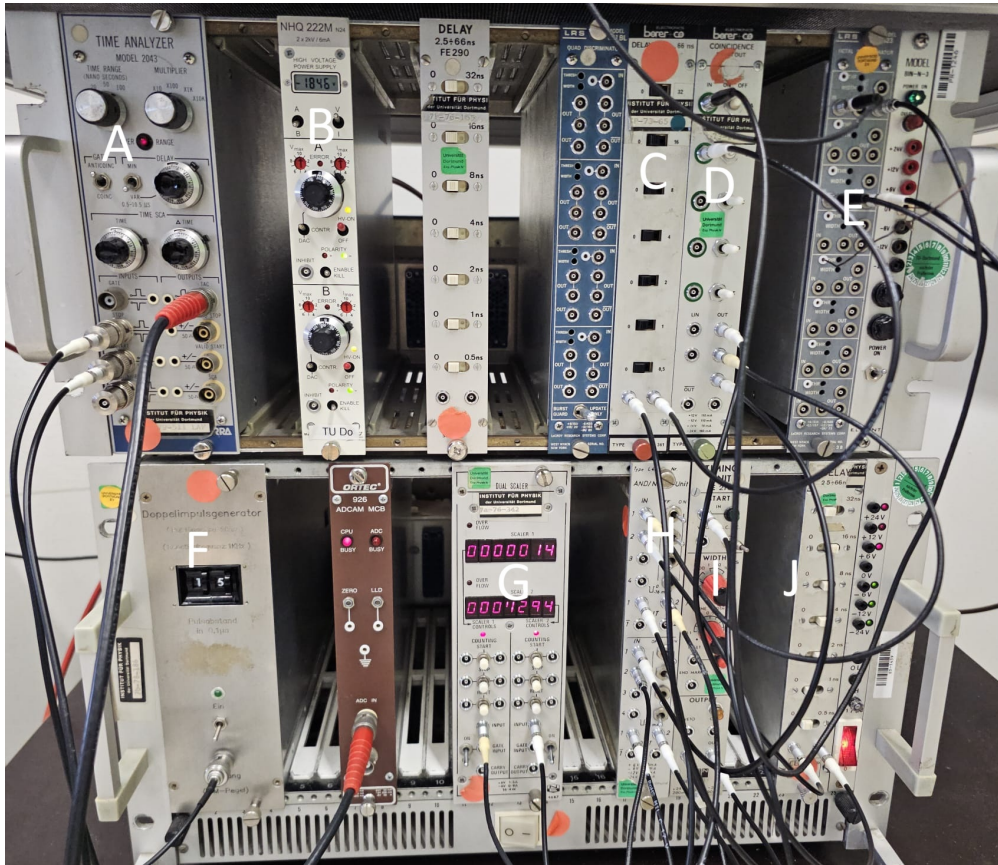


Abbildung 4: Schaltplan des Versuches.



(a) Szintillationstank mit Photomultipliern links und rechts.



(b) Verwendete Module für den Versuch. A: TAC. B: Power Supply. C: Discriminator-Delay. D: Coincidence-Schaltung. E: Discriminator. F: Doppelimpulsgenerator. G: Counter. H: AND-AND-Schaltung. I: Monoflop. J: Monoflop-Delay.

Abbildung 5: Verwendeter Versuchsaufbau mit nummerierten Bestandteilen im NIM-Rack.

Die Coincidence-Schaltung gibt ein Signal nur dann, wenn beide Inputs gleichzeitig antreffen. Es kann auch ein Doppelimpulsgenerator (F) mit variablem Pulsabstand in die Coincidence-Schaltung geschaltet werden, um den Vielkanalanalysator zu kalibrieren. Nach der Coincidence-Schaltung folgen zwei AND-Gatter (H), die über einen weiteren Delay (J) mit einem Monoflop (I) das Start- und Stoppsignal der Wartezeit für zwischen Myon-Eintritt und Myon-Zerfall im Szintillatortank produzieren. Das Startsignal entsteht, sobald die Coincidence-Schaltung ein Signal gibt. Dieses Signal geht in beide AND-Gatter und in den Monoflop, der ein zeitlich instabiles Signal erzeugt, das OÜT in Abbildung 4. Nach einer gewissen Zeit kippt dieses Signal und das Stoppsignal wird gegeben. Über den Time-to-Amplitude-Converter (TAC) (A) und den Monoflop kann die Suchzeit eingestellt werden. Der TAC wandelt die gemessene Zeit in ein Amplitudensignal um, das der Vielkanalanalysator verwerten kann.

