

# **V702 - Aktivierung mit Neutronen**

David Gutnikov  
david.gutnikov@udo.edu

Lasse Sternemann  
lasse.sternemann@udo.edu

Bearbeitet am 29.05.2020

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
1.1	Myonen . . . . .	3
1.2	Lebensdauer von Teilchen . . . . .	4
1.3	Detektion von Myonen . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Auswertung</b>	<b>7</b>
2.1	Bestimmung der Untergrundrate . . . . .	7
2.2	Justierung der Verzögerungsleitungen . . . . .	7
2.3	Kalibrierung des TAC-MCA . . . . .	8
2.4	Bestimmung der Lebenszeit . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Diskussion</b>	<b>11</b>

# 1 Theoretische Grundlagen

## 1.1 Myonen

Myonen sind Fermionen und haben demnach einen Spin von  $\frac{1}{2}$ . Ihre Ladung beträgt  $-1e$ , ihre Masse in natürlichen Einheiten  $106 \text{ MeV}$  und ihre Lebensdauer  $\tau = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ . Die Hauptprozesse zur Erzeugung von Myonen sind die schwachen Zerfälle von geladenen Pionen

$$\begin{aligned}\pi^+ &\longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- &\longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu\end{aligned}$$

in ein positives oder negatives Myon und das entsprechende Myon-Neutrino. Diese Zerfälle sind ein Folgezerfall von kosmischen Protonen, die in einer Höhe von  $15\text{-}20\text{ km}$  über der Erde in der Atmosphäre Pionen erzeugen, welche wiederum um  $15\text{ km}$  über der Meereshöhe, wie bereits beschrieben, über die schwache Wechselwirkung in geladene Myonen zerfallen. Während der Propagation der Myonen können auch sie wieder zerfallen. Dies geschieht erneut über die schwache Wechselwirkung

$$\begin{aligned}\mu^- &\longrightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e \\ \mu^+ &\longrightarrow \bar{\nu}_\mu + e^+ + \nu_e\end{aligned}$$

wobei hauptsächlich Elektronen beziehungsweise Positronen, sowie die entsprechenden Neutrinos dieser und des zerfallenden Myons entstehen. Der Weg den die Myonen bis zu ihrem Zerfall zurücklegen, kann für einen auf der Erde ruhenden Beobachter auf zwei Wegen berechnet werden. Angenommen das Myon besitzt eine Energie von  $E_\mu 10 \text{ GeV}$ , berechnet sich die Geschwindigkeit des Myons  $v_\mu$  klassisch über die Gesamtenergie dessen

$$E_\mu^2 = m_\mu^2 c^4 + p_\mu^2 c^2 \quad \underline{p_\mu = \gamma_\mu m_\mu v_\mu} \quad v_\mu \approx 0,999\,94c.$$

Daraus ergibt sich über das Weg-Zeit-Gesetz folgende Reichweite

$$s = v_\mu \cdot \tau_\mu \approx 658,617 \text{ m},$$

die keine Myonen auf Meereshöhe erlauben würde. Dass dennoch Myonen detektiert werden, kann durch Einbeziehen der Längenkontraktion gezeigt werden. Demnach haben die Myonen folgende Reichweite

$$s' = \frac{s}{\gamma} \approx 60 \text{ km}$$

und können auf Meereshöhe detektiert werden. Dies erlaubt auch einen durchschnittlichen Fluss von einem Myon pro  $\text{cm}^2$  pro Minute auf Meereshöhe. Daraus kann die erwartete Ereignisrate in einem Szintillatortank, der als auf dem Boden liegender Zylinder angenommen wird, berechnet werden. Das Volumen des Zylinders entspricht 50 l und die Höhe dem zweifachen Radius. So lässt sich die Querschnittsfläche parallel zur Erdoberfläche und daraus die erwartete Ereignisrate bestimmen

$$\text{Ereignisrate} = h^2 \cdot \frac{1 \text{ Myon}}{\text{cm}^2 \cdot \text{min}} = 1590 \text{ cm}^2 \cdot \frac{1 \text{ Myon}}{\text{cm}^2 \cdot \text{min}} = \frac{1590 \text{ Myonen}}{\text{min}}$$

