

# **Aufbau eines Szintillator - Hodoskops für kosmische Myonen**

**BACHELORARBEIT**  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Science in Physics  
(B.Sc.)

dem Fachbereich Physik der  
Universität Siegen

vorgelegt von  
**Adeline Bieker**

Juni 2008

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Physikalische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Höhenstrahlung . . . . .	3
2.2	Wechselwirkung von geladenen Teilchen mit Materie . . . . .	4
2.3	Wechselwirkung von Photonen mit Materie . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Technische Grundlagen</b>	<b>8</b>
3.1	Szintillationszähler . . . . .	8
3.1.1	Szintillator . . . . .	9
3.1.2	Photomultiplier . . . . .	11
3.2	Elektronik . . . . .	13
3.2.1	Spannungsversorgung der Photomultiplier . . . . .	13
3.2.2	Signalauslese der Szintillationszähler . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Messungen zur Inbetriebnahme des Szintillator - Hodoskops</b>	<b>16</b>
4.1	Uniformität der Szintillatoren . . . . .	16
4.1.1	Aufbau . . . . .	17
4.1.2	Messung . . . . .	19
4.1.3	Auswertung . . . . .	20
4.2	Aufnahme der Delaykurve . . . . .	23
4.2.1	Aufbau . . . . .	24
4.2.2	Messung . . . . .	26
4.2.3	Auswertung . . . . .	27
4.3	Einstellung der Hochspannungen an den Photomultipliern . . . . .	29
4.3.1	Aufbau . . . . .	29
4.3.2	Messung . . . . .	30
4.3.3	Auswertung . . . . .	31
4.4	Einstellung der Diskriminatorschwellen durch Koinzidenzmessungen	34
4.4.1	Aufbau . . . . .	35
4.4.2	Messung . . . . .	36
4.4.3	Auswertung . . . . .	38
4.5	Messung der Nachweiswahrscheinlichkeit für Myonen in den einzelnen Szintillatoren . . . . .	39
4.5.1	Aufbau . . . . .	40
4.5.2	Messung . . . . .	40
4.5.3	Auswertung . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Verwendung des Szintillator-Hodoskops als Trigger für einen anderen Detektor</b>	<b>42</b>
5.1	Aufbau und Messung . . . . .	42

## *Inhaltsverzeichnis*

5.2 Auswertung . . . . .	44
<b>6 Fazit und Ausblick</b>	<b>47</b>
<b>Anhang</b>	<b>48</b>
<b>A Messwerte der Uniformitätsmessung</b>	<b>48</b>
<b>B Messwerte der Delaykurve</b>	<b>49</b>
<b>C Messwerte zur Bestimmung der Photomultiplier-Hochspannungen</b>	<b>50</b>
<b>D Koinzidenzraten zur Bestimmung der Diskriminatorschwellen</b>	<b>52</b>
<b>E Messwerte zur Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit von Myonen</b>	<b>53</b>
<b>F Auflistung der verwendeten Geräte und Materialien</b>	<b>54</b>
<b>Literatur</b>	<b>55</b>

# 1 Einleitung

In vielen Bereichen der naturwissenschaftlichen Arbeit kann man ohne Detektoren nicht mehr Forschung betreiben, denn man untersucht die Materie bis zu subatomaren Strukturen, die für menschliche Sinnesorgane oder optische Geräte nicht mehr zugänglich sind. Detektoren werden aufgrund von speziellen Fragestellungen an die Natur gebaut und der Nachweis von subatomaren Teilchen beruht auf deren Wechselwirkung mit der Materie des Detektors. Seit der Entwicklung der ersten Detektoren, die ihre Anwendung in der Kernphysik, z.B. zum Nachweis radioaktiver Strahlung durch Schwärzung einer photographischen Platte (Becquerel, 1896) und zur Bestimmung der Aktivität radioaktiver Präparate (Geiger-Müller-Zählrohr, 1908) fanden, hat sich ihr Anwendungsgebiet auf viele verschiedene Bereiche erweitert. In der Teilchenphysik ist man auf Detektoren angewiesen, um Grundlagenforschung zu betreiben: Um neue Teilchen zu entdecken oder die Eigenschaften von schon bekannten Teilchen zu untersuchen, wofür z.B. eine Zeitprojektionskammer (time projection chamber, TPC) für einen zukünftigen Linearbeschleuniger (ILC) verwendet werden soll. Die hier vorgelegte Bachelorarbeit ist Teil dieser Entwicklungsarbeiten. Mithilfe von Detektoren wird auch der Ursprung kosmischer Strahlung erforscht. Im medizinischen Bereich werden Detektoren zur Diagnostik benötigt, speziell für bildgebende Verfahren wie Röntgenaufnahme, Kernspintomographie oder Positronen-Emissionstomographie. In der Materialforschung werden Detektoren eingesetzt, um chemische und physikalische Eigenschaften von Stoffen und Oberflächen zu bestimmen.

In dieser Bachelorarbeit wird der Aufbau und Test eines Hodoskops beschrieben. Ein Hodoskop ist eine Anordnung von Zählerdetektoren in der Art, dass über Koinzidenzmessungen die Bahn von einem energiereichen Teilchen, zum Beispiel aus der Höhenstrahlung, durch diesen Aufbau bestimmt werden kann. Im hier verwendeten Aufbau kann registriert werden, ob ein Teilchen zwei zueinander parallele Flächen, die einen gewissen Abstand voneinander haben, innerhalb einer Zeit  $\Delta t$  durchdrungen hat.

Der in dieser Bachelorarbeit gewählte Aufbau kann dazu verwendet werden, andere Detektoren, die in das System integriert werden, zu triggern, d.h. mit Hilfe des Hodoskops wird das Auslesesystem des anderen Detektors gesteuert und somit eine Vorselektion der Ereignisse vorgenommen. Verwendet man ein Hodoskop, das den anderen Detektor umgibt, so weiß man, dass ein Teilchen, das im Hodoskop registriert wurde, den gesamten Detektor durchdrungen hat. Damit speichert das System nur noch Daten von hochenergetischen Teilchen, die nicht im Detektor stecken bleiben. Wichtig ist bei diesem Verfahren eine schnelle Signalverarbeitung, denn sonst gehen die Detektordaten verloren. Für moderne Großdetektoren ist ein Triggersystem außerdem unerlässlich, da die anfallenden Datenmengen es aus Speichergründen nicht erlauben, alle Daten zu speichern. Außerdem vermeidet man so die Speicherung redundanter Daten.

## 1 Einleitung

Das Hodoskop, das im Rahmen dieser Arbeit gebaut wurde, sollte aus Szintillationszählern und der dazugehörigen Ausleseelektronik aufgebaut werden.

Dabei wurden folgende Punkte zum Aufbau des Hodoskops berücksichtigt:

1. Die Szintillationszähler waren auf ihre Funktion zu testen und ihre optimalen Arbeitspunkte zu bestimmen.
2. Die Bauteile der Ausleseelektronik für die Szintillationszähler waren so aufzubauen, dass ein durchgehendes Myon ein Signal auslöst. Rauschen sollte weitestgehend unterdrückt werden.
3. Das fertige Hodoskop war zu testen, indem ein anderer Detektor damit getriggert und mit diesem Detektor ein Myonsignal gemessen wurde.

### **Gliederung**

In den folgenden zwei Kapiteln werden die für diese Arbeit benötigten physikalischen und technischen Grundlagen skizziert. In Kapitel 4 werden die zum Aufbau des Szintillator-Hodoskops durchgeführten Messungen erklärt und ausgewertet. Im Anschluss daran, im Kapitel „Verwendung des Szintillator-Hodoskops als Trigger für einen anderen Detektor“ wird das Hodoskop auf seine Funktion getestet. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und es wird ein Ausblick gegeben.

## 2 Physikalische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die physikalischen Effekte beschrieben, die für das Verständnis der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen maßgeblich sind. Der Nachweis von Teilchen in Detektoren beruht auf ihrer Wechselwirkung mit den Atomen und Molekülen des Detektormaterials. Dabei ist zwischen elektrisch geladenen und neutralen Teilchen zu unterscheiden. Bei dem aufzubauenden Hodoskop sollen kosmische Myonen durch ihre Wechselwirkung mit Szintillatormaterial nachgewiesen werden. Bei dieser Wechselwirkung entstehen Photonen. Deshalb werden im folgenden zuerst der Entstehungsmechanismus von Myonen aus der kosmischen Strahlung und dann die Wechselwirkungen von geladenen Teilchen und Photonen mit Materie erläutert [1].

### 2.1 Höhenstrahlung

Das Szintillator - Hodoskop soll Myonen aus der Höhenstrahlung nachweisen. Die Erde wird andauernd von hochenergetischen Teilchen aus dem Universum getroffen. Diese wird primäre Höhenstrahlung genannt und besteht zum größten Teil aus energiereichen Protonen. Mögliche Quellen sind die Sonne, Supernovae und Pulsare. Bei Zusammenstößen dieser Protonen mit den in der Atmosphäre befindlichen Atomen entstehen u.a. durch folgende Prozesse:



geladene Pionen.

Die geladenen Pionen haben eine mittlere Lebensdauer von  $\tau = 2,60 \cdot 10^{-8} \text{s}$  [2] und zerfallen über die schwache Wechselwirkung fast vollständig (zu über 99,9 %) in ein Myon und ein Neutrino:



Bei den Prozessen (1) und (2) können wieder energiereiche Protonen und Neutronen entstehen, so dass in einem so entstehenden Luftschauer zahlreiche Myonen enthalten sind.

Die Myonen werden in ca. 10 km Höhe erzeugt und bewegen sich aufgrund ihrer hohen Energie relativistisch. Sie benötigen eine Mindestenergie, um die Erdoberfläche innerhalb ihrer mittleren Lebensdauer zu erreichen.

Auf Meereshöhe setzt sich die geladenen Komponente der Höhenstrahlung aus 80 % Myonen, ungefähr 20 % Positronen und Elektronen und 1 % Hadronen zusammen. Der Fluß der Myonen auf Meereshöhe beträgt  $0,01 \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  [2]. Man erwartet also 45

Myonen pro 50 s für eine Fläche von  $9,5 \text{ cm} \times 9,5 \text{ cm}$ . Diese Größe besitzt die Fläche im Szintillator - Hodoskop zum Detektieren von kosmischen Myonen. Die mittlere Energie der Myonen beträgt 4 GeV.

## 2.2 Wechselwirkung von geladenen Teilchen mit Materie

Geladene Teilchen reagieren mit Materie, indem sie Atome anregen oder ionisieren. Dabei verlieren sie kinetische Energie.

Bei der Ionisation wird von dem geladenen Teilchen auf ein Elektron eines Atoms der Materie so viel Energie übertragen, dass das Elektron aus dem Atom gelöst wird. Es kann dann entweder den Detektor verlassen oder wieder rekombinieren, wobei ein Photon entsteht.

Ein angeregtes Atom geht durch Aussendung eines Photons, dessen Energie der Differenz der beiden Energieniveaus entspricht, wieder in einen niederenergetischen Zustand über.

Photonen können von einem Photomultiplier (siehe Abschnitt 3.1.2) über ihre Wechselwirkungsprozesse registriert werden. Die Wechselwirkungen von Photonen mit Materie werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

Der mittlere Energieverlust  $dE$  von geladenen Teilchen mit der Masse  $m_0 \gg m_e$  pro Massenbelegung  $dx = \rho ds$ , wobei  $ds$  die Wegstrecke in der Materie und  $\rho$  die Dichte der Materie ist, ist durch die Bethe-Bloch-Formel gegeben:

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_a r_e^2 m_e c^2 * z^2 \frac{Z}{A \beta^2} * \left( \ln \left( \frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right) \quad (5)$$

mit  $4\pi N_a r_e^2 m_e c^2 = 0,3071 \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2}$ ,

$\beta = v/c$ ,  $\gamma = \sqrt{\frac{1}{1-\beta^2}}$  und den folgenden Bezeichnungen:

- $\rho$ : Dichte der Materie ( $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ ),
- $ds$ : Wegstrecke (cm),
- $v$ : Geschwindigkeit des einfallenden Teilchens,
- $z$ : Ladung des einfallenden Teilchens,
- $Z, A$ : Kernladungszahl und Massenzahl der Materie,
- $m_e$ : Masse des Elektrons,
- $I$ : mittleres Ionisationspotential, mit  $I = 16 * Z^{0,9}$  eV für  $Z > 1$ ,
- $\delta$ : Dichtekorrektur.

## 2 Physikalische Grundlagen

Diese Formel ist eine Näherung für den Energieverlust, aber für Teilchen mit Energien unter 100 GeV ist sie bis auf einige Prozent genau [1]. Die in den Messungen dieser Arbeit verwendeten Teilchen haben eine mittlere Energie von 4 GeV (Myonen aus der Höhenstrahlung), damit ist die Bethe-Bloch-Formel eine gute Näherung für den Energieverlust der verwendeten Teilchen.

Das verwendete Szintillatormaterial ist zu  $C_{10}H_{11}$  äquivalent (Es liegt kein Datenblatt zum Szintillatormaterial vor. Dies ist die chemische Formel von einem zum verwendeten äquivalenten Material, [3].) und hat also eine effektive Kernladungszahl von  $Z=4$  und eine effektive Massenzahl von  $A=8$ . Damit erhält man für Myonen mit einer mittleren Energie von 4 GeV ( $\beta=0,9997$ ):

$$-\frac{dE}{dx} = 6,2 \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2}.$$

Mit einer Dichte von  $\rho = 1,032 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$  und einer Dicke des Szintillatormaterials von  $ds = 1 \text{ cm}$  erhält man als Energieverlust der Myonen in dem Szintillator (Integration, mit der Annahme, dass  $E \sim \text{konst}$ ):  $-dE = 6,5 \text{ MeV}$ , dies sind 1,6‰ der Gesamtenergie, d.h. dass ein Myon beim Durchqueren eines Szintillators nur einen kleinen Teil seiner Energie abgibt. Die Ursache dafür ist, dass der Energieverlust pro Massenbelegung im Minimum der Bethe-Bloch-Kurve liegt, d.h. die Myonen minimal ionisierend sind.

Für den Ionisationsverlust von Elektronen gilt:

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_a r_e^2 m_e c^2 * \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} * \left( \ln \left( \frac{m_e c^2 \gamma \beta \sqrt{\gamma - 1}}{\sqrt{2} I} \right) - \frac{1}{2}(1 - \beta^2) - \frac{2\gamma - 1}{2\gamma^2} \ln 2 + \frac{1}{16} \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma} \right)^2 \right).$$

Damit ergibt sich für Elektronen mit einer Energie von maximal 2,27 MeV (Elektronen aus einer  $\text{Sr}^{90}$ -Quelle, siehe Zerfallsschema in Kapitel 4.1.1) im Szintillatormaterial mit obigen Angaben:

$$-\frac{dE}{dx} = 2,12 \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2}.$$

Als Näherung für den Energieverlust erhält man:  $-dE = 2,18 \text{ MeV}$ , was 96% der Gesamtenergie ist. Für die genaue Bestimmung des Energieverlusts muss die Integration über  $dx$  durchgeführt werden.

Weil der Energieverlust so hoch ist, können Elektronen aus einer Strontium-Quelle z.B. bei den Koinzidenzmessungen oder in der in Kapitel 5 beschriebenen Messung nicht verwendet werden.



## 2 Physikalische Grundlagen

Zusätzlich zum Energieverlust durch Ionisation haben noch andere Effekte Einfluß auf die Energie eines geladenen Teilchens, das Materie durchdringt. Diese Effekte sind die Bremsstrahlung, die direkte Paarerzeugung und der Energieverlust durch photonukleare Wechselwirkungen [1], welche als Strahlungseffekte zusammengefasst werden [2].

Damit beträgt der Gesamtenergieverlust:

$$-\frac{dE}{dx} = -\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion} - \left(\frac{dE}{dx}\right)_{strahl} .$$

Dabei ist  $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion}$  der Energieverlust durch Ionisation, der durch die Bethe-Bloch-Formel beschrieben wird und  $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{strahl}$  beschreibt den Energieverlust durch Strahlungseffekte.

Die kritische Energie wird definiert als die Energie  $E_c$ , für die gilt:

$$\left(\frac{dE_c}{dx}\right)_{ion} = \left(\frac{dE_c}{dx}\right)_{strahl} .$$

Unterhalb dieser kritischen Energie dominiert der Energieverlust durch Ionisation und oberhalb der Energieverlust durch Strahlungseffekte.

Die kritische Energie für Myonen berechnet sich nach [2]:

$$E_c = \frac{5700 \text{ GeV}}{(Z + 1,47)^{0,838}} .$$

Mit  $Z=4$  folgt für die kritische Energie:  $E_c = 1400 \text{ GeV} \gg E_\mu$ . Damit dominiert für Myonen der Energieverlust durch Ionisation.

Für die kritische Energie von Elektronen gilt nach [2]:

$$E_c = \frac{610 \text{ MeV}}{(Z + 1,24)} = 116 \text{ MeV} .$$

Da die Elektronen aus der Strontium-Quelle eine maximale kinetische Energie von 2,27 MeV haben, dominiert auch hier der Energieverlust durch Ionisation. Strahlungsverluste werden daher im Folgenden nicht betrachtet.

Es werden mit dem Hodoskop, wenn noch ein anderer Detektor in das System integriert wird, nur Myonen nachgewiesen, weil als geladene Teilchen nur Myonen, Protonen und Elektronen aus der Höhenstrahlung auf der Erdoberfläche ankommen

und von diesen nur die Myonen den gesamten Aufbau durchdringen können. Alle anderen Teilchen geben im Aufbau ihre gesamte Energie ab und gehen nicht mehr durch den letzten Szintillator, weshalb das Hodoskop auf diese Teilchen nicht anspricht.

### 2.3 Wechselwirkung von Photonen mit Materie

Photonen können nur indirekt nachgewiesen werden, indem sie im Detektor über einen Wechselwirkungsprozess geladene Teilchen erzeugen, die ein Detektorsignal liefern. Zum Aufbau des Hodoskops werden Photomultiplier verwendet, die in Kapitel 3.1.2 näher beschrieben werden.

