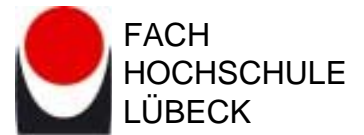



FACHBEREICH ANGEWANDTE NATURWISSENSCHAFTEN
STUDIENGANG PHYSIKALISCHE TECHNIK



Universität of Applied Sciences

Diplomarbeit



Verfasser: Alexandra Eggemann
Betreuer: Herr Prof. Dr. rer. nat. Reiner Trommer
Datum der Abgabe: 21.05.2007

Diplomarbeit

Thema: Messungen zur Anwendung von Geiger Mode Photodioden

Zusammenfassung:

Für den geplanten International Linear Collider (ILC) am Desy in Hamburg existiert derzeit ein Konzept für ein Hadronenkalorimeter mit dem die Energie der bei Kern-Wechselwirkungen freiwerdenden Teilchen bestimmt werden sollen. Die erforderliche räumliche Auflösung des Kalorimeters soll durch Einsatz von Silizium-Photomultipliern (SiPM) gewährleistet werden. SiPMs bestehen aus einer Anzahl von Avalanche-Photodioden, die im Durchbruch (Geiger-Mode) betrieben werden. Die Signalauslese wird in einem aktuellen Prototyp über ein System aus Szintillator und SiPM bewerkstelligt. Beide Bauteile werden durch einen Wellenlängenschieber verbunden, da der Szintillator blaues Licht liefert, der SiPM aber nur für grünes Licht sensitiv ist. Zur weiteren Optimierung sollten blau-sensitive Silizium-Photomultiplier des Unternehmens Hamamatsu untersucht werden. Der neuartige SiPM kann direkt mit dem Szintillator gekoppelt werden, da diese Variante die Nutzung von Wellenlängenschiebern überflüssig macht. In einem ersten Schritt sollte der SiPM charakterisiert werden, u.a. durch Messungen des Dunkelstroms und der Verstärkung. Des Weiteren waren die Abhängigkeit der Lichtausbeute und deren Abhängigkeit vom Durchgangsort der Teilchen zu untersuchen. Insgesamt besitzt der hier besprochene SiPM gute Eigenschaften, insbesondere lässt sich niedriges Untergrundrauschen durch Diskriminierung erreichen. Die Blausensivität des SiPM, die die direkte Kopplung ermöglichen könnte, funktioniert leider nicht, weil in der indirekten Kopplung ein Wellenlängenschieber bessere Lichtsammlung ermöglicht. Die Arbeit zeigte, dass bei höherer Pixelanzahl des SiPM der dynamische Messbereich erhöht wird. Bei den verwendeten Modellen war jedoch die lichtempfindliche Fläche insgesamt kleiner, wodurch dann die Gesamtempfindlichkeit verringert wurde.

Verfasser: Alexandra Eggemann, Mat.-Nr. 100968
Betreuer: Herr Prof. Dr. rer. nat. Reiner Trommer
Datum der Abgabe: 21.05.2007

Erklärung zur Diplomarbeit

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbständig, ohne fremde Hilfe verfasst habe.

Bei der Abfassung der Arbeit sind nur die angegebenen Quellen benutzt worden.
Wörtlich oder dem Sinne nach entnommene Stellen sind als solche gekennzeichnet.

Lübeck, den 21.05.2007

Unterschrift

Ich bin damit einverstanden, dass meine Arbeit veröffentlicht wird, insbesondere dass
die Arbeit Dritten zur Einsichtnahme vorgelegt wird
oder Kopien der Arbeit zur Weitergabe an Dritte angefertigt werden.

Lübeck, den 21.05.2007

Unterschrift

Verfasser: Alexandra Eggemann
Betreuer: Herr Prof. Dr. rer. nat. Reiner Trommer
Datum der Abgabe: 21.05.2007

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Grundlagen.....	5
2.1	Die pn-Photodiode.....	5
2.2	Die pin-Photodiode	6
2.3	Die Avalanche-Photodiode, APD.....	7
2.4	Der Silizium-Photomultiplier, SiPM.....	8
2.5	Untergrundrauschen: Dunkelstrom und Crosstalk.....	10
2.5.1	Dunkelstrom	11
2.5.2	Crosstalk	11
2.6	Anwendungen des SiPM.....	12
2.6.1	Astronomie	12
2.6.2	Medizin	13
2.6.3	Strahlendetektion in der Hochenergiephysik, Quantenoptik und Plasmaphysik.....	14
2.7	Beschreibung des Prototyps des Hadronenkalorimeters	14
2.7.1	Hadronen	14
2.7.2	Der International Linear Collider, ILC.....	14
2.7.3	Der Prototyp des Hadronenkalorimeters	15
2.8	Multi Pixel Photon Counter, MPPC	16
3	Messaufbau.....	18
3.1	Die Komponenten des Messaufbaus.....	18
3.1.1	Box.....	18
3.1.2	Szintillator	20
3.1.3	Wellenlängenschieber , WLS	21
3.1.4	Ruthenium 106-Quelle.....	21
3.1.5	Photomultiplier, PM	21
3.2	Triggerung des Signals	22
3.2.1	Trigger mit Photomultiplier	22
3.2.2	Trigger mit Digital Delay/Pulse Generator	23
3.3	Verwendete elektronische Komponenten zur Signalauslese.....	24

4	Charakterisierung.....	25
4.1	Messung der Dunkelrate	25
4.1.1	Messaufbau.....	25
4.1.2	Messung und Auswertung.....	26
4.2	Messung des Signal- und des Signaluntergrundspektrums	29
4.2.1	Messaufbau.....	29
4.2.2	Messung und Auswertung.....	30
4.2.2.1	Verstärkung.....	32
4.2.2.2	Berechnung der Durchbruchspannung	33
4.2.2.3	Kapazität.....	34
5	Direkte Kopplung von MPPC und Szintillator	35
5.1	Messaufbau.....	35
5.2	Messung und Auswertung.....	38
5.2.1	Lichtausbeute	38
5.2.2	Betrachtung der Mengenanteile von Signal- und Untergrundspektrum für unterschiedliche Spannungen.....	43
5.2.3	Crosstalkanteil	49
5.2.4	Uniformität der Lichtverteilung im Szintillator	51
6	Indirekte Kopplung mit einem Wellenlängenschieber.....	54
6.1	Allgemeines.....	54
6.2	Messung und Auswertung.....	55
6.3	Vergleich der Kopplungsmethoden.....	55
7	Vergleich unterschiedlicher MPPC.....	58
7.1	Charakterisierung.....	59
7.2	Lichtausbeute	61
8	Uniformitätsuntersuchung des Teilchendurchgangsortes	62
8.1	Entwurf eines Kollimators	62
8.2	Messaufbau.....	64
8.3	Messung und Auswertung.....	65
9	Optimierung des Reflektors.....	68
10	Zusammenfassung und Ausblick.....	69

1 Einleitung

Am Deutschen Elektronen-Synchrotron, DESY, in Hamburg wird seit einigen Jahren in internationaler Zusammenarbeit an der Realisierung des International Linear Collider (ILC) gearbeitet. Mit diesem neuen Konzept versucht man Antworten auf Fragen nach dem Higgs-Teilchen, der Supersymmetrie und der dunklen Materie zu finden. In diesem 33km langen Linearbeschleuniger werden Positronen und Elektronen beschleunigt. Dabei erreichen die beschleunigten Teilchen eine Energie von bis zu 250GeV. Um für solch hohe Energien eine ausreichende Betriebsspannung gewährleisten zu können, bedient man sich supraleitender Beschleunigungsstrecken. In einem Detektor, der speziell hierfür ausgelegt wird, werden die bei der Kollision entstehenden Ereignisse beobachtet.

Der Detektor besteht aus mehreren Komponenten, die für die Beobachtung unterschiedlicher Teilchen zuständig sind. Neben einem elektromagnetischen Kalorimeter existiert auch ein Konzept eines Hadronenkalorimeters. Mit Hadronen werden die Teilchen bezeichnet, die der starken Wechselwirkung unterliegen, z.B. die Protonen und Neutronen der Atomkerne. Die Beobachtung solcher Teilchen erfolgt über die Messung von Licht, nachdem die Teilchenenergien mit Hilfe eines Szintillators umgewandelt worden sind. Die Lichtmessung wird durch Photodetektoren realisiert. Für das derzeit existierende Konzept eines Hadronenkalorimeters am Desy wird für die Signalauslese ein System aus einem Silizium-Photonenvervielfacher (SiPM), der mit einem Szintillator über einen Wellenlängenschieber gekoppelt ist, verwendet. Der SiPM ist sensitiv für grünes Licht. Da der Szintillator blaues Licht emittiert, wird ein Wellenlängenschieber verwendet, der zur Umwandlung des blauen in grünes Licht dient. Die Herstellung dieses Systems ist bzgl. Zeit- und Kostenaufwand zu optimieren, womit sich diese Diplomarbeit im Ansatz beschäftigt.

In dieser Diplomarbeit sollten zur weiteren Optimierung der Signalauslese im Hadronenkalorimeter Silizium-Photomultiplier der Firma Hamamatsu untersucht werden. Es war zu prüfen, in welchem Umfang der neuartige SiPM angewendet werden kann. Die Besonderheit dieses SiPM ist die Messempfindlichkeit im blauen

Wellenlängenbereich. Da der Szintillator blaues Licht emittiert, ist die Kopplung über den Wellenlängenschieber nicht mehr nötig. Sollten die neuen SiPM der geforderten Anwendung im Hadronenkalorimeter gerecht werden, wäre eine neue Auslegung des Kalorimeters möglich.

Die Untersuchung des SiPM beinhaltet dessen Charakterisierung. Hierbei sollte das Verhalten des Rauschens und der inneren Verstärkung auf Linearität untersucht werden. Des Weiteren waren erste Anwendungsmessungen durchzuführen, in denen die Lichtausbeuten mit der herkömmlichen Kopplung über einen Wellenlängenschieber und mit der direkten Kopplung ohne WLS verglichen werden sollten. Ebenso war die Abhängigkeit der Lichtausbeute vom Eintrittsort der Teilchen in den Szintillator zu untersuchen. Aufgrund dieser Untersuchungen wurde eine Aussage über die Verwendbarkeit dieser neuartigen Photosensoren möglich.

2 Grundlagen

2.1 Die pn-Photodiode

Eine pn-Photodiode besteht aus einem pn-Übergang, der in Sperrrichtung betrieben wird. Durch die angelegte Spannung bildet sich über dem pn-Übergang eine Sperrschicht aus. Die beweglichen Ladungsträger werden aufgrund des resultierenden elektrischen Feldes aus der Raumladungszone gezogen. Fällt Licht mit $hf \geq W_g$ auf die Photodiode, findet der innere Photoeffekt in der Sperrschicht statt. Die Energie des Photons wird absorbiert und dabei ein Elektron-Loch-Paar generiert. Das elektrische Feld zieht diese Ladungsträger ebenfalls aus der Sperrschicht. Ein Photostrom ist messbar.

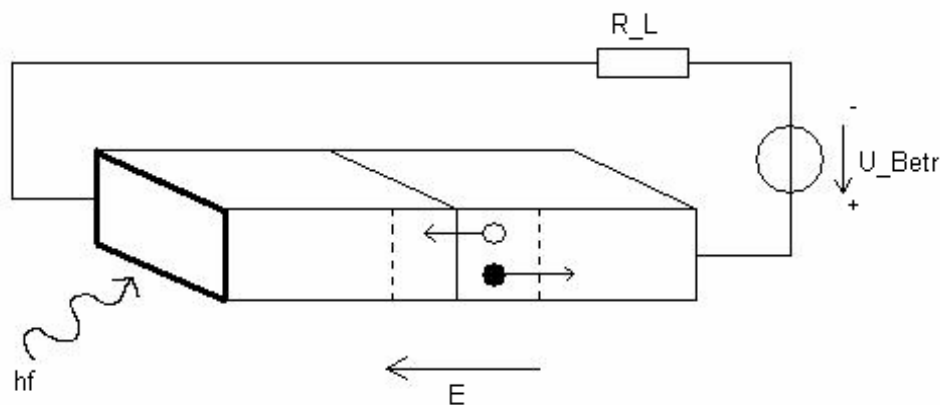


Bild 2.1: Schema einer pn-Diode mit Lastwiderstand R_L

Der Wirkungsgrad bzw. die Lichtausbeute ist bei der pn-Struktur leider nicht besonders hoch. Nicht alle Photonen tragen zur Stromerzeugung bei, da die Lichteindringtiefe je nach Energie der Photonen unterschiedlich groß ist. Die Lichteindringtiefe hängt von der Photonenenergie ab gemäß $P = P_i \cdot e^{-kx}$, ($k = k(\lambda) = \text{Absorptionskonstante}$). Das bedeutet, dass einige Photonen in der Sperrschicht, andere außerhalb absorbiert werden. Die außerhalb absorbierten Photonen erzeugen auch ein Elektron-Loch-Paar, dieses muss aber erst in die Sperrschicht diffundieren. Dabei kann es schon vor Erreichen der Schicht rekombinieren und trägt nicht mehr zum Photostrom bei. Deshalb sollte sich der pn-Übergang möglichst dicht unter der Fläche, an der das Licht eintritt, befinden. Des

Weiteren muss die Raumladungszone möglichst groß sein, besonders im Fall großer Lichteindringtiefen. Deshalb benutzt man mehrere unterschiedlich dotierte Halbleiterschichten. Mit geringen Dotierungen erreicht man größere Raumladungszonen. Dünne, hoch dotierte Schichten dienen zur Kontaktierung und vermeiden, dass die Raumladungszone bis an die Halbleiteroberfläche reicht [2.1].

2.2 Die pin-Photodiode

Einen solchen Aufbau besitzen z.B. pin-Photodioden. Sie sind aus drei unterschiedlich dotierten Halbleiterschichten in der Folge $p^+p^-n^+$ oder $p^-n^+p^+$ zusammengesetzt. Bild 2.2 zeigt den Aufbau und das resultierende elektrische Feld.

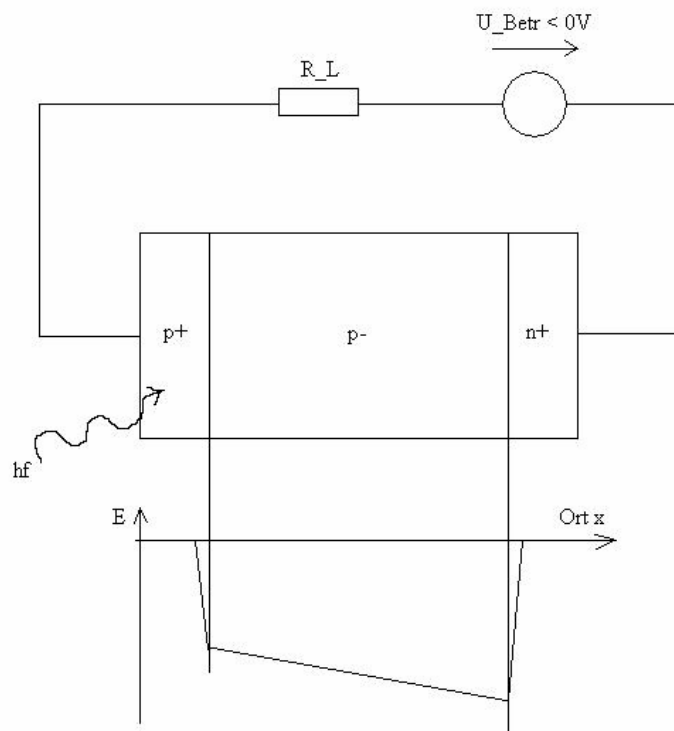


Bild 2.2: Schema einer pin-Photodiode und resultierendes elektrisches Feld

Wird Licht von der p^+ -Seite her eingestrahlt, so werden nur wenige Photonen in der dünnen p^+ -Schicht, aber fast alle in der p^- -Schicht und damit in der Raumladungszone absorbiert. Die erzeugten Elektronen werden durch das elektrische Feld zum neutralen n^+ -Gebiet bewegt, die Löcher fließen zum p^+ -Gebiet hin ab [2.1].

2.3 Die Avalanche-Photodiode, APD

Die APD ist ein Lichtdetektor, der den Photostrom, der wie bei einer Photodiode erzeugt wird, generiert aber gleichzeitig verstärkt. Wird eine hohe Betriebsspannung an eine APD angelegt, so resultiert über der Raumladungszone ein starkes elektrisches Feld. Freie Ladungsträger werden beschleunigt und erhalten zusätzliche Energie, die sie bei Stößen mit dem Gitter nicht vollständig abgeben können. Ist ihre so angesammelte kinetische Energie ausreichend groß, können sie bei einem weiteren Stoß mit dem Gitter schließlich ein Elektron aus der Bindung schlagen und so ein weiteres Elektron-Loch-Paar erzeugen.