## 1.2 Lebensdauer von Teilchen

Die Lebensdauer von Teilchen ist eine mittlere Lebensdauer, da sie angibt, dass 63,2% aller Teilchen in dieser Zeit zerfallen. Sie lässt sich herleiten, indem angenommen wird, dass innerhalb eines infinitesimalen Zeitraums eine Zerfallswahrscheinlichkeit vorhanden ist, die proportional über eine Zerfallskonstante  $\lambda$  mit dem Zeitraum zusammenhängt

$$dW = \lambda dt \quad (1)$$

Die Anzahl an Teilchen die in diesem Zeitraum zerfallen ergibt sich durch Multiplikation von (1) mit der aktuellen Teilchenzahl  $N$

$$-NdW = -\lambda Ndt$$

Integrieren und Umstellen dieser Gleichung ergibt das bekannte Zerfallsgesetz

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (2)$$

mit der Zerfallskonstante  $\lambda$  und den zum Startzeitpunkt vorhanden Teilchen  $N_0$ . Die mittlere Lebensdauer lässt sich bestimmen, indem der Erwartungswert der Zeit  $t$  aus der zu (2) gehörenden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion berechnet wird.

$$\tau = \int_0^\infty t \lambda \cdot e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

Somit ergibt sich die mittlere Lebensdauer als Inverses der Zerfallskonstante  $\lambda$ .

## 1.3 Detektion von Myonen

Zur Detektion von Myonen können Szintillatoren genutzt werden. Der Konzept der Szintillation beruht darauf, dass einfallende Strahlung Atome des Szintillationsmediums

entweder ionisiert oder anregt und diese beim Relaxieren Photonen freisetzen, die detektiert werden. Grundsätzlich wird zwischen organischen und anorganischen Szintillatoren unterschieden.

## Anorganische Szintillatoren

Anorganische Szintillationsmedien sind nicht leitende Festkörper, sodass die Eigenschaften der Szintillation von der Gitter- und Bandstruktur des Festkörpers abhängig sind. Da die Szintillationsmedien nicht leiten, liegt eine Energielücke von 4 bis 12 eV zwischen dem Leitungs- und Valenzbands, in der auch die Fermi-Energie liegt. Aufgrund der moderaten Energielücke handelt es sich um Halbleiter, die jedoch noch um ein Lumineszenzzentrum erweitert werden müssen. Diese Zentren sind Bereiche, in denen der Abstand zwischen möglichen Energiezuständen geringer ist als zwischen dem Valenz- und Leitungsband und können entweder durch äußere Dotierung hervorgerufen werden oder sind durch intrinsische Defekte des Mediums bereits vorhanden.

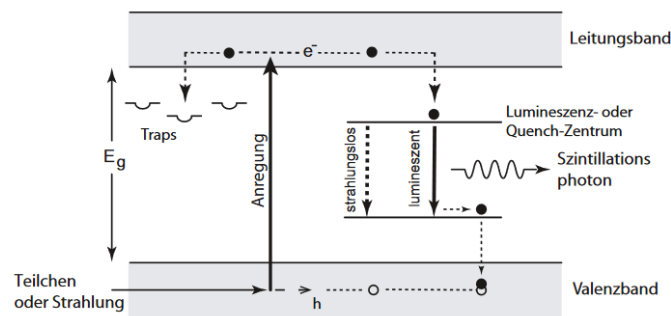


Abbildung 1: In der Abbildung ist die Bandstruktur eines anorganischen Szintillationsmediums, sowie der Ablauf des Szintillationsprozesses abgebildet. Entnommen aus [kolanoski\_teilchendetektoren\_2016]

Wird ein Elektron durch einfallende Strahlung in das Leitungsband angehoben, muss es zunächst zum Lumineszenzzentrum wandern. Dieser Weg ist der Grund dafür, dass anorganischen Szintillatoren hohe Rückfallzeiten haben und daher weniger zeit-sensitiv als organische Szintillatoren sind. Am Lumineszenzzentrum fällt das Elektron zunächst in den oberen Energiezustand des Zentrums und von diesem in den unteren Zustand, bevor es zurück ins Valenzband fällt. Das dabei freigesetzte Photon wird detektiert und hat aufgrund des Übergangs durch das Lumineszenzzentrum eine andere Energie, als die einfallende Strahlung.

## Organische Szintillatoren

Bei organischen Szintillatoren handelt es sich um organische Moleküle, die immer Kohlenstoff enthalten. Die elektronische Struktur des Kohlenstoffs spielt eine entscheidende Rolle

für den Szintillationsprozess und ändert sich, sobald das Kohlenstoff in einem Molekül gebunden ist.



