

**F-Praktikum Ia/c**  
**Experimentelle Physik**  
**Eigenschaften eines organischen**  
**Szintillationszählers\***

Klaudia Herbst      Manfred Thomann

18.02.2004

\*Wir erklären, dass wir dieses Protokoll eigenhändig anhand unseres Messprotokolls und der angegebenen Literatur erstellt haben.

Sich mit den Eigenschaften und der Wirkungsweise eines organischen Szintillators vertraut zu machen steht als Ziel dieses Versuches. Ein Szintillationszähler besteht aus zwei verschiedenen Komponenten, dem Szintillator und dem Photomultiplier. Dabei unterscheidet man vier Arten von Szintillatoren: anorganische Einkristalle, organische Flüssigkeiten, organische Plastikmaterialien und Edelgase.

In diesem Versuch werden verschiedene Detektoren mit elektrischen Komponenten verkabelt, der Arbeitspunkt wird bestimmt, diverse Eigenschaften des Photomultipliers untersucht und die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals im organischen Szintillatormaterial gemessen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>1</b>
1.1	Myonen . . . . .	1
1.2	Szintillatoren . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Durchführung</b>	<b>2</b>
2.1	Aufbau . . . . .	2
2.2	Bestimmung des Arbeitspunktes . . . . .	3
2.3	Ladungsmessung als Testmessung . . . . .	3
2.4	Ladungsmessung an $TZ_1$ . . . . .	5
2.5	Bestimmung der Diskriminatorschwelle . . . . .	7
2.6	Ladungsmessung in Abhängigkeit der Durchgangsposition . . . . .	8
2.7	Laufzeitmessung . . . . .	9
2.7.1	Zeiteichung . . . . .	9
2.7.2	Durchführung der Messung . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Probleme und Verbesserungsvorschläge</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Korrektur</b>	<b>11</b>
4.1	Testmessung . . . . .	11
4.2	Ladungsmessung an $TZ_1$ . . . . .	11
4.3	Bestimmung der Diskriminatorschwelle . . . . .	12

# Abbildungsverzeichnis

1	Aufbau der Testszintillatoren [3] . . . . .	2
2	Ladungskurve [1] . . . . .	6
3	Schaltung für Ladungsmessung [1] . . . . .	6
4	Schaltung für die Zeitmessung [3] . . . . .	9

# Tabellenverzeichnis

1	Messdaten . . . . .	4
2	Ansprechvermögen der Detektoren . . . . .	4
3	Ortsabhängigkeit . . . . .	8
4	Eichung in Position nah . . . . .	9
5	Bestimmung der benötigten Zeit . . . . .	10

# 1 Theoretische Grundlagen

## 1.1 Myonen

In der Elementarteilchenphysik unterscheidet man drei große Gruppen von Teilchen, die Leptonen, Mesonen und Baryonen. Myonen sind Leptonen welche in circa 20 Kilometer Höhe durch Wechselwirkung von kosmischer Strahlung mit der Erdatmosphäre als Sekundärstrahlung entstehen.

Zuvor entstehen jedoch erstmalig Pionen,  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ , welche der Gruppe der Mesonen zugeordnet werden, die nach 26 ns zerfallen.

Da  $\pi^0$  sehr selten vorkommt, wird nur den  $\pi^+$ - und den  $\pi^-$ - Zerfällen Beachtung geschenkt.

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

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

Myonen sind ebenso wie die Pionen instabil und zerfallen nach etwa 2,2  $\mu s$ .

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

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

Trotz ihrer kurzen Lebensdauer stellen die Myonen den Hauptbestandteil der kosmischen Strahlung am Boden dar. Dies ist auf relativistische Effekte (Zeitdilatation für den Beobachter und Längenkontraktion aus Sicht der Myonen) zurückzuführen, da sich Myonen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit bewegen.

Es besteht die Möglichkeit das negative Myonen von Atomkernen eingefangen werden. Es entstehen sogenannte Myon-Atome, welche dem Bohr-Atom sehr ähnlich sind. Gravierender Unterschied besteht jedoch in der Masse, denn die Masse des Myons ist um einen Faktor 200 größer als die des Elektrons.