Dieser Prozess wird als Stoßionisation bezeichnet. Die Elektronen und die Löcher werden erneut beschleunigt und nehmen Energie auf. So können auch diese wiederum neue Elektron-Loch-Paare erzeugen. Dabei entsteht ein lawinenartiger Anstieg der Anzahl der beweglichen Elektronen und Löcher. Dies ist der Lawineneffekt, der die innere Signalverstärkung der APD ausmacht [2.1].

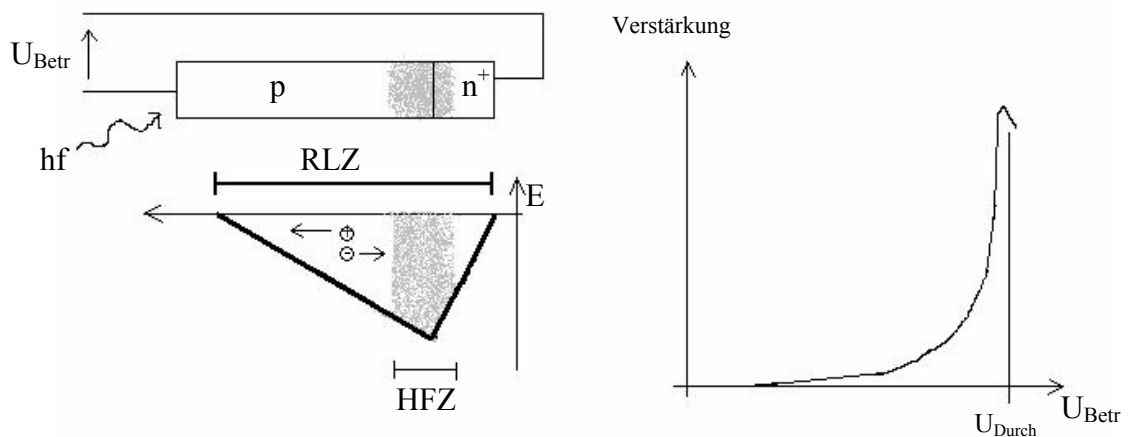


Bild 2.3: pn^+ -APD mit Löcherinjektion in die HLZ = Hochfeldzone. RLZ = Raumladungszone, Stromverstärkung einer APD bis zum Durchbruch der APD bei U_{Durch}

2.4 Der Silizium-Photomultiplier, SiPM

Der Silizium-Photomultiplier basiert auf einem Siliziumsubstrat. Das Substrat ist aus einem Feld von Avalanche-Photodioden (APD) aufgebaut, die im Zusammenhang mit dem SiPM auch Pixel genannt werden. Es gibt SiPM mit 100, 400 und 1600 Pixeln bzw. APD. Weiterhin wurden SiPM hergestellt, die für unterschiedliche Wellenlängen sensitiv sind. In Bild 2.4 ist die Halbleiterstruktur einer APD dargestellt.

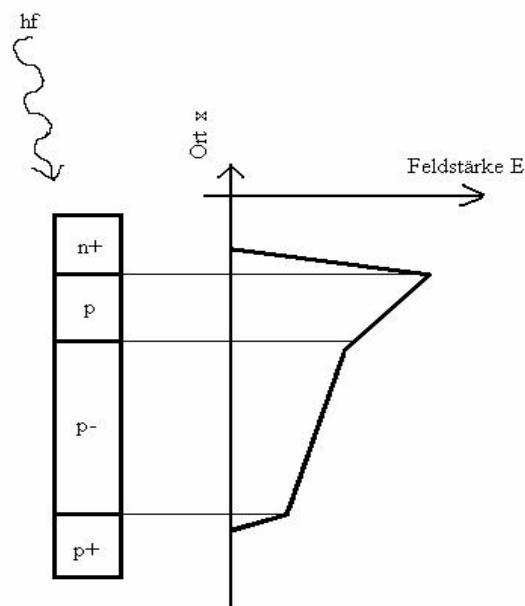


Bild 2.4: Schematischer Aufbau der Avalanche-Diode (RAPD-Struktur) und resultierendes elektrisches Feld bei Anlegen einer Spannung $U_{\text{Betri}} > U_{\text{Durch}}$

n^+ : n-leitende Schicht mit starker Dotierung von Donatoren

p : p-leitende Schicht mittlerer Dotierung von Akzeptoren

$\pi (p^-)$: p-leitende Schicht mit schwacher Dotierung von Akzeptoren

p^+ : p-leitende Schicht mit starker Dotierung von Akzeptoren

Die gegenüber in Bild 2.3 kompliziertere 4-Schicht-Struktur verbessert das Verstärkungs- und das Rauschverhalten der APD.

Wie in Kapitel 2.3 erklärt, findet bei Anregung mit Licht in der APD eine Vervielfachung der Ladungsträger durch den Lawineneffekt statt. Im so genannten Geiger Mode wird die APD zunächst mit einer Sperrspannung betrieben, die über der

Durchbruchspannung liegt. In dieser Betriebsart ist der Nachweis einzelner Photonen möglich, da eine einzelne durch ein Photon gezündete Lawine einen genügend starken und damit messbaren Strom bewirkt. Das Problem hierbei ist, dass eine einmal gezündete Lawine immer weiter bestehen bliebe, was bedeutet, dass eine angeregte APD nicht weiter verwendet werden kann. Der Durchbruch, und damit die Zerstörung der APD, wäre damit erreicht. Um dem entgegenzuwirken, wird die APD mit einem Widerstand in Reihe geschaltet. Der Widerstand wird Quenchingwiderstand genannt, Lösch-Widerstand. Wenn durch ein Photon eine Lawine entsteht, was im Folgenden auch Feuern genannt wird, bringt der Quenchingwiderstand die Lawine zum Erliegen. Der erzeugte Strom in der Diode muss durch den Quenchingwiderstand fließen, an dem dann eine Spannung abfällt. Diese Spannung wiederum wirkt der Betriebsspannung entgegen, so dass diese gesenkt wird. Senkt sich die Betriebsspannung unter den Wert der Durchbruchspannung, wird die Lawine gestoppt. Jetzt ist das elektrische Feld über der Sperrschicht nicht stark genug, um neue Elektron-Loch-Paare durch die Ladungsträger erzeugen zu lassen. Die APD wird so wieder in ihren Ausgangszustand zurückgeführt und kann neue Photonen detektieren. Der Widerstand ist in der Regel mit einigen 1 bis 20 M Ω dimensioniert [2.2].

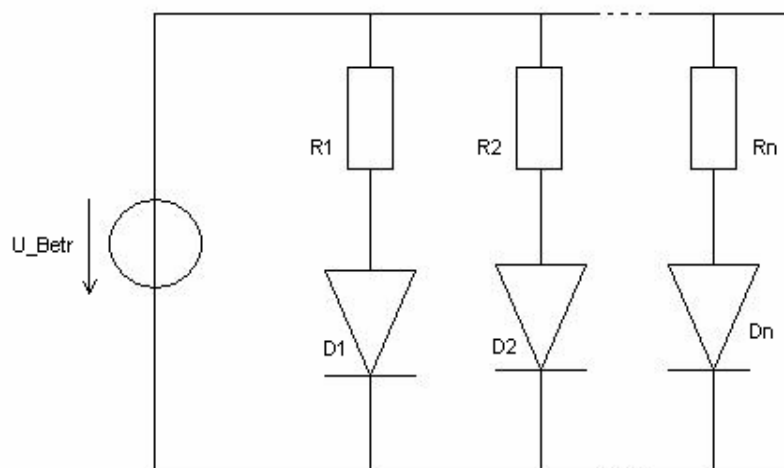


Bild 2.5: Schaltungs bild eines SiPM zur Verdeutlichung des Geiger Modes, Quenchingwiderstände R_1 bis R_n und APDs D_1 bis D_n

Durch parallele Verschaltung der APDs gibt der SiPM die Summe aller Einzelsignale der APD aus. Die erzeugten Signale werden auf einen Aluminiumbus geführt, der diese

an die Ausleseelektronik weiter gibt. Die APD auf dem Substrat sind durch kleine Gräben, siehe Bild 2.6, voneinander getrennt, um den Crosstalk weitestgehend zu unterbinden [2.2].

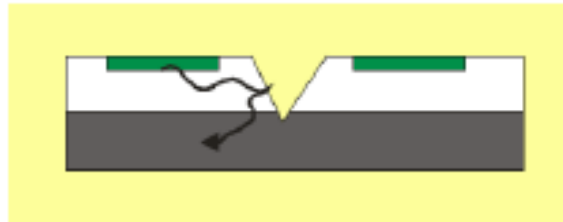


Bild 2.6: Schema des Grabens zwischen den Pixeln

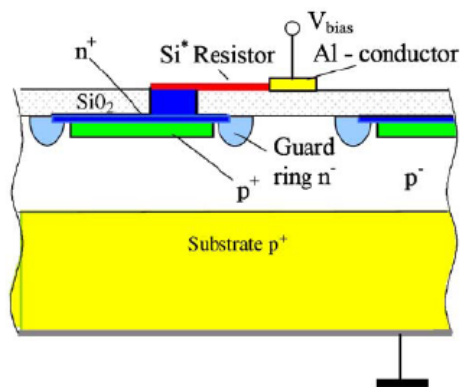


Bild 2.7: Schematischer Aufbau einer Avalanche-Photodiode im SiPM

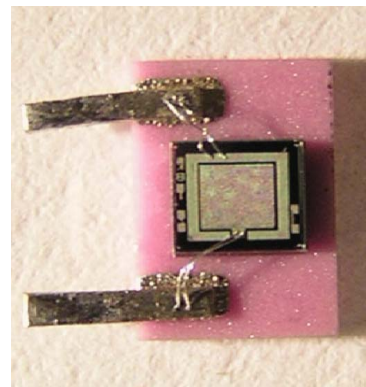


Bild 2.8: Foto eines SiPM

2.5 Untergrundrauschen: Dunkelstrom und Crosstalk

Das Untergrundrauschen bezeichnet die Signale, die das SiPM-Signal, das gemessen werden soll, verunreinigen. Wenn die zu messenden Signale sehr klein sind, werden diese oft durch Untergrundrauschen überlagert. Aber mit Hilfe des Diskriminators kann das Rauschen unterbunden werden, dessen Funktionsweise in Kapitel 3 beschrieben wird. Das Untergrundrauschen hat mehrere Ursachen:

1. Rauschen des Messaufbaus. In jedem elektronischen Gerät wird Rauschen durch Eigenschaften des Stromes verursacht.

2. Faktoren, die ausschließlich im MPPC erzeugt werden. Dazu zählen der Dunkelstrom und der Crosstalk.

2.5.1 Dunkelstrom

Wird ein Silizium-Photomultiplier (SiPM) an eine Spannung angeschlossen und in Abwesenheit von Licht betrieben, so lässt sich doch ein Signal auf dem Oszilloskop erkennen. Dieses Signal wird Dunkelstrom genannt und entsteht bei der thermischen Anregung von Elektronen im Atomverband. Mit steigender Temperatur beginnen die Elektronen zu oszillieren. Irgendwann ist die Oszillation so stark, dass die Elektronen aus dem Verband gerissen werden. Da eine Spannung über dem SiPM anliegt, werden auch diese thermischen Elektronen beschleunigt und können durch Stoßionisation neue Elektron-Loch-Paare generieren. Je höher die Spannung, desto höher wird der Dunkelstrom sein, denn mit hohen Spannungen kann ein starkes elektrisches Feld erzeugt werden [2.2].

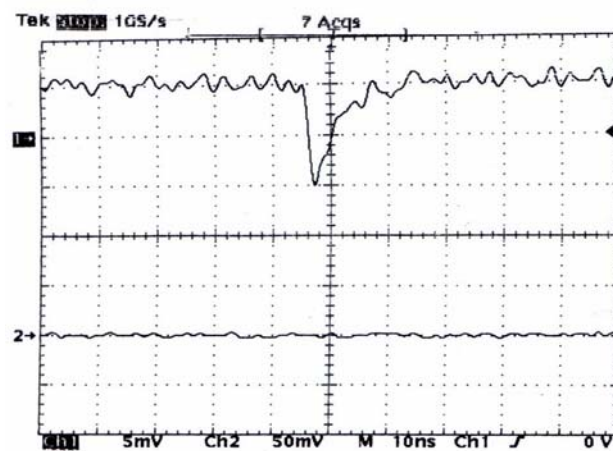


Bild 2.9: Dunkelrate, ca. 10mV Amplitude, entspricht dem Signal eines gefeuerten Pixels

2.5.2 Crosstalk

Crosstalk ist das englische Wort für Übersprechen. Es ist damit gemeint, dass über eine Grenze hinweg Nachbareffekte auftreten können. Die Nachbareffekte in einem SiPM beruhen auf der erneuten Entstehung von Photonen während der Vervielfältigung in

einem Pixel, die in den Nachbarpixel übersprechen können und wiederum eine Lawine erzeugen. Die Produktion von neuen Photonen ist durch Rekombination der Elektron-Loch-Paare möglich. Auf 10^5 generierte Elektron-Loch-Paare kann während des Lawinenprozesses 1 Photon erzeugt werden. Das Messergebnis wird dadurch verfälscht, da es nicht möglich ist, Licht ohne den Effekt des Crosstalks zu detektieren [2.2].

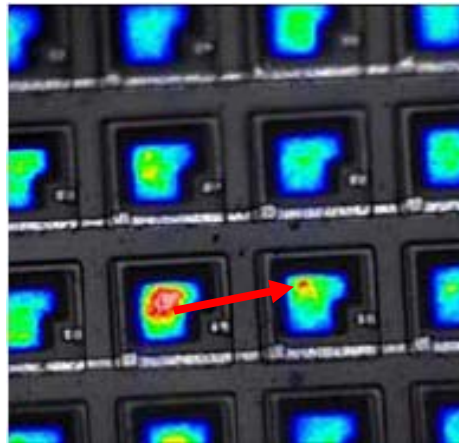


Bild 2.10: Beobachtung des Crosstalkeffekts unter dem Mikroskop

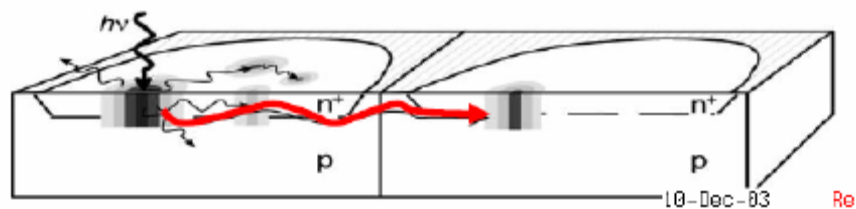


Bild 2.11: Schema des Übersprechens

2.6 Anwendungen des SiPM

2.6.1 Astronomie

In der Astronomie können bei Messungen des Sternenlichts nur geringe Lichtmengen aufgenommen werden, da das Licht nur mit kleinen Intensitäten auf der Erde ankommt. Deswegen wird auch hier das Licht in ein elektrisches Signal umgewandelt und gleichzeitig verstärkt. Die SiPM werden z.B. eingesetzt bei der Cherenkov- und

Fluoreszenz Lichtdetektion im MAGIC-Teleskop. Die Schlüsselfaktoren für die Nutzung von SiPM sind:

1. UV-Licht Sensitivität, um Cherenkov- und Fluoreszenzlicht zu detektieren
2. Gute Photonzählerfähigkeiten, d.h. Nachweis von einzelnen Photonen ist möglich
3. Höchste Photonendetektionseffizienz
4. Große Detektoren mit kleiner Anzahl von Kanälen, SiPM müssen größere Flächen haben
5. Leichtes und robustes Gerät
6. Zeitauflösung

Cherenkov-Licht wird bei elektromagnetischen Kaskaden erzeugt, die entstehen, wenn Gammastrahlung aus dem All auf die Atmosphäre trifft. Das Cherenkov-Licht wird über mehrere zusammengesetzte Spiegel auf den Detektor reflektiert, in dem die Photomultiplier montiert sind [2.3].

2.6.2 Medizin

SiPM sollen unter anderem in der Positron-Emissions-Tomographie genutzt werden.

Warum sich die SiPM besonders gut für solche Anwendungen eignen, beschreiben die folgenden Punkte:

Es werden bestimmte Kristalle in den Geräten verwendet, die mit den SiPM gekoppelt werden können, da einige Modelle sensitiv sind für blaues Licht. Die Wirkung des Dunkelstroms hat auf die Ergebnisse keinen nennenswerten Einfluss, da in diesen Anwendungen sehr große Photonenmengen gemessen werden. Weiterhin wurden SiPM in magnetischen Feldern getestet. Durch die sehr kurzen Wegstrecken, die die Elektronen bzw. die Löcher im Halbleiter durchlaufen, hat ein magnetisches Feld (getestet bis 5T) kaum Einfluss auf deren Wege [2.3].