In der Molekülverbindung können die s- und p-Orbitale nun unterschiedlich miteinander hybridisieren. Zu lumineszenten Übergängen kommt es, wenn nur 2 der 3 2p-Orbitale hybridisieren. In diesem Fall bleibt ein 2p-Orbital unverändert, das nun die sogenannten  $\pi$  – Elektronen enthält. Die Übergänge dieser  $\pi$  – Elektronen Energieniveaus sind für die Fluoreszenz verantwortlich. Da die Elektronen vor dem Zurückfallen auf den Ausgangszustand bereits kleine Übergänge durchlaufen, ist auch hier die Energie der Fluoreszenzelektronen unterschiedlich zu der der anregenden Photonen, sodass Erneutanregungen durch Fluoreszenzelektronen vermieden werden. Der Vorteil organischer Szintillationsmedien ist, dass sie auch besonders schnelle Signale zuverlässig detektieren können.

### Photovervielfacher

Zur Detektion der Szintillationsphotonen werden Photovervielfacher genutzt. Sie bestehen aus einer großen Einfalsskathode, aus der einfallende Photonen Photoelektronen auslösen. Diese Photoelektronen werden daraufhin durch eine hohe Spannung auf mehrere Dynoden beschleunigt. Bei jedem Auftreffen auf eine Dynode werden zusätzliche Elektronen ausgelöst und es bildet sich folglich eine Lawine an Sekundärelektronen. So kann das Primärelektron um einen Faktor von circa  $10^6$  verstärkt und so messbar gemacht werden. Neben der Möglichkeit bereits ein einzelnes Photon zu detektieren, besitzen Photovervielfacher auch eine gute Zeitauflösung im Bereich unter 200 ps und eignen sich daher auch für schnelle Zerfallsprozesse.

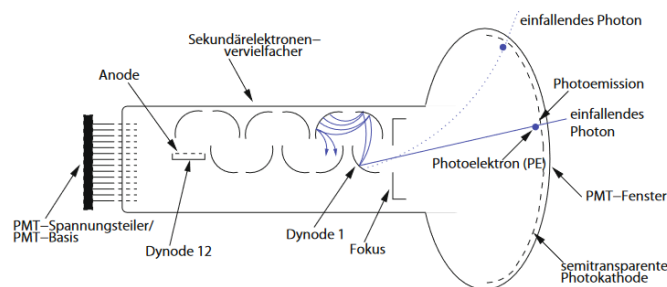


Abbildung 2: In der Abbildung ist der schematische Aufbau eines Photonvervielfachers dargestellt. Entnommen aus [kolanoski\_teilchendetektoren\_2016]

## 2 Auswertung

### 2.1 Bestimmung der Untergrundrate

In einem Zeitraum von  $T = 327256$  s wurden  $N_{\text{Start}} = 6543685$  Startsignale und  $N_{\text{Stopp}} = 25257$  Stoppsignale aufgenommen. Damit ergibt sich eine durchschnittliche Rate von:

$$r = \frac{N_{\text{Start}}}{T} = \frac{6543685}{327256} \approx 20,00 \frac{\text{Myonen}}{\text{s}}$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass genau ein weiteres Myon ( $k = 1$ ) in der Suchzeit  $T_S = 10 \mu\text{s}$  nach einem vorherigen Myon ein Signal erzeugt ist poissonverteilt und damit:

$$p(k) = \frac{(T_S \cdot r)^k}{k!} \exp(-T_S \cdot r)$$

$$p(1) = T_S r \cdot \exp(-T_S r) \approx 0,02000\%$$

Der Untergrund setzt sich aus diesen während einer angefangenen Suchzeit ankommenden Myonen zusammen. Also ist die Anzahl dieser fehlerhaften Signale gegeben durch:

$$N_{\text{fehl}} = p(1) \cdot N_{\text{Start}} \approx 1308$$

Für jeden der 225 besetzten Kanäle (gesamt 512 Kanäle) im MCA wäre der Untergrund somit:

$$u_{\text{theo}} \approx 5,81$$

### 2.2 Justierung der Verzögerungsleitungen

Die Signale aus den Photomultipliern sollten möglichst zeitgleich an der Koinzidenz ankommen. Das heißt, dass die Anzahl der Signale, die die Koinzidenz durchlässt steigt je kleiner der zeitliche Abstand zwischen den beiden ankommenden Signalen ist. Da die beiden Signale nie genau im selben Zeitpunkt ankommen können, hat die Koinzidenz ein kleines Toleranzintervall (die Auflösungszeit), weshalb ein Plateau zu sehen sein müsste, wenn die Counts gegen die Zeitdifferenz aufgetragen werden.