Die möglichen Wechselwirkungsprozesse sind der Photoeffekt, der Comptoneffekt und Paarbildung.

Welcher Prozess stattfindet, hängt von der Energie der Photonen ab. Bei Energien unter 100 keV erfolgt als Wechselwirkung fast ausschließlich der Photoeffekt [1]. Da die nachzuweisenden Photonen des Szintillatorlichts eine Wellenlänge von  $\lambda = 434 \text{ nm}$  haben (vgl. Tabelle 1, Kapitel 3.1.1) und damit eine Energie von  $E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = 3 \text{ eV}$ , findet als Wechselwirkung nur der Photoeffekt statt<sup>1</sup>.

Unter dem Photoeffekt versteht man das Herauslösen von Elektronen aus einer Oberfläche durch die totale Absorption von auftreffenden Photonen. Es werden aber nur dann Elektronen emittiert, wenn das Licht eine bestimmte Mindestfrequenz  $\nu_{min}$  hat. Die Energie eines Photons ist  $E = h \cdot \nu_{min}$ . Diese materialabhängige Mindestenergie, die man Austrittsarbeit ( $W_A$ ) nennt, ist erforderlich, um Elektronen aus der Oberfläche auszulösen. Die kinetische Energie der Elektronen beträgt:

$$E_{kin} = h \cdot \nu - W_A.$$

Da die Energie der Photonen des Szintillationslichts sehr gering ist (bei dem verwendeten Szintillator 3 eV), werden in Photomultipliern Metalloberflächen verwendet, weil sich diese durch eine geringe Auslösearbeit für Elektronen auszeichnen.

---

<sup>1</sup> $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$  bezeichnet das Plancksche Wirkungsquantum,  $c = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  die Lichtgeschwindigkeit.

## 3 Technische Grundlagen

Ein Hodoskop ist eine Anordnung von Zählerdetektoren in der Art, dass über Koinzidenzmessungen die Bahn von einem energiereichen Teilchen, zum Beispiel aus der Höhenstrahlung, durch diesen Aufbau bestimmt werden kann. Als Zähler können zum Beispiel Geiger-Müller-Zählrohre oder Szintillationszähler verwendet werden. In dieser Arbeit werden drei Szintillationszähler benutzt, um ein Hodoskop aufzubauen.

In diesem Kapitel wird die Funktionsweise der verwendeten Geräte zum Aufbau eines Hodoskops, also der Szintillationszähler und der Elektronik, dargestellt. Für weitere Details wird auf [1] und [4] verwiesen. Im Anhang F ist eine Auflistung der verwendeten Geräte und Materialien zu finden.

### 3.1 Szintillationszähler

Das zentrale Element des Hodoskops sind die Szintillationszähler. Ein Szintillationszähler dient der Zählung einzelner Teilchen. Er besteht aus folgenden Komponenten (siehe Abb. 1):

- Szintillator,
- Lichtleiter,
- Photomultiplier.

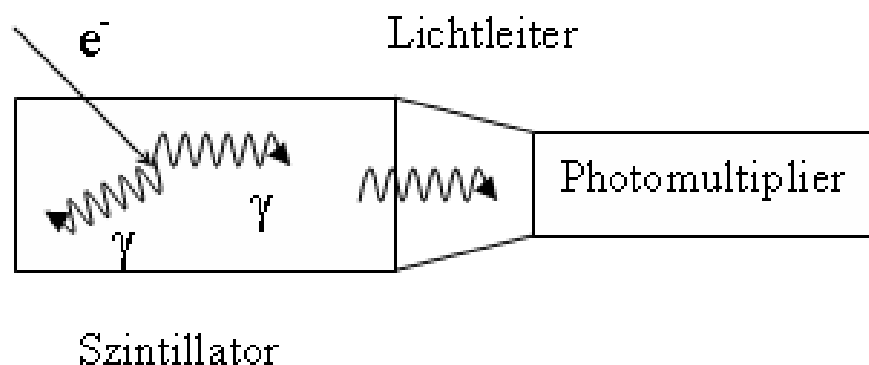


Abbildung 1: Aufbau eines Szintillationszählers

### 3 Technische Grundlagen

Im Szintillatormaterial wird ein Teil der kinetischen Energie des durchgehenden Teilchens in sichtbares Licht umgewandelt. Die Funktionsweise des Szintillators wird in 3.1.1 genauer beschrieben. Das Licht wird durch den Lichtleiter zum Photomultiplier geführt, der das Licht in ein messbares elektrisches Signal umwandelt, eine detaillierte Beschreibung folgt in 3.1.2. Die Lichtausbeute ist proportional zum Energieverlust der Teilchen im Szintillator, sodass der Szintillationszähler auch Informationen über die Energie der Quanten liefert.

Der Vorteil gegenüber anderen Detektoren ist, da der Durchgang eines Teilchens ein Lichtsignal erzeugt, eine sehr schnelle Informationsübertragung.

Im folgenden werden die einzelnen Komponenten eines Szintillationszählers genauer erklärt.

#### 3.1.1 Szintillator

Ein Szintillator besteht aus einem Material, das beim Durchgang von Teilchen angeregt wird und diese Energie in Form von Photonen wieder abgibt. Diesen Prozess nennt man Szintillation. Die Wellenlänge der abgegebenen Photonen liegt abhängig vom gewählten Material im UV- oder sichtbaren Bereich [1], [5].

Die Hauptanwendungen für Szintillatoren sind:

- Kalorimetrie: Messung der Energie eines Teilchens und
- Zeitmessungen.

Das Material wählt man abhängig vom Verwendungszweck des Szintillationszählers, entweder ein organisches oder ein anorganisches Material.

Anorganische Szintillatoren dienen wegen ihrer hohen Dichte und der damit verbundenen Absorptionsfähigkeit zur Messung der Energie der auffallenden Teilchen oder Gammastrahlung. Organische Szintillatoren zeichnen sich durch sehr kurze Abklingzeiten des Szintillationslichts im Bereich von einigen Nanosekunden aus und sind deshalb besonders für genaue Flugzeitmessungen von Teilchen geeignet.

Für ein Hodoskop benötigt man kurze Abklingzeiten, damit man möglichst viele Teilchen einzeln nachweisen kann. Deshalb wird ein organisches Material (siehe Anhang E) verwendet. Die Parameter der verwendeten Plastiksintillatoren sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

### 3 Technische Grundlagen

Dichte	1,032 g/cm <sup>3</sup>
Pulsanstiegszeit $t_{rise}$	1,0 ns
Pulsabfallzeit $t_{delay}$	3,3 ns
$\lambda_{max}$ (Emission)	434 nm
Brechungsindex für $\lambda_{max}$	1,58

Tabelle 1: Daten des Plastiksintillators nach [6]

Vom Material ist auch der Szintillationsmechanismus abhängig. Für das verwendete organische Material wird dieser Mechanismus im folgenden erklärt.

Der primäre Fluoreszenzstoff wird durch die abgegebene Energie der Teilchen angeregt. Diese Energie wird wieder durch Photonen abgegeben.

Alle Materialien sind für ihr eigenes Licht nicht transparent. Lichtsignale erhält man dadurch, dass dem Szintillatormaterial ein zweiter fluoreszierender Stoff beigemischt wird, ein sogenannter Wellenlängenschieber, der das primäre Fluoreszenzlicht absorbiert und Licht von geringerer Frequenz wieder emittiert [1]. Somit wird der Szintillator durchsichtig für dieses sekundäre Szintillationslicht.

Das ausgesendete Licht wird auf dem Weg zum Lichtleiter winkelabhängig durch zwei verschiedene Mechanismen an der Szintillatoroberfläche reflektiert.

- Wenn der Einfallswinkel  $\theta$  größer ist als der Totalreflektionswinkel  $\theta_t$ , tritt Totalreflektion auf.
- Gilt  $\theta < \theta_t$ , tritt ein Teil des Lichts aus und wird durch einen äußeren Reflektor, hier auf Polyesterfolie gespritztes Aluminium (Polyethylenterephthalat - Polyesterfolie [7]), reflektiert.

Diese Mechanismen sind wichtig, damit kein Licht aus dem Szintillator austritt, da sonst zum einen die Nachweiswahrscheinlichkeit eines Teilchens sinkt und zum anderen eine eventuelle Energiemessung verfälscht wird.

Der gesamte Szintillator ist desweiteren mit lichtdichtem Klebeband vor Umgebungslicht geschützt, um das Rauschen zu minimieren.

Der Lichtleiter koppelt das Licht aus dem Szintillator in den Photomultiplier ein. Die Detektierbarkeit des Lichts hängt vom Einfallswinkel auf die Grenzfläche des Übergangs Lichtleiter - Photomultiplier ab. Um Totalreflektion hier zu vermeiden, wird auf die Grenzfläche ein optisches Fett aufgetragen.

#### 3.1.2 Photomultiplier

Ein Photomultiplier wandelt geringe Mengen an Photonen in einen messbaren Spannungspuls um. Er besteht aus einer Kathode, einem nachgeschalteten Sekundärelektronenvervielfacher und einer Anode, wie in Abb. 2 gezeigt.

Die auf die Kathode auftreffenden Photonen erzeugen durch Photoeffekt Elektronen. Die Aufgabe des Elektronenvervielfachers ist, den schwachen, von der Kathode kommenden Elektronenstrom mithilfe der Sekundärelektronenemission zu verstärken. Dies geschieht, indem mit einem elektrischen Feld alle von der Kathode ausgehenden Elektronen gesammelt und auf die erste Elektrode, eine sogenannte Dynode, beschleunigt werden. Dort löst jedes Elektron weitere Sekundärelektronen aus, die wiederum zur nächsten Dynode beschleunigt werden [4].

Damit man eine Verstärkung erhält, muss zum einen die Spannung an den Dynoden hoch genug sein und zum anderen das Material der Dynode so beschaffen sein, dass mehr Sekundärelektronen ausgelöst werden, als Primärelektronen auf die Dynode treffen. Mit 10 Dynoden erreicht man eine bis zu  $10^7$ fache Stromverstärkung. Von der letzten Dynode aus werden die Elektronen auf die Anode hin beschleunigt und fließen dort zur Masse ab. Dadurch erhält man einen Spannungsabfall über den Ausgangswiderstand und damit das Ausgangssignal.

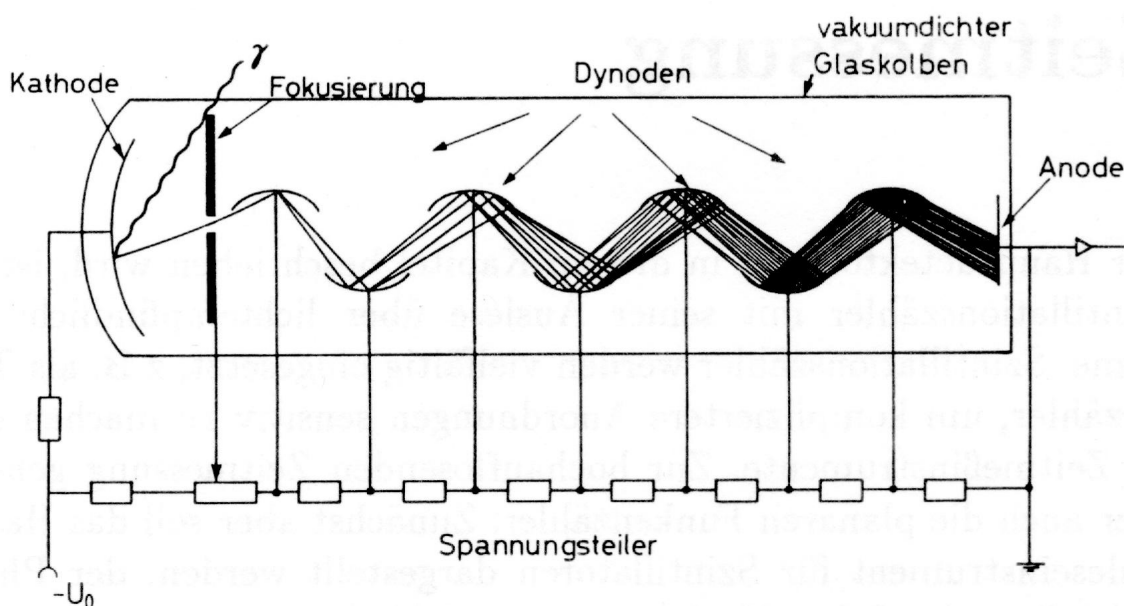


Abbildung 2: Aufbau eines Photomultipliers [8]

Das elektrische Feld erhält man, indem die Dynoden auf einem zunehmend positiven

### 3 Technische Grundlagen

Potenzial liegen. Dazu wird die anliegende Hochspannung über eine Spannungsteilerkette heruntergeteilt. Dieser Spannungsteiler, sowie die Ausleseelektronik der Signale sind in der dahintergeschalteten Einbaufassung (PM Base) untergebracht. Bei den Photomultipliern finden sich in den Anschlusseinheiten der Einbaufassung häufig zwei getrennte Ausgänge, ein energieproportionaler Ausgang, der an die Dynodenstufen angeschlossen ist, und ein Anodenausgang, der bei 50  $\Omega$ -Abschluss präzise Zeitsignale liefert [4]. Da bei dem Hodoskop schnelle Zeitsignale gewünscht sind, wird der Anodenausgang ausgelesen.

## 3.2 Elektronik

In der Kernphysik wurde in den sechziger Jahren begonnen, Standard-Module zu entwerfen, die für bestimmte Aufgaben zu umfangreicheren Systemen zusammengeschaltet werden konnten. Die verwendeten Module sind in der NIM (Nuclear Instrumentation Standard)- Form. Dieser Standard definiert die logische "1" bzw. "0" über Spannungen, wobei diese über Abschlusswiderstände von  $50\ \Omega$  meßbar sind. Ein Spannungspuls (NIM-Signal) ist immer ein Rechteckpuls mit einer Amplitude von  $-800\ \text{mV}$ , was der logischen "1" entspricht, und einer wählbaren Pulsbreite. Eine Spannung von  $0\ \text{mV}$  entspricht der logischen "0".

Die Elektronik wird einerseits für die Spannungsversorgung der Photomultiplier, andererseits für die Signalauslese der Szintillationszähler benötigt, die für den Aufbau des Szintillator - Hodoskops verwendet werden. Abb. 3 zeigt den Aufbau des Hodoskops in einem Blockdiagramm, dabei steht SZ für den Szintillationszähler, DA für den Diskriminator. Es werden zwei Ausgangssignale vom Diskriminator des Szintillationszählers C auf eine Koinzidenz gegeben, damit die Signallaufzeit gleich bleibt mit dem Koinzidenzsignal der Szintillationszähler A und B.

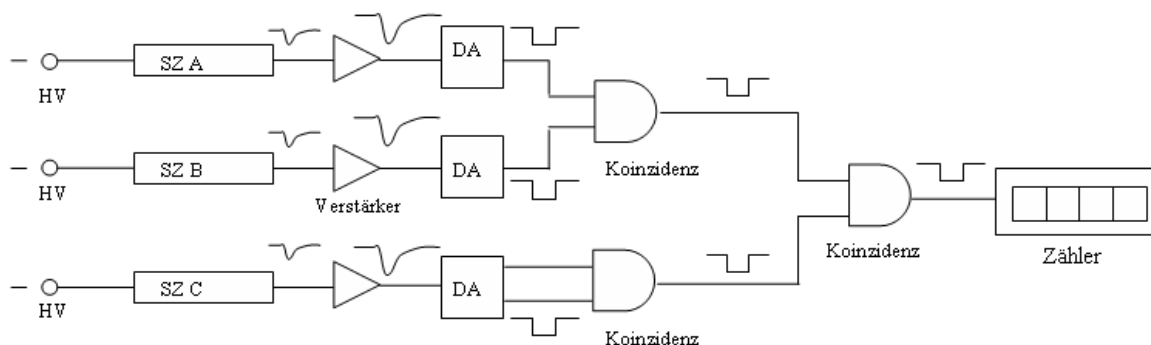


Abbildung 3: Aufbau des Szintillator - Hodoskops

Die verwendeten Geräte werden im folgenden aufgelistet und erklärt. Die herstellerabhängigen Gerätebezeichnungen finden sich in Anhang F.

### 3.2.1 Spannungsversorgung der Photomultiplier

Für die Spannungsversorgung werden drei Hochspannungsgeräte benutzt: Die Module haben einen Spannungsbereich von  $0 - 2\ \text{kV}$ . Mit ihnen kann die Spannung präzise bis auf  $1\ \text{V}$  eingestellt werden und sie haben eine hohe Langzeit-Stabilität.



#### 3.2.2 Signalauslese der Szintillationszähler

##### Verstärker

Das verwendete Modul verstärkt das Eingangssignal um den Faktor 10 und besitzt für jeden Eingang zwei Ausgänge.

##### Zähler

Ein Zähler dient der Zählung eingehender Ereignisse (NIM-Pulse). Der Zählvorgang kann entweder manuell oder automatisch gestartet werden, wobei die Dauer der Zählzeit gewählt werden kann [4]. Die Zählzeit wurde bei den Experimenten auf 50 s eingestellt und manuell gestartet.

##### Diskriminator

Der verwendete Diskriminator gibt auf seinem Ausgang ein NIM-Signal aus, wenn eine einstellbare Schwelle von der Anstiegsflanke des Eingangssignals überschritten wird (siehe Abb. 4). Diese Schwelle, wie auch die Breite des Ausgangssignals, werden über ein Potentiometer eingestellt. Die Schwelle kann zwischen -30 mV und -1 V justiert werden und wird so gewählt, dass Rauschsignale unterhalb der Schwelle liegen. Die Breite der verwendeten Ausgangssignale beträgt 20 ns bei -400 mV (der Hälfte der Amplitude).