2.6.3 Strahlendetektion in der Hochenergiephysik, Quantenoptik und Plasmaphysik

Bei der Strahlendetektion von schwachem Licht und der Auslese von Szintillationslicht gelten folgende Schlüsselfaktoren für die Nutzung von SiPM [2.3]:

1. Kopplung der SiPM mit Szintillationsmaterial wegen hoher Sensitivität für blaues und grünes Licht
2. SiPM sind für hohe magnetische Felder unempfindlich (getestet bis 5T)
3. Eine hohe Granularität des Kalorimeters wird möglich, da der SiPM ein kleiner kompakter Detektor ist.

2.7 Beschreibung des Prototyps des Hadronenkalorimeters

2.7.1 Hadronen

Die Hadronen sind Teilchen, die der starken Wechselwirkung unterliegen. Zu den Hadronen werden die Baryonen und die Mesonen gezählt. Hadronen setzen sich aus den Quarks zusammen. Hiervon gibt es sechs Arten und ihre entsprechenden Antiteilchen:

Tabelle 2.1: Tabelle der Quarks

	u	d	s	c	b	t
<i>Name</i>	up	down	strange	charmed	bottom	top
<i>Ladung Q/e</i>	2/3	-1/3	-1/3	2/3	-1/3	2/3

Eine exakte Massendefinition ist schwierig, da Quarks immer im Verbund auftreten.

Mesonen setzen sich aus einem Quark und einem Antiquark zusammen, die Baryonen aus drei Quarks. Zu der Gruppe der Mesonen gehören die Kaonen und die Pionen. Zur Gruppe der Baryonen zählen die Hyperonen und Nukleonen, die Atomkerne [2.4].

2.7.2 Der International Linear Collider, ILC

Der International Linear Collider ist für eine Strecke von etwa 33km geplant. An beiden Enden werden Elektronen und Positronen erzeugt und über jeweils die Hälfte der

Strecke beschleunigt. Etwa in der Mitte der Gesamtstrecke treffen die Teilchen aufeinander. Dabei werden neue Teilchen mit anderen Massen, Energien und Lebensdauern erzeugt [2.5]. Für die Messung der unterschiedlichen Teilchenarten und gesuchten Parameter werden unterschiedliche Kalorimeter benötigt. Dazu besteht der Detektor, der um den Wechselwirkungspunkt herum aufgebaut ist, aus mehreren Modulen. Neben dem Hadronenkalorimeter, in dem die Energien der bei den Kern-Wechselwirkungsprozessen frei werdenden Teilchen gemessen werden, setzt sich der Detektor aus einem elektromagnetischen Kalorimeter und einer Time Projection Chamber zusammen. Im elektromagnetischen Kalorimeter können Spuren geladener Teilchen nachgewiesen werden, während in der TPC der Teilchenimpuls gemessen werden soll.

2.7.3 Der Prototyp des Hadronenkalorimeters

Der Prototyp des Hadronenkalorimeters ist nach einer Vielzahl von Messungen mit einem vorangegangenen Minical, einem kleinen Vorgänger des jetzigen Prototyps, entstanden. Bei diesem Modell wurde die Übertragung des Lichts aus den Szintillatoren über Lichtwellenleiter bewerkstelligt, die dann auf Avalanche-Photodioden geleitet wurden. Das Minical wurde für Vergleichsmessungen von SiPM, APD und Photomultiplerröhren konstruiert. Der jetzige Prototyp ist 1m^3 groß und in 38 Schichten, den Kassetten, unterteilt. Die äußersten 8 Kassetten beinhalten nur 121 Szintillatoren in zwei verschiedenen Größen. Jede der innen liegenden Kassetten beinhaltet 216 Szintillatoren, die in drei unterschiedlichen Größen in einer bestimmten Anordnung auf den Kassetten angebracht sind, hierzu Bild 2.12. Diese Anordnung ermöglicht eine möglichst hohe räumliche Auflösung.

In den Szintillatoren sind Gräben eingearbeitet, in denen grüne Wellenlängenschieber eingesetzt wurden. Diese dienen zur Umwandlung des blauen Lichts aus den Szintillatoren. An jedem Szintillator in der Kassette ist ein SiPM angebracht, der das Licht aus dem Wellenlängenschieber detektiert. Dieser Aufbau war bisher nötig, da nur SiPM existierten, die für grünes Licht sensitiv waren. Weiterhin liegen auf den Szintillatoren Lichtwellenleiter auf, die zur Kalibrierung Licht einer LED auf den Szintillator leiten. Die SiPM sind mit einer Ausleseelektronik verbunden. Die Kassetten

werden durch 2cm rostfreien Stahl getrennt. Der Stahl wird für die Kaskadenbildung der Teilchen benötigt. Durch die Anwendung der SiPM und die Art der Szintillatoranordnung wird es möglich, die Granularität des Kalorimeters (die räumliche Auflösung) zu steigern und damit die Messungen noch genauer werden zu lassen [2.6].

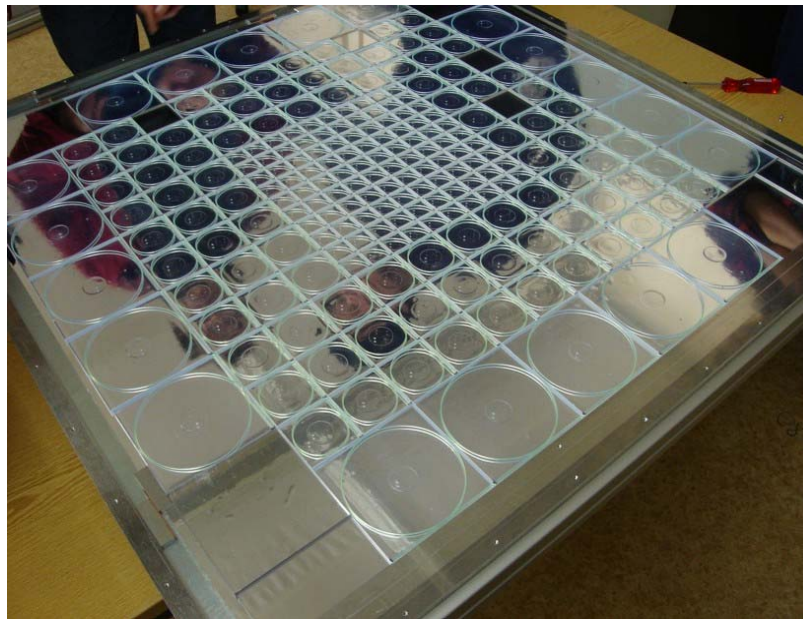


Bild 2.12: Szintillatoranordnung in einer Kassette

2.8 Multi Pixel Photon Counter, MPPC

Der für diese Diplomarbeit verwendete SiPM wurde von der Firma Hamamatsu aus Japan hergestellt und nennt sich Multi Pixel Photon Counter, MPPC. Von Hamamatsu wurden 5 Probestücke des MPPC¹ bereitgestellt. Dieser MPPC war eine Sonderanfertigung für die Calice²-Kollaboration, da er komplett in durchsichtigen Kunststoff gegossen wurde, um ihn vor äußeren Einflüssen zu schützen. Eine wichtige Eigenschaft dieser neuartigen SiPM ist die Sensitivität für blaues Licht. Zu den Probestücken wurden die von Hamamatsu gemessenen Kenndaten mitgeliefert. Die Messungen

¹ MPPC – Multi Pixel Photon Counter, Hamamatsu, Japan, Typenbezeichnung MPPC-11-025M

² Calice = CALorimeter for the Linear Collider Experiment

wurden alle bei einer Temperatur von $T = 25^\circ\text{C}$ und mit einer Lichtquelle der Wellenlänge $\lambda = 655\text{nm}$ durchgeführt.

Tabelle 2.2: Kenndaten der Probestücke von Hamamatsu, U_{Betr} : Betriebsspannung, DR: Dunkelrate. 1,5 bzw. 0,5 Schwelle bedeutet, dass das Signal beim 1,5 bzw. 0,5-fachen eines Pixelsignals abgeschnitten wurde und nur der Anteil über der Schwelle gemessen wurde.

Nr. des Probestückes	U_{Betr} in V	DR in kHz (1,5 Schwelle)	DR in kHz (0,5 Schwelle)	Verstärkung
1	78,13	0,06	56,6	$2,75 \cdot 10^5$
2	78,22	0,13	65	$2,75 \cdot 10^5$
3	78,11	0,1	50,2	$2,75 \cdot 10^5$
4	78,11	0,08	59,9	$2,75 \cdot 10^5$
5	78,08	0,12	64,1	$2,75 \cdot 10^5$

Aus den Angaben lässt sich erkennen, dass sich die Probestücke kaum in ihren charakteristischen Daten unterscheiden. So ist zumindest für diese fünf Probestücke davon auszugehen, dass die Produktion reproduzierbar durchgeführt werden kann. Um einen aussagekräftigen Vergleich anzustellen, müssten natürlich die Daten von deutlich mehr MPPC untersucht werden.

Weiterhin wurden die Dunkelraten in Abhängigkeit von der Schwelle angegeben. Die Schwelle bezeichnet einen Grenzwert, der vorgibt, ab welcher Signalgröße das zu messende Signal aufgenommen werden soll. Hierzu kann am Oszilloskop die Amplitude gemessen werden, die bei Feuerung eines Pixels erzeugt wird. Die Schwelle wird dann als ein Vielfaches der Amplitude gewählt.

Die Verstärkung bezeichnet das Maß der Vervielfältigung der Elektronen im Halbleiter, also die Stromverstärkung. Auf die Berechnung der Stromverstärkung soll hier nicht weiter eingegangen werden. In Kapitel 4 wird zur Beschreibung der Charakterisierungsmessungen die Berechnung anhand von Messergebnissen vorgestellt [2.7].

3 Messaufbau

Bild 3.1 zeigt den Messaufbau im Labor. Der Aufbau beinhaltet eine Box, in der sich der MPPC befindet. Eine weitere Box enthält eine LED, die für die Charakterisierungsmessungen als Lichtquelle genutzt wurde. Des Weiteren ist die notwendige Ausleseelektronik gezeigt, Pulsgenerator, Digitaler Pulse/Delay Generator und NIM-Logik. Spannungsversorgung und Strommessung sind links unten im Bild zu finden.



Bild 3.1: Foto des Messaufbaus im Labor

Die Verbindungen zwischen den Geräten zur Signalübertragung wurden mit Koaxial-Kabeln hergestellt. Da sich die Messaufbauten für die durchgeführten Messungen unterscheiden, werden diese in den entsprechenden Kapiteln erklärt.

3.1 Die Komponenten des Messaufbaus

3.1.1 Box

Szintillator und MPPC befinden sich in einer abgedunkelten Box zusammen mit der radioaktiven Quelle und dem Photomultiplier. Der Inhalt der Box wird in Bild 3.2 gezeigt.

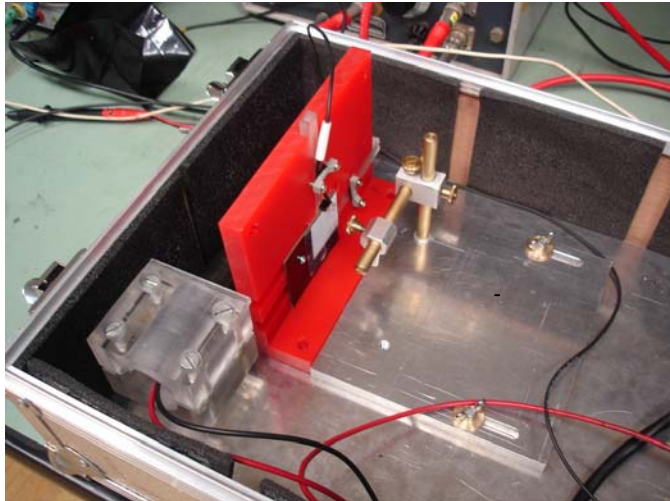


Bild 3.2: Inhalt der Box

Es wird nur die Halterung für die Stabquelle gezeigt. In der Box ist außerdem eine Platine integriert, die mit dem MPPC über ein Koaxial-Kabel verbunden ist. Die Platine steuert die Spannungsversorgung des MPPC und dessen Signalausgabe. Bild 3.3 zeigt diese Platine.

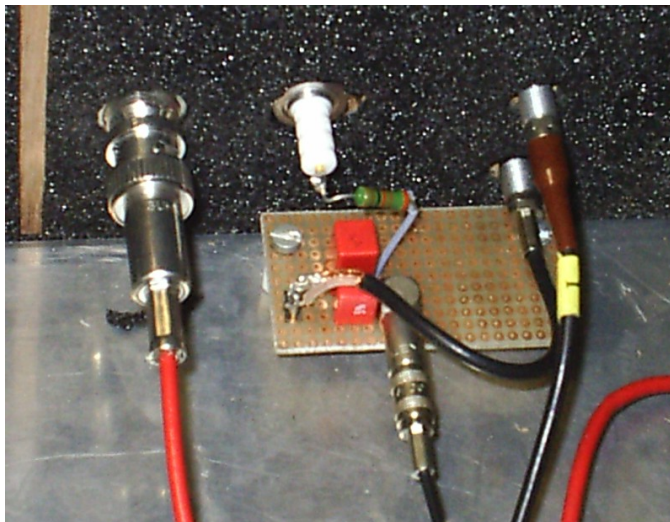


Bild 3.3: Platine zur Steuerung der Betriebsspannung des MPPC und Signalauskopplung

3.1.2 Szintillator³

Fällt Licht auf einen Szintillator, werden Elektronen im Material angeregt und auf ein höheres Energieniveau gehoben. Wenn diese wieder auf den Grundzustand zurück fallen, werden Photonen abgestrahlt. Es kann aber auch zu anderen Prozessen kommen, die ermöglichen, dass das dann emittierte Licht mit einer größeren Wellenlänge abgestrahlt wird [3.1].

Für die folgenden Messungen wurden organische Kunststoffszintillatoren mit den Maßen $3 \times 3 \times 0,5 \text{ cm}^3$ verwendet. Bild 3.4 zeigt die beiden Szintillatoren für die unterschiedlichen Kopplungsarten. Der Linke wird für die direkte Kopplung benötigt. Hierbei wird das Szintillationslicht direkt vom MPPC ausgelesen. Im rechten Szintillator ist ein Wellenlängenschieber eingelassen, der das blaue Szintillationslicht in grünes Licht wandelt und welches dann erst vom MPPC detektiert wird.

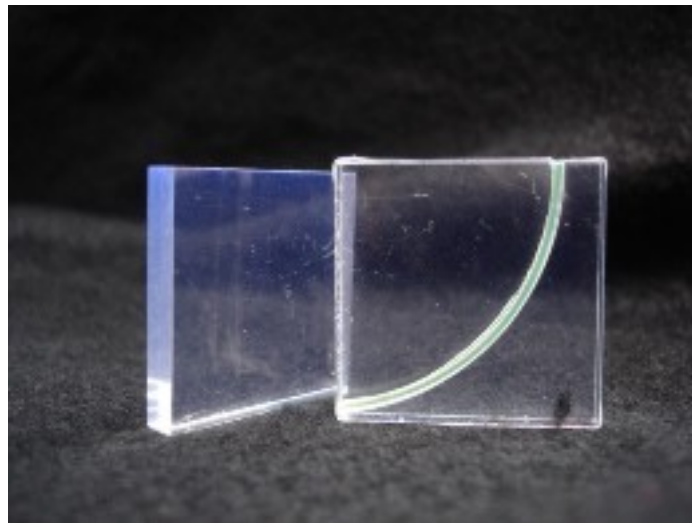


Bild 3.4: Organische Szintillatoren mit und ohne integrierten Wellenlängenschieber (WLS). Bei dem Exemplar ohne WLS ist die Emission blauen Lichts gut zu erkennen.

³ keine Typenbezeichnungen vorhanden

3.1.3 Wellenlängenschieber ⁴, WLS

Wellenlängenschieber sind Szintillatoren in Faserform. Auch diese wandeln Licht einer Wellenlänge in Licht größerer Wellenlänge um. Mit den Fasern kann Licht gesammelt und auf einen bestimmten Punkt geleitet werden. Beim Kalorimeterprototyp wurde die Kopplung zwischen Szintillator und MPPC bisher über einen Wellenlängenschieber bewerkstelligt.

3.1.4 Ruthenium 106-Quelle

Die Wechselwirkungen im Beschleuniger können durch die Monte-Carlo-Simulation beschrieben werden. Zur Charakterisierung des MPPC wurde deshalb als Signalquelle Ruthenium 106 verwendet, wodurch die zu erwartende Signalstatistik gut simuliert werden kann.