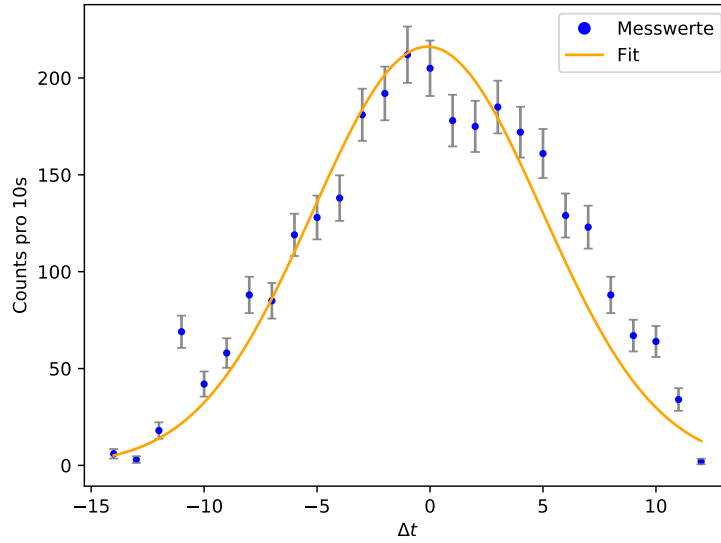


Abbildung 3: Die an der Koinzidenz gemessenen Counts/10s sind gegen die Zeitdifferenz zwischen den beiden Verzögerungsleitungen aufgetragen.

Es wird eine Gauß-Glocke an die Messwerte gefittet

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

mit den folgenden Parametern:

$$a = 216,19 \pm 14,21$$

$$x_0 = (-0,11 \pm 0,29) \text{ ns}$$

$$\sigma = (-5,08 \pm 0,20) \text{ ns}$$

Im Nachfolgenden wurde die Stelle der maximalen Counts als Nullpunkt gewählt und alle darauffolgenden Schritte wurden mit dieser Einstellung der Verzögerungsleitung durchgeführt.

## 2.3 Kalibrierung des TAC-MCA

Das TAC gibt zu einem gemessenen Zeitintervall proportionale Spannungsamplitude an den MCA weiter, welche dann ihrer Größe nach in Kanäle geordnet werden. Um den Proportionalitätsfaktor zwischen den Amplituden und den Zeitintervallen zu bestimmen werden verschiedene Pulsabstände an einem Doppelimpulsgenerator eingestellt und gegen die Kanäle im MCA aufgetragen. Dadurch wird bestimmt welchem Kanal welcher Zeitabstand zugeordnet ist, bzw. der Proportionalitätsfaktor wird bestimmt.



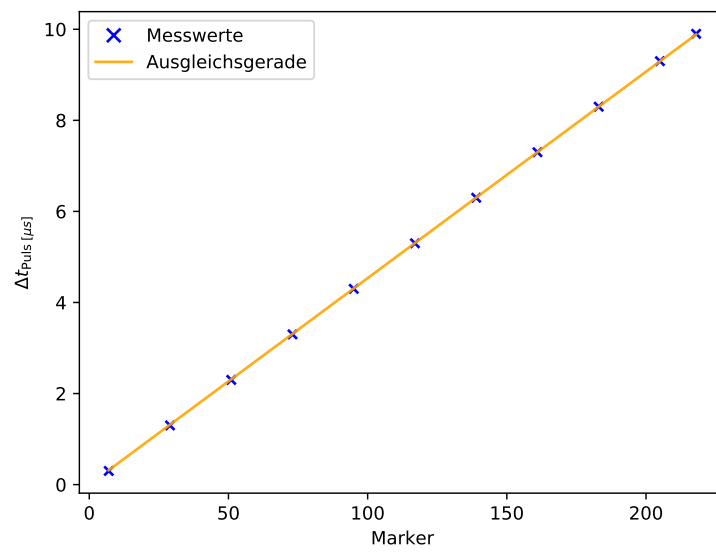


Abbildung 4: Das eingestellte Zeitintervall zwischen den Pulsen am Doppelimpulsgenerator ist gegen die Kanäle des MCA aufgetragen.