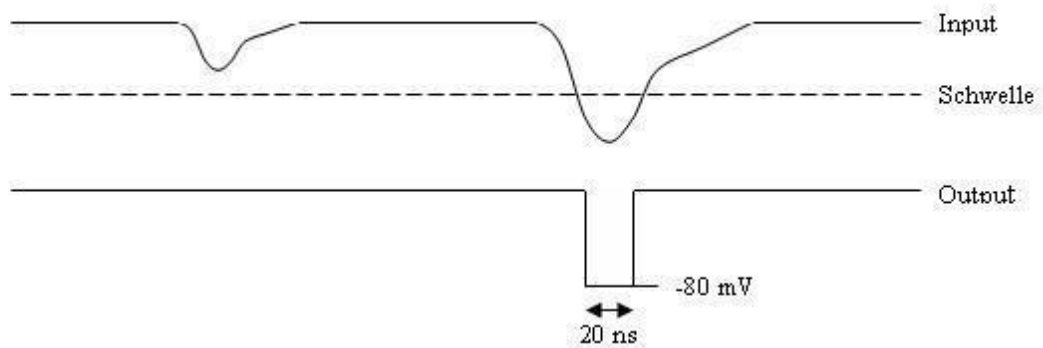


Abbildung 4: Funktionsweise eines Diskriminators [6]

Durch das Auslösen eines Signals ab einer bestimmten Spannung der Anstiegsflanke des Eingangssignals ergibt sich für normale Diskriminatoren der Nachteil, dass sie abhängig von der Anstiegszeit der Signale sind und damit auch von der Pulshöhe. Für das verwendete Szintillationsmaterial stellt dies allerdings kein Problem dar, weil die Anstiegsflanke sehr steil ist.

### Koinzidenzeinheit

Mit einer Koinzidenzeinheit können zwei oder mehrere Signale auf ihre Gleichzeitigkeit überprüft werden. Zwei Signale sind koinzident, wenn sich die Signale zeitlich überlappen (siehe Abb. 5). Das Ausgangssignal ist dann ein NIM-Puls mit einer einstellbaren Pulsbreite, welche wieder auf 20 ns bei -400 mV justiert wird.

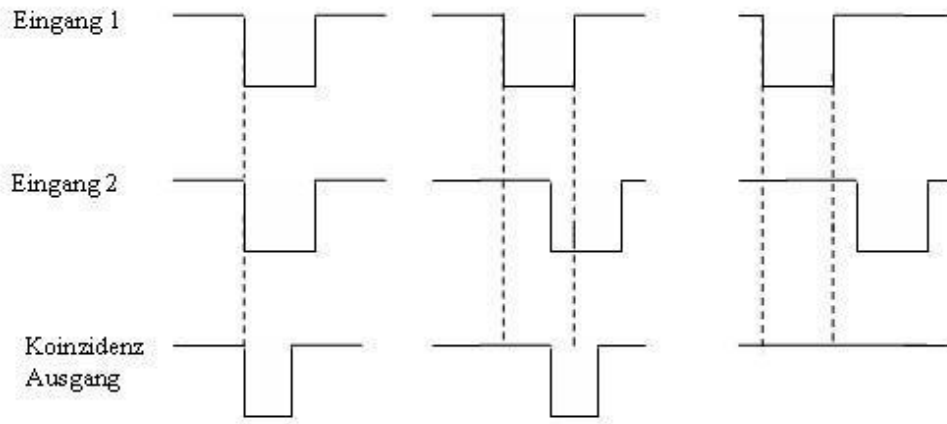


Abbildung 5: Funktionsweise einer Koinzidenzeinheit [6]

## 4 Messungen zur Inbetriebnahme des Szintillator - Hodoskops

Die in diesem Kapitel beschriebenen und ausgewerteten Messungen dienen dem Aufbau eines Hodoskops. Es ist die Ausleseelektronik aufzubauen, die Szintillatoren sind zu untersuchen, zu testen und die optimalen Spannungseinstellungen der Szintillationszähler auszumessen.

### 4.1 Uniformität der Szintillatoren

In dieser Messung wird die Uniformität der Szintillatoren, d.h. die Abhängigkeit des Ansprechvermögens eines Szintillators vom Durchgangsort eines Teilchens, bestimmt.

Diese Messungen werden durchgeführt, um die Funktionalität der Szintillatoren insgesamt zu untersuchen und mögliche kleinere schadhafte Stellen eines Szintillators zu entdecken. Die Uniformität wird bestimmt, indem eine  $\text{Sr}^{90}$ -Quelle (Zerfallsschema siehe Abb.6) auf die Szintillatorfläche gelegt und die Zählrate in Abhängigkeit von dem Ort der Strontiumquelle gemessen wird.

Idealerweise sollte das Ansprechvermögen eines Szintillators über die gesamte Fläche konstant sein. Doch normalerweise ist es selbst für einen neuen Szintillator am Rand um bis zu 5 % geringer als in der Mitte der Szintillatorfläche, da der Lichtverlust an den Außenflächen im Randgebiet besonders hoch ist. Das Ansprechvermögen hängt einerseits vom Zustand des Szintillatormaterials, andererseits vom optischen Übergang des Szintillators zum Photomultiplier und vom Photomultiplier selbst ab. Ein guter Zustand des Szintillatormaterials, und dadurch eine hohe Uniformität, ist wichtig, um eine hohe Effizienz des Hodoskops zu erreichen, d.h. es sollen möglichst viele Teilchen nachgewiesen werden können und die Zählraten bei den später folgenden Messungen mit Myonen zum Aufbau des Szintillator-Hodoskops nicht verringert werden.

Um die Uniformität zu untersuchen, wird die nachfolgend beschriebene Messung durchgeführt. Die Messung der absoluten Höhe des Ansprechvermögens der Szintillationszähler wird in Kapitel 4.5: „Messung der Nachweiswahrscheinlichkeit für Myonen in den einzelnen Szintillatoren“ erläutert.

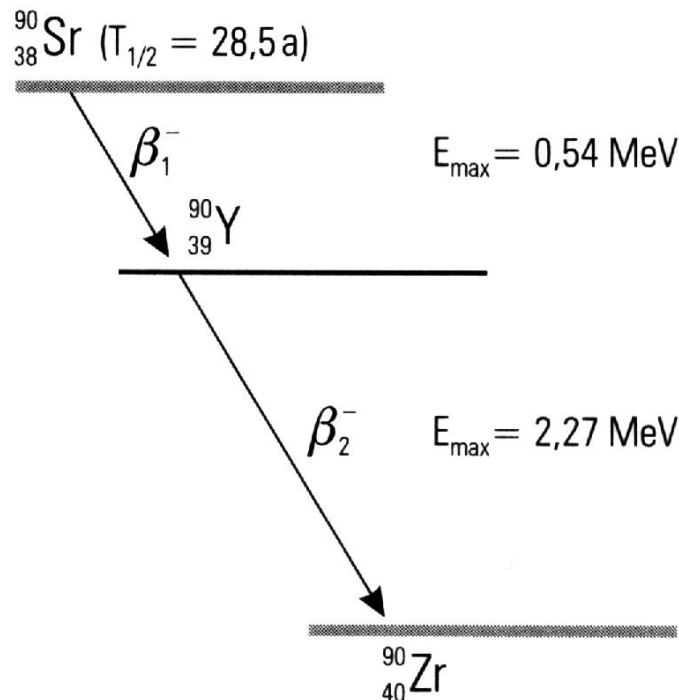


Abbildung 6: Zerfallsschema von Strontium 90 [9]

#### 4.1.1 Aufbau

Auf der Szintillatorfläche des zu untersuchenden Szintillators wird ein Blatt Papier befestigt, auf das vorher ein Raster gezeichnet wurde. Die Punkte dienen der Bestimmung der Position der Strontium-Quelle. Es wird  $\text{Sr}^{90}$  (Aktivität: 370 kBq) benutzt, da diese Quelle nur Elektronen aussendet und man mit diesen ein wohldefiniertes Signal erhält. Außerdem erreicht man mit der  $\text{Sr}^{90}$ -Quelle eine hohe Zählrate. Die Elektronen treten aus der Quelle kollimiert aus, die Kollimatoröffnung beträgt 5 mm im Durchmesser. Mit der Strontium-Quelle wird die Szintillatorfläche abgefahren und die für jeden Messpunkt zugehörige Zählrate gemessen.

Aus Abb.7 kann man das Raster für die Szintillatoren A und C entnehmen. Es wurde so gelegt, damit auch Messpunkte nah am Szintillatortrand sind, um diesen kritischen Bereich des Szintillators vermessen zu können, weil man Aussagen über das Ansprechvermögen in der Nähe der Kanten machen möchte. Die Szintillatoren A und C haben eine Fläche von  $9,5 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$  und Szintillator B hat eine Fläche von  $20 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ .

Das Raster für Szintillator B ist analog, nur dass nicht 4 Punkte, sondern 6 Punkte nebeneinander liegen, da er 10 cm breiter ist als die Szintillatoren A und C.

#### 4 Messungen zur Inbetriebnahme des Szintillator - Hodoskops

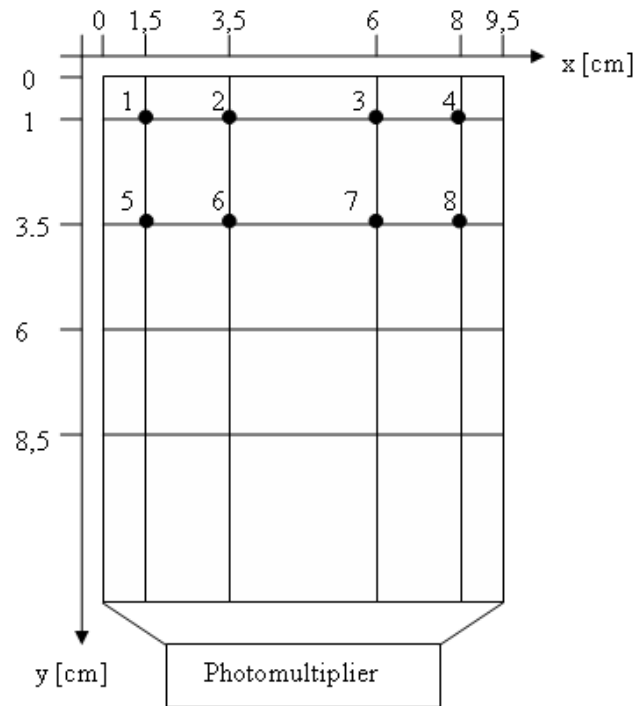


Abbildung 7: Nummerierung der Punkte und Definition des Koordinatensystems des Rasters für die Uniformitätsmessung

An den Photomultiplier wird das Versorgungsgerät für die Hochspannung über ein Hochspannungskabel angeschlossen. Die Auslese der Anode des Photomultipliers erfolgt über den Verstärker und den Diskriminator, dessen Ausgangspulse durch den Zähler gezählt werden, siehe Abb.8.

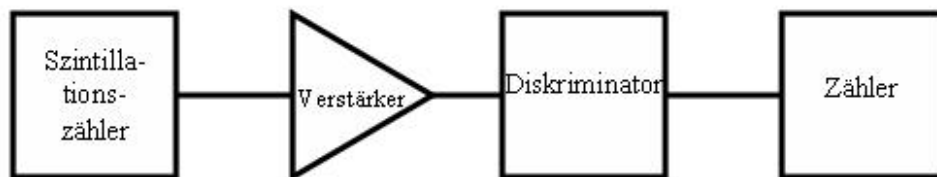


Abbildung 8: Blockdiagramm zur Ausmessung der Uniformität der Szintillatoren

#### 4 Messungen zur Inbetriebnahme des Szintillator - Hodoskops

Das Anodensignal der Photomultiplier hat eine negative Polarität. Für Elektronen aus der  $\text{Sr}^{90}$ -Quelle erhält man eine Spannungsamplitude von ungefähr -150 mV. Deshalb wird die Diskriminatorschwelle auf -100 mV eingestellt, damit Rauschen unterdrückt wird. Wichtig ist, dass während der Messung die Schwelle nicht verändert wird, damit das Ergebnis nicht verfälscht wird. Genauso ist die am Photomultiplier anliegende Hochspannung während der Messung konstant. Bei Photomultiplier A wird eine Spannung von 1500 V, bei B eine Spannung von 1970 V und bei C eine Spannung von 1660 V angelegt.

##### 4.1.2 Messung

Die Quelle wird auf jeden Punkt des Rasters der Szintillatorfläche gelegt und die Zählrate für 50 s gemessen. Dies wird für jeden der drei Szintillatoren (A, B und C) durchgeführt.

Für Szintillator A erhält man folgendes Resultat (Tabelle 2):

Pkt.	N	$\sigma_N$	Pkt.	N	$\sigma_N$	Pkt.	N	$\sigma_N$	Pkt.	N	$\sigma_N$
1	79568	89	12	188658	137	23	206058	144	34	188452	137
2	94209	97	13	165057	128	24	183813	136	35	183717	136
3	119379	109	14	206995	144	25	173697	132	36	192666	139
4	107670	104	15	218408	148	26	197557	141	37	179269	134
5	122158	111	16	186332	137	27	203114	143	38	182927	135
6	178199	133	17	163322	128	28	188153	137	39	169573	130
7	186259	136	18	205887	143	29	175025	132	40	193674	139
8	149778	122	19	213366	146	30	206871	144	41	163593	128
9	154581	124	20	181278	135	31	209832	145	42	171996	131
10	200318	142	21	157939	126	32	192384	139	43	172956	132
11	203993	143	22	199772	141	33	180391	134	44	199313	141

Tabelle 2: Zählraten und deren Fehler für Szintillationszähler A

Pkt. steht für den Messpunkt, N ist die Zählrate in 50 s und der Fehler der Zählrate ist  $\sigma_N = \sqrt{N}$ .

Die Messwerte für die Szintillatoren B und C sind im Anhang A zu finden.

### 4.1.3 Auswertung

Zur Übersichtlichkeit werden die Messwerte graphisch dargestellt, um über die Uniformität des Szintillators Aussagen machen zu können. Dafür wird jedem Messpunkt auf der Szintillatorfläche eine Koordinate (x/y) zugeordnet, entsprechend dem in Abb.7 definierten Koordinatensystem.

Die Zählrate wird normiert, indem sie durch den maximal gemessenen Wert  $N_{max}$  geteilt wird. Die Darstellung erfolgt in einem dreidimensionalen Diagramm, wobei jedem Messpunkt (x/y) die jeweilige relative Zählrate als z-Koordinate zugeordnet wird. Der Fehler der normierten Zählrate berechnet sich mit  $\sigma_{norm} = \frac{\sqrt{N}}{N_{max}}$ .

Die Diagramme für die Szintillatoren A, B und C finden sich in den Abb.9-11. Dabei ist hier zu beachten, dass sich der Photomultiplier nun (aufgrund der Darstellung) an den hinteren Rand des Fläche anschließt. Die Fehler der normierten Zählraten sind nicht dargestellt, da sie maximal 1% betragen.

Bei Szintillator A erkennt man, dass im vorderen Bereich (etwa die ersten 6 cm), nur 40 bis 80 % der maximalen Zählrate registriert werden. Im übrigen Bereich beobachtet man insgesamt eine gute Uniformität mit dem beschriebenen Randabfall, der mit (10-20) % noch moderat ausfällt. Für die weiteren Messungen muss darauf geachtet werden, dass der vordere Teil des Szintillators A nicht benutzt wird, zum Beispiel in der Messung, die in Kapitel 4.3 beschrieben wird.

Bei Szintillator B sieht man eine noch stärkere Variation des Ansprechvermögens. An den Kanten des Szintillators fällt das Ansprechvermögen stark ab und in der Mitte der Fläche befindet sich eine Stelle, an der auch nur 50 % der maximalen Zählrate registriert wird. Deshalb ist der Szintillator für präzise Messungen nicht mehr zu gebrauchen, was bei allen weiteren Messungen immer wieder bemerkbar sein wird. Falls man weitere, über diese Bachelorarbeit hinausgehende Messungen mit diesem Hodoskop machen möchte, sollte man diesen Szintillator durch einen neuen ersetzen.

Bei Szintillator C kann man dagegen eine gute Uniformität mit einem relativ konstanten Ansprechvermögen zwischen 80 und 90 % ablesen. Bei diesem Szintillator kann also in den weiteren Messungen zum Aufbau des Hodoskops mit guten Resultaten gerechnet werden.

Die starke Variation des Ansprechvermögens bei den drei Szintillatoren von über 20 %, erklärt sich aufgrund des Alters des Szintillatormaterials (mehr als 20 Jahre).