3.1.5 Photomultiplier⁵, PM

Der Silizium-Photomultiplier ist die verkleinerte Variante des Photomultipliers (PM). Mit diesem kann ebenso Licht detektiert werden und in ein elektrisches Signal umgewandelt werden, wobei es im Innern des PM verstärkt wird.

Der PM besitzt eine Kathode mit negativem Potential, und eine Anode mit positivem Potential. Zwischen den beiden Elektroden sind mehrere Dynoden angebracht. Diese sind über Widerstände verbunden, die die Spannung von einer Dynode zur anderen zunehmend positiver werden lassen. Alle Elemente befinden sich in einer evakuierten Röhre. Wenn an den PM eine Spannung gelegt wird, kann bei Auftreffen eines Photons auf die Kathode ein Elektron aus dieser ausgeschlagen werden. Durch den Potentialunterschied der beiden Elektroden liegt ein elektrisches Feld über der Röhre, die das ausgeschlagene Teilchen von der Kathode weg beschleunigt. Dieses Teilchen gewinnt durch die Beschleunigung Energie und trifft auf die erste Dynode. Je nach angelegter Spannung werden 2-4 Sekundärelektronen aus der Dynode ausgeschlagen

⁴ Saint-Gobain Crystals, BCF-91A, Multiclad, Ø 1mm

und diese erneut beschleunigt. Die Anzahl der Elektronen nimmt so exponentiell, abhängig von der Anzahl der Dynoden, zu. Dieser Teilchenstrom wird an der Anode zu einem Strom gesammelt. Über einem Widerstand fällt dann eine Spannung als Ausgangssignal ab.

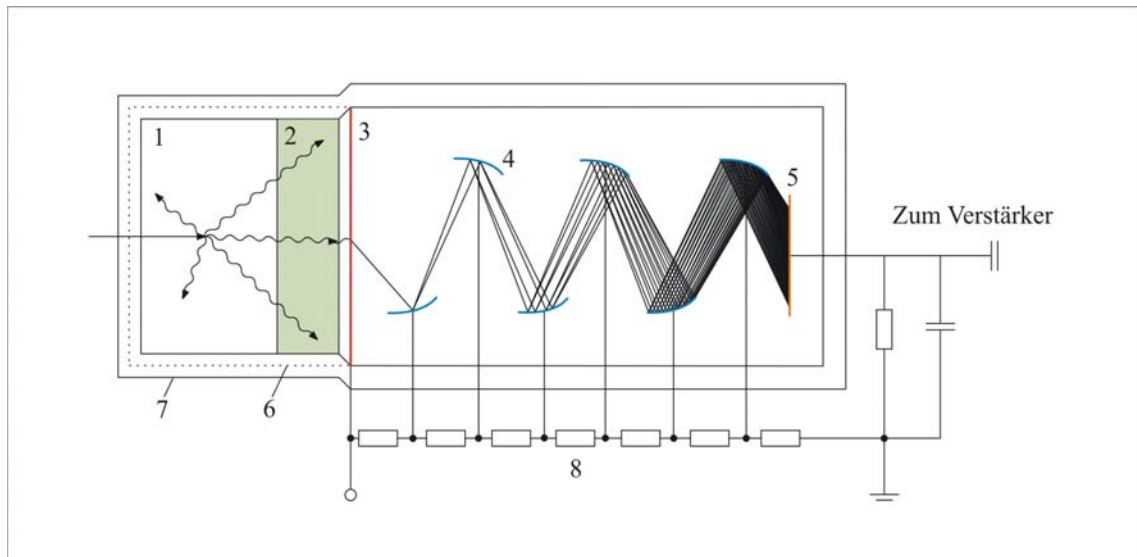


Bild 3.5: Schematischer Aufbau eines Photomultipliers, hier mit vorgestelltem Szintillator zur Umwandlung von radioaktiver Strahlung in Licht

3.2 Triggerung des Signals

Beim Triggern wird eine Art Referenzsignal erzeugt, das vom Messsignal abhängen kann. In dieser Diplomarbeit wurden zwei unterschiedliche Triggerarten für zwei verschiedene Messaufbauten verwendet.

3.2.1 Trigger mit Photomultiplier

Diese Variante wurde bei der Messung der Lichtausbeute benutzt. Hierbei wird eine radioaktive Quelle auf den Szintillator gerichtet, der mit dem MPPC gekoppelt ist. Nach

⁵ Hamamtsu, R5505-70, Größe 26mm

Anregung des Szintillators, fliegt es weiter durch die Plattform hindurch in den zweiten Szintillator und erzeugt dort ebenfalls Licht. Der zweite Szintillator ist mit einem PM gekoppelt. Dieser wandelt wie der MPPC das Licht in einen elektrischen Strom um und verstärkt diesen gleichzeitig. Dies ist dann das Referenzsignal. Auch hier werden beide Signale, das des PM und das des MPPC, zur Ausleseelektronik weitergeleitet.



Bild 3.6: Trigger mit Photomultiplier und Szintillator

3.2.2 Trigger mit Digital Delay/Pulse Generator⁶

Die Triggerung des Signals mit einem Digital Delay/Pulse Generator wird bei den Charakterisierungsmessungen, Kapitel 4, verwendet. Der Generator gibt einen Puls mit einer bestimmten Frequenz an den Diskriminator. Über die 3 Fold Logic Unit (siehe Kapitel 3.3) gelangt dieses Referenzsignal an den Analog-Digital-Wandler, wo es für das Öffnen des Messfensters verwendet wird.

⁶ Stanford Research Systems Inc., DG535, 4-Kanal-Generator

3.3 Verwendete elektronische Komponenten zur Signalauslese

Der Diskriminator⁷ vergleicht das ankommende MPPC-Signal mit einem vorher am Diskriminator eingestellten Schwellwert, der sich am MPPC-Signal orientiert. Liegt das Signal über dem Schwellwert, wird es durchgelassen. Ansonsten wird es unterdrückt. Damit ist es möglich, Untergrundrauschen aus einer Messung zu eliminieren. Kommen zwei Signale gleichzeitig in der 3 Fold Logic Unit⁸ an, werden diese auch hier durchgelassen. Des Weiteren kann ein Messfenster mit der Länge eines MPPC-Signals geöffnet werden, das verhindert, dass sich zwei dicht aufeinander folgende MPPC-Signale überlagern. Der Analog-Digital-Wandler⁹ integriert ein Stromsignal über eine bestimmte Zeit zu einer Ladung auf. Diese wird dann einem digitalen Wert zugeordnet und an einen PC weitergeleitet. Der Visual Scaler/Zähler¹⁰ zählt Ereignisse, die im MPPC stattfinden und für die Bestimmung der Dunkelrate verwendet.

Vorverstärker¹¹ wurden für die Signalverstärkung beim MPPC und beim Photomultiplier verwendet. Die MPPC-Signale hätten sonst nicht so gut vom Untergrundrauschen getrennt werden können. Verwendet wurden 20, 50 und 100fache Verstärkung. Der Digital Delay/Pulse Generator kann als Trigger für das MPPC-Signal verwendet werden und gibt ebenso eine Frequenz verzögert an einen Puls Generator¹² weiter, der diese an eine LED weitergibt. Spannungsversorgungen¹³ mussten für den MPPC, den Photomultiplier, sowie für die Vorverstärker bereitgestellt werden. Die Strommessung erfolgte seriell zum MPPC mit Hilfe eines Elektrometers¹⁴ und eines Digitalmultimeters¹⁵ wegen dessen besseren Genauigkeit. Die Signale konnten mit Hilfe eines Speicheroszilloskopes¹⁶ im Vorwege untersucht werden. Mit dem Oszilloskop wurden u. a. Zeiten für Messfenster gemessen. Die Blockschaltbilder der gesamten Messelektronik befinden sich in Kapitel 4.

⁷ LeCroy, NIM Model 620CL

⁸ Nuclear Physics, N405

⁹ VME Model 1182

¹⁰ Max-Planck-Institut für Physik, München

¹¹ Phillips Scientific, Fast Pulse Preamplifier, Model 6954, Verstärkung 20, 50, 100fach

¹² Hewlett Packard 8082A

¹³ Rhode & Schwarz, Triple Power Supply, NGT35
Volkraft PPS-12008

Heinzinger, Transistor-Netzgerät, HN 10000-1

¹⁴ Keithley 617

¹⁵ Fluke 87V

¹⁶ Tektronix, TDS7404, 4GHz, 20GS/s

4 Charakterisierung

Es wurden fünf Probestücke des Multi Photon Pixel Counters (MPPC) gleicher Pixelgröße, 1600 Pixel, zur Verfügung gestellt. Zu jeder dieser fünf MPPC wurden die wichtigsten Daten, z.B. Betriebsspannung, mitgeliefert. Diese Daten sollten in eigenen Charakterisierungsmessungen überprüft werden, wobei Linearitätsuntersuchungen durchgeführt und die Uniformität der Ergebnisse geprüft werden mussten. Hiermit ließ sich dann eine Aussage über die Produktionsschwankung in der MPPC-Herstellung treffen. Weiterhin war nach dem Arbeitspunkt gefragt, der mit den Daten der Charakterisierung ermittelt werden konnte und sich für die geforderte Anwendung im Hadronenkalorimeter eignet. Die Messungen zur Charakterisierung umfassen die Messung der Dunkelrate und des Signalspektrums.

4.1 Messung der Dunkelrate

4.1.1 Messaufbau

Für diese Messung wird kein Licht benötigt, da das intrinsische Rauschen des MPPC untersucht werden soll. Durch die in 4.1.2 folgenden Ergebnisse kann ein spezifizierter Arbeitsbereich festgelegt werden, indem die Linearität der Rate des Dunkelstroms abhängig von der Betriebsspannung untersucht wird. Hierbei ist auf den Anstieg der Dunkelrate zu achten. Bild 4.1 zeigt den für diese Messung notwendigen Messaufbau als Blockschaltbild.

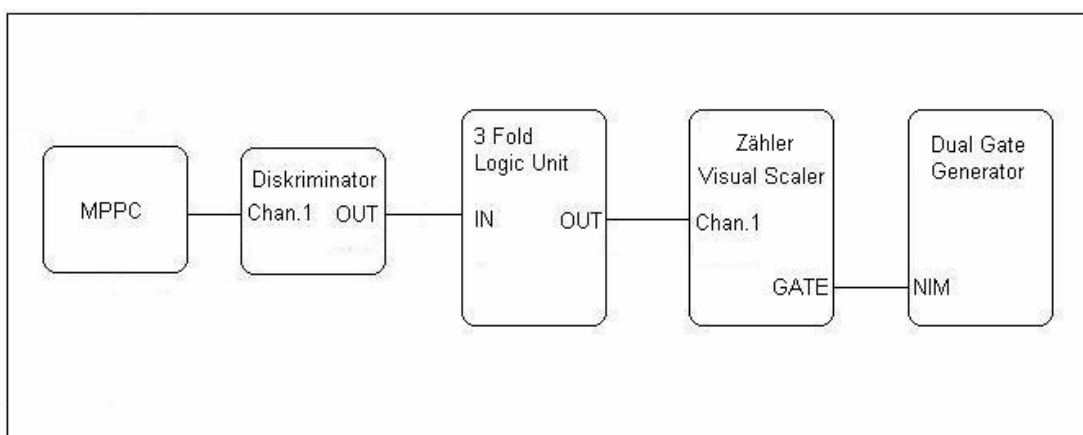


Bild 4.1: Blockschaltbild zur Messung der Dunkelrate

Bevor die Ereignisanzahl zur Bestimmung der Dunkelrate aufgenommen werden konnte, wurde eine Schwelle am Diskriminator eingestellt. Hiermit sollte verhindert werden, dass der Untergrund des Messaufbaus in das Messergebnis mit eingeht. Zur Bestimmung der Diskriminierungsschwelle wurde bei $U_{\text{Betr}} = 77,4\text{V}$ die Dunkelstromamplitude des MPPC mithilfe des Oszilloskops gemessen. Die Signalamplitude betrug $U_{\text{mess}} = 30\text{mV}$. Es sollten nur Ereignisse gezählt werden, die das 1,5fache der Signalamplitude betragen sollten, also $U_{\text{Schwelle}} = 1,5 \cdot U_{\text{mess}}$.

Das MPPC-Signal läuft in den Diskriminator und wird mit dem Schwellwert nach o. g. Bedingung verglichen. Ist das Signal größer als die Schwelle, wird es weitergeleitet. In der Logic Unit wird mit Eingang des Signals ein kleines Messfenster erzeugt, womit erreicht wird, dass MPPC-Signale nacheinander verarbeitet werden können. Die Signale werden dann an den Zähler weiter gegeben.

Um die Zählraten der unterschiedlichen Probestücke vergleichen zu können, wurde auch ein zeitlich festgelegtes Messfenster von $t_{\text{gate}} = 9,6\text{s}$ am Dual Gate Generator eingestellt, das auf den Visual Scaler rückwirkte. Zur weiteren Verstärkung des MPPC-Signals wurde ein Vorverstärker mit einer Verstärkung von $V_{\text{DC}} = 100$ genutzt.

4.1.2 Messung und Auswertung

Nachdem die notwendigen Einstellungen durchgeführt worden waren, sollte die Dunkelrate über einen bestimmten Spannungsbereich gemessen werden. Im Mittel wurde die Betriebsspannung mit $U_{\text{Betr}} = 78,1\text{V}$ durch die Firma Hamamatsu angegeben. Am Oszilloskop wurde zuerst kontrolliert, ab welcher Spannung ein Signal zu erkennen war, das sich eindeutig als Dunkelstrom identifizieren ließ. Des Weiteren wurde das Signal aus Sicherheitsgründen zu höheren Spannungen hin überprüft, indem die Spannung so lange erhöht wurde, so dass der gemessene Strom den unteren nA-Bereich nicht überschritt. Es sollte vermieden werden, die Zelle zu zerstören. Für diese Messung wurde der Spannungsbereich von $U_{\text{Betr}} = 77,4$ bis $79,0\text{V}$ gewählt.

In den ersten Dunkelratenmessungen wurde die Schwelle nur bei der kleinsten Spannung eingestellt. Für eine korrekte Messreihe ist es aber notwendig, die Schwelle für jede Spannung neu einzustellen, da sich der Untergrund mit Einstellen von höheren Spannungen ebenfalls vergrößert. Als Ergebnis ergab sich so insgesamt eine höhere

Dunkelrate, weil mehr Untergrund des Aufbaus im Signal gemessen worden ist. Leider gibt es zu diesen Messungen und diesem MPPC-Modell keine korrekte Messung.

Nach Einstellen der jeweiligen Betriebsspannung des gewählten Arbeitsbereiches wurde die Rate ohne Lichtbestrahlung des MPPC über einer Zeit von $t_{\text{gate}} = 9,6\text{s}$ genommen. Der Fehler wurde zu $0,4\text{s}$ als Ablesefehler am Oszilloskop abgeschätzt.

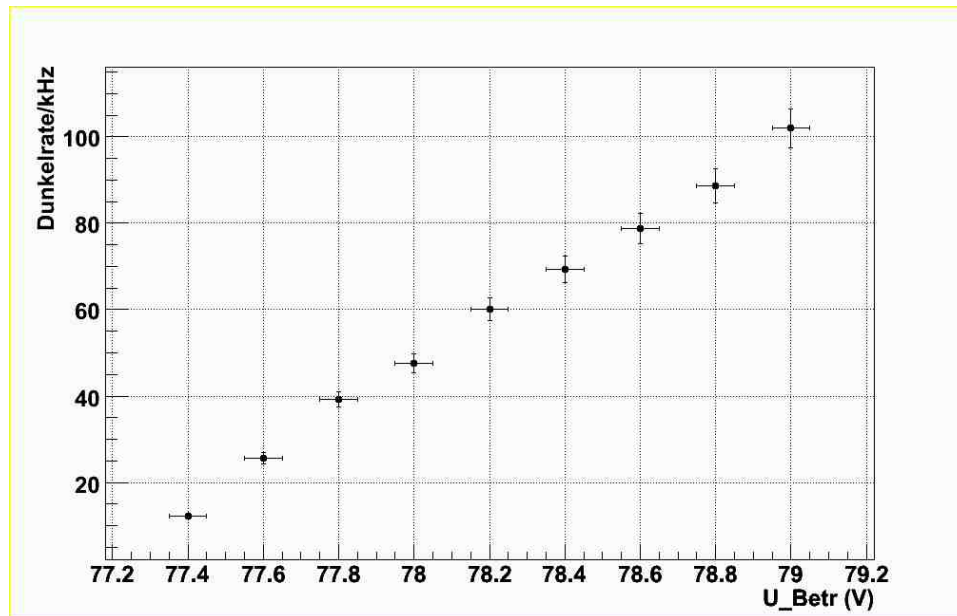


Bild 4.2: Dunkelrate als Funktion der Betriebsspannung, $U_{\text{Betr}} = 77,4$ bis $79,0\text{V}$

Wie zu erkennen ist, steigt die Dunkelrate bis zum Ende des vorerst gewählten Arbeitsbereiches linear an. Für die weitergehenden Messungen und Analysen ist es notwendig, alle Spannungen, die sich in diesem linearen Bereich befinden, zu bestimmen. Daher wurde diese Messung erneut durchgeführt. Der Bereich der Betriebsspannung des MPPC wurde dabei erweitert. Zusätzlich wurde das Rauschsignal der Elektronik mit den genannten Einstellungen gemessen und von den spannungsabhängigen Raten abgezogen.

$$f_{DR} = \frac{n_{DR} - n_{EL}}{t_{gate}} \quad \text{Gl. 4-1}$$

f_{DR} = Dunkelrate in Hz

n_{DR} = Anzahl der Ereignisse ohne Bestrahlung des MPPC

n_{EL} = Anzahl der Ereignisse der Elektronik

t_{gate} = Gatezeit = $(9,6 \pm 0,4)s$

Als Beispiel sei die Anzahl der Ereignisse bei 78,1V gegeben, wenn der MPPC nicht mit Licht bestrahlt wird: $n_{DR} = 274366$

Dazu wurde eine Ereignissanzahl des elektronischen Untergrundes von $n_{EL} = 5026$ gemessen und von n_{DR} abgezogen.