3.3. Kalibrierung

Als erstes müssen die PMs mit genügend Spannung versorgt werden. Dafür werden diese auf ungefähr 1800 V hochgeregt und über den Discriminator dem Counter verbunden. Die Spannungen werden möglichst auf ungefähr 30 Events pro Sekunde geregelt. In dieser Versuchsdurchführung war ein Counter deutlich schneller als der andere, weshalb der Discriminator umgeregelt werden muss. Über ein Oszilloskop lassen sich Breite und Höhe der gemessenen Signale darstellen. Diese sollten eine Breite von ungefähr 10 ns und eine genügend große Intensität haben. Über die Regelschrauben "THR" für Threshold und "WIDTH" können die Höhe bzw. Breite der Signale reguliert werden. Diese werden variiert, bis sie eine akzeptable Breite und ausreichenden Ausschlag haben.

Anschließend muss der Delay der Coincidence-Schaltung kalibriert werden. Da die Signale verschiedene Weglängen zurücklegen müssen, kommen sie zeitlich versetzt an, lösen die Coincidence-Schaltung also nicht aus. Dafür wird die Weglänge künstlich variiert. Hierfür wird zunächst das Signal eines PMs an den Delay (C) gesteckt und schrittweise um 0,5 ns von 0 ns auf 16 ns erhöht und über 20 Sekunden die Events gemessen und am Counter abgelesen. Anschließend wird der andere Photomultiplier stattdessen angesteckt, um eine Verzögerung des anderen Signals, also in „negative Richtung“ zu erhalten. Die vorige Messung wird wiederholt.

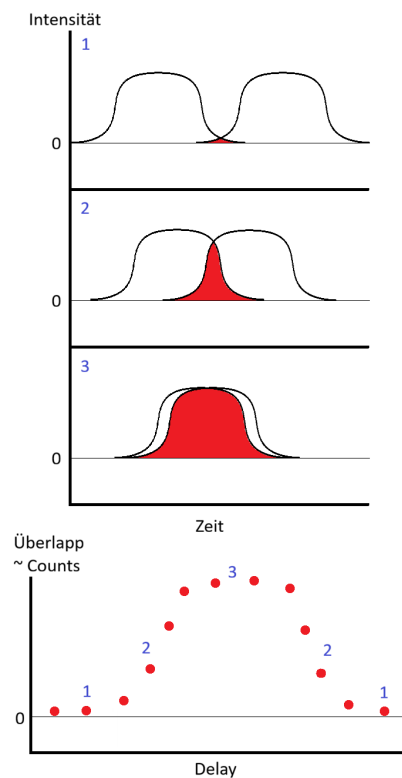


Abbildung 6: Qualitative Darstellung der Delay-Kalibrierung. Oben sind die Signale bei drei verschiedenen Delays dargestellt, unten der Überlapp

Die Signale der PMs sind rechteck-ähnlich mit gauß-ähnlichen Tails. Werden diese schrittweise durch Variation des Delays überlagert, nimmt der Überlapp der Signale schrittweise zu und hat eine ähnliche Form wie die Signale selber. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 6 dargestellt. Es wird jener Delay gewählt, der den höchsten Überlapp, also den höchsten Count produziert, da die Signale dann gleichzeitig ankommen.

Im Anschluss muss noch der Vielkanalanalysator (Multi-Channel Analyzer, MCA) kalibriert werden. Hierfür wird der Doppelimpulsgenerator angeschlossen, der zwei Signale mit einstellbarer Verzögerung liefert. Diese Verzögerung gibt über den TAC eine feste Amplitude, sodass ein Kanal des MCAs einer bestimmten Zeitspanne entspricht. Die Verzögerungen werden in 5 μs -Schritten variiert und die zugehörigen Kanäle gemessen. Es ist ein linearer Zusammenhang zu erwarten, sodass über

$$t(K) = m \cdot K + n \quad (2)$$

einem Kanal eine eindeutige Zeitspanne zugeordnet werden kann. K ist dabei die Kanalnummer, m ist die Steigung in μs pro Kanalnummer und n der y -Achsenabschnitt in μs .