#### 4 Messungen zur Inbetriebnahme des Szintillator - Hodoskops

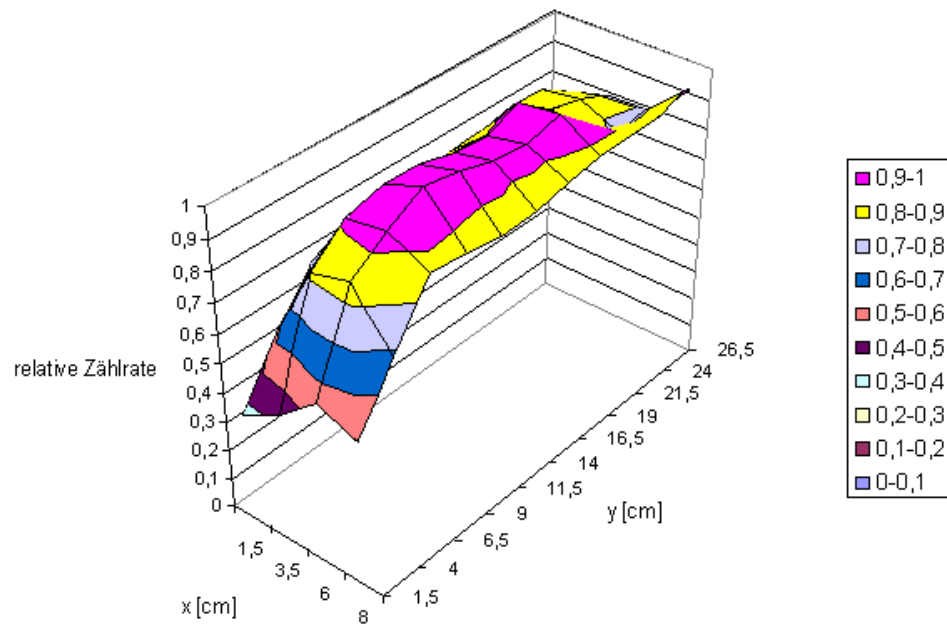


Abbildung 9: Ortsabhängigkeit der relativen Zählrate von Szintillator A mit  $\min(\sigma_{norm})=0,004$  und  $\max(\sigma_{norm})=0,007$

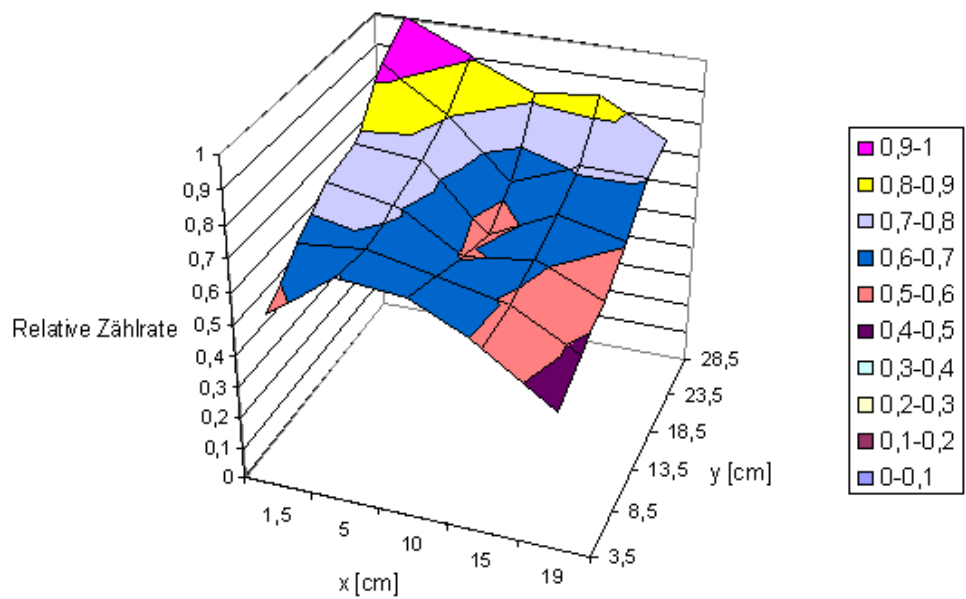


Abbildung 10: Ortsabhängigkeit der relativen Zählrate von Szintillator B mit  $\min(\sigma_{norm})=0,004$  und  $\max(\sigma_{norm})=0,007$



#### 4 Messungen zur Inbetriebnahme des Szintillator - Hodoskops

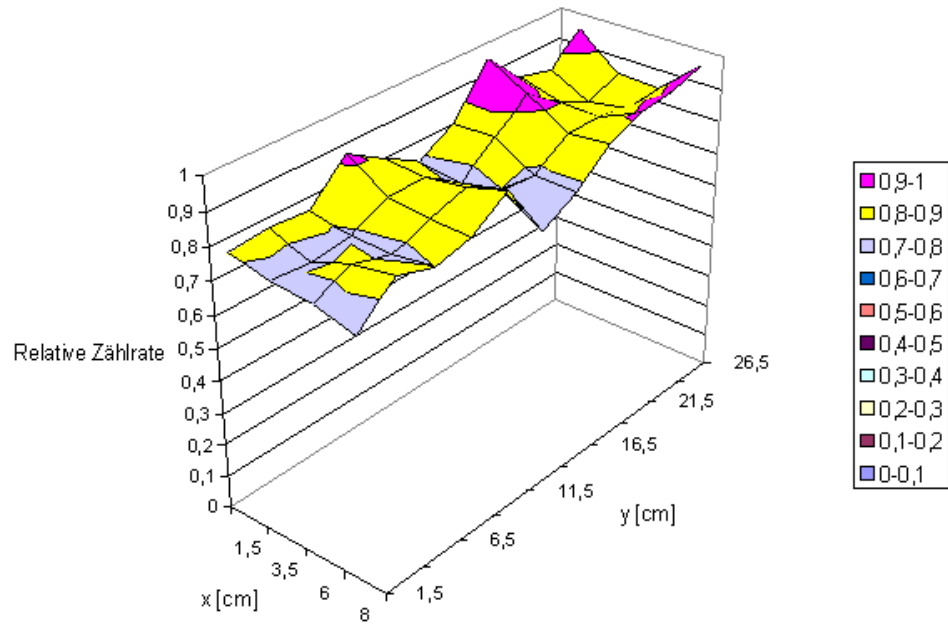
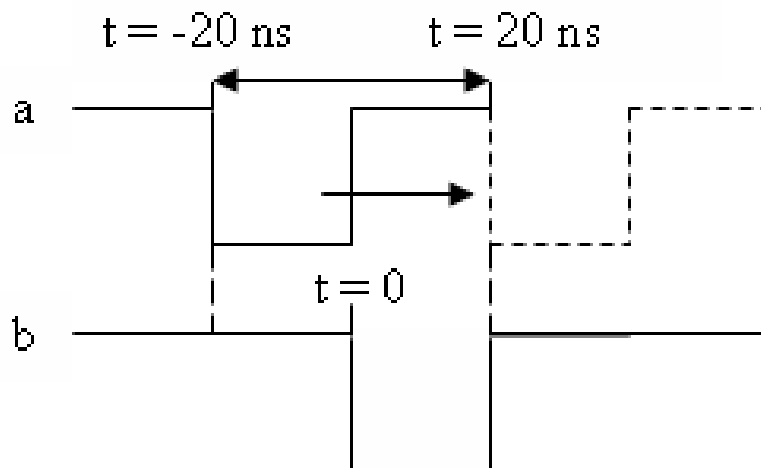


Abbildung 11: Ortsabhängigkeit der relativen Zählrate von Szintillator C mit  $\min(\sigma_{norm})=0,011$  und  $\max(\sigma_{norm})=0,012$

## 4.2 Aufnahme der Delaykurve

Eine Koinzidenzeinheit gibt Auskunft über die Gleichzeitigkeit von zwei Signalen. Sie liefert ein Ausgangssignal, wenn eines der Eingangssignale innerhalb eines kurzen Zeitintervalls mit dem anderen Eingangssignal zusammentrifft. Dieses Zeitintervall wird als Auflösungszeit der Koinzidenzeinheit bezeichnet. Durch die Messung der Delaykurve wird die Auflösungszeit der Koinzidenzeinheit bestimmt [10].

Theoretisch (ohne die Elektronik zu berücksichtigen) ist die Auflösungszeit gleich der Summe der beiden Pulsdauern, denn die Pulse können sich maximal während der Gesamtdauer  $T_1 + T_2 = 2\tau$  (für  $T_1 = T_2 = \tau$ ) überlappen [10], siehe Abb. 12. Praktisch benötigt die Koinzidenzeinheit zum Schalten einen zeitlichen Mindestüberlapp der eintreffenden Signale, außerdem beeinflusst die endliche Anstiegszeit die Auflösungszeit. Damit sollte bei  $\tau = 20$  ns eine geringere Breite der Delaykurve als 40 ns gemessen werden.



Zeitdifferenz: 40 ns

Abbildung 12: Auflösungszeit

#### 4.2.1 Aufbau

Aus Abb. 13 wird der Aufbau für die Messung der Delaykurve ersichtlich.

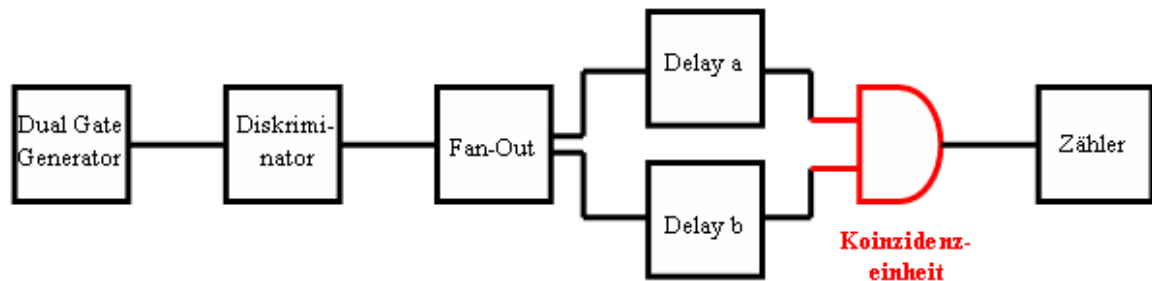


Abbildung 13: Aufbau zur Aufnahme der Delaykurve

Es werden zuerst die drei bisher in dieser Arbeit noch nicht beschriebenen Elektrobauteile, der Fan-Out, das Delay und der Dual Gate Generator, erläutert.

##### Linear Fan-Out

Ein Fan-Out ist eine Vervielfältigungseinheit von Signalen. Man erhält also mehrere identische Ausgangssignale, die dem Eingangssignal entsprechen. Die Form des Signals bleibt erhalten.

##### Delay

Unter einem Delay versteht man einen elektronischen Baustein, mit dem ein Signal um eine bestimmte Zeit verzögert wird. Um analoge Signale, deren Form man nicht kennt, verzögern zu können, werden aufgerollte Kabel verwendet, wodurch das Eingangssignal um die Kabellaufzeit verschoben wird, aber die Form beibehält.

##### Dual Gate Generator

Dieses Modul liefert ein NIM-Ausgangssignal von wählbarer Länge. Da das Gerät zwei Kanäle besitzt, kann es auch als Pulsgeber benutzt werden. Dazu verbindet man die Ausgänge der beiden Kanäle wie folgt: Der Start-Ausgang von Kanal 1, mit dem man einen Puls manuell starten kann, wird mit dem Ausgang des invertierten NIM-Pulses von Kanal 2 verbunden und umgekehrt. Auf einem der Ausgänge der NIM-Pulse kann man nun einen periodischen Rechteckpuls abgreifen (siehe Abb. 14), der durch den im folgenden, dargestellten Ablauf entsteht.

#### 4 Messungen zur Inbetriebnahme des Szintillator - Hodoskops

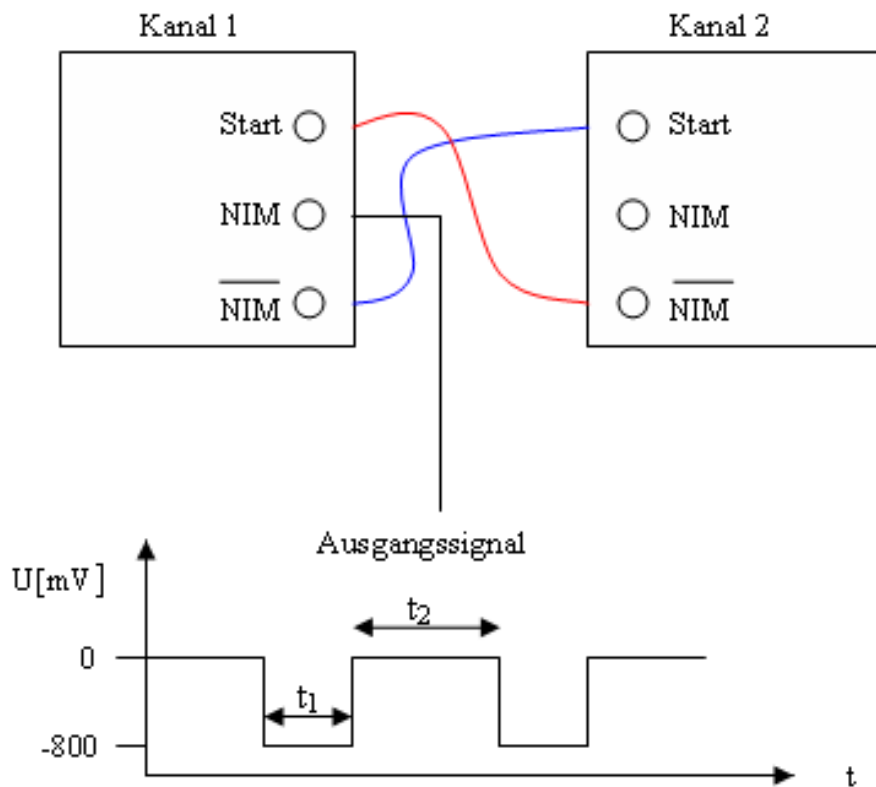


Abbildung 14: Aufbau eines Pulsgebers mit einem Dual Gate Generator

Von Kanal 1 wird ein Puls von wählbarer Länge  $t_1$  auf den Ausgang gegeben. Parallel wird der invertierte Puls auf den „Start“-Eingang von Kanal 2 gegeben, d.h. solange der Puls andauert, wird bei Kanal 2 kein Signal ausgegeben, was einer logischen „0“ entspricht. Wenn der Puls endet, wechselt der invertierte Ausgang zu einer logischen „1“ und ein Signal der einstellbaren Länge  $t_2$  wird in Kanal 2 ausgelöst. Solange dieses Signal andauert, wird entsprechend bei Kanal 1 kein Puls ausgelöst, sondern erst, wenn der Puls von Kanal 2 endet. Damit ist die Ausgangssituation wieder hergestellt, d.h. man erhält einen periodischen Rechteckpuls.

Wenn man den NIM-Puls bei Kanal 1 abgreift, dann kann bei Kanal 1 die Pulsbreite  $t_1$  und bei Kanal 2 durch die Veränderung von  $t_2$  die Frequenz eingestellt werden. Die minimale Pulsbreite, die man hiermit erreichen kann, beträgt  $1 \mu\text{s}$ .

Die in den weiteren Messungen benötigte Pulsbreite beträgt  $20 \text{ ns}$ . Sie wird so kurz gewählt, um zufällige Koinzidenzen, siehe Kapitel 4.5 und darin Formel (12), die von der Pulsdauer abhängen, zu vermeiden.

Um eine Pulsbreite von  $20 \text{ ns}$  zu erhalten, gibt man die Pulse auf einen Diskriminator, bei dem die Schwelle auf die Hälfte des Eingangssignals ( $-400 \text{ mV}$ ) und die Breite des

#### 4 Messungen zur Inbetriebnahme des Szintillator - Hodoskops

Ausgangspulses auf 20 ns eingestellt wird. Die Höhe der Diskriminatorschwelle ist hier noch frei wählbar, da es keine zufälligen Pulse gibt, sondern jeder Puls, der auf den Eingang kommt, ein Signal auslösen soll. Dieses Ausgangssignal gibt man auf ein Fan-Out, um zwei identische Signale zu erhalten, mit denen man die Delaykurve aufnimmt. Diese Kurve erhält man, indem ein Signal gegenüber dem anderen über ein Delay verzögert wird und diese beiden Signale auf eine Koinzidenzeinheit gegeben werden. Man erhält ein Ausgangssignal, wenn die beiden Signale sich länger als die von der Koinzidenzeinheit zum Schalten benötigte minimale Überlappzeit überschneiden. Die Anzahl der Koinzidenzen wird innerhalb einer gewählten Zeit gemessen.

##### 4.2.2 Messung

Die Verzögerung der Pulse gegeneinander erfolgt über zwei Delayboxen, a und b (Abb.13). Zuerst wird das Signal a maximal gegen das Signal b verschoben (63 ns). Nun werden die Signale in 3 ns-Schritten angenähert und wieder entfernt (Abb.15). Beginn und Ende des Bereichs, in dem die Signale überlappen, werden in 1 ns-Schritten vermessen. Für jeden Messpunkt wird die Zählrate 10 s gemessen.

Die Messwerte sind in den Tabellen im Anhang B zu finden.

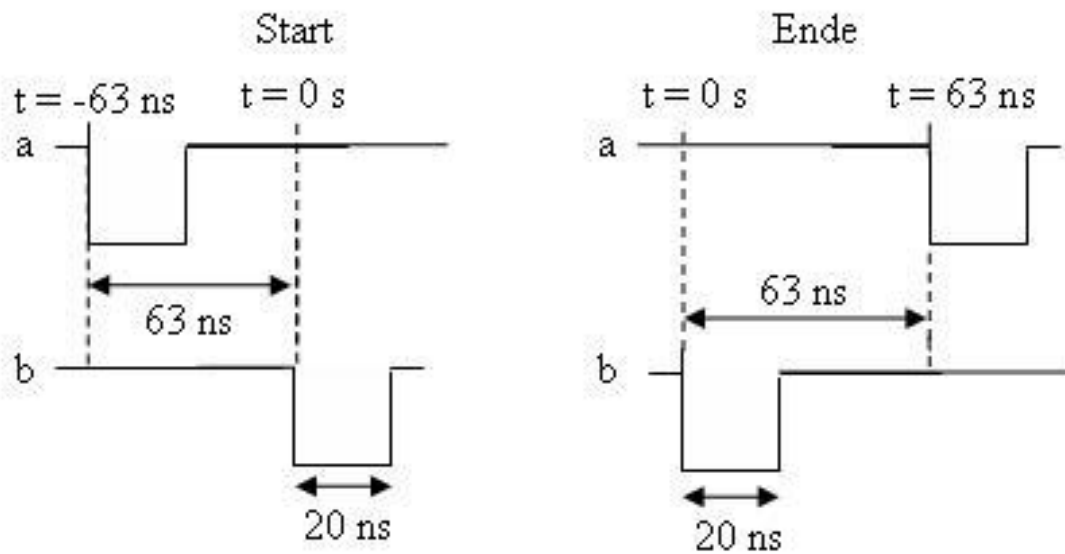


Abbildung 15: Verschiebung der Signale bei der Aufnahme der Delaykurve in Schritten von 3 ns (Start bis Ende)

#### 4.2.3 Auswertung

Zur Auswertung der Daten wird ein Diagramm erstellt, in dem die normierte Zählrate gegen die Verzögerung aufgetragen wird. Die Zählrate wird normiert, indem die Zählrate durch die maximale Zählrate geteilt wird. Somit erhält man Werte zwischen 0 und 1.