## 1.2 Szintillatoren

Zu untersuchen sind Myonen. Sie treten in den Szintillator ein. Dabei werden die Szintillatoratome angeregt, da sie die Energie des Myons aufnehmen, und diese in Form von Lichtimpulsen (Szintillationen) emittieren. Man unterscheidet zwischen organischen und anorganischen Szintillatoren. Der Vorteil anorganischer Szintillatoren liegt darin, daß sie einen größeren Teil der absorbierten Energie in Licht umwandeln, jedoch besitzen sie höhere Abklingzeiten. Wichtig ist, dass Szintillationsmaterialien durchsichtig sind und daß die Frequenz des erzeugten Lichts ausreicht, um auf der Photoelektrode des Photomultipliers Elektronen auslösen zu können. Wir verwenden einen (organischen) Plastikszintillator.

## 2 Durchführung

### 2.1 Aufbau

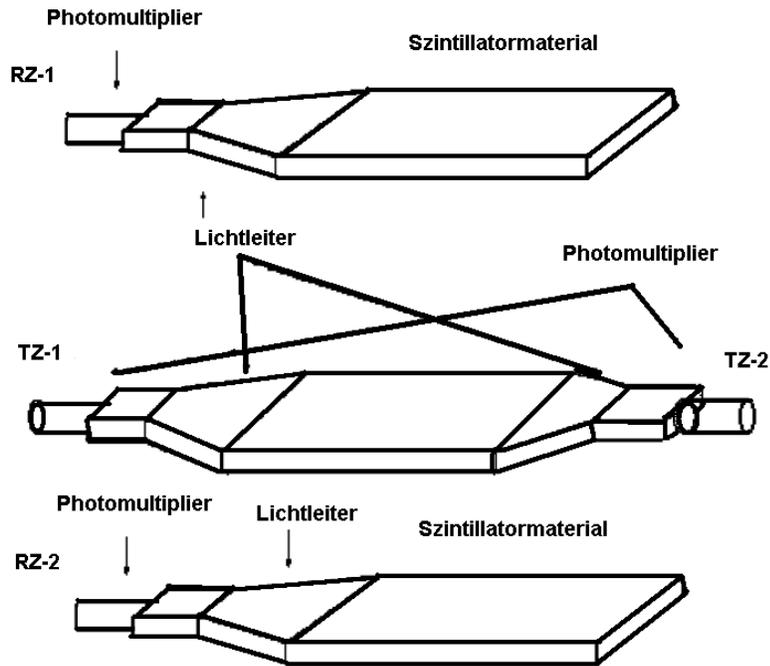


Abbildung 1: Aufbau der Testszintillatoren [3]

Abbildung 1 zeigt den Versuchsaufbau. Dabei liegt Referenzzähler 1 ( $RZ_1$ ) auf Testzähler TZ-i ( $i=1,2$ ) und ein weiterer Referenzzähler ( $RZ_2$ ) ist darunter angebracht. Anfangs liegen die Referenzzähler noch wie in der Abbildung dargestellt. Im späteren Verlauf werden diese um  $90^\circ$  gedreht.

Die jeweiligen Zähler werden an unsere Meßapparatur angeschlossen. Diese Meßapparatur ist in der Lage logische Verknüpfungen zwischen den Zählern zu bilden. UND-Verknüpfungen kennzeichnen wir mit "\*".

Es werden 9 Kanäle der Meßapparatur belegt.

input	Verknüpfung
1	$RZ_1$
2	$RZ_2$
3	$K(RZ_1 * RZ_2)$
4	$TZ_1$
5	$TZ_2$
6	$K(RZ_1 * RZ_2 * TZ_1)$
7	$K(RZ_1 * RZ_2 * TZ_2)$
8	$K(TZ_1 * TZ_2)$
9	$K(RZ_1 * RZ_2 * TZ_1 * TZ_2)$

## 2.2 Bestimmung des Arbeitspunktes

Für das Ansprechvermögen eines Szintillationszählers gilt

$$\mu(TZ - i) = \frac{K(RZ_1 * RZ_2 * TZ - i)}{K(RZ_1 * RZ_2)},$$

und für dessen Fehler

$$\sigma_{\mu(TZ-i)} = \sqrt{\frac{\mu(TZ - i) \cdot (1 - \mu(TZ - i))}{K(RZ_1 * RZ_2)}}.$$

Die Spannung U wird von 2000 V auf 3000 V in 100 V-Schritten erhöht, und alle Meßdaten aufgenommen. Um anschließend den geeignetsten Arbeitspunkt zu bestimmen muss die Spannung U gegen das Ansprechvermögen aufgetragen werden.