3.4. Messung der Myonen

Sobald alle Kalibrierungen vorgenommen wurden, kann die Messung der Myonen beginnen. Die erwartete Lebensdauer beträgt circa 2 μs . Um eine gute Statistik zu erhalten, wird also eine Suchzeit von ungefähr 10 μs eingestellt. Das ist die Zeit, die zwischen Eintritt und Zerfall eines Myons verstreicht. Der Counter wird an die beiden AND-Gatter verbunden, sodass alle Startsignale und Stoppsignale auch gezählt werden. Die Messung läuft für ungefähr 48 Stunden.

Es besteht die Möglichkeit, dass zwei Myonen sehr zeitnah eintreffen, was dazu führen würde, dass ein Stoppsignal nicht durch den Zerfall eines Myons, sondern durch ein weiteres Eintreten ausgelöst wird. Dieser Prozess wird als Untergrund U behandelt und kann berücksichtigt werden. Wird eine Poissonverteilung der Wahrscheinlichkeit eines doppelten Eintritts angenommen, ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit, dass ein zweites Myon eintritt

$$P(1) = T_S \cdot N_{\text{Myon}} \cdot \exp(-T_S \cdot N_{\text{Myon}}) \quad (3)$$

mit der Suchzeit T_S und der Eintrittsrate der Myonen $N_{\text{Myon}} = \frac{N_{\text{start}}}{t_{\text{Mess}}}$. Die Anzahl fehlerhafte Counts pro Kanal ergibt sich dann zu

$$U = \frac{N_{\text{start}} \cdot P(1)}{\#\text{Kanäle}}. \quad (4)$$

4. Auswertung

Für die Auswertung wird die Python-Bibliothek `numpy` [7] benutzt. Die Fits entstehen mit `curve_fit` aus `scipy.optimize` [8]. Die Fehlerrechnung wird mit `uncertainties` [9] durchgeführt. Plots entstehen mit `matplotlib.pyplot` [10].

4.1. Kalibrierung

Der Delay wird wie in Unterabschnitt 3.3 gemessen, die Messdaten sind in Abbildung 7 dargestellt.