Für den Fehler der Zählrate bei fester Verschiebung der Signale gilt:

$$\sigma_N = \sqrt{N}. \quad (6)$$

Dann gilt für die normierten Größen:

$$N_{norm} = \frac{N}{N_{max}}, \quad (7)$$

$$\sigma_{norm} = \frac{\partial N_{norm}}{\partial N} \sigma_N = \frac{\sigma_N}{N_{max}}. \quad (8)$$

#### 4 Messungen zur Inbetriebnahme des Szintillator - Hodoskops

$N_{max}$  wird bestimmt zu 11 688 028, und mit  $\max(\sigma_N) = 3419$  als maximaler Fehler der Zählraten (siehe Tabelle im Anhang C) gilt für alle Messpunkte  $\sigma_{norm} < 1\%$ . Da diese Fehler so klein sind, kann man die Fehlerbalken im Diagramm nicht erkennen (Abb. 16).

Wie aus der Kurve abzulesen ist, erhält man als Auflösungszeit (Breite der Delaykurve) 38 ns. Der Startpunkt der Koinzidenz-Zählrate ( $N \neq 0$ ) liegt bei  $t = -19$  ns und der Endpunkt liegt bei  $t = 19$  ns. Wie vorne dargestellt, müßte man theoretisch (ohne die endliche Auflösung der Elektronik zu berücksichtigen) eine Breite von 40 ns erhalten (zwischen -20 ns und 20 ns). Damit erhält man als Abweichung  $\Delta t$  zum Theoriewert der Auflösungszeit

$$\Delta t = \frac{(2\tau)_{theo} - (2\tau)_{exp}}{2} = \frac{40 \text{ ns} - 38 \text{ ns}}{2} = 1 \text{ ns}.$$

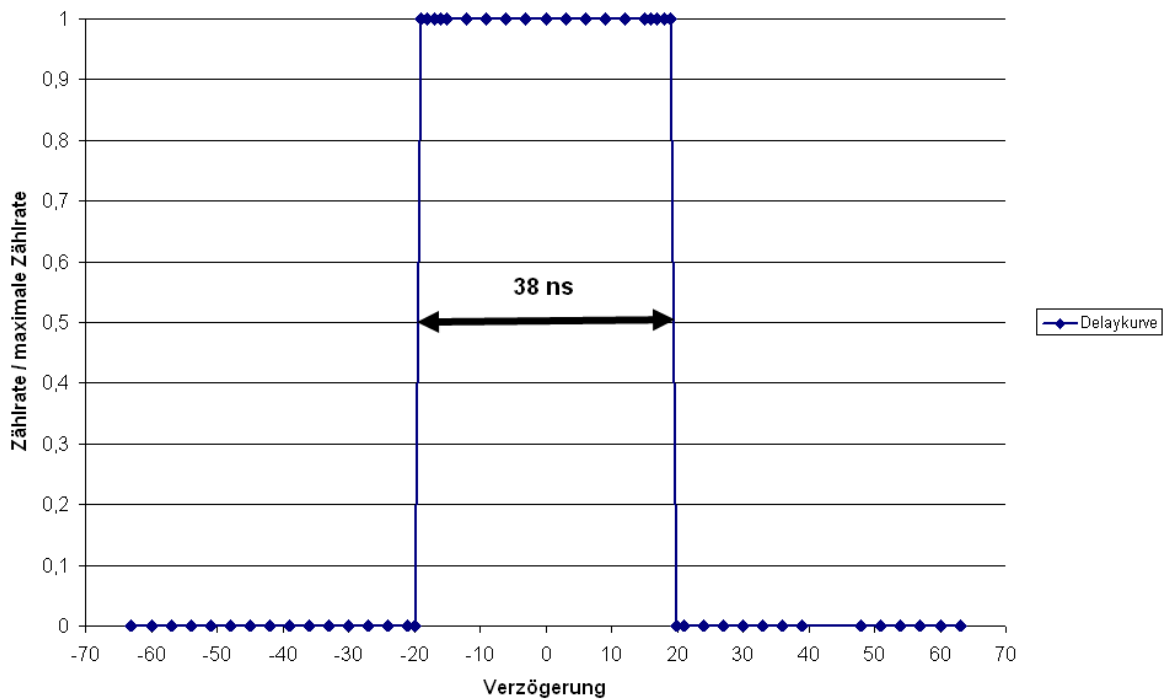


Abbildung 16: Normierte Delaykurve

Die Ursache dieser Abweichung ist, dass die Koinzidenzeinheit einen geringen zeitlichen Überlapp zweier Signale benötigt. Dieser Mindestüberlapp ist mit 1 ns gering.

### 4.3 Einstellung der Hochspannungen an den Photomultipliern

In dieser Messreihe sollen die für die Teilchendetektion optimalen Hochspannungen der Photomultiplier bestimmt werden.

Diese Messungen werden durchgeführt, weil die Zählrate der Photomultiplier von der anliegenden Spannung abhängig ist und die optimale Spannung für jeden Szintillationszähler bestimmt werden soll. Trägt man die Zählrate gegen die eingestellte Spannung auf, erkennt man im Graphen drei Bereiche (Abb. 17).

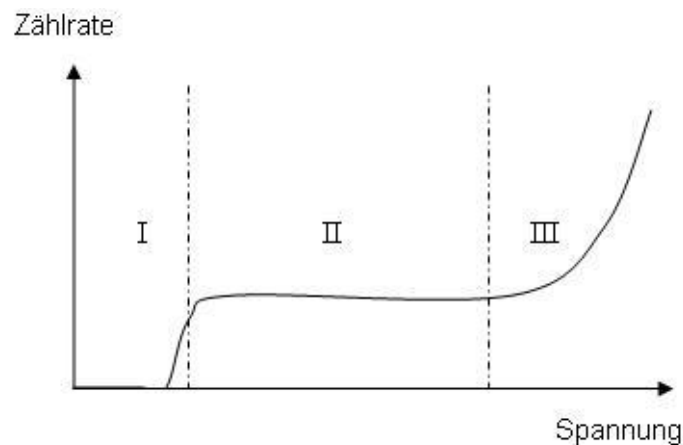


Abbildung 17: *Abhängigkeit der Zählrate von der am Photomultiplier anliegenden Spannung*

Im ersten Bereich ist die Spannung zu niedrig, so dass die durch die Photonen in der Kathode des Photomultipliers ausgelösten Elektronen nicht ausreichend auf die Dynoden beschleunigt werden, d.h. man erhält kein Signal. Im Bereich III ist die Spannung zu hoch, so dass Kurzschlüsse zwischen den Dynoden des Photomultipliers entstehen, wodurch der Photomultiplier zerstört wird. Dazwischen ist ein Bereich, in dem die Zählrate unabhängig von der Spannung ist. In diesem Plateaubereich muss der Photomultiplier betrieben werden (Arbeitspunkt).

#### 4.3.1 Aufbau

Für die Bestimmung der Hochspannungen der Photomultiplier wird der folgende Aufbau gewählt: Die Szintillatorflächen der Szintillationszähler werden gekreuzt, wobei die Szintillationszähler so aufgebaut werden, dass Szintillator A zuoberst, in



#### 4 Messungen zur Inbetriebnahme des Szintillator - Hodoskops

der Mitte Szintillator B und darunter Szintillator C liegt, siehe Abb.18.

Bei diesen Messungen werden kosmische Myonen verwendet. Die Anordnung der Szintillatoren zueinander bleibt während der Messungen gleich. Die Signalauslese erfolgt, wie in Abb.3 zu sehen ist, zuerst über einen Verstärker, dessen Signale auf einen Diskriminator gegeben werden. Die weitere Signalverarbeitung findet wie folgt statt (beispielhaft für Szintillator C): Die Ausgangssignale des Diskriminators von den Szintillationszählern A und B werden auf eine Koinzidenzeinheit gegeben, ebenso zwei Signale von Szintillationszähler C (in dem Diskriminator ist ein Fan-Out integriert), damit die Laufzeit der Signale gleich bleibt. Dann werden die beiden Signale der Koinzidenzen AB und CC wiederum auf eine Koinzidenz gegeben (Dreifachkoinzidenz). Man erhält nun ein Signal auf dem Ausgang der letzten Koinzidenzstufe, wenn ein kosmisches Myon durch alle drei Szintillatoren gegangen ist.

Die Hochspannung des Photomultipliers C wird variiert und somit die Abhängigkeit der Zählrate der Koinzidenz C(AB) von der Hochspannung gemessen. Die Darstellung erfolgt in einem Diagramm, das die Dreifachkoinzidenz in Abhängigkeit von der Spannung am Photomultiplier zeigt. Hieraus kann der Arbeitspunkt des Photomultipliers bestimmt werden.

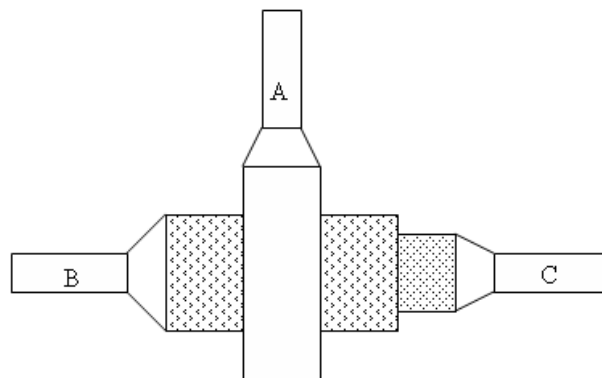


Abbildung 18: Aufbau der Szintillationszähler zueinander, Sicht von oben auf den Aufbau

Für die beiden anderen Photomultiplier erfolgt die Einstellung der Hochspannung analog.

#### 4.3.2 Messung

Die Zählzeit für jeden Messpunkt beträgt 50 s. Die Diskriminatorschwellen werden für die Szintillatoren A und C auf -100 mV und für Szintillator B auf -80 mV eingestellt. Die Diskriminatorschwelle für B wird so gewählt, weil bei einer höheren Schwelle kaum Signale durch den Diskriminator kommen. Zuerst wird die Messung für den Szintillationszähler A durchgeführt, dann für B und zuletzt für C. Da man die

Arbeitspunkte der Szintillationszähler noch nicht kennt, wird bei der ersten Messung zur Bestimmung des Arbeitspunkts von Szintillationszähler A bei Photomultiplier B eine Spannung von 2000 V und bei Photomultiplier C eine Spannung von 1640 V eingestellt, da diese Werte bei der Bestimmung der Uniformität verwendet wurden und sich diese als geeignet herausgestellt hatten. Bei der Messung für Szintillationszähler B wird schon die Hochspannung am Photomultiplier A am Arbeitspunkt eingestellt. Bei der letzten Messreihe für den Szintillationszähler C wird bei Photomultiplier B auch schon der Arbeitspunkt eingestellt.

Die Messwerte für die Einstellung der Hochspannung sind in den Tabellen im Anhang C zu finden. Darin werden für jeden Spannungswert die Zweifach- und die Dreifachkoinzidenz-Zählrate aufgeführt.

#### 4.3.3 Auswertung

Zur besseren Übersichtlichkeit werden für die Auswertung wieder Graphen erstellt, die die Zweifach- und Dreifachkoinzidenz-Zählrate in Abhängigkeit von der Hochspannung zeigen, siehe Abb.19-21. Der Fehler der Zählrate  $n$  beträgt  $\sqrt{n}$ .

Man erwartet als Zählrate für die Koinzidenz von AB und BC ungefähr 95 Myonen in 50 s, da die Fläche bei beiden Messungen  $9,5 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  beträgt. Für die Koinzidenz AC mit einer Fläche von  $9,5 \text{ cm} \times 9,5 \text{ cm}$  erwartet man eine Zählrate von ungefähr 45 Myonen.

Wenn man sich das Diagramm von Szintillationszähler A (Abb.19) anschaut, erkennt man das Plateau: Es beginnt ab einer Spannung von etwa 1500 V. Die Dreifachkoinzidenz-Zählrate liegt in diesem Bereich zwischen 30 und 40. Das ist geringer als erwartet. Die Zweifachkoinzidenz-Zählrate bleibt konstant, was auch so erwartet wird, denn die Zweifachkoinzidenz BC ist unabhängig von der Spannung am Photomultiplier A. Für diesen Szintillationszähler wird damit die Hochspannung auf 1680 V festgelegt, weil diese Spannung in der Mitte des ausgemessenen Plateaubereichs liegt und die Gefahr, den Photomultiplier bei dieser Spannung zu zerstören, gering ist.

Bei Szintillationszähler C (Abb.21) sieht man ein ähnliches Bild: Das Plateau beginnt wieder ab einer Spannung von etwa 1500 V. Die Dreifachkoinzidenz-Zählrate liegt im Plateaubereich bei ungefähr 40, was auch wieder geringer ist als erwartet. Die Hochspannung des Szintillationszählers C wird auf 1680 V festgelegt, da diese Spannung im Plateaubereich liegt.

Bei Szintillationszähler B erhält man erst ab Spannungen über 1800 V überhaupt Signale. Außerdem ist ein Plateaubereich nicht eindeutig zu erkennen. Bei der Bestimmung der Uniformität war dieser Szintillationszähler auch schon wegen seines schlechten Resultats aufgefallen. Die Hochspannung wurde nicht höher als 2120 V eingestellt, weil der Photomultiplier nicht zerstört werden sollte. Die Hochspannung

#### 4 Messungen zur Inbetriebnahme des Szintillator - Hodoskops

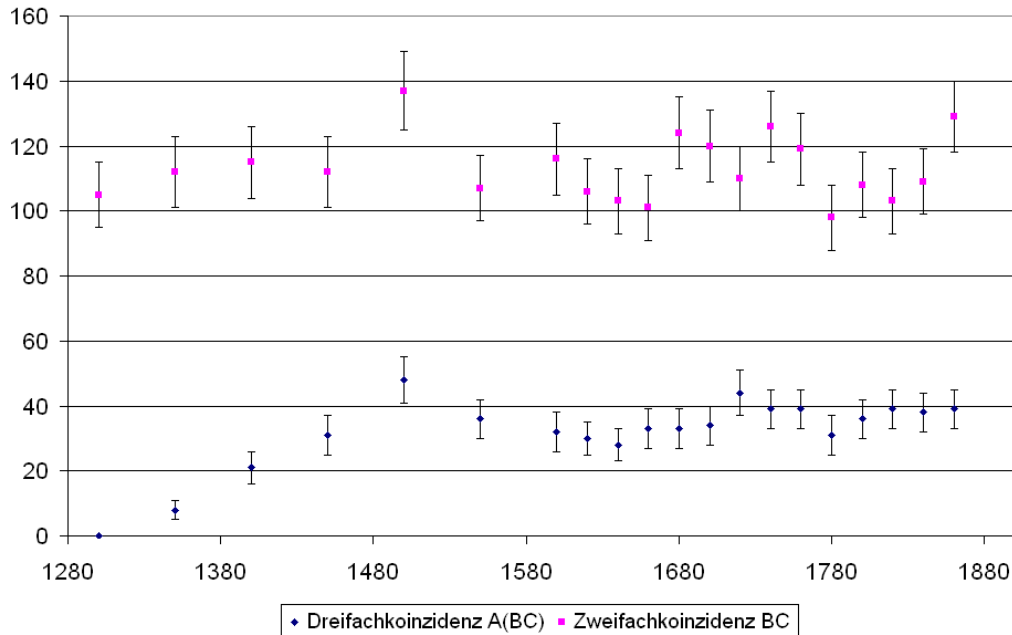


Abbildung 19: Die Dreifachkoinzidenz  $A(BC)$  in Abhängigkeit von der Hochspannung des Photomultipliers A mit der jeweiligen Zweifachkoinzidenz BC

für diesen Szintillationszähler wird auf 2000 V festgelegt, um Signale zu erhalten, aber den Photomultiplier nicht zu zerstören.

Die gemessenen Zweifachkoinzidenz-Raten sind jeweils höher als die erwartete Myonrate. Dabei könnten Rauschpulse eine Rolle spielen, die eine Koinzidenz bilden. Die Dreifachkoinzidenzen sind niedriger als erwartet, da die Myonen nicht nur senkrecht von oben kommen, sondern auch unter anderen Winkeln auf die Erdoberfläche treffen. Diese Myonen müssen nicht durch alle drei Szintillationszähler gehen. Rauschpulse sollten keine Rolle mehr spielen, da drei gleichzeitige Rauschpulse selten vorkommen. Näheres darüber kann erst im Kapitel 4.5: „Messung der Nachweiswahrscheinlichkeit für Myonen in den einzelnen Szintillatoren“, erklärt werden. Die Einstellung der Diskriminatorschwellen wird im nächsten Kapitel beschrieben.

Damit sind die Spannungen für die Photomultiplier festgelegt: Für A liegt der Arbeitspunkt bei 1680 V, genauso wie für den Szintillationszähler C. Für B wird die Spannung auf 2000 V gelegt. Bei den Szintillationszählern A und C kann man bei diesen Einstellungen mit guten Resultaten rechnen, bei Szintillationszähler B ist die Einstellung nicht zufriedenstellend, da kein Plateaubereich zu erkennen ist.