Die von uns errechneten Werte für  $\mu(TZ - i)$  und  $\sigma_{\mu(TZ-i)}$  sind in Tabelle 2 berechnet und wurden in der Grafik „Ansprechvermögen“ im Anhang aufgetragen.

Um einen optimalen Arbeitspunkt zu erreichen, muss das Ansprechvermögen im Bereich der eingestellten Spannung  $U_{TZ-i}$  konstant sein. Anhand unserer Grafik ergeben sich somit folgende Arbeitspunkte:

$$U_{TZ_1} = 2600V$$

$$U_{TZ_2} = 2700V$$

Diese Werte werden nun eingestellt und nicht mehr verändert.

## 2.3 Ladungsmessung als Testmessung

Wir führen eine erste Messung der Ladung, die hinter dem Photomultiplier abgegriffen wird, am  $TZ_1$  durch. Diese Messung erstreckt sich über 30 Minuten. Das Maximum

$U_{TZ} [V]$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2000	17682	8639	559	32	0	3	0	0	0
2100	17131	8798	603	39	0	1	0	0	0
2200	17153	8894	618	1316	25	2	0	20	0
2300	16563	8737	572	1194	68	12	3	18	3
2400	16717	8771	587	22631	721	37	16	405	16
2500	16338	8971	613	22874	2761	160	40	972	38
2600	16121	9103	644	22305	10169	396	141	1833	118
2700	16100	8748	625	331688	46054	552	328	8148	329
2800	15982	9080	615	327851	114239	597	486	12262	484
2900	16078	8986	663	323349	259703	652	586	2035	586
3000	15185	8833	600	304881	7771015	590	577	30214	583

Tabelle 1: Messdaten

$U_{TZ} [V]$	$\mu(TZ_1)$	$\sigma_{\mu(TZ_1)}$	$\mu(TZ_2)$	$\sigma_{\mu(TZ_2)}$
2000	0,0056	0,0031	0	0
2100	0,0016	0,00165	0	0
2200	0,0032	0,0023	0	0
2300	0,021	0,0059	0,0047	0,0027
2400	0,063	0,01	0,024	0,0059
2500	0,26	0,018	0,065	0,0099
2600	0,62	0,019	0,23	0,017
2700	0,88	0,013	0,55	0,002
2800	0,97	0,0068	0,79	0,016
2900	0,98	0,0049	0,93	0,0099
3000	0,98	0,0049	0,97	0,0066

Tabelle 2: Ansprechvermögen der Detektoren

dieser Messung, und damit die am häufigsten absorbierte Energie, liegt auf Kanal 132, was einer Ladung  $q$  von  $13,2 \text{ pC}$  entspricht, da die Relation  $10 \text{ Kanäle} = 1 \text{ pC}$  gilt. Um die Halbwertsbreite zu bestimmen suchen wir rechts und links des Maximums die Kanäle, bei denen die Impulsrate der halben des Maximums entspricht. Wir finden dies bei Kanal 70 und Kanal 189. Die Differenz dieser beiden Kanäle, die Halbwertsbreite, ergibt  $119 \text{ Kanäle}$ , was  $11,9 \text{ pC}$  entspricht. Damit ergibt sich eine relative Halbwertsbreite von

$$\begin{aligned} FWHM_Q^{rel} &= \frac{FWHM_Q}{q} \\ &= \frac{11,9}{13,2} \\ &= 0,9 \end{aligned}$$

Die Anzahl der Photoelektronen ergibt sich mit der relativen Halbwertsbreite nach

$$\bar{n}_e = \frac{(1 - \theta) \cdot 2,4^2 \cdot k}{(FWHM_Q^{rel})^2 \cdot 0,04}$$

zu

$$\begin{aligned} \bar{n}_e &= \frac{115,2}{(FWHM_Q^{rel})^2} \\ &= 142, \end{aligned}$$

wobei  $k \equiv$  Korrekturfaktor, hier  $k=1$  und  $\theta \equiv$  Quantenausbeute der Photokathode, hier  $\theta=0,2$