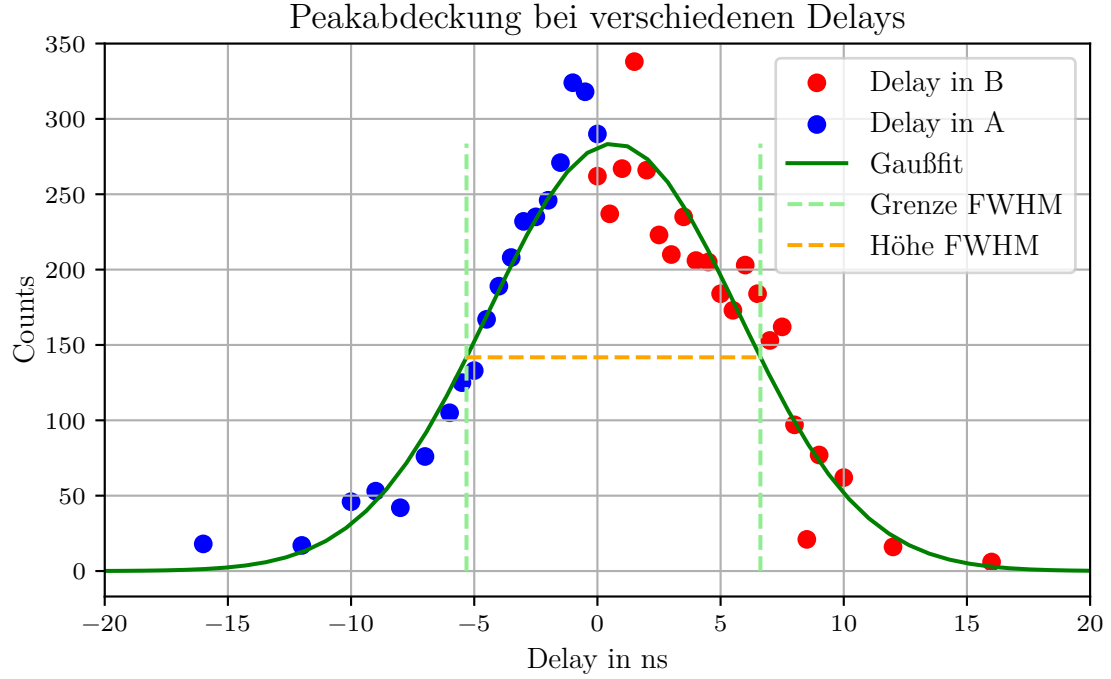


Abbildung 7: Messung des Delays. Bei den blauen Messpunkten ist die Verzögerung in PM „A“ eingestellt worden, bei den roten in PM „B“. Ebenfalls ist ein Gaußfit mit FWHM dargestellt.

Es ist erkennbar, dass ein Delay in beide Richtungen zu einem Sinken der gemessenen Counts führt.

Der Gaußfit der Form

$$f(x) = a \cdot \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma^2}\right),$$

x ist der eingestellte Delay in Nanosekunden, hat die Parameter

$$a = 283,61 \pm 7,86$$

$$x_0 = (0,651 \pm 0,175) \text{ ns}$$

$$\sigma = (5,07 \pm 0,20) \text{ ns}$$

mit einer FWHM-Breite von

$$\text{FWHM} = (11,93 \pm 0,46) \text{ ns}.$$

Die Kalibrierung für den MCA wird ebenfalls wie in Unterabschnitt 3.3 beschrieben durchgeführt. Die Messdaten sind in Abbildung 8 dargestellt.

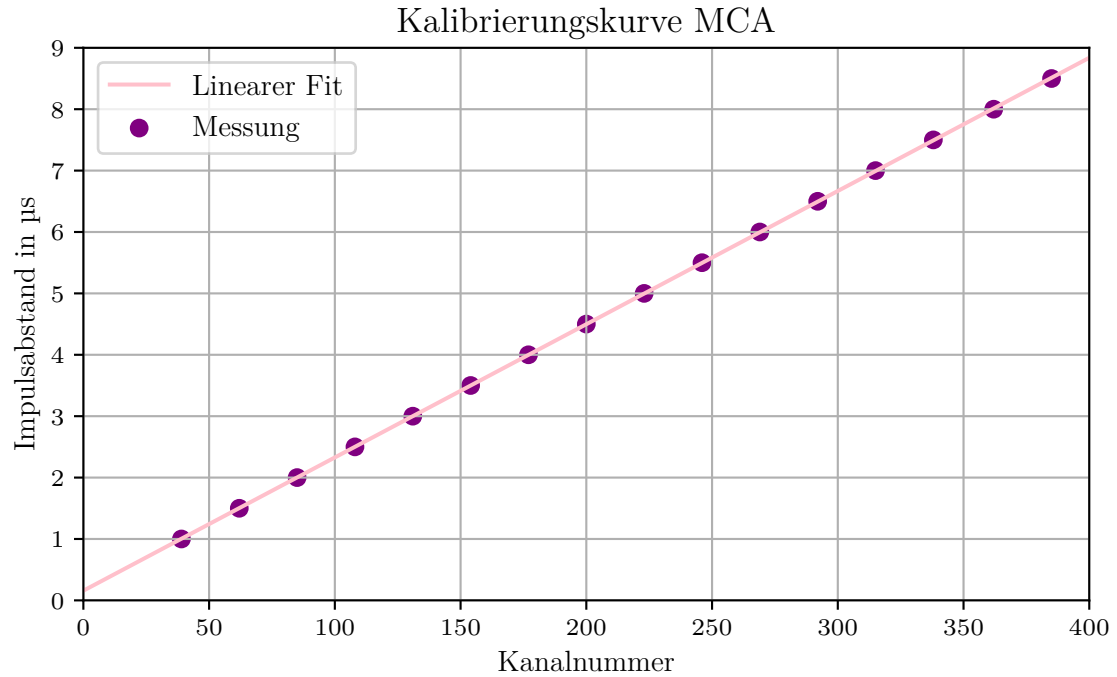


Abbildung 8: Kalibrierung des MCA. Dargestellt sind der eingestellte Impulsabstand gegen die zugeordnete Kanalnummer. Ebenfalls ist ein linearer Fit dargestellt.