#### 4 Messungen zur Inbetriebnahme des Szintillator - Hodoskops

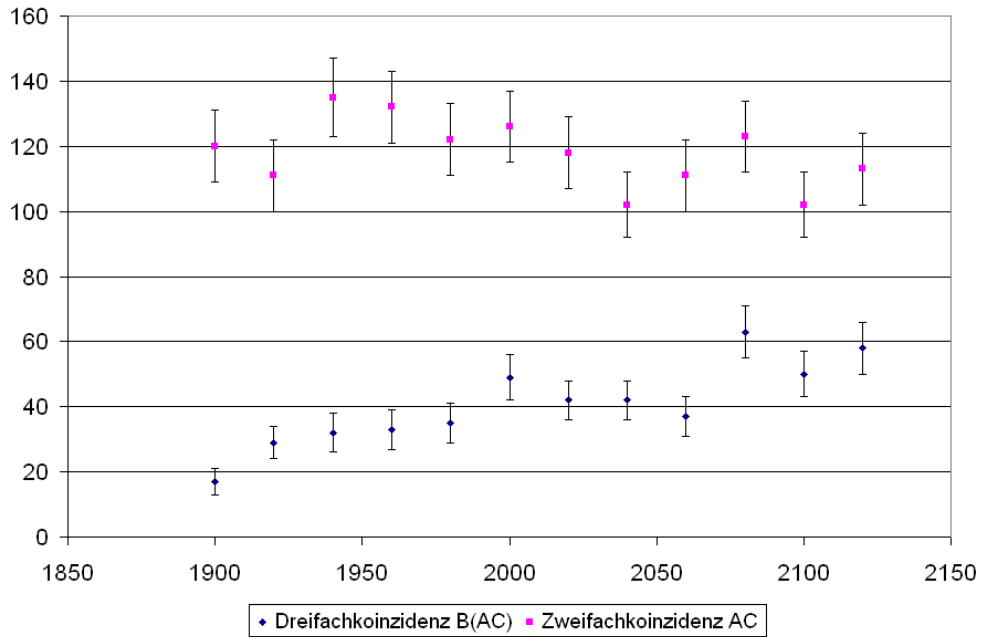


Abbildung 20: Die Dreifachkoinzidenz  $B(AC)$  in Abhängigkeit von der Hochspannung des Photomultipliers  $B$  mit der jeweiligen Zweifachkoinzidenz  $AC$

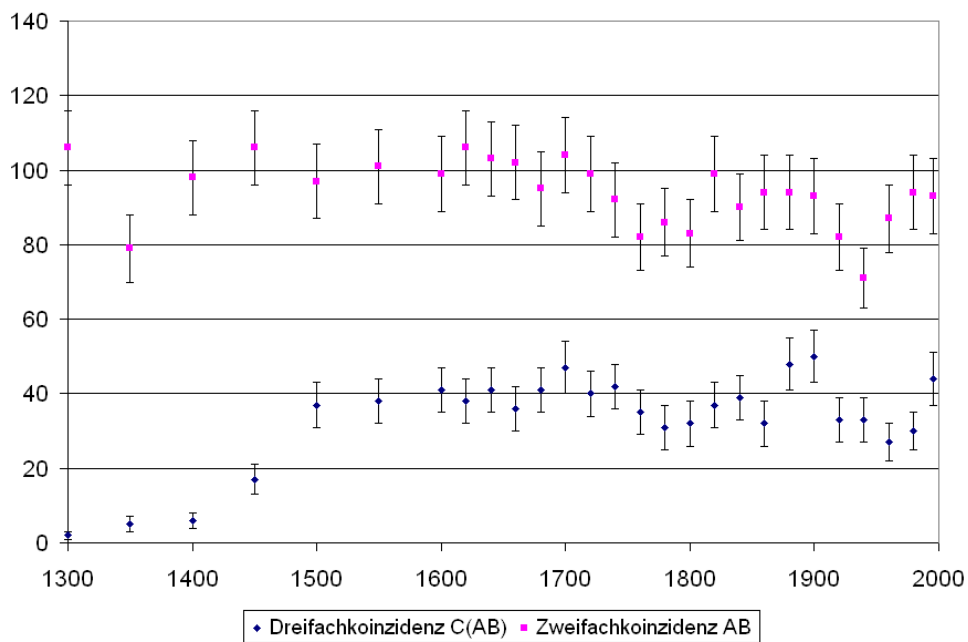


Abbildung 21: Die Dreifachkoinzidenz  $C(AB)$  in Abhängigkeit von der Hochspannung des Photomultipliers  $C$  mit der jeweiligen Zweifachkoinzidenz  $AB$

#### 4.4 Einstellung der Diskriminatorschwellen durch Koinzidenzmessungen

Mit diesen Messungen werden die Diskriminatorschwellen für die einzelnen Szintillationszähler eingestellt.

Da das Ergebnis bei einer Messung durch Rauschpulse verfälscht werden kann, müssen diese Pulse herausgefiltert werden, wozu zwei Mechanismen benutzt werden:

1. Herausfilterung durch den Diskriminator: Es entstehen viele Rauschsignale aufgrund von Wärme in den Photomultipliern. Diese sollen durch den Diskriminator herausgefiltert werden, indem die einstellbare Diskriminatorschwelle auf eine Spannung eingestellt wird, bei der die Rauschsignale möglichst unter dieser Schwelle und die Signale, die durch geladene Teilchen ausgelöst werden, darüber liegen sollen.
2. Elimination durch Koinzidenz: Benutzt man nun zwei Szintillationszähler und schaltet diese in Koinzidenz, dann geschieht es sehr selten, dass zwei zufällige Rauschpulse in zwei verschiedenen Szintillationszählern gleichzeitig zwei Signale in den dazugehörigen Diskriminatoren auslösen, wodurch dann ein Koinzidenzsignal entsteht. Die Berechnung, wie viele zufällige Koinzidenzen man in dem Szintillator - Hodoskop erwarten kann, wird im Abschnitt 4.5 mit Formel (12) durchgeführt.

Die Einstellung der Diskriminatorschwelle ist also so wichtig, um Rauschen und Untergrundsignale zu unterdrücken. Die Einstellung der Diskriminatorschwellen erfolgt durch ein iteratives Verfahren. Dabei werden an alle drei Photomultiplier die zuvor bestimmten Hochspannungen angelegt (siehe Kapitel 4.3). Dann schaltet man zwei Szintillationszähler in Koinzidenz und gibt dieses Signal auf ein Oszilloskop. Des weiteren wird das Signal des dritten Szintillationszählers auf das Oszilloskop gegeben. Dieses Signal wird von dem Signal der Zweifachkoinzidenz getriggert, d.h. dass das Signal nur angezeigt wird, wenn ein Koinzidenzsignal vorliegt.

Stellt man an dem Oszilloskop für die Signale Nachleuchten ein, so dass alle auftretenden getriggerten Photomultipliersignale angezeigt werden, so erkennt man folgendes Bild (Abb.22).

## 4 Messungen zur Inbetriebnahme des Szintillator - Hodoskops

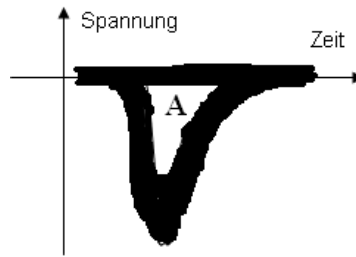


Abbildung 22: Oszillatorbild

Dieses Bild besteht aus drei Teilen:

1. Man erhält Signale auf dem Oszilloskop, bei denen die Amplitude null ist, d.h. dass bei den Szintillatoren, die in Koinzidenz geschaltet sind, ein Teilchen registriert wurde, aber dieses Teilchen nicht im betrachteten Szintillator registriert wurde.
2. Man erkennt Myonpulse von einer Mindestamplitude, die entstehen, weil Myonen, die durch einen Szintillator gehen, eine Mindestenergie verlieren.
3. Man sieht eine Fläche A (die auch Auge genannt wird), die frei ist von Pulsen, weil alle Rauschpulse durch die Diskriminatoren und die Koinzidenz unterdrückt sind.

Die Diskriminatorschwelle wird nun auf die kleinste Signalspannung eines Myonpulses eingestellt, die man in dem Oszilloskopbild ausmessen kann. Zur Kontrolle wird die Zweifach- und die Dreifachkoinzidenz-Zählrate für 50 s gemessen.

Danach wird dieses Verfahren auf die anderen beiden Szintillationszähler angewandt. Es kann sein, dass man dieses Vorgehen mehrmals wiederholen muss, wenn man die Diskriminatorschwellen nicht in Schritten, die größer sind als 100 mV, verändern will.

### 4.4.1 Aufbau

Der Aufbau ist der gleiche wie in der Messung, die in Kapitel 4.3 beschrieben ist. Es wird immer zur Kontrolle die Zweifach- und die Dreifachkoinzidenz-Zählrate gemessen. Zusätzlich wird nun für den zu vermessenden Szintillationszähler das Signal des Verstärkers (der Verstärker besitzt für jeden Eingang zwei Ausgänge) auf das Oszilloskop gegeben, genauso das Signal der Zweifachkoinzidenz der anderen beiden Szintillationszähler. Mit diesem Signal wird, wie oben schon erwähnt, das Signal des zu vermessenden Szintillationszählers getriggert.

#### 4.4.2 Messung

In Abb.23-25 sind die Oszilloskopbilder der Szintillationszähler-Signale gezeigt, getriggert von der Zweifachkoinzidenz der jeweils beiden anderen Szintillationszähler nach der endgültigen Einstellung der Diskriminatorschwellen. Es wurden nach jeder Änderung einer Diskriminatorschwelle die Zählraten gemessen, die in der Tabelle im Anhang E und der letzte Messdurchgang in Tabelle 3 aufgeführt sind.

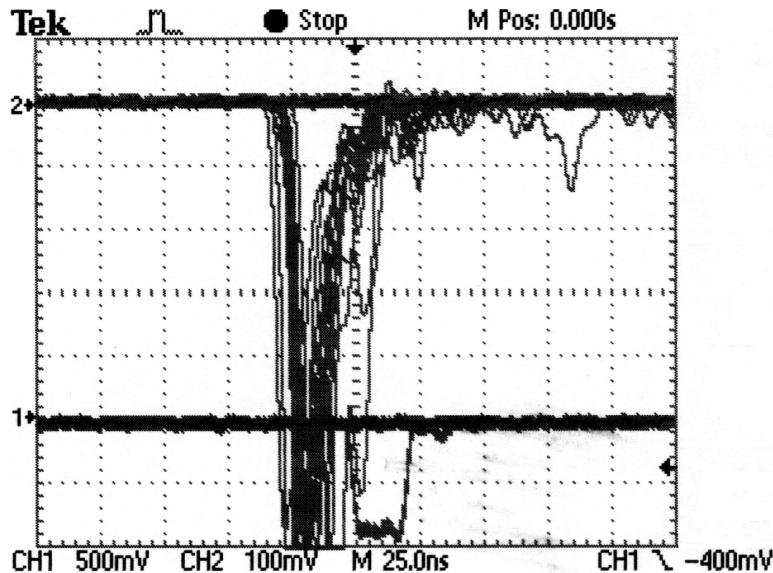


Abbildung 23: Durch die Zweifachkoinzidenz BC (unten) getriggerte Signale von Szintillationszähler A (oben)

Diskriminatorschwelle	Zweifachkoinz.	stat. Fehler	Dreifachkoinz.	stat. Fehler
SZ C: -215 mV mit SZ A: -200mV mit SZ B: -75mV	98	10	41	6
SZ A: -210 mV mit SZ B: -75mV mit SZ C: -215mV	120	11	35	6
SZ B: -85 mV mit SZ A: -210mV mit SZ C: -215mV	75	9	39	6

Tabelle 3: Koinzidenz-Zählraten bei dem letzten Durchlauf der Einstellung der Diskriminatorschwellen. Zweifachkoinz. steht für Zweifachkoinzidenz und Dreifachkoinz. für Dreifachkoinzidenz

#### 4 Messungen zur Inbetriebnahme des Szintillator - Hodoskops

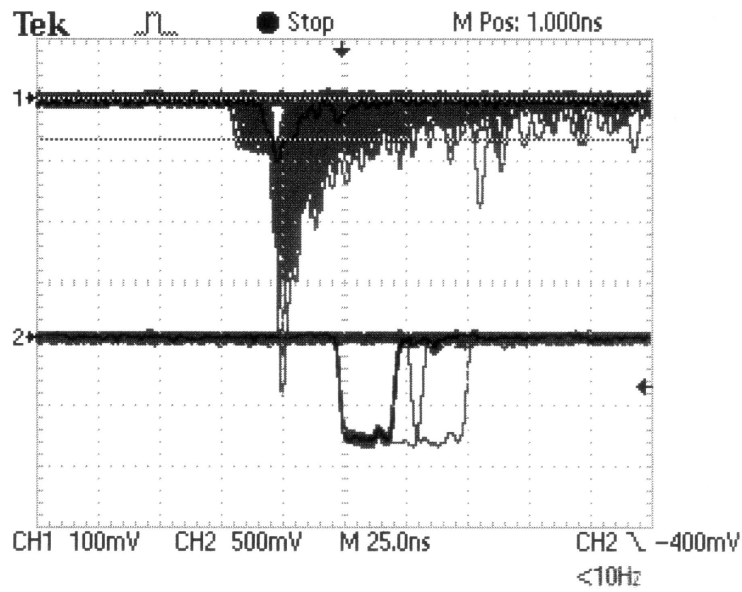


Abbildung 24: Durch die Zweifachkoinzidenz AC (unten) getriggerte Signale von Szintillationszähler B (oben)

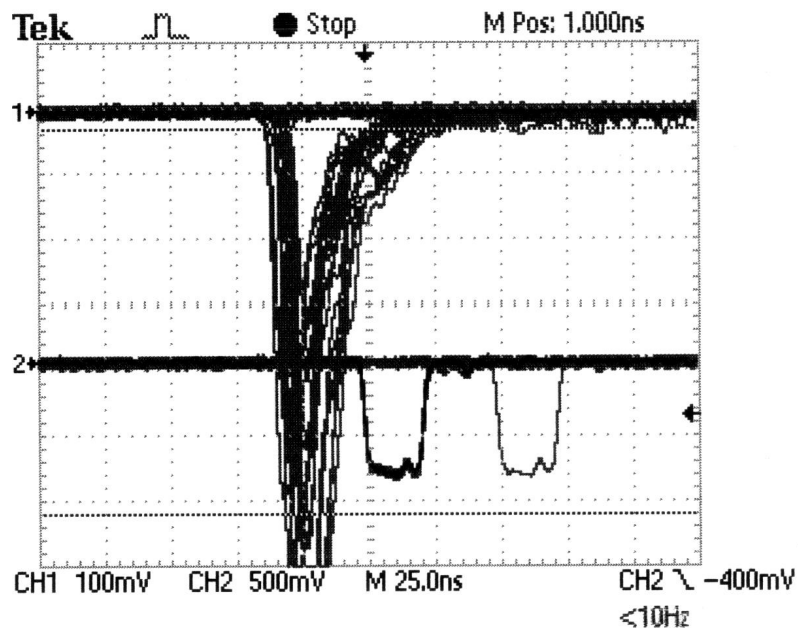


Abbildung 25: Durch die Zweifachkoinzidenz AB (unten) getriggerte Signale von Szintillationszähler C (oben)



### 4.4.3 Auswertung

In den Oszilloskopbildern ist bei den Szintillationszählern A und C ein deutliches Auge zu erkennen, wobei die Zeit, in der das Auge aufgenommen wurde, sehr kurz ist (ungefähr 20 s). Nimmt man länger Signale auf, dann füllt sich das Auge mit Myonspurs. Die Ursache hierfür ist, dass zwei Zweifachkoinzidenzsignale aufeinander folgend auftreten und die Myonspurs dann hintereinander aufgezeichnet werden. Die Amplituden der Pulse haben aufgrund der Diskriminatorschwelle immer eine gewisse Mindesthöhe.

Bei Szintillationszähler B ist kaum ein Auge zu erkennen. Auch wenn man die gewählten Diskriminatorschwellen vergleicht, fällt auf, dass bei B die Schwelle viel geringer ist als bei den Szintillationszählern A und C. Entweder ist die Lichtausbeute im Szintillator sehr gering aufgrund des Alters des Materials oder weil bei dem Photomultiplier die Einstellung der Hochspannung zu niedrig gewählt wurde. Da die Photomultiplier nicht zerstört werden sollten, wurde deshalb bei der Bestimmung der Hochspannung die Spannung nicht noch weiter erhöht. Leider liegen keine Angaben zum Hersteller vor, und der zeitliche Aufwand des Auseinanderbaus der schon montierten Szintillationszähler, um den Hersteller festzustellen, schien nicht gerechtfertigt, zumal dabei das Risiko einer Beschädigung bestanden hätte. Die gewählten Einstellungen der Spannungen an den Photomultipliern liegt im Rahmen der üblichen Einstellungen.

Des Weiteren erkennt man, dass die durch die Zweifachkoinzidenz getriggerten Signale immer vor dem Signal der Zweifachkoinzidenz aufgezeichnet werden. Dies liegt daran, dass das Signal der Zweifachkoinzidenz eine längere Laufzeit durch die Elektronik und die Kabel hat als das zu vermessende Signal des Szintillationszählers nach dem Verstärker.

Es werden folgende Diskriminatorschwellen eingestellt: Für Szintillator A -210 mV, für Szintillator B -85 mV und für Szintillator C -215 mV.

Wenn man die gemessenen Zählraten betrachtet, fällt auf, dass die Dreifachkoinzidenzen immer geringer sind als der Erwartungswert von 45 Myonen in 50 s. Aber dieses ist auch schon in der vorherigen Messung beobachtet und erklärt worden.

## 4.5 Messung der Nachweiswahrscheinlichkeit für Myonen in den einzelnen Szintillatoren

In dieser Messung soll die Nachweiswahrscheinlichkeit für kosmische Myonen für jeden Szintillationszähler bestimmt werden. Die Messung wird mit den in den vorherigen Messungen bestimmten Spannungen und Diskriminatorschwellen durchgeführt. Sie wird durchgeführt, um weitere Aussagen sowohl über die bisherigen Ergebnisse machen zu können (z.B. warum die Zählraten geringer sind als erwartet), als auch, um weitere Zählraten-Messungen besser zu verstehen.