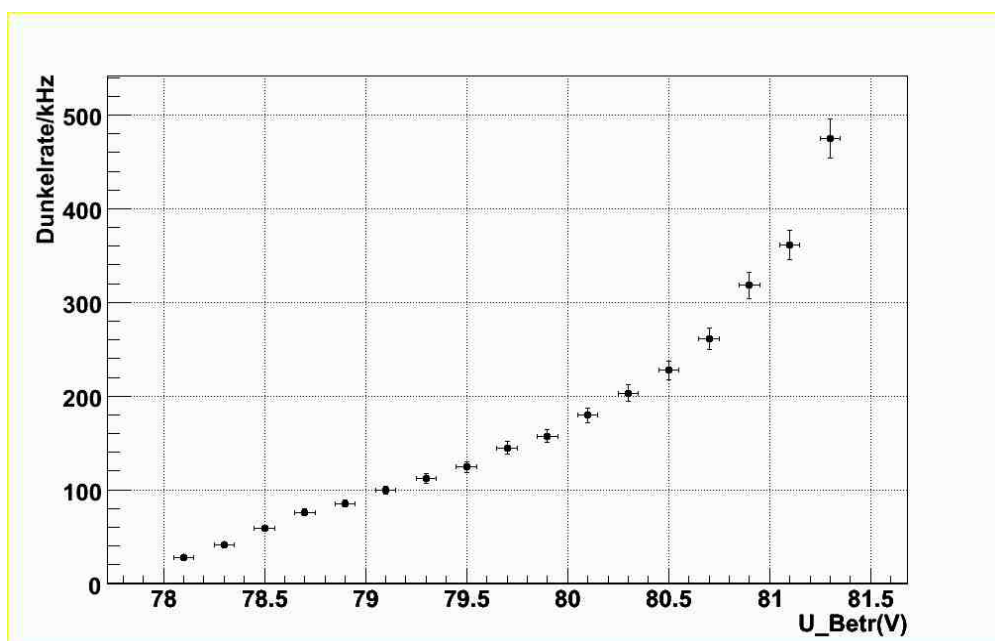


Bild 4.3: Dunkelrate in Hz als Funktion der Betriebsspannung, Dunkelrate beträgt

20 bis 180kHz für einen Spannungsbereich von $U_{Betr} = 78,1$ bis $81,3V$

Nach der zweiten Messung der Dunkelrate konnte die erwartete etwa exponentielle Änderung des Anstiegs dargestellt werden. Das Signal würde ab einer Sperrspannung von etwa $U_{Betr} = 80V$ verrauschen, so dass anhand dieser Messungen ein Arbeitsbereich von $U_{Betr} = 78,2V$ bis $79,9V$ festgelegt werden konnte. Der Arbeitsbereich soll sich auch deshalb im linearen Anstieg der Rate befinden, da sich hier Schwankungen der Spannungsversorgung nicht so stark auf den Detektor auswirken.

4.2 Messung des Signal- und des Signaluntergrundspektrums

4.2.1 Messaufbau

Bild 4.4 zeigt den zur Messung der Lichtausbeute nötigen Messaufbau im Blockschaltbild. Durch Auswertung dieser Messungen sollen die innere Verstärkung, die Durchbruchspannung und die Kapazität der Avalanche-Dioden auf dem MPPC bestimmt werden.

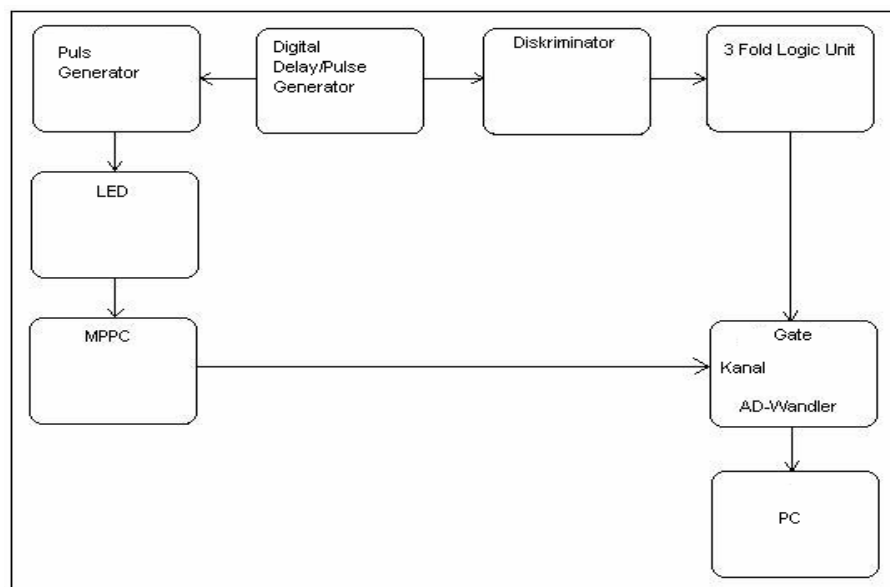


Bild 4.4: Blockschaltbild des Messaufbaus zur Messung des Signalspektrums

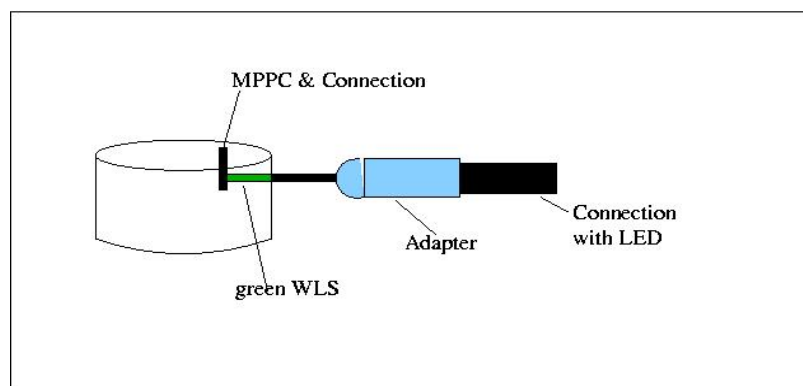


Bild 4.5: Lichtbestrahlung des MPPC durch eine LED

Bild 4.5 stellt die Verbindung zwischen MPPC und LED dar. Die LED strahlt in einer lichtdichten Box auf ein Bündel von Lichtwellenleitern, die deren blaues Licht mit gegebenen Verlusten auf den MPPC übertragen. Zwischen dem MPPC und dem Faserbündel wurde ein Wellenlängenschieber eingesetzt, der das blaue Licht in grünes Licht umwandelte, da diese Messung mit grünem Licht durchgeführt wurde.

4.2.2 Messung und Auswertung

Die Charakterisierungsmessungen sollten ursprünglich durch Bestrahlung des MPPC mit blauem und mit grünem Licht durchgeführt werden, da schon bei diesen Messungen evtl. Unterschiede des MPPC-Verhaltens untersucht werden sollten. Aus zeitlichen Gründen wurde dieses Vorhaben geändert und die Messung mit der Verbindung mittels grünen Wellenlängenschiebers, siehe Bild 4.5, durchgeführt. Auf Untersuchungen der Blausensitivität wird in Kapitel 5 eingegangen.

Zur Messung des Signal- und des Untergrundspektrums wurden Messdaten zu einigen Betriebsspannungen im Arbeitsbereich, $U_{\text{Betr}} = 78,1$ bis $81,3\text{V}$, aufgenommen. Der gleiche Arbeitsbereich gilt für die Datenaufnahme des Untergrundspektrums. Jeweils ein Beispiel für die hierbei entstehenden Spektren zeigen die Bilder 4.6 und 4.7, in denen die Ereignisse als Funktion der AD-Wandler-Kanäle aufgetragen sind.

Das Signalspektrum setzt sich aus mehreren Maxima zusammen. Der MPPC liefert, da alle Dioden parallel geschaltet sind, eine Summe aller Ströme. Der Strom wird durch Vervielfältigung der Elektronen und Löcher erzeugt. Dieses Signal wird mit Hilfe des AD-Wandlers integriert, der wiederum einen Ladungswert ausgibt. Je nach Größe der Ladung wird im Diagramm ein entsprechender Kanal gefüllt. Durch das Diagramm in Bild 4.6 wird die Häufigkeit der jeweils detektierten Ladungen beschrieben. Das erste Maximum wird durch das elektronische Rauschen erzeugt. Ist dieses sehr klein, wird das MPPC-Signal kaum durch das Rauschen überlagert. Die Ladungen der anderen Maxima sind auf die Anzahl der gleichzeitig gefeuerten Pixel bzw. der detektierten Photonen zurück zu führen.

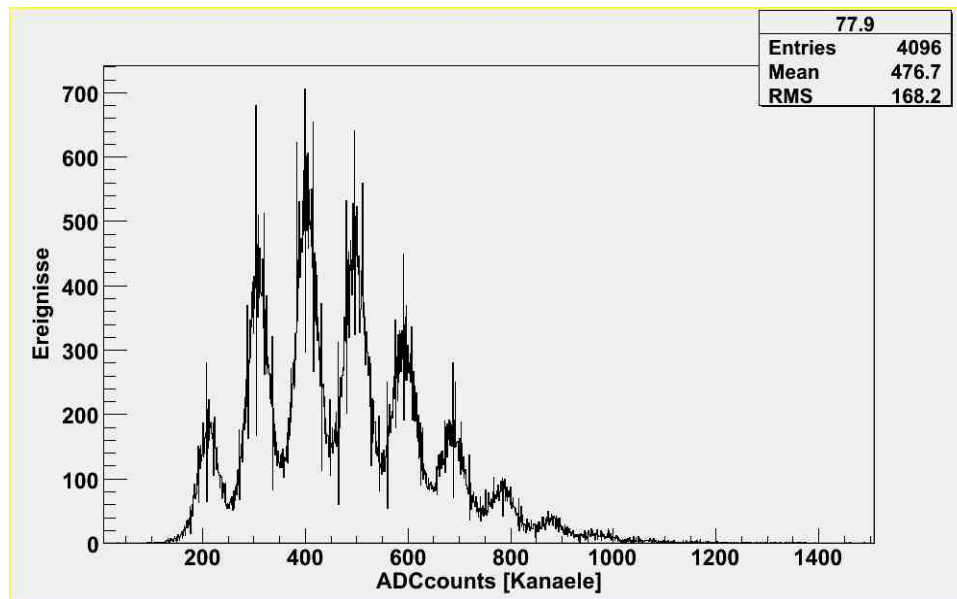


Bild 4.6: Signalspektrum eines MPPC bei Bestrahlung durch eine LED

Der elektronische Untergrund wurde noch einmal ohne den Betrieb des MPPC gemessen und in Bild 4.7 dargestellt. Der erste Peak beinhaltet hauptsächlich Untergrundrauschen des Messaufbaus. Es sind auch kleinere Peaks zu erkennen, bei denen es sich um die Dunkelrate des MPPC und um Crosstalk handelt. Die Position des zweiten Maximums entspricht dem zweiten Maximum in Bild 4.6.

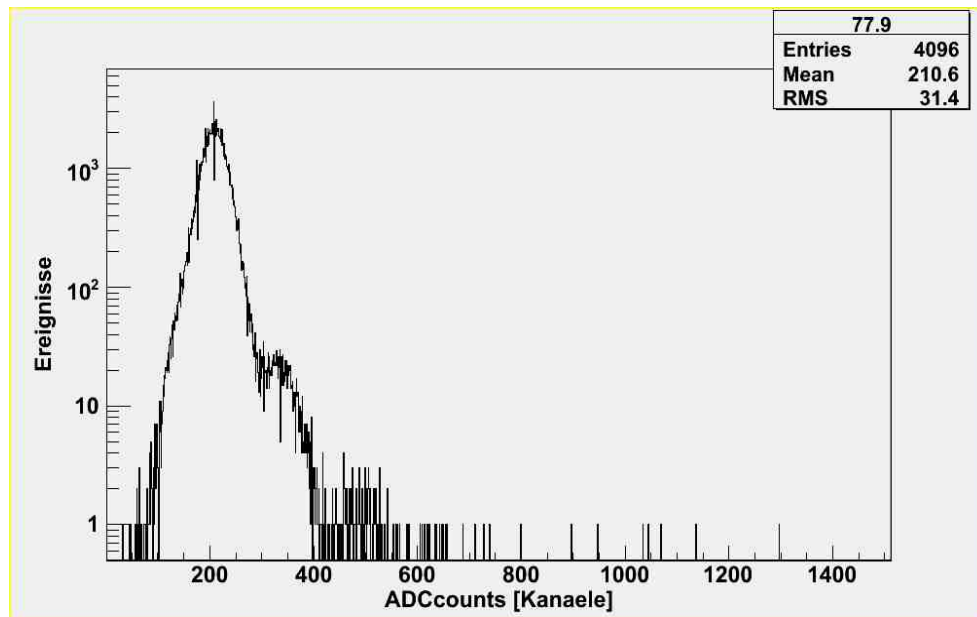


Bild 4.7: Untergrundspektrum, Rauschen des MPPC und der Elektronik ohne Bestrahlung durch eine LED. Die größere Ereignisanzahl ist auf eine längere Messzeit zurück zu führen.

4.2.2.1 Verstärkung

Wenn das zweite Maximum im Signalspektrum durch ein detektiertes Photoelektron entsteht, das dritte Maximum durch zwei detektierte Photoelektronen entsteht usw., dann kann mit der Differenz zweier Maxima die innere Verstärkung G des MPPC angegeben werden, wobei $G = Q_{\text{det}}/e$ mit Q_{det} als der gemessenen Ladung. Vorerst ist es sinnvoll, die Verstärkung auf einen Wert ohne Einheit umzurechnen, da die Ladung in AD-Wandler-Kanälen gemessen wird. Zur Umrechnung werden folgende Werte herangezogen und in Gl.2 eingesetzt:

- G_0 : Verstärkung in AD-Wandler-Kanälen, Differenz der Kanalzahl zweier aufeinander folgender Maxima in Kanälen. In Bild 4.7 sind das 100 Ladungen für 4096 Kanäle: $G_0 = 100$
- Q_{AD} : Gesamtladung von 4096 AD-Wandler-Kanälen: $Q_{\text{AD}} = 200\text{pC}$
- N : Anzahl der Kanäle des AD-Wandlers: $N = 4096$
- A : Verstärkung des verwendeten Vorverstärkers: $A = 100$
- e : Elementarladung: $e = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{C}$

Die folgende Berechnung wurde als Beispiel für $U_{\text{Betr}} = 77,9\text{V}$ in Verbindung zu den Bildern 4.7 und 4.8 durchgeführt.

$$G = \frac{G_0 \cdot Q_{AD}}{N \cdot A \cdot e} \quad \text{Gl. 4-2}$$

$$G = \frac{100 \text{ Kanäle} \cdot 200 \text{ pC}}{4096 \text{ Kanäle} \cdot 100 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}}$$

$$G = 304794 = 3,0 \cdot 10^5$$

Mit den obigen Berechnungen konnte gezeigt werden, dass sich die Verstärkung proportional zur Spannung erhöht, Bild 4.8. Zusätzlich zeigt sich, zumindest für die fünf gegebenen Probestücke, dass die Reproduzierbarkeit innerhalb von 1% gegeben ist. Die Verstärkung für die Spannung $77,9\text{V}$ beträgt $3 \cdot 10^5$. Dieses Ergebnis stimmt mit den Daten der Firma Hamamatsu, $G = 2,75 \cdot 10^5$, überein.