Der lineare Fit nach Gleichung 2 hat die Parameter

$$m = (0,021\,700 \pm 0,000\,015) \mu\text{s/Kanal}$$

$$n = (0,1577 \pm 0,0035) \mu\text{s}.$$

Über diese Funktion können die Kanalnummern in Zeiten umgerechnet werden.

4.2. Messung der Myonen

Die Messung der Myonen wird wie in Unterabschnitt 3.4 beschrieben durchgeführt. Die Kanäle werden wie zuvor beschrieben in Zeiten umgerechnet und die Counts der Kanäle gegen die Zeit aufgetragen, siehe Abbildung 9. Es werden 1 496 787 Startsignale und 3144 Stoppsignale gemessen.

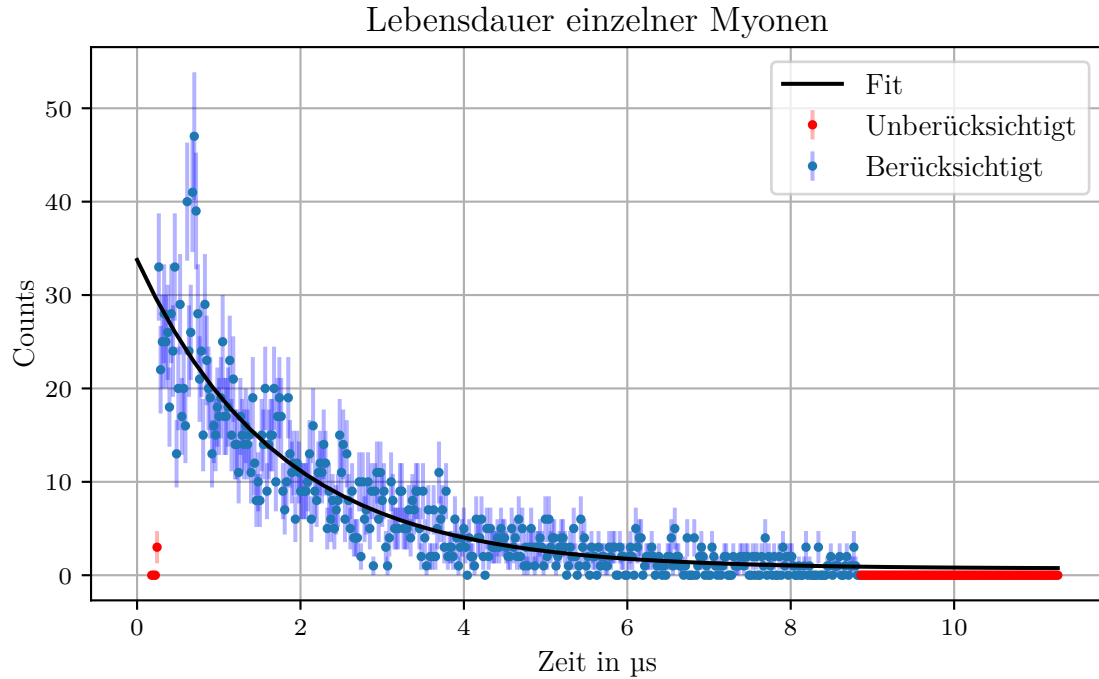


Abbildung 9: Messung der Myonenlebensdauer. Dargestellt sind die gemessenen Counts gegen die Zeit. Ebenfalls ist ein exponentieller Fit nach Gleichung 1 dargestellt. Blau sind die dafür berücksichtigten Messpunkte, rot jene, die dafür ignoriert wurden.