Idealerweise sollte jedes geladene Teilchen, das durch den Szintillator geht, auch ein Signal auslösen. Da die Nachweiswahrscheinlichkeit der Szintillationszähler aber auch von dem Teilchendurchgangsort abhängig ist, wie im Kapitel „Uniformität der Szintillatoren“ schon untersucht wurde, kann erwartet werden, dass die Szintillationszähler nicht 100 % Nachweiswahrscheinlichkeit aufweisen werden und Szintillationszähler B die geringste Nachweiswahrscheinlichkeit für geladene Teilchen aufweisen wird.

Der zu vermessende Szintillator wird zwischen den beiden anderen Szintillatoren aufgebaut. Die Flächen der Szintillatoren müssen immer übereinander angeordnet sein, damit man sicher sein kann, dass ein Teilchen, das durch die beiden äußeren Szintillatoren gegangen ist, auch durch den Szintillator in der Mitte gegangen ist. Somit müsste, wenn der Szintillator in der Mitte 100 % Ansprechvermögen hat, die Zweifach- gleich der Dreifachkoinzidenz-Zählrate sein.

Das Ansprechvermögen  $\epsilon$  berechnet sich als das Verhältnis der Dreifach ( $y$ )- zu der Zweifachkoinzidenz-Zählrate ( $x$ ):

$$\epsilon = \frac{y}{x}. \quad (9)$$

Bei der Berechnung des Fehlers muss berücksichtigt werden, dass  $x$  und  $y$  korreliert sind, daher gilt

$$\sigma_{\epsilon} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial x} (x_i - \bar{x}) + \frac{\partial \epsilon}{\partial y} (y_i - \bar{y}) \right)^2}. \quad (10)$$

Dabei ist  $n$  die Anzahl der Messungen,  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  sind die Mittelwerte von  $x$  und  $y$ .

Bei der Auswertung wird auch die Anzahl der zufälligen Koinzidenzen bestimmt, denn es ist wichtig zu wissen, ob die Zählrate hierdurch nennenswert beeinflusst wird. Zufällige Koinzidenzen entstehen, weil jedes Szintillatorsignal eine endliche Zeitdauer besitzt, so dass zwei voneinander unabhängige Signale, die innerhalb dieser Zeit auftreten, als Zweifachkoinzidenz gemessen werden. Die Zählrate dieser zufälligen Koinzidenzen hängt einerseits von den Einzelzählraten  $n_i$ , andererseits von den Signaldauern  $T_i$  ab:

$$n_{zuf} = n_1 n_2 (T_1 + T_2). \quad (11)$$

## 4 Messungen zur Inbetriebnahme des Szintillator - Hodoskops

Da  $T_1 = T_2 = \tau$  gilt, folgt

$$n_{zuf} = 2 n_a n_b \tau, \quad (12)$$

$\tau = 20$  ns ist die Dauer eines Diskriminatorsignals.

### 4.5.1 Aufbau

Der Aufbau der Szintillatoren zueinander ist wie vorne beschrieben. Die Signalauslese-Elektronik ist dieselbe wie in den vorherigen Messungen (Kapitel 4.3). An den Szintillationszählern werden die zuvor bestimmten Hochspannungen und an den Diskriminatoren die bestimmten Schwellen eingestellt. Diese sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Szintillationszähler	Spannung [V]	Schwelle [mV]
A	-1680	-210
B	-2000	-85
C	-1680	-215

Tabelle 4: Hochspannungen und Diskriminatorschwellen für die einzelnen Szintillationszähler

Es werden zusätzlich noch die Einzelzählraten der äußeren Szintillationszähler nach dem Diskriminator gemessen.

### 4.5.2 Messung

Die Messzeit beträgt 50 s für jeden Messpunkt. Die Anzahl der Messungen für einen Messpunkt beträgt  $n=5$ . Nach jeder Messreihe für einen Szintillationszähler müssen die Szintillatoren neu angeordnet werden, so dass sich immer die Fläche des zu vermessenden Szintillationszählers zwischen den beiden anderen Szintillatorflächen befindet. Die Messwerte der Einzelzählraten, der Zweifach- und Dreifachkoinzidenzen sind in den Tabellen in Anhang D zu finden.

### 4.5.3 Auswertung

Zuerst werden die Ansprechvermögen der einzelnen Szintillatoren bestimmt. Dazu werden die Mittelwerte und die Fehler der Mittelwerte der Zählraten berechnet, siehe Tabellen im Anhang D. Die Formeln zur Berechnung der Mittelwerte und deren

#### 4 Messungen zur Inbetriebnahme des Szintillator - Hodoskops

Fehler lauten:

$$\bar{N}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{ij}, \quad (13)$$

$$\sigma_{\bar{N}_j} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (N_{ij} - \bar{N}_j)^2 \quad (14)$$

Damit erhält man dann für die Nachweiswahrscheinlichkeiten:

$$\epsilon_A = (0,88 \pm 0,03),$$

$$\epsilon_B = (0,42 \pm 0,04),$$

$$\epsilon_C = (0,86 \pm 0,03).$$

Man erkennt, dass Szintillationszähler B nur 40 % der durchgehenden Myonen registriert. Die meisten Pulse müssen von dem Rauschen des Photomultipliers kommen. Die Szintillationszähler A und C weisen eine gute Nachweiswahrscheinlichkeit für Myonen auf.

Berechnet man die erwarteten zufälligen Zweifachkoinzidenzen für die Zählzeit von 50 s und  $\tau = 20$  ns, so erhält man die in Tabelle 5 gezeigten Werte.

SZ	Einzelzählrate	SZ	Einzelzählrate	Zweifachkoinzidenz	$N_{zuf}$
A	1604	B	2287	AB	0,003
A	1647	C	612	AC	0,001
B	2243	C	635	BC	0,001

Tabelle 5: Werte der zufälligen Zweifachkoinzidenzen

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine zufällige Koinzidenz auftritt, ist also mit ungefähr 1‰ sehr gering.

Die Wahrscheinlichkeit zufällige Koinzidenzen bei der Dreifachkoinzidenz zu erhalten, ist noch geringer: Für die Zweifachkoinzidenz ist  $N_{zuf,AB} = 0,003$  und die mittlere Zählrate für C für 50 s beträgt ungefähr 620, d.h.

$$N_{zuf,ABC} = 40 * 10^{-9} \text{s} * \frac{620}{50 \text{s}} * 0,003 \leq 10^{-9}.$$

Damit folgt, dass die zufälligen Koinzidenzen keinen Einfluss auf die in den vorherigen Messungen bestimmten Zählraten haben.

Ursachen für die niedrigen Zählraten der Dreifachkoinzidenz sind die verringerte Nachweiswahrscheinlichkeit für Myonen und die Tatsache, dass die Myonen winkelverteilt auf der Erdoberfläche ankommen, was bei den Berechnungen außer Acht gelassen worden ist.

## 5 Verwendung des Szintillator-Hodoskops als Trigger für einen anderen Detektor

In dieser Messung soll verifiziert werden, ob das aufgebaute Hodoskop funktioniert. Dies soll geschehen, indem ein Detektor zwischen die Szintillatoren gebracht wird und überprüft wird, ob man ein Myonsignal aus dem Detektor erhält, wenn man das Auslesesystem des Detektors mit dem Hodoskop triggert. Als Detektor wird die Testkammer, die dem Aufbau einer International Linear Collider - Time Projection Chamber (ILC-TPC) dient, benutzt. Erklärungen zur Funktionsweise und dem Aufbau dieser Testkammer sind in [11] zu finden.

### 5.1 Aufbau und Messung

Die Szintillationszähler werden so angeordnet, dass sich die Flächen von A und B über der Kammer kreuzen und Szintillator C wird unter die Kammer gebracht. Da die Szintillatorflächen nicht mehr direkt übereinander liegen, kann man nicht mehr nur eine Fläche von  $9,5 \text{ cm} \times 9,5 \text{ cm}$  betrachten, sondern es muss das entsprechende Volumen betrachtet werden (siehe Abb.26).

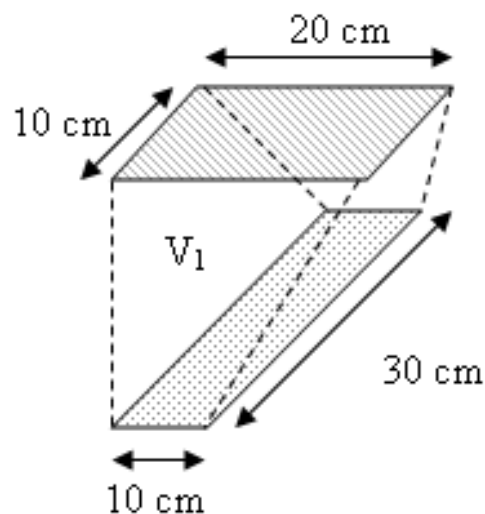


Abbildung 26: In diesem Volumen befindet sich die Testkammer. Die schraffierte Fläche entsteht durch die Kreuzung von den Szintillatorflächen A und B, die gepunktete Fläche ist die Szintillatorfläche C.

## 5 Verwendung des Szintillator-Hodoskops als Trigger für einen anderen Detektor

Wenn ein Myon durch die obere Fläche (schraffiert) in dieses Volumen  $V_1$  eindringt und es durch die untere Fläche (gepunktet) verläßt, erhält man eine Dreifachkoinzidenz, die das Auslesesystem triggert. Die Wahrscheinlichkeit, dass in diesem Fall das Myon in der Kammer nachgewiesen wird, ist trotzdem noch gering, denn der prozentuale Anteil des Volumens der Kammer ( $120 \times 184 \times 33 \text{mm}^3$ ) an dem Volumen  $V_1$  ist klein. Außerdem kann in der Kammer nur ein Teil, ein sogenanntes Pad (es wurde Pad Nr.8 gewählt) ausgelesen werden (Größe:  $6,8 \text{ mm} \times 34,1 \text{ mm}$ ), was dieses Volumen noch zusätzlich verringert. Das bedeutet, dass sehr viele der gespeicherten Daten keinen Myonpuls enthalten werden.

Der Aufbau der Szintillationszähler-Ausleseelektronik ist der gleiche wie in Abb.3. Der NIM-Puls der Dreifachkoinzidenz wird einmal auf den Zähler gegeben und einmal auf das Auslesesystem der Testkammer. Es werden die Daten aus der Testkammer gespeichert, wenn eine Dreifachkoinzidenz vorliegt. Die Datennahme wird 22 Stunden betrieben.

Bevor die Datennahme gestartet wird, wird das Kammersignal auf ein Oszilloskop gegeben und mit dem Koinzidenzsignal des Hodoskops getriggert. Wenn Signale aus der Kammer auf dem Oszilloskop zu sehen sind, dann funktioniert sowohl das Hodoskop als auch die Testkammer. Ein Signal aus der Testkammer, das von dem Hodoskop getriggert wurde, ist in Abb.27 zu sehen.

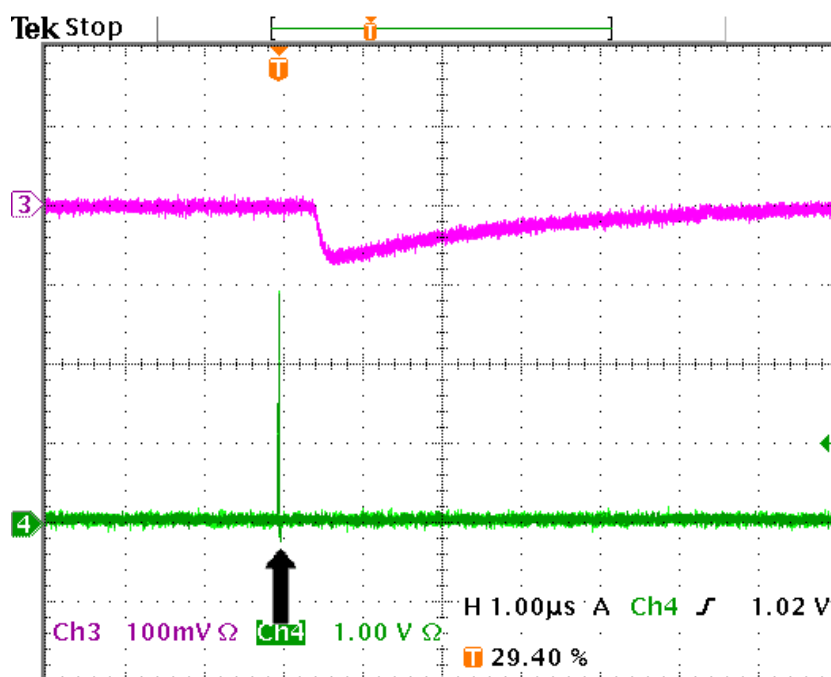


Abbildung 27: Kammersignal (oben), das durch das Hodoskop getriggert wurde (unten)

Man erkennt an diesem Bild (Abb. 27), dass das Koinzidenzsignal (bei dem senk-

rechten Pfeil ist das Koinzidenzsignal zu sehen) vor dem Kammersignal eintritt, d.h. dass das Kammersignal aufgrund des vorliegenden Koinzidenzsignals aufgezeichnet wurde. Das Kammersignal hat eine Amplitude von ungefähr -60 mV.

## 5.2 Auswertung

Zuerst werden die Daten gefiltert, um nur noch Signale ab einer gewählten Mindestamplitude zu erhalten. Damit werden die Daten, bei denen das Myon zwar durch die drei Szintillationszähler, aber nicht durch die Kammer gegangen ist, bzw. dort nicht nachgewiesen wurde, aussortiert. Die verbleibenden Daten werden näher untersucht. Aufgrund einer defekten Auslesekarte des Auslesesystems und einem Übersteuern der Verstärker der Testkammer trat starkes Rauschen auf, so dass obiges Filtern schlecht funktionierte. Diese konnten nur durch eigene Kontrolle der Graphen identifiziert werden. Daher mussten die übrigen Graphen einzeln untersucht werden, um Störsignale auszusortieren. Insgesamt konnten aus 22 Stunden Messung 33 Myonpulse ermittelt werden. Die Daten der defekten Auslesekarte wurden dabei nicht benutzt. Einer dieser Pulse ist in Abb.28 zu sehen.

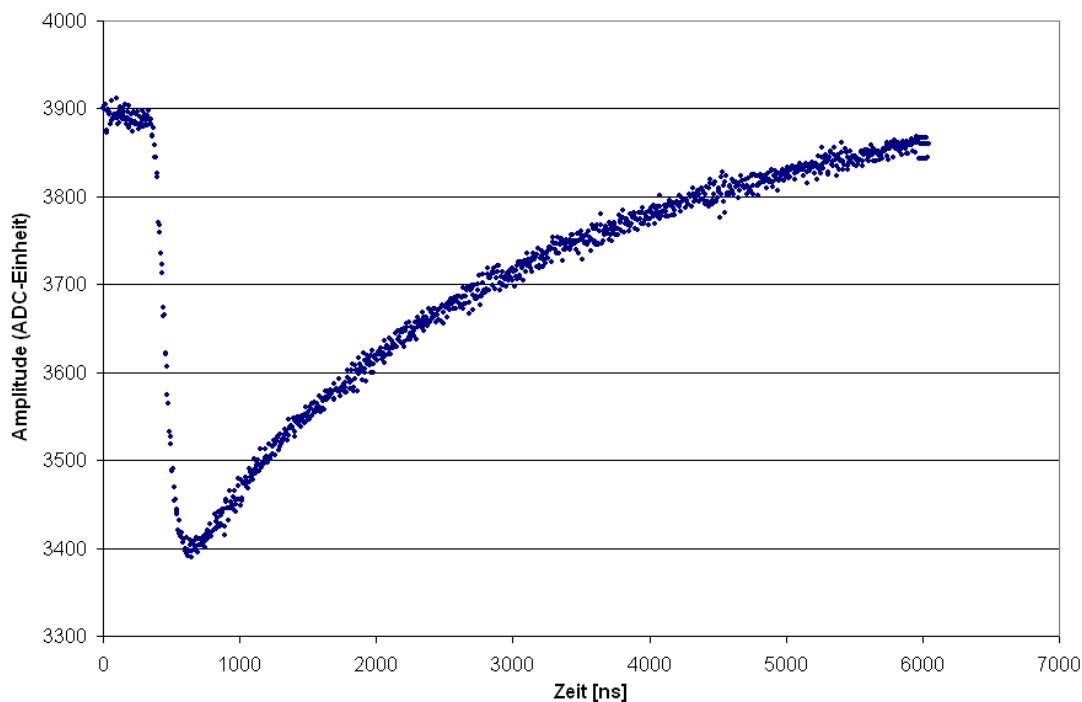


Abbildung 28: Myonpuls aus dem Auslesesystem der TPC-Testkammer, das durch das Hodoskop getriggert wurde. Die Einheit der Amplitude ist willkürlich.

## 5 Verwendung des Szintillator-Hodoskops als Trigger für einen anderen Detektor

Als Ergebnisse dieser Messung erhält man,

1. dass das im Rahmen dieser Bachelorarbeit gebaute Hodoskop funktioniert, d.h. es kann kosmische Myonen nachweisen und mit dem Dreifach-Koinzidenzsignal kann ein anderer Detektor getriggert werden.
2. dass die in diesem Hodoskop verwendete Methode zum Nachweis von Myonen (Szintillationszähler) mit einer anderen Nachweismethode für geladene Teilchen (Gasionisation) getestet und bestätigt wurde.
3. dass das Auslesesystem der Testkammer zum Aufbau einer ILC-TPC von diesem Hodoskop getriggert werden kann.

Somit ist das Hodoskop, bestehend aus drei Szintillationszählern und der dazugehörigen Ausleseelektronik, aufgebaut und seine Funktion ist durch die Testkammer zum Aufbau einer ILC-TPC bestätigt worden.