Damit ergibt sich eine Gesamtverstärkung des Photomultipliers von:

$$V_{ges} = \frac{q}{\bar{n}_e \cdot e} = 5,8 \cdot 10^5$$

## 2.4 Ladungsmessung an TZ<sub>1</sub>

Die Messung des vorangehenden Versuchteils wird um weitere 30 Minuten fortgesetzt. Am VKA ergibt sich Bild 2. Das Häufigkeitsmaximum liegt diesmal bei Kanal 136, damit ist die durchschnittliche vom Photomultiplier weggehupte Ladung  $q = 13,6 \text{ pC}$ . Die Halbwertsbreite wird analog zum vorigen Abschnitt bestimmt. Die gefundenen Kanalnummern sind diesmal 66 und 190, was eine Differenz von  $124 \text{ Kanälen}$  beziehungsweise  $12,4 \text{ pC}$  bedeutet. Daraus ergibt sich eine Halbwertsbreite von

$$\begin{aligned} FWHM_Q^{rel} &= \frac{FWHM_Q}{q} \\ &= \frac{12,4}{13,6} \\ &= 0,91, \end{aligned}$$

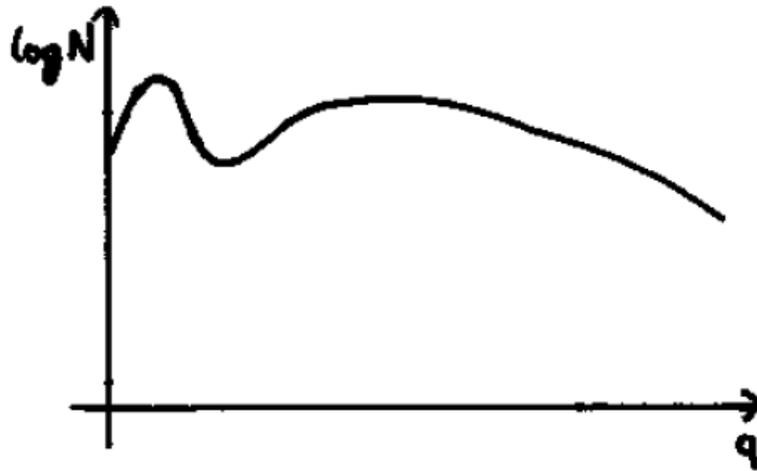


Abbildung 2: Ladungskurve [1]

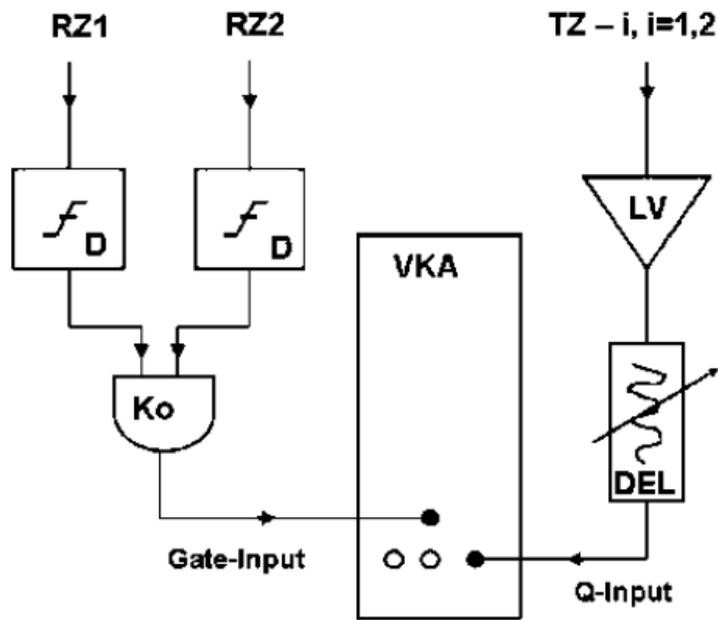


Abbildung 3: Schaltung für Ladungsmessung [1]

was wiederum einer Photonenelektronenzahl von 139, und einer Gesamtverstärkung von  $6,11 \cdot 10^5$  entspricht. Die Anzahl der auf die Photokathode treffenden Photonen berechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned} n_k &= \frac{1}{\theta \cdot n_e} \\ &= 695 \end{aligned}$$