Der exponentielle Fit nach Gleichung 1 hat die Parameter

$$N_0 = 93,8 \pm 146\,477\,176,8$$

$$\lambda = (0,575 \pm 0,035) \frac{1}{\mu\text{s}}$$

$$T = (-1,815 \pm 2\,716\,074,511) \mu\text{s}$$

$$U = 0,712 \pm 0,326.$$

Für die mittlere Lebensdauer ergibt sich somit

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = (1,739 \pm 0,105) \mu\text{s}.$$

Neben dem Untergrund für den durchgeführten Fit kann dieser auch wie in Gleichung 3 und 4 beschrieben berechnet werden, es ergibt sich

$$U = 0,250 \text{ Counts/Kanal}.$$

5. Diskussion

Im Folgenden Abschnitt werden die gefundenen Ergebnisse diskutiert.

5.1. Kalibrierung

Die in Abbildung 7 dargestellten Ergebnisse deuten darauf hin, dass die beiden Signale der PMs fast zeitgleich eintreffen, da die meisten Counts bei einem Delay von ungefähr 0 gemessen wurden. Die Abnahme der Counts bei höheren und niedrigeren Delays ist damit zu erklären, dass die Signale wie in Abbildung 6 dargestellt eine Breite besitzen und der Überlapp, also die Menge der gleichzeitig eintreffenden Counts, abnimmt. Der eingestellte Delay von 0 ns ist somit begründet.

Die Kalibrierung des MCA in Abbildung 8 zeigt die zu erwartende lineare Abhängigkeit zwischen Kanalnummer und Zeit.

5.2. Messung der Myonen

Die in Abbildung 9 dargestellten Messdaten zeigen den erwarteten exponentiellen Abfall der Myonenanzahl über die Zeit. Sehr hohe Zeiten werden gar nicht gemessen, da statistisch nur sehr wenige Myonen so lange leben. Bei einer längeren Messzeit wäre zu erwarten, auch hier Counts über 0 zu erhalten. Ebenfalls auffällig ist die Abweichung der ersten Messpunkte vom exponentiellen Fit, dort ist ein sehr rasanter Anstieg der Counts zu erkennen, der nicht auf der Natur der Myonen beruhen kann, weshalb diese Messwerte für die Auswertung vernachlässigt wurden. Da die Zeit der Myonen zwischen Eintritt und Zerfall in diesen Kanälen sehr kurz ist, könnte es vorstellbar sein, dass die geringe Anzahl der Counts auf elektrotechnische Effekte zurückzuführen ist, die durch eine nicht perfekte Justierung des Delays bedingt sind.

Die gefundene Lebensdauer τ beträgt

$$\tau = (1,739 \pm 0,105) \mu\text{s}$$

und hat somit eine Abweichung vom Literaturwert $\tau_{\text{lit}} = 2,196 \mu\text{s}$ von etwa 20,8 %. Es sei hier angemerkt, dass die Lebensdauer unter Berücksichtigung aller Messwerte bei $(2,345 \pm 0,147) \mu\text{s}$ liegen würde, was eine Abweichung von nur 6,7 % zum Literaturwert bedeuten würde. Allerdings ist diese Auswertung durch die nicht erklärbaren Messwerte bei geringen Zeiten verfälscht.

A. Originaldaten

Literatur

- [1] Universität Bonn. *Myonen in der Theorie*. URL: <https://www.physik-astro.uni-bonn.de/cosmics4school/de/myon>.
- [2] Lexikon der Physik. *Kosmische Strahlung*. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/kosmische-strahlung/8412>.
- [3] Lexikon der Physik. *Schauer*. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/schauer/12832>.

- [4] Dr. Manfred Krammer. *5. Szintillatoren*. URL: <https://web-docs.gsi.de/~wolle/Schuelerlabor/TALKS/DETEKTOREN/VO-5-Szintillatoren.pdf>.
- [5] DESY. *Praktikum im DESY Zeuthen*. URL: https://www-zeuthen.desy.de/exps/physik_begreifen/chris/Photomultiplier.html.
- [6] Wikipedia. *Photomultiplier*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier>.
- [7] Charles R. Harris u. a. „Array programming with NumPy“. In: *Nature* 585.7825 (Sep. 2020), S. 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.
- [8] Pauli Virtanen u. a. „SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python“. In: *Nature Methods* 17 (2020), S. 261–272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.
- [9] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 3.1.7. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [10] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. DOI: 10.1109/MCSE.2007.55. URL: <http://matplotlib.org/>. Current version 3.7.2, DOI: 10.5281/zenodo.8118151.