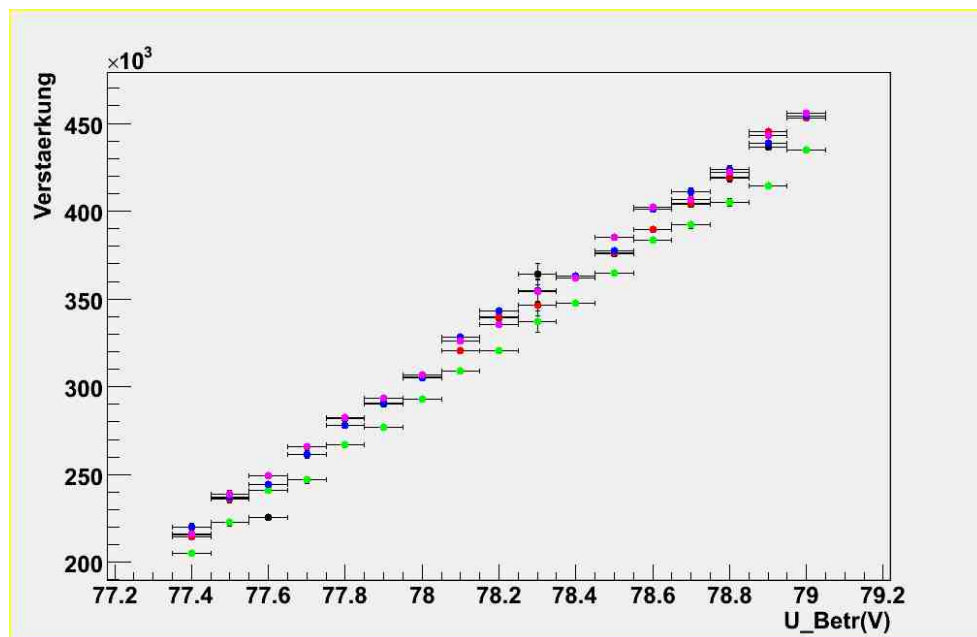


Bild 4.8: Verstärkung als Funktion der Betriebsspannung für verschiedene MPPC-Probestücke

4.2.2.2. Berechnung der Durchbruchspannung

Die Durchbruchspannung gibt an, ab welchem Wert der Sperrspannung bzw. der Betriebsspannung die Verstärkung gegen Unendlich strebt [4.1]. Die Kenntnis der Durchbruchspannung ist insofern interessant, als dass weitere Ergebnisse gerne als Funktion der Überspannung angegeben werden.

$$U_{\text{Über}} = U_{\text{Betr}} - U_{\text{Durch}} \quad \text{Gl. 4-3}$$

Eine lineare Extrapolation der Geraden in Bild 4.8 liefert die Durchbruchspannung U_{Durch} . Durch das Fitting wird eine Basis für die Berechnung der Durchbruchspannung geschaffen, die es erlaubt für eine Betriebsspannung die allgemein gültige Durchbruchspannung für den entsprechenden MPPC zu berechnen. Hierzu ist Tabelle 1 dargestellt, die die berechneten Daten der Durchbruchspannung für jedes MPPC-Probestück beinhaltet.

Tabelle.1: Ergebnisse der Durchbruchspannung für das jeweilige Probestück

Probestück Nr.	Durchbruchspannung (V)
1	$75,94 \pm 0,11$
2	$75,72 \pm 0,85$
3	$76,09 \pm 1,14$
4	$75,91 \pm 0,1$
6	$75,87 \pm 0,47$

4.2.2.3. Kapazität

Die Kapazität kann ebenfalls über eine lineare Extrapolation der Geraden aus Bild 4.8 berechnet werden.

$$Q = G \cdot e = C \cdot U \quad \text{Gl. 4-4}$$

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\Delta(G \cdot e)}{\Delta U} = \frac{\Delta G}{\Delta U} \cdot e \quad \text{Gl. 4-5}$$

$\frac{\Delta G}{\Delta U}$ ist die Steigung der in bild 4.8 dargestellten Gerade.

Tabelle.2: Ergebnisse der Kapazität für das jeweilige Probestück

Probestück Nr.	Kapazität (fF)
1	23,6 ± 2,3
2	24,3 ± 1,2
3	22,5 ± 1,2
4	23,5 ± 1,2
6	23,3 ± 1,2

Die berechneten und aus den Diagrammen ermittelten Werte stimmen mit denen der Datenblätter der Firma Hamamatsu überein.

5 Direkte Kopplung von MPPC und Szintillator

5.1 Messaufbau

Der hier verwendete Messaufbau unterscheidet sich von dem aus Kapitel 4.2.1 dadurch, dass hier als Lichtquelle ein Szintillator verwendet wird, der durch eine radioaktive Quelle, Ruthenium 106, angeregt wird. Des Weiteren wird nur noch das Triggersignal durch den Diskriminator geführt. Das MPPC-Signal wird direkt auf den Analog-Digital-Wandler (AD-Wandler) geleitet.

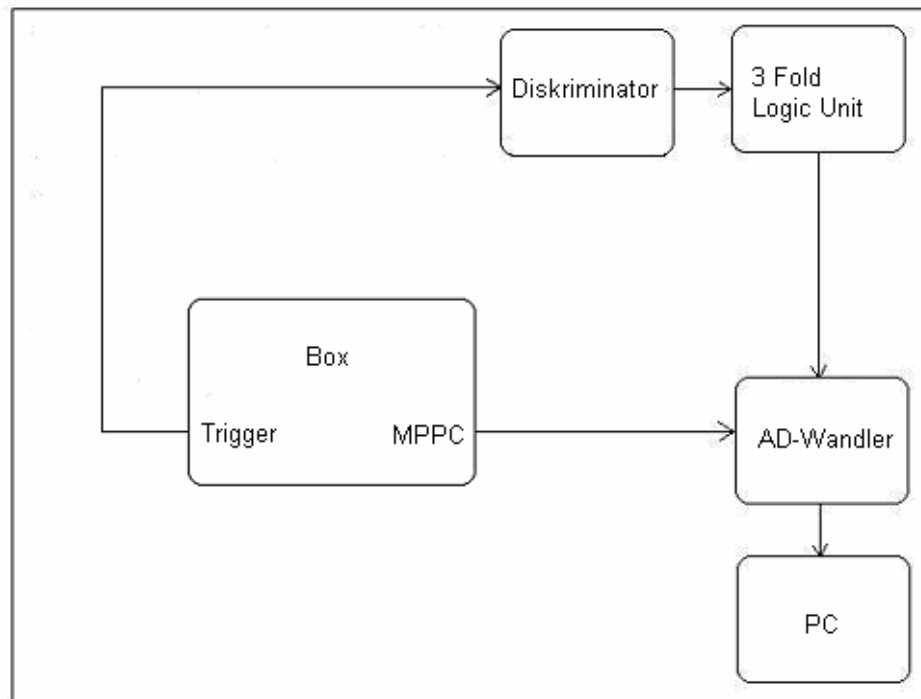


Bild 5.1: Blockschaltbild des Messaufbaus zur Messung der Lichtausbeute

In Bild 5.2 ist die Plattform in der bereits erwähnten Box, siehe Kapitel 3.1.1, zur reproduzierbaren Befestigung des Multi Pixel Photon Counter (MPPC) und des Szintillators abgebildet. Der Szintillator ist mittig angebracht und wurde mit Reflexionsfolie umwickelt, um Lichtverluste zu verhindern. An einer Seite des Szintillators wurde ein 3mm großes Fenster als Kontaktfläche mit dem MPPC freigelassen.

Der MPPC kann an zwei Positionen mit dem Szintillator gekoppelt werden. Hierzu wird dieser in einen der beiden Stäbe gesetzt. Dies erlaubt eine feste aber dennoch auswechselbare reproduzierbare Verbindung. Der MPPC kann an folgenden Positionen angebracht werden: Rand der Szintillatorseite, bezeichnet als „edge“, und mittig auf der Szintillatorseite, bezeichnet als „middle“. Durch die Messungen an unterschiedlichen Positionen kann eine erste Aussage über die Uniformität des Lichtaustritts aus dem Szintillator getroffen werden.

Die Box enthält den in Kapitel 3.2.1 erklärten Trigger, der aus einem zweiten Szintillator und einem Photomultiplier aufgebaut ist, Bild 5.4.

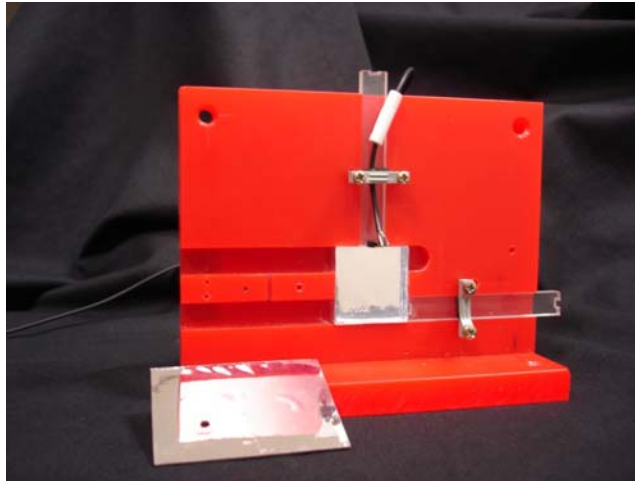


Bild 5.2: Plattform zur reproduzierbaren Befestigung des MPPC

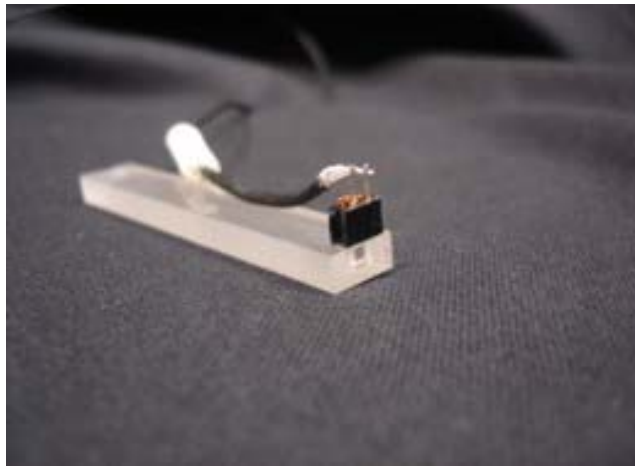


Bild 5.3: Befestigung des MPPC in den Stäbchen mit Verbindung zur elektronischen Auslese



Bild 5.4: Externer Trigger: Triggersystem aus Szintillator und Photomultierröhre hinter Plattform, vor der Plattform befindet sich eine Halterung für die radioaktive Quelle

5.2 Messung und Auswertung

5.2.1 Lichtausbeute

Die Messungen zur direkten Kopplung sollen mit denen der indirekten Kopplung (Kapitel 6) verglichen werden. Dazu war wiederum die Aufnahme des Signalspektrums und des Untergrundspektrums über den Arbeitsbereich in Abständen von 0,2V notwendig. In Bild 5.5 ist das Signalspektrum dargestellt, in Bild 5.6 das Untergrundspektrum.

Die Lichtausbeute bezeichnet die mittlere Anzahl detektierter Photonen pro MIP. Ein MIP ist ein Teilchen, das bei einer bestimmten kinetischen Energie gerade noch eine ionisierende Wirkung besitzt. Es deponiert den kleinst möglichen Energiebetrag im Material.

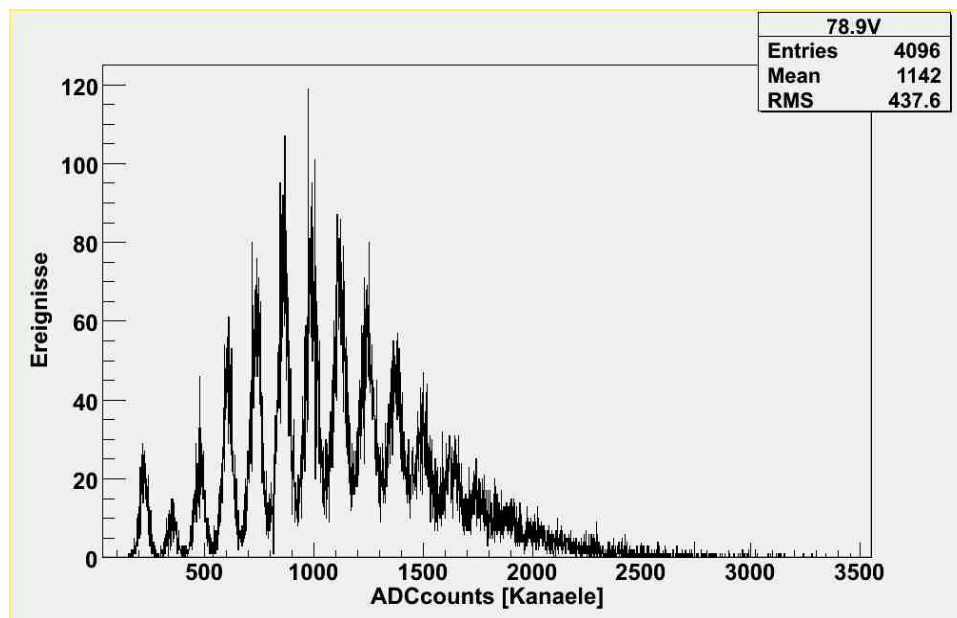


Bild 5.5: Signalspektrum mit direkter Kopplung bei $U_{Betr} = 78,1V$

Das erste Maximum beschreibt das Untergrundrauschen des Messaufbaus. Dieses wurde separat gemessen und in Bild 5.3 abgebildet.

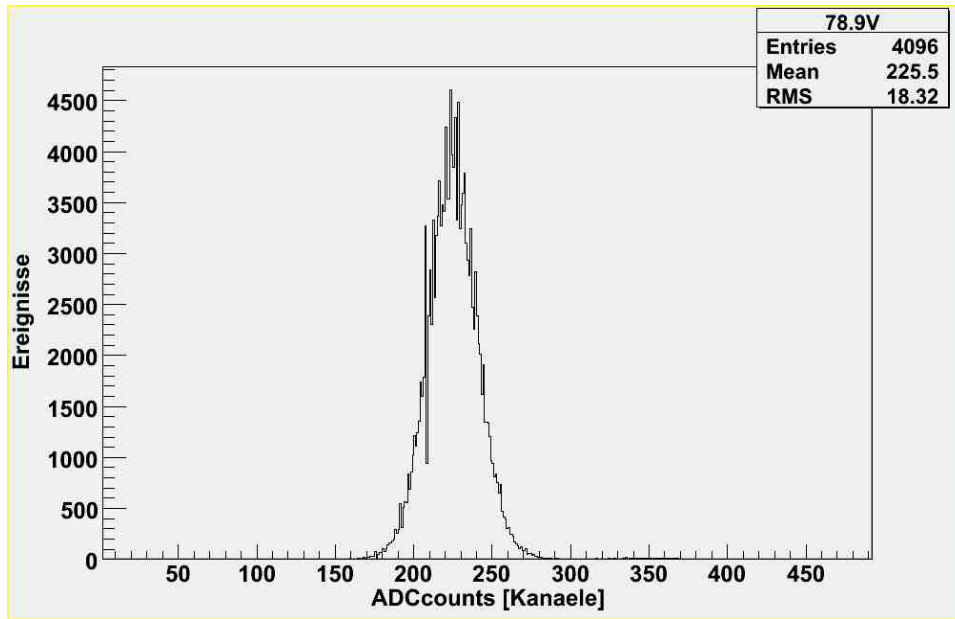


Bild 5.6: Untergrundspektrum mit direkter Kopplung bei $U_{Bet} = 80,1V$

Um die Ergebnisse der Lichtausbeute zu erhalten, wurden folgende Analysen durchgeführt. Als erstes wurde die Anzahl der gemessenen Photonen pro MIP in Abhängigkeit der Überspannung berechnet. Es sollten die Photonenzahl der MPPC untereinander verglichen werden, was u. a. eine Aussage über die Stabilität liefern konnte. Weiterhin wurden die Angaben der Lichtausbeute in Zusammenhang mit der Dunkelrate genutzt, um den optimalen Arbeitspunkt genauer bestimmen zu können.