Das Auflösungsvermögen  $\sigma_e$  berechnet sich bei Approximation des Spektrums durch eine Gauss-Funktion folgendermaßen:

$$\begin{aligned} \sigma_e &= \frac{1}{2,36} \cdot FWHM \\ &= \frac{1}{2,36} \cdot 12,4pC \\ &= 5,25pC \end{aligned}$$

Die relative Auflösung beträgt:

$$\begin{aligned} \sigma_e^{rel} &= \frac{\sigma_e}{q} \\ &= \frac{5,25pC}{13,2} \\ &= 0,397 \end{aligned}$$

Das Delay hat die Aufgabe, die Ladungsmessung hinter dem Photomultiplier nicht unmittelbar nach Registrierung eines Signals durch die beiden Referenzzähler zu starten. Der Energieverlust von Myonen auf der Wegstrecke  $dx$  im Szintillatormaterial wird mit Hilfe der Bethe-Bloch-Formel [2] wie folgt berechnet.

$$\frac{dE}{dx} = 0,15 \frac{\rho Z z^2}{A \beta^2} \ln(a \cdot E) \frac{MeV cm^2}{g}$$

mit  $\beta = 0,998$ ,  $\rho = 1 \frac{g}{cm^3}$ ,  $z=1$ ,  $Z=8$ ,  $A=16$ ,  $E=300$  MeV,  $a$ = Materialkonstante  
 Diese Werte ergeben einen Energieverlust  $\Delta E/\Delta x = 2$  MeV/cm, in unserem 2 cm dicken Szintillator also 4 MeV. Bei konstantem Energieverlust der Myonen im Szintillator werden in diesem bei einer Szintillatordicke von 2 cm circa 10000 Photonen erzeugt. Ein Myon setzt bei Durchquerung des Materials fast seine gesamte Energie in die Erzeugung von Licht, also Photonen, um. Also beträgt die in Lichterzeugung umgesetzte Energie  $E \approx 4$  MeV.

## 2.5 Bestimmung der Diskriminatorschwelle

Der Photomultiplier muss eine bestimmte Ladungsgröße  $Q_{Schw}$  überschreiten damit der Diskriminator ein Signal erzeugt, diese Schwelle soll jetzt bestimmt werden. Hierzu schliessen wir TZ-i an den Diskriminator an, dessen Signal wird 34-fach verstärkt und über das 40 ns Delay an den VKA übergeben. Bei dieser Messung ergibt sich:

- TZ-1: Peak bei Kanal 99, dies entspricht einer Ladung von 9,9 pC
- TZ-2: Peak bei Kanal 100, dies entspricht einer Ladung von 10 pC

Dies entspricht nach der Gleichung

$$\frac{Q_{Schw}}{V_{ges}e} = n$$

einer Anzahl von  $n \approx 113$  Photonen.

## 2.6 Ladungsmessung in Abhängigkeit der Durchgangsposition

Zur Bestimmung der Ortsabhängigkeit werden die Referenzzähler um  $90^\circ$  gedreht, dadurch reduziert sich die Ausdehnung in Messrichtung, und nacheinander in eine „nahe“ und eine „ferne“ Position bezüglich TZ-1 gebracht. Die Längendifferenz von den Mittelpunkten der Referenzzähler in den Positionen „nah“ und „fern“ beträgt 175 cm. Wie bei der vorigen Messung treten wieder Peaks auf die sich je nach Position unterscheiden:

Wie in der Anleitung beschrieben verwenden wir einen exponentiellen Ansatz:

Position	Kanal	Ladung [pC]
nah	58	5,8
fern	33	3,3

Tabelle 3: Ortsabhängigkeit

$$\begin{aligned}
 q &= q_0 e^{cx} \\
 q_{nah} &= q_0 e^{cx_{nah}} \\
 q_{fern} &= q_0 e^{cx_{fern}} \\
 \frac{q_{fern}}{q_{nah}} &= \frac{q_0 e^{cx_{fern}}}{q_0 e^{cx_{nah}}} \\
 &= e^{c(x_{fern} - x_{nah})} \\
 \ln \frac{q_{fern}}{q_{nah}} &= c(x_{fern} - x_{nah}) \\
 c &= \frac{1}{x_{fern} - x_{nah}} \ln \frac{q_{fern}}{q_{nah}}
 \end{aligned}$$