## 5 Verwendung des Szintillator-Hodoskops als Trigger für einen anderen Detektor

### Photos der Testkammer im Hodoskop und Aufbau der Elektronik

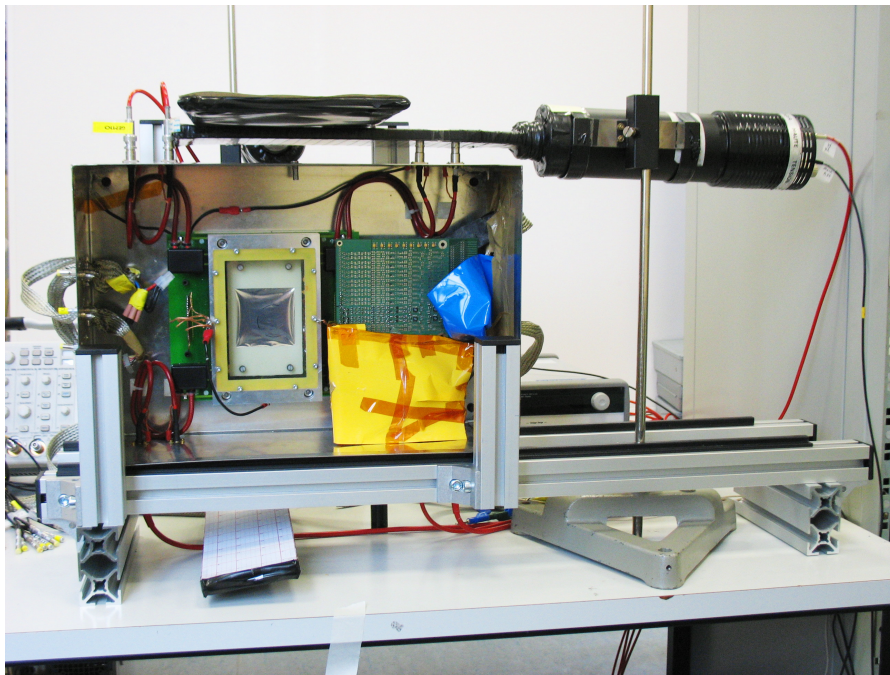


Abbildung 29: Testkammer zwischen den Szintillationszählern

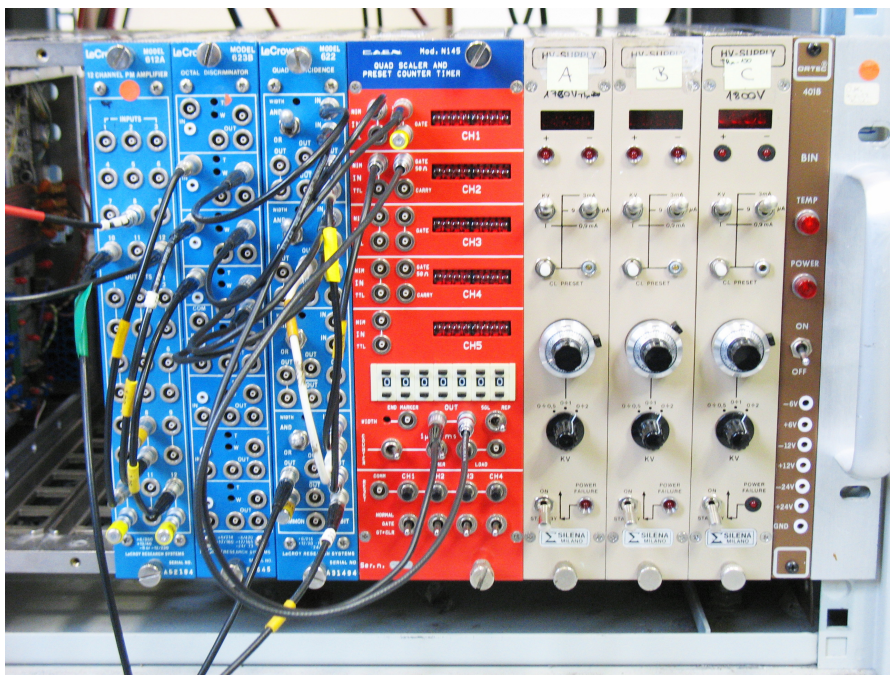


Abbildung 30: Aufbau der Szintillationszähler-Ausleseelektronik

## 6 Fazit und Ausblick

Das Ziel dieser Bachelorarbeit war, ein funktionstüchtiges Szintillator - Hodoskop aufzubauen und in Betrieb zu nehmen. Dies wurde realisiert, indem zunächst drei Szintillationszähler auf ihre Funktion getestet wurden: Dazu wurde ihre Uniformität ausgemessen und ihr Ansprechvermögen bestimmt, nachdem die optimalen Arbeitspunkte ermittelt und die Diskriminatorschwellen zur Rauschunterdrückung eingestellt worden waren. Außerdem wurde die Koinzidenzeinheit durch die Aufnahme einer Delaykurve gepüft. Anschließend wurde die Funktion des Hodoskops durch die Siegener Testkammer zum Aufbau einer International Linear Collider - Time Projection Chamber bestätigt.

Es traten während des Aufbaus Probleme auf, die vor einer weiteren Nutzung des Hodoskops beseitigt werden müssen. Der Szintillationszähler B sollte ersetzt werden, da er keine gute Uniformität aufweist, viele Rauschpulse im Photomultiplier entstehen und die Nachweiswahrscheinlichkeit für geladene Teilchen sehr gering ist. Die Szintillationszähler A und C funktionieren gut, aber wenn man neues Szintillatormaterial kauft, sollte über einen Austausch der Szintillatoren aufgrund ihres Alters nachgedacht werden. Der Szintillator B sollte dann die gleiche Fläche aufweisen, wie die Szintillatoren A und C. Ein Ausbau auf 4 Szintillationszähler wäre von Vorteil, weil dann die Flächen, mit denen Myonen nachgewiesen werden, auf jeweils  $9,5 \text{ cm} \times 9,5 \text{ cm}$  beschränkt werden können. Damit wird die Zählrate zwar geringer, aber wenn das Hodoskop als Trigger benutzt wird, ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Myon auch durch den Detektor gegangen ist, höher. Es werden also weniger Daten gespeichert, die kein Myonsignal enthalten.

Des Weiteren soll ein Teststand für Detektoren mit diesem Hodoskop aufgebaut werden. Dieser Teststand kann u.a. dazu benutzt werden, den Siegener TPC-Prototyp zu testen und kosmische Myonen damit zu untersuchen.

## A Messwerte der Uniformitätsmessung

Pkt. steht für den Messpunkt, N ist die Zählrate in 50 s und der statistische Fehler der Zählrate ist  $\sigma_N = \sqrt{N}$ .

Pkt.	N	$\sigma_N$	Pkt.	N	$\sigma_N$	Pkt.	N	$\sigma_N$	Pkt.	N	$\sigma_N$
1	123749	352	9	132304	364	17	168258	410	25	158699	398
2	157042	396	10	106785	327	18	124326	353	26	223775	473
3	152792	391	11	167242	409	19	146521	383	27	203127	451
4	129573	360	12	159012	399	20	135326	368	28	182942	428
5	96746	311	13	132238	364	21	210104	458	29	188966	435
6	147756	384	14	138265	372	22	180152	424	30	164253	405
7	153253	391	15	119020	345	23	139055	373			
8	142997	378	16	172742	416	24	158773	398			

**Messwerte für die Uniformität des Szintillators B, angelegte Spannung: 1970 V**

Pkt.	N	$\sigma_N$	Pkt.	N	$\sigma_N$	Pkt.	N	$\sigma_N$	Pkt.	N	$\sigma_N$
1	565120	752	12	560259	749	23	558446	747	34	599032	774
2	548647	741	13	643250	802	24	507506	712	35	600161	775
3	539556	735	14	589261	768	25	596865	773	36	637326	798
4	573619	718	15	578613	761	26	595574	772	37	606382	779
5	573619	757	16	575970	759	27	545707	740	38	565038	752
6	542261	736	17	595898	772	28	699074	739	39	582415	763
7	573329	757	18	589762	768	29	652330	736	40	645260	803
8	587128	766	19	601914	776	30	652330	808	41	664250	815
9	567549	753	20	628033	792	31	599438	774	42	593695	771
10	553791	744	21	552772	743	32	610666	781	43	589961	768
11	548531	741	22	535288	732	33	624116	790	44	665969	816

**Messwerte für die Homogenität des Szintillators C, angelegte Spannung: 1660 V**

## B Messwerte der Delaykurve

In der folgenden Tabelle sind die Zählraten und deren statistische Fehler aufgeführt. Der Fehler berechnet sich mit  $\sigma_N = \sqrt{N}$ .

t [ns]	Zählrate N	$\sigma_N$
von -63 bis -20	0	0
-19	11682427	3418
-18	11683102	3418
-17	11683855	3418
-16	11684156	3418
-15	11684333	3418
-12	11684832	3418
-9	11685623	3418
-6	11685598	3418
-3	11686120	3418
0	11686765	3419
3	11686906	3419
6	11686793	3419
9	11686945	3419
12	11687174	3419
15	11687204	3419
16	11687769	3419
17	11687702	3419
18	11687422	3419
19	11688028	3419
von 20 bis 63	0	0

**Tabelle mit den Messwerten für die Bestimmung der Auflösungszeit**

## C Messwerte zur Bestimmung der Photomultiplier-Hochspannungen

Spannung U am SZ A [V]	Koinzidenz BC	$\sigma_{BC}$	Koinzidenz A(BC)	$\sigma_{A(BC)}$
1300	105	10	0	0
1350	112	11	8	3
1400	115	11	21	5
1450	112	11	31	6
1500	137	12	48	7
1550	107	10	36	6
1600	116	11	32	6
1620	106	10	30	5
1640	103	10	28	5
1660	101	10	33	6
1680	124	11	33	6
1700	120	11	34	6
1720	110	10	44	7
1740	126	11	39	6
1760	119	11	39	6
1780	98	10	31	6
1800	108	10	36	6
1820	103	10	39	6
1840	109	10	38	6
1860	129	11	39	6

**Tabelle mit den Messwerten für Szintillator A**

Spannung U am SZ B [V]	Koinzidenz AC	$\sigma_{AC}$	Koinzidenz B(AC)	$\sigma_{B(AC)}$
1900	120	11	17	4
1920	111	11	29	5
1940	135	12	32	6
1960	132	11	33	6
1980	122	11	35	6
2000	126	11	49	7
2020	118	11	42	6
2040	102	10	42	6
2060	111	11	37	6
2080	123	11	63	8
2100	102	10	50	7
2120	113	11	58	8

**Tabelle mit den Messwerten für Szintillator B**

*C Messwerte zur Bestimmung der Photomultiplier-Hochspannungen*

Spannung U am SZ C [V]	Koinzidenz AB	$\sigma_{AB}$	Koinzidenz C(AB)	$\sigma_{C(AB)}$
1300	106	10	2	1
1350	79	9	5	2
1400	98	10	6	2
1450	106	10	17	4
1500	97	10	37	6
1550	101	10	38	6
1600	99	10	41	6
1620	106	10	38	6
1640	103	10	41	6
1660	102	10	36	6
1680	95	10	41	6
1700	104	10	47	7
1720	99	10	40	6
1740	92	10	42	6
1760	82	9	35	6
1780	86	9	31	6
1800	83	9	32	6
1820	99	10	37	6
1840	90	9	39	6
1860	94	10	32	6
1880	94	10	48	7
1900	93	10	50	7
1920	82	9	33	6
1940	71	8	33	6
1960	87	9	27	5
1980	94	10	30	5
1996	93	10	44	7

**Tabelle mit den Messwerten für Szintillator C**

Die Zählraten wurden 50 s gemessen. Der statistische Fehler der Zählrate N ist  $\sigma_N = \sqrt{N}$ .

## D Koinzidenzraten zur Bestimmung der Diskriminatorschwellen

Verstellung	Th A [mV]	Th B [mV]	Th C [mV]	ZK	$\sigma_{ZK}$	DK	$\sigma_{DK}$
C	100	100	150	148	12	61	8
B	100	70	150	70	8	38	6
A	200	70	150	130	11	49	7
C	200	70	180	101	10	46	7
B	200	80	180	70	8	43	7
A	200	80	180	118	11	47	7
C	200	80	200	93	10	40	6
B	200	85	200	76	9	38	6
A	205	85	200	143	12	50	7
C	205	85	215	91	10	40	6
B	205	85	215	90	9	46	7
A	210	85	215	85	9	34	6

**Tabelle mit den Zweifach- und Dreifachkoinzidenz-Zählraten bei verschiedenen Diskriminatorschwellen**

Es steht Verstellung für den Szintillationszähler, bei dem die Diskriminatorschwelle verstellt wurde, Th für die Schwelle des Diskriminators, ZK für die Zweifachkoinzidenz-Zählrate und DK für die Dreifachkoinzidenz-Zählrate.  $\sigma_{ZK}$  und  $\sigma_{DK}$  stehen für die dazugehörigen statistischen Fehler der Koinzidenz-Zählraten. Sie berechnen sich mit  $\sigma_{ZK} = \sqrt{ZK}$  und  $\sigma_{DK}$  berechnet sich analog.

## E Messwerte zur Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeit von Myonen

$\bar{N}_j$  bezeichnet den Mittelwert der Zählraten.  $\sigma_{\bar{N}_j}$  die dazugehörigen statistischen Fehler.

	Koinzidenz BC	$\sigma_{BC}$	Koinzidenz A(BC)	$\sigma_{A(BC)}$	B	$\sigma_B$	C	$\sigma_C$
Zählrate:	70	8	63	8	2179	47	639	25
	71	8	63	8	2297	48	626	25
	78	9	72	8	2263	48	640	25
	93	10	81	9	2280	48	618	25
	97	10	82	9	2194	47	650	25
$\bar{N}_j$ :	82		72		2243		635	
$\sigma_{\bar{N}_j}$ :	13		9		53		13	

Tabelle mit den Messwerten für Szintillationszähler A

	Koinzidenz AC	$\sigma_{AC}$	Koinzidenz B(AC)	$\sigma_{B(AC)}$	A	$\sigma_A$	C	$\sigma_C$
Zählrate:	139	12	54	7	1611	40	640	25
	136	12	62	8	1633	40	631	25
	106	10	50	7	1695	41	598	24
	113	11	43	7	1649	41	602	25
	109	10	48	7	1646	41	587	24
$\bar{N}_j$ :	121		51		1647		612	
$\sigma_{\bar{N}_j}$ :	16		7		31		23	

Tabelle mit den Messwerten für Szintillationszähler B

	Koinzidenz AB	$\sigma_{AB}$	Koinzidenz C(AB)	$\sigma_{C(AB)}$	A	$\sigma_A$	B	$\sigma_B$
Zählrate:	76	9	66	8	1546	39	2427	49
	73	9	63	8	1578	40	2293	48
	74	9	66	8	1611	40	2212	47
	91	10	75	9	1709	41	2254	47
	77	9	63	8	1574	40	2249	47
$\bar{N}_j$ :	78		67		1604		2287	
$\sigma_{\bar{N}_j}$ :	7		5		63		83	

Tabelle mit den Messwerten für Szintillationszähler C



## **F Auflistung der verwendeten Geräte und Materialien**

### Elektronik:

- Hochspannungsversorgung der Photomultiplier: Silena, Model 7712 und iseg, NHQ 204M,
- Verstärker: LeCroy, Model 612A,
- Delay: Tennelec, TC 412A,
- Fan-Out: LeCroy, Model 428F,
- Pulsgenerator: Dual Gate Generator, LeCroy, Model 222,
- Diskriminator: LeCroy, Model 623B,
- Koinzidenzeinheit: LeCroy, Model 622,
- Zähler: C.A.E.N., Model N145,
- Oszilloskop: Agilent Technologies, DSO3102A.

### Szintillatoren:

- Szintillatormaterial: N110 von Nuclear Enterprise [12],
- Polyethylenterephthalat - Polyesterfolie: DuPont, Mylarfolie,
- Klebeband: Vinyl Electrical Tape, Super 33+ von Scotch,
- Optisches Fett: Rhodorsil Silicones, Pâte 7.

## Literatur

- [1] siehe z.B.:  
C. Grupen, *Teilchendetektoren*, Wissenschaftsverlag, 1993,  
O.C. Allkofer, *Teilchendetektoren*, Verlag Karl Thiemig KG, 1971,  
K. Kleinknecht, *Detektoren für Teilchenstrahlung*, B.G. Teubner Verlag, 1992,  
W.R. Leo, *Techniques for nuclear and particle physics experiments*, Springer Verlag, 1994  
und Referenzen darin .
- [2] W.-M. Yao *et al.*, *Review of Particle Physics*, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, vol.33(1): 1-1232, 2006.
- [3] *Datenblatt, Premium Plastic Szintillatoren, Saint Gobain*, 2008.
- [4] H. Schmidt, *Meßelektronik in der Kernphysik*, B.G. Teubner Verlag, 1986.
- [5] E. Fünfer, H. Neuert, *Zählrohre und Szintillationszähler*, Verlag G. Braun, 1959.
- [6] W. R. Leo, *Techniques for nuclear and particle physics experiments*, Springer Verlag, 1994.
- [7] U. Werthenbach, *persönliche Mitteilung*.
- [8] C. Grupen, *Teilchendetektoren*, Wissenschaftsverlag, 1993.
- [9] C. Grupen, *Grundkurs Strahlenschutz*, Springer Verlag, 2007.
- [10] H.-J. Stuckenberg, *Detektor- und Experimentelelektronik*, Braun-Verlag Wissenschaft und Technik, 1974.
- [11] B. Gaur, *First studies of a prototype GEM readout for a future ILC-TPC*, Masterarbeit, März 2008.
- [12] C. Grupen, *persönliche Mitteilung*.

# Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie Zitate und Ergebnisse anderer kenntlich gemacht habe.

.....  
(Ort)            (Datum)

.....  
(Unterschrift)

## Danksagung

Ich danke Prof. Dr. Peter Buchholz für die Betreuung dieser Arbeit; Bakul Gaur, Adrian Kube und Ullrich Werthenbach für ihre Hilfe und Diskussionen.

Ich danke Kai Grybel für die Korrekturvorschläge und meinem Freund Martin Jung, der mir während meines ganzen Studiums und auch bei dieser Arbeit zur Seite stand. Ein Dank geht auch an meine Eltern, ohne die das Studium nicht möglich gewesen wäre.