Berechnung der Anzahl der detektierten Photonen pro MIP:

$$n_{\text{Photonen}} \approx \frac{\overline{\text{MIP}} - \overline{\text{Untergrund}}}{\overline{\text{Gain}}} \quad \text{Gl. 5-1}$$

Der Mittelwert der detektierten Photonenzahl wurde mit einem Gaußfit über die höchsten Maxima im Signalspektrum berechnet, Bild 5.7. Dies wurde ebenfalls beim Untergrundspektrum durchgeführt, Bild 5.8. Der Mittelwert der inneren Verstärkung, Gain, wurde mit Hilfe Multi-Gaußfits ermittelt, Bild 5.9.

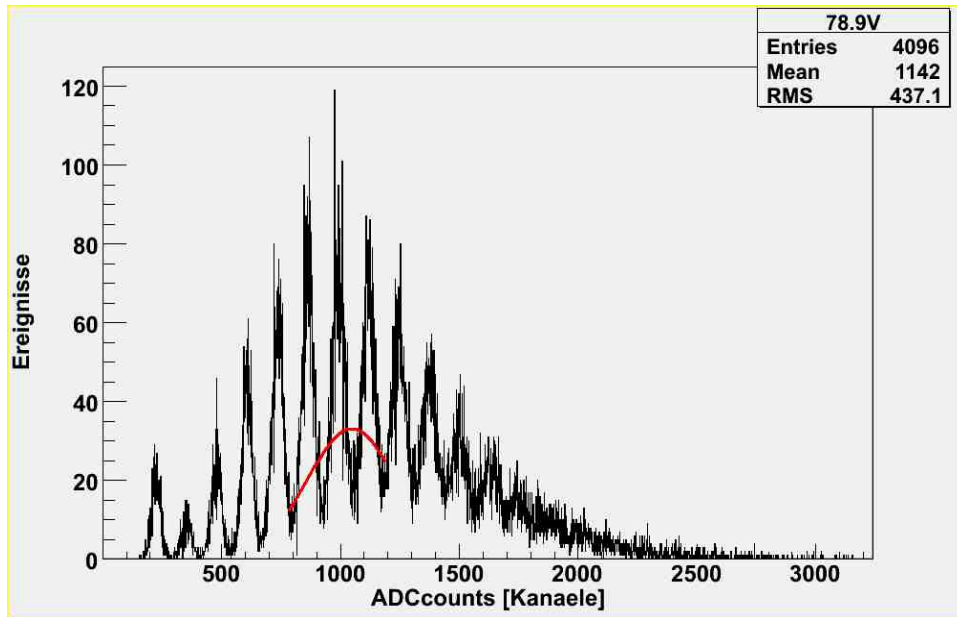


Bild 5.7: Mittelwert über Maxima, die den MPV bezeichnen im Signalspektrum

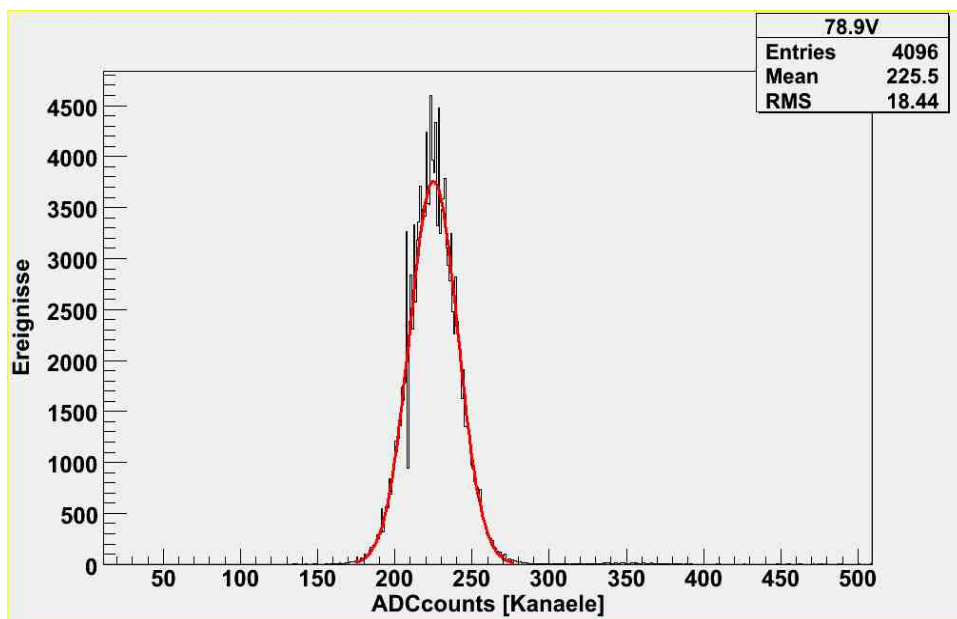


Bild 5.8: Mittelwertberechnung mit Gauß-Fit

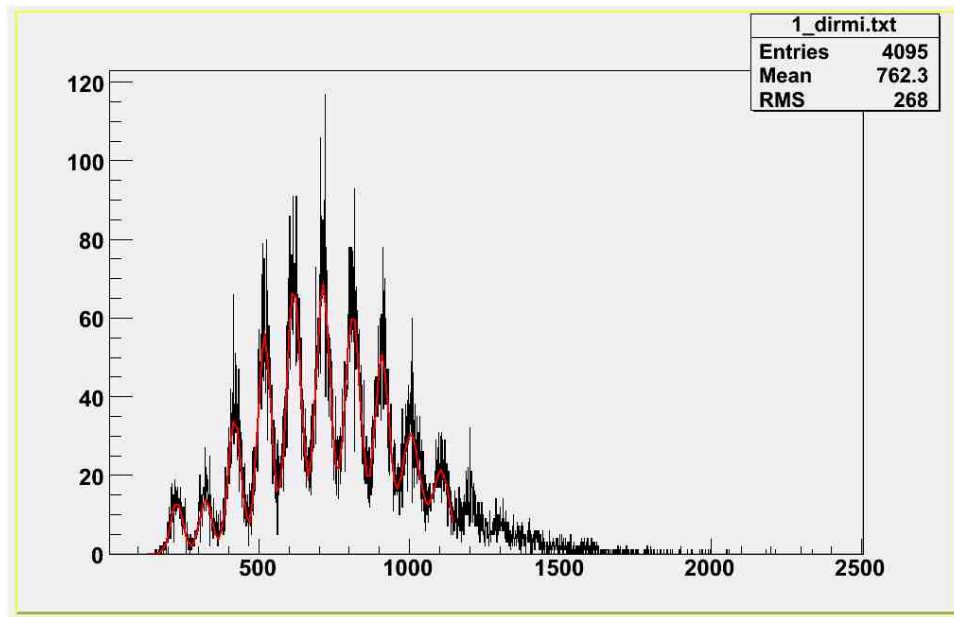


Bild 5.9: Multi-Gaußfit über Signalspektrum zur Berechnung der mittleren Verstärkung

Die Gaußsche Normalverteilung wird mit Gl.2 beschrieben [5.1].

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad \text{Gl. 5-2}$$

σ : Standardabweichung, bestimmt Breite und Höhe der Kurve

μ : Erwartungswert, legt die Lage des Maximums fest

σ^2 : Varianz der Zufallsvariablen x

Es wurde über jedem Maximum ein Gaußfit berechnet. Hieraus ergaben sich die Positionen jedes Maximums. Da die Verstärkung aus der Differenz zweier Maxima hervorgeht, wurde der Mittelwert der Verstärkung über alle Differenzen ermittelt.

Setzt man die Ergebnisse für \overline{MIP} , $\overline{Untergrund}$ und \overline{Gain} in Gl.1 ein, erhält man die Anzahl der detektierten Photonen bzw. die Lichtausbeute pro MIP. Diese Berechnung wird für jede eingestellte Betriebsspannung in 0,2V-Schritten durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 5.10 als Lichtausbeute über der Überspannung dargestellt.

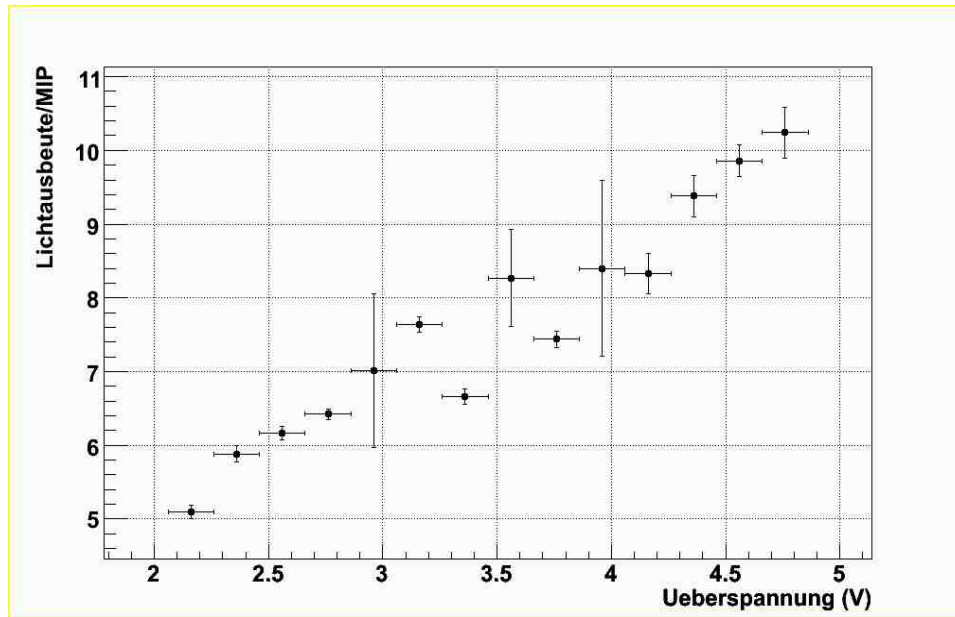


Bild 5.10: Lichtausbeute/MIP als Funktion der Überspannung, $U_{Durch} = 75,94V$. Die Lichtausbeute wird als Anzahl der detektierten Photonen angegeben.

Der Fehler für die Überspannung wurde wie folgt berechnet:

$$U_{\text{Über}} \pm \Delta U_{\text{Über}} = (U_{\text{Betr}} \pm \Delta U_{\text{Betr}}) - (U_{\text{Durch}} \pm \Delta U_{\text{Durch}}) \quad \text{Gl. 5-3}$$

Der Fehler des Digital Multimeters betrug lt. Datenblatt $\Delta U_{\text{Betr}} = \pm 0,05\% + 1 = 0,5V$.

Für Probestück 1 ergab sich die Durchbruchspannung ein Wert von $U_{\text{Durchbruch}} = (75,94 \pm 0,11)V$.

Für die Überspannung ergibt sich für das Beispiel $U_{\text{Betr}} = 78V$:

$$U_{\text{Über}} = U_{\text{Betr}} - U_{\text{Durch}} = 78V - 75,94V = 2,06V \quad \text{Gl. 5-4}$$

Unter Berücksichtigung der Fehlerfortpflanzung folgt für den Fehler der Überspannung:

$$\Delta U_{\text{Über}} = \sqrt{\Delta U_{\text{Betr}}^2 + \Delta U_{\text{Durch}}^2} = \sqrt{(0,05V)^2 + (0,11V)^2} = 0,12V \approx 0,1V \quad \text{Gl. 5-5}$$

Um eine Aussage über die Stabilität des Messaufbaus und der Messungen treffen zu können, wurde eine solche Messreihe nochmals aufgenommen und beide Messreihen in Bild 5.11 dargestellt. Wie Bild 5.11 bestätigt, sind die Ergebnisse, bei einer Streuung

von etwa 3%, sehr ähnlich. Die großen Fehler zur Lichtausbeute lassen sich auf teils schlechte Gauß-Fits zurückführen.

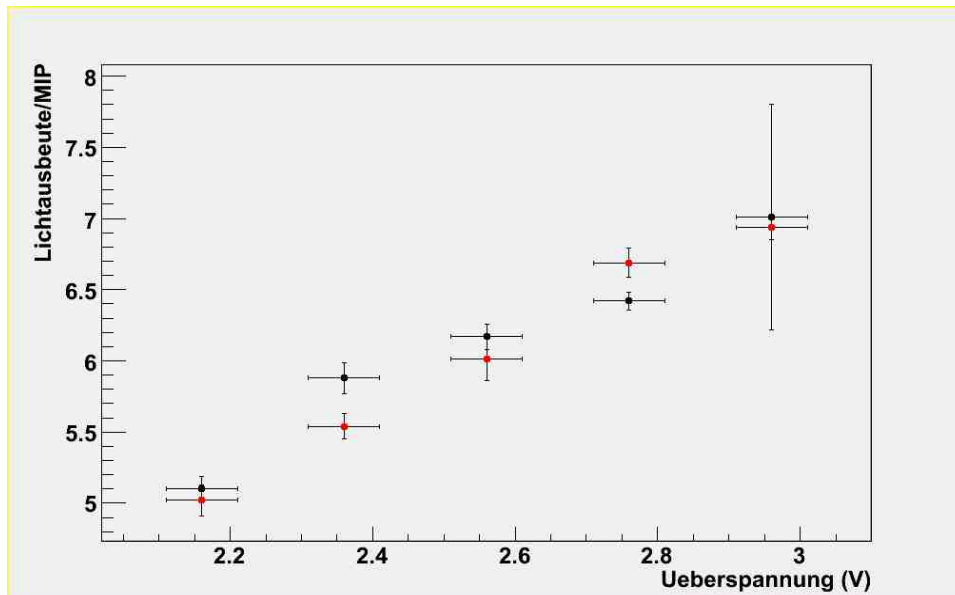


Bild 5.11: Prüfung der Stabilität der Messung anhand der Lichtausbeute als Funktion der Überspannung bzgl. auf $U_{\text{Durch}} = 75,94V$. Stabile Messungen sind bis 3V Überspannung und einer Streuung von etwa 3% möglich. Der große Fehler des letzten Messpunktes ist durch einen schlechten Gaußfit zu erklären. Die Lichtausbeute wird als Anzahl der detektierten Photonen angegeben.

5.2.2 Betrachtung der Mengenanteile von Signal- und Untergrundspektrum für unterschiedliche Spannungen

Um über die Einsetzbarkeit der MPPC im Kalorimeter eine Aussage treffen zu können, wurde betrachtet, bei welcher Betriebsspannung das Signalspektrum den höchsten Anteil Signal und den geringsten Anteil der Dunkelrate besitzt. In Bild 5.12 wird gezeigt, wie sich Signal und Untergrund überlappen können.

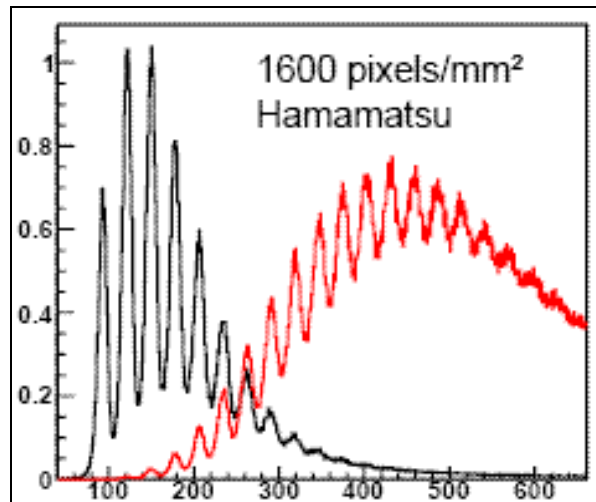


Bild 5.12: Überlagern von Untergrundspektrum (schwarz) und Signalspektrum (rot) als Beispiel

Für eine Abschätzung musste als erstes die Dunkelrate bestimmt werden, was über die Betrachtung des Untergrundspektrums geschah. Die sich hieraus ergebenden Ergebnisse werden auf das Signalspektrum angewendet und dann die Effizienz errechnet.

Um die Dunkelrate zu ermitteln, werden auf der Abszisse des Untergrundspektrums Punkte n_i gesetzt. Die Wahl der Punkte n_i orientierte sich anhand der Minima und Maxima im Signalspektrum. An diesen Punkten sollten Schnitte im Spektrum gemacht werden, die als Startwerte für die Flächenberechnung dienen sollten. Die gewählten Punkte lauten:

$$n_1 - n_7 = 0,5 \text{ Pixel} - 3,5 \text{ Pixel in } 0,5 \text{ Pixel-Schritten}$$

Der Untergrund wie auch die einzelnen Maxima im Signalspektrum entsprechen einer Gaußverteilung. Über das Untergrundspektrum wurde dessen Gesamtfläche mit einem Fit in den Grenzen 0 bis 4096 AD-Wandler-Kanälen über die Aufsummierung der Maxima berechnet:

$$A_{\text{Untergrund}} = \sum_0^{4096} f(x)$$

Gl. 5-6

Über die durch das Setzen der Schnitte neu entstandenen Bereiche wurde dann ebenfalls die Fläche in den Grenzen Schnittpunkt n_i bis 4096 berechnet.

$$A_{\text{Schnitt}} = \sum_{n_i}^{4096} f(x) \quad \text{Gl. 5-7}$$

Werden die beiden Integrale aus Gl.6 und Gl.7 ins Verhältnis gesetzt, so erhält man hieraus die Dunkelrate, inkl. Crosstalk. Da sich die Abschätzung dieser Dunkelrate auf das gemessene Signalspektrum und den gemessenen Untergrund bezieht, wird durch die Dauer des Gates geteilt, welches für diese Messungen benutzt wurde. Es betrug $t_{\text{gate}} = 60\text{ns}$.

$$\text{Dunkelrate} = \frac{A_{\text{Schnitt}}}{t_{\text{gate}}} \frac{A_{\text{Untergrund}}}{t_{\text{gate}}} \quad \text{Gl. 5-8}$$

Trägt man im Anschluss die Ergebnisse der Dunkelraten als Funktion der Cuts auf ergibt sich Bild 5.13.

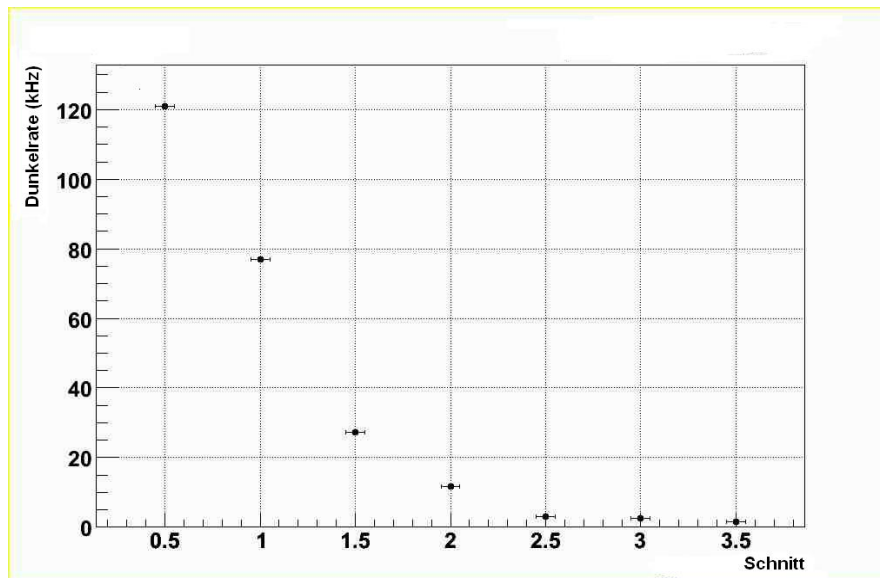


Bild 5.13: Dunkelrate als Funktion der Schnitte. Die Lichtausbeute wird als Anzahl der detektierten Photonen angegeben.

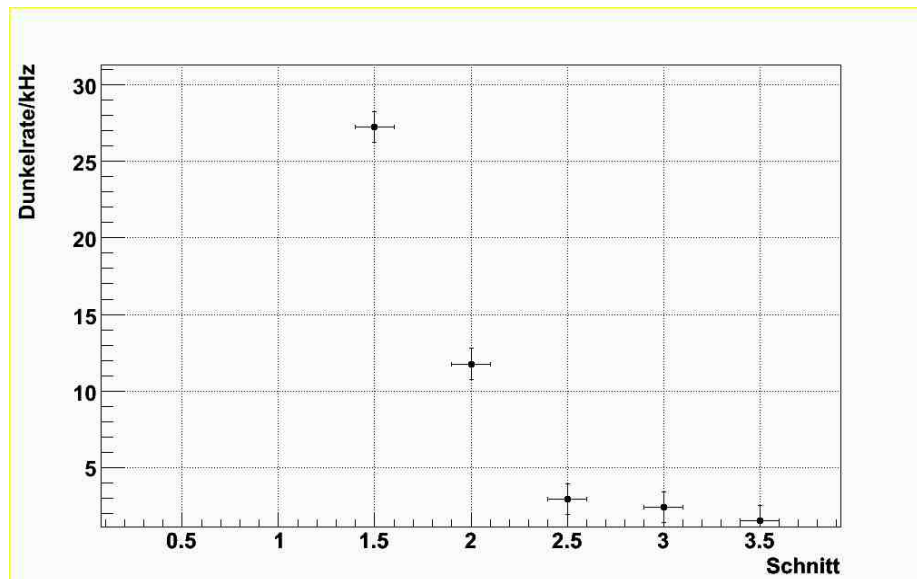


Bild 5.14: Dunkelrate als Funktion der Schnitte. Die Lichtausbeute wird als Anzahl der detektierten Photonen angegeben. Vergrößerter Ausschnitt, da sich die Dunkelrate der ersten beiden Punkte bei $n = 0,5$ und $n = 1$ weit außerhalb der geforderten Grenze von 3kHz befinden.

Bild 5.13 wurde vergrößert, weil die ersten beiden Ergebnisse der Dunkelrate zu hoch waren und so für die Auswertung nicht benutzt werden konnten. Für den Kalorimeter-Prototyp wird ein Grenzwert für die Dunkelrate gefordert, der 3kHz beträgt. Anhand Bild 5.14 lässt sich jetzt der Schnitt bestimmen, an dem die genannte Forderung erfüllt wird, der da lautet $n_5 = 2.5$.

Der Schnitt von $n_i = 2,5$ wird auf das Signalspektrum angewendet und jeweils die Fläche über das gesamte Spektrum und über den Anteil ab dem Schnitt n_i berechnet (siehe Bild 5.15).

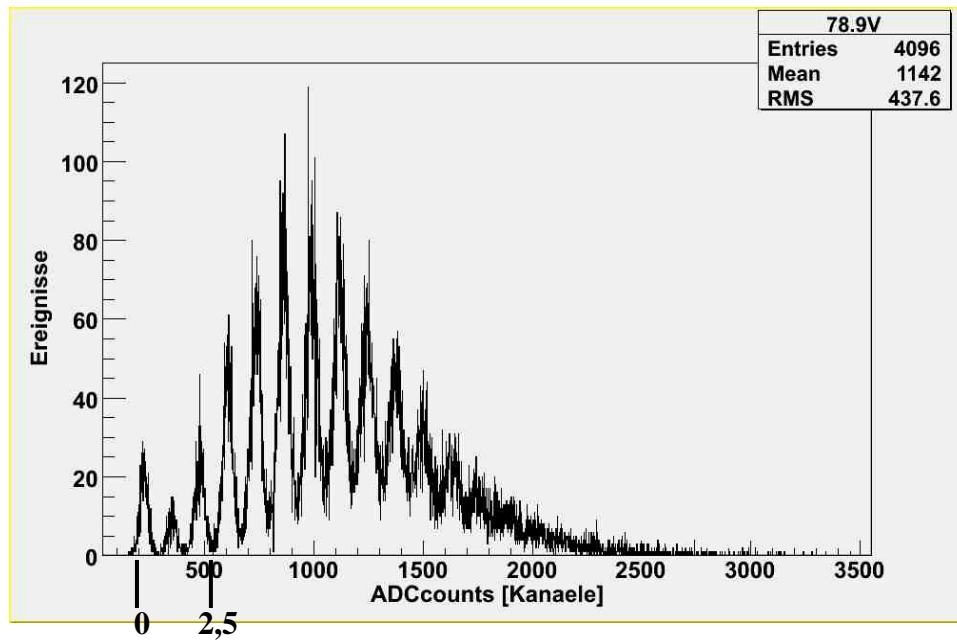


Bild 5.15: Anwendung des Schnitts von 2,5 Pixeln auf das Signalspektrum

$$A_1 = \sum_0^{4096} f(x) \quad \text{Gl. 5-9}$$

$$A_2 = \sum_{2,5}^{4096} f(x) \quad \text{Gl. 5-10}$$

Hierbei entspricht die untere Grenze von 2,5 der Kanal-Anzahl von etwa 540 Kanälen.

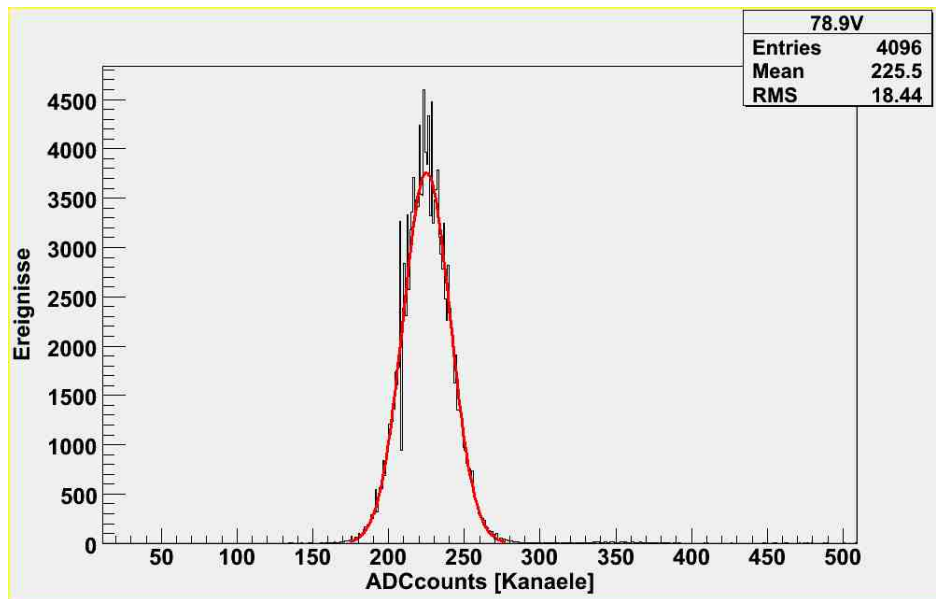


Bild 5.16: Gaußfit über Untergrund

$$A_{\text{Untergrund}} = \sum_{170}^{280} f(x)$$

Gl. 5-11

Vom Ergebnis aus Gl.9 musste dann $A_{\text{Untergrund}}$ abgezogen werden. Werden nun die beiden Anteile des Spektrums abzüglich der Fläche des Untergrundes ins Verhältnis gesetzt, ergibt sich daraus der prozentuale Anteil des Signals zum gesamten Spektrum.

$$\varepsilon = \frac{A_2}{A_1 - A_{\text{Untergrund}}}$$

Gl. 5-12

Die Effizienzen ε der direkten Kopplung als Funktion der Überspannungen im Arbeitsbereich von 2,4V bis 3,4V zeigt Bild 5.17.

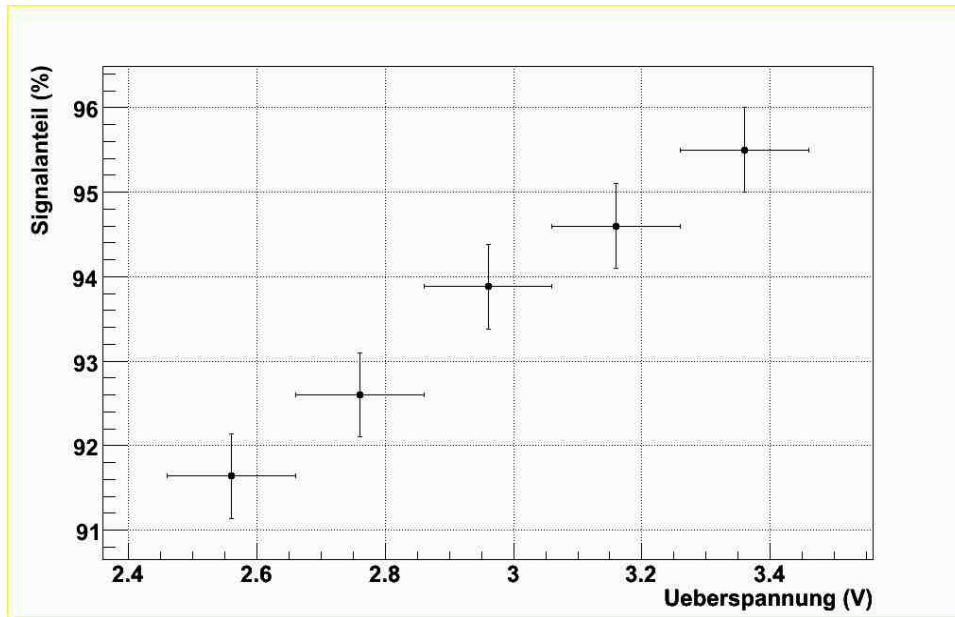


Bild 5.17: Effizienz als Funktion der Überspannung. Die Lichtausbeute wird als Anzahl der detektierten Photonen angegeben. $U_{Durch} = 75,94V$.

Es zeigt sich eine Effizienz ϵ von etwa 95% für eine Überspannung von $U_{\text{über}} \approx 3,3V$ bei einem Schnitt von 2,5. Es wurden auch die Effizienzwerte zweier nachfolgender Überspannungen berechnet. Bei den beiden Spannungen war das Rauschen bei einem Schnitt von 2,5 zu hoch. Sie wurden nicht in die Auswertung einbezogen. Ein Nutzanteil des MPPC-Signals von $\epsilon = 95\%$ ist für die Nutzung im Prototyp ein ausreichender Wert.

5.2.3 Crosstalkanteil

Die Größe des Crosstalks muss für die Analyse der gemessenen Daten im Detektor bekannt sein. Das Signalspektrum besteht zu einem Teil aus dem Untergrundrauschen und zum anderen aus dem Signal selbst. Das Untergrundrauschen setzt sich aus dem elektronischen Rauschen, der Dunkelrate und dem Crosstalk zusammen. Eine Verteilung des gesamten Rauschens im Signal kann wie in Bild 5.18 angenommen werden:

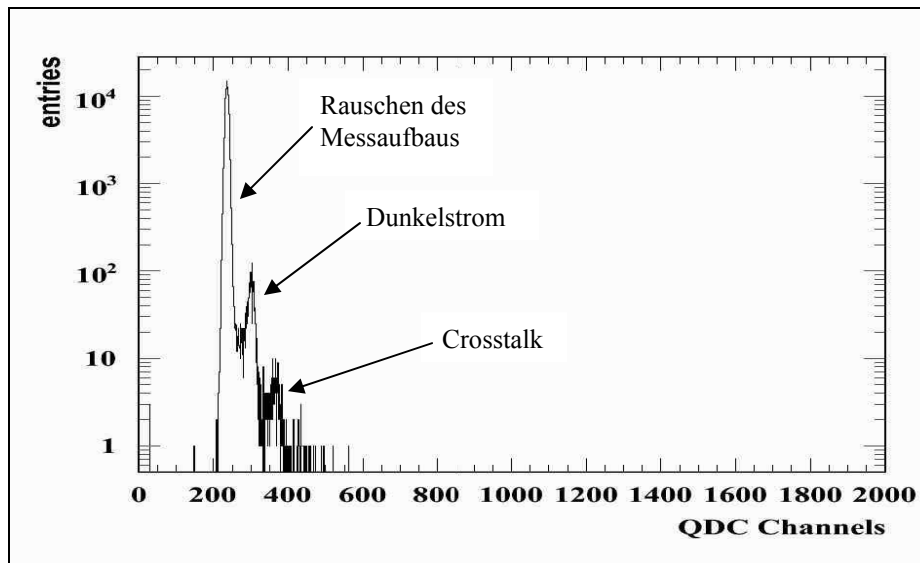


Bild 5.18: Verteilung des Untergrundrauschens auf elektronisches Rauschen, Dunkelstrom, Crosstalk

Das erste Maximum beschreibt ausschließlich das Untergrundrauschen des Messaufbaus. Es ist anzunehmen, dass das zweite Maximum seine Ursache im Dunkelstrom und das dritte Maximum seine Ursache im Crosstalk findet.

Zur Berechnung des quantitativen Crosstalkanteils werden zwei Schnitte gesetzt. Ab dem Schnitt von 0,5 wurde nur noch die Dunkelrate betrachtet. Ein zweiter Schnitt wurde bei 1,5 Maxima gesetzt, ab dem nur noch der Crosstalk zu betrachten ist. Im Anschluss wurden die Flächen über das Rauschsignal berechnet und die Ergebnisse ins Verhältnis gesetzt.

$$x_{\text{Crosstalk}} = \frac{\sum_{1,5}^{\infty} f(x)}{\sum_{0,5}^{\infty} f(x)} \quad \text{Gl. 5-13}$$

Für die Grenzen sind die jeweilige Anzahl der Kanäle für Schnitt 0,5 und 1,5 im Spektrum des Rauschsignals anzugeben. Für die zweite Grenze wurde die Gesamtzahl der Kanäle, $n = 4096$, eingesetzt. Bild 5.19 zeigt eine Funktion des Crosstalks für unterschiedliche Überspannungen.