Jetzt setzen wir die von uns gefundenen Werte ein:

$$c = \frac{1}{1,75 \text{ m}} \ln \frac{3,3 \text{ pC}}{5,8 \text{ pC}} = -0,32 \text{ m}^{-1}$$

## 2.7 Laufzeitmessung

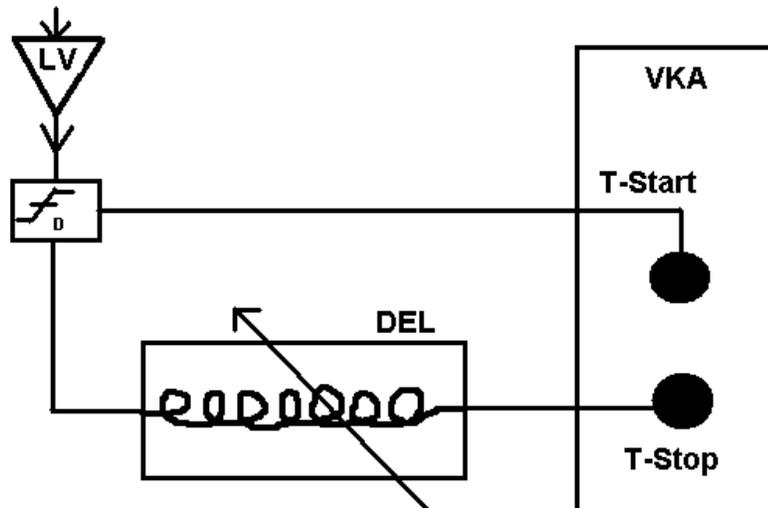


Abbildung 4: Schaltung für die Zeitmessung [3]

Nun soll die Laufzeit der Photonen im Szintillator bestimmt werden. Diese Zeit wird durch Messungen in den Positionen „nah“ und „fern“ ermittelt. Um den Messwerten eine Zeit zuordnen zu können müssen die Kanäle zunächst auf Zeit geeicht werden.

### 2.7.1 Zeiteichung

Für diese Eichung benutzen wir den Szintillator TZ-2. Dessen Signal wird über den linearen Fan-Out in den Diskriminator gespeist. Von dort aus geht das Signal gleichzeitig direkt in den VKA und über ein Delay in den VKA. Das Signal, das das Delay passiert wird dabei als Stop-Signal benutzt. Durch Variation des Delay kann das Kanal-Zeit-Verhältnis bestimmt werden. Die Messung ohne Delay bestimmt dabei das Offset:

Nah: Offset: 75 Kanäle

Dies entspricht in der Position „nah“ einer Zeit von  $t = 0,0995$  ns pro Kanal und einer

Delay	Kanal	Zeit/Kanal [ns]
10	106	0,094
19,5	198	0,098
40	386	0,104
59,5	582	0,102

Tabelle 4: Eichung in Position nah

Zeit von 101,88 ns für alle 1024 Kanäle, Literaturwert ist 102 ns.

### 2.7.2 Durchführung der Messung

Wir bestimmen die Maxima in den Positionen „nah“ und „fern“ mit verschiedenen Delays. Die Längendifferenz beträgt wieder 1,75 m.

Laut Aufgabenstellung soll für ein Delay von 40 ns die Zeit bestimmt werden, diese

Delay	Kanal <sub>fern</sub>	Kanal <sub>nah</sub>	Differenz	Zeit
0	78	75	-3	-0,2985
10	177	181	4	0,398
19,5	260	273	13	1,2935
40	461	461	0	0
59,5	646	657	11	1,0945

Tabelle 5: Bestimmung der benötigten Zeit

Messwerte fallen bei unserer Messung leider sehr ungünstig aus, daher nehmen wir den Mittelwert der Messungen mit 19,5 ns bzw. 59,5 ns Delay. Der Mittelwert ist 1,194 ns. Bei einem Brechungsindex von 1,58 ergibt sich eine Lichtgeschwindigkeit von  $\approx 0,633 \cdot c_0$  in dem Szintillatormaterial. Der so zurückgelegte Weg für die Myonen ist 22,6 cm und damit 8-mal kleiner als die geometrische Länge von 1,75 m. Diese Längenkontraktion beruht wie schon beschrieben auf der großen Geschwindigkeit der Myonen, die anfangs sogar größer ist als die Lichtgeschwindigkeit im Szintillatormaterial. Die für diese Messung benutzte physikalische Größe ist die Ladung, die der Photomultiplier aus den eintreffenden Photonen gewinnt. Indirekt wird also die vom Szintillatormaterial absorbierte Energie als Messgröße benutzt.

## 3 Probleme und Verbesserungsvorschläge

Das Problem bei diesem Versuch ist der Zeitaufwand. Auch wenn unsere Messwerte bei der Zeitmessung nicht ideal sind, sind sie doch ein Beispiel für die viel zu hohen Aufnahmezeiten, die von den Aufgabenstellungen verlangt werden. Unsere Messwerte haben eine Aufnahmezeit von  $\leq 30$  s und zeigen qualitativ dennoch die richtigen Größen.

## 4 Korrektur

### 4.1 Testmessung

Die Anzahl der Photoelektronen ergibt sich mit der relativen Halbwertsbreite nach

$$\bar{n}_e = \frac{(1 - \theta) \cdot 2,4^2 \cdot k}{(FWHM_Q^{rel})^2 - 0,04}$$

zu

$$\begin{aligned}\bar{n}_e &= \frac{4,61}{(FWHM_Q^{rel})^2 - 0,04} \\ &= 5,98\end{aligned}$$

wobei  $k \equiv$  Korrekturfaktor, hier  $k=1$  und  $\theta \equiv$  Quantenausbeute der Photokathode, hier  $\theta=0,2$

Damit ergibt sich eine Gesamtverstärkung des Photomultipliers von:

$$V_{ges} = \frac{q}{n_{\bar{e}} \cdot e} = 13,78 \cdot 10^6$$

### 4.2 Ladungsmessung an TZ<sub>1</sub>

Bei der Ladungsmessung ergab sich für  $FWHM_Q^{rel} = 0,91$  und eine Ladung  $q$  von  $12,4 \text{ pC}$ . Die Anzahl der Photoelektronen ergibt sich mit der relativen Halbwertsbreite nach

$$\bar{n}_e = \frac{(1 - \theta) \cdot 2,4^2 \cdot k}{(FWHM_Q^{rel})^2 - 0,04}$$

zu

$$\begin{aligned}\bar{n}_e &= \frac{4,61}{(FWHM_Q^{rel})^2 - 0,04} \\ &= 5,85\end{aligned}$$

wobei  $k \equiv$  Korrekturfaktor, hier  $k=1$  und  $\theta \equiv$  Quantenausbeute der Photokathode, hier  $\theta=0,2$

Damit ergibt sich eine Gesamtverstärkung des Photomultipliers von:

$$V_{ges} = \frac{q}{n_{\bar{e}} \cdot e} = 13,23 \cdot 10^6$$

Die Anzahl der auf die Photokathode treffenden Photonen berechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned}n_k &= \frac{\bar{n}_e}{\theta} \\ &= 29,25\end{aligned}$$

### 4.3 Bestimmung der Diskriminatorschwelle

Der Photomultiplier muss eine bestimmte Ladungsgröße  $Q_{Schw}$  überschreiten damit der Diskriminator ein Signal erzeugt, diese Schwelle soll jetzt bestimmt werden. Hierzu schliessen wir TZ-i an den Diskriminator an, dessen Signal wird 34-fach verstärkt und über das 40 ns Delay an den VKA übergeben. Bei dieser Messung ergibt sich:

- TZ-1: Peak bei Kanal 99, dies entspricht einer Ladung von 9,9 pC
- TZ-2: Peak bei Kanal 100, dies entspricht einer Ladung von 10 pC

Dies entspricht nach der Gleichung

$$\frac{Q_{Schw}}{V_{ges}e} = n$$

einer Anzahl von  $n \approx 5$  Photonen.

### Literatur

- [1] Alf Köhn and Tim Happel. *Eigenschaften eines organischen Szintillationszählers*.
- [2] Prof. Dr. Horst Stöcker. *Taschenbuch der Physik*. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main, 4. edition, 2000.
- [3] Thomann and Herbst. *Zeichnung inspired by Versuchsanleitung*.