Durch die Messwerte wird ein linearer Fit gelegt

$$f(x) = m \cdot x$$

mit der Steigung:

$$m = (0,045348 \pm 0,000024) \mu s$$

## 2.4 Bestimmung der Lebenszeit

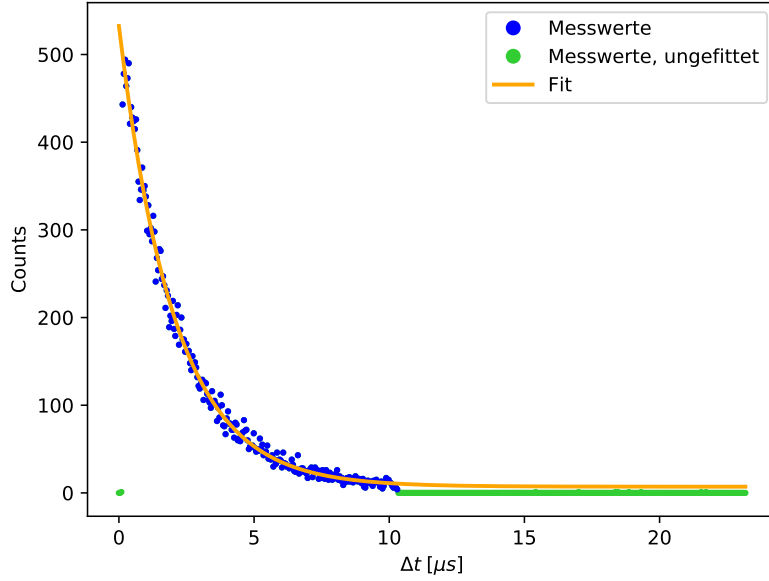


Abbildung 5: Die über 4 Tage aufgenommenen Counts sind gegen die Zeitintervalle vom Start bis zum Stopp der jeweiligen Messung aufgetragen. Aufgrund der Einschränkung durch das gewählte Messintervall werden die grün markierten Messpunkte nicht beachtet.

Über einen Zeitraum von ca. 90,9 Stunden wurden 23944 Myonen-Zerfälle aufgenommen. In Abbildung 5 ist wie zu erwarten ein exponentieller Verlauf der Lebenszeit zu erkennen. Zur Bestimmung der Zerfallskonstante  $\lambda$  aus dem Zerfallsgesetz (2) wird eine Exponentialfunktion an die Messwerte gefittet,

$$f(x) = A \cdot \exp(-\lambda t) + u$$

wobei  $u$  der Untergrund während Messung ist. Als Parameter ergeben sich:

$$\lambda = (0,4873 \pm 0,0067) \mu s^{-1}$$

$$u = 7,09 \pm 1,39$$

Der zuvor berechnete Untergrund von  $u_{\text{theo}} \approx 5,81$  ist in der Messunsicherheit enthalten.

Mit  $\lambda$  ergibt sich eine mittlere Myonenlebensdauer von

$$\tau_{\mu} = \frac{1}{\lambda} = (2,052 \pm 0,028) \mu s$$

mit einer relativen Messabweichung vom Theoriewert  $\tau_{\text{theo}} \approx 2,197 \mu s$  von:

$$a_{\tau} = \frac{\tau_{\mu} - \tau_{\text{theo}}}{\tau_{\text{theo}}} \approx 6,6\%$$

### 3 Diskussion

Der Graph zur Justierung der Verzögerungsleitungen in Abbildung 3 sollte eigentlich ein Plateau statt eines Peaks aufweisen. Wir können das Auftreten des Peaks leider nicht erklären.

Der weitere Versuch wurde mit der Justage der Verzögerungsleitungen fortgeführt, die dem Messpunkt im Ursprung des Graphen zugeordnet ist. Der Fit der Gaußglocke bestätigt diese Wahl, da seine Symmetrieachse sehr nah am Ursprung liegt.

Die Nähe des theoretisch berechneten Untergrundes zum tatsächlich gemessenen Untergrund dient als Bestätigung der Annahme der Poissonverteilung.

Die resultierende Lebensdauer der Myonen weicht nur ca. 6,6% vom eigentlichen Theoriewert ab, was ein Indiz dafür ist, dass die Messung erfolgreich verlaufen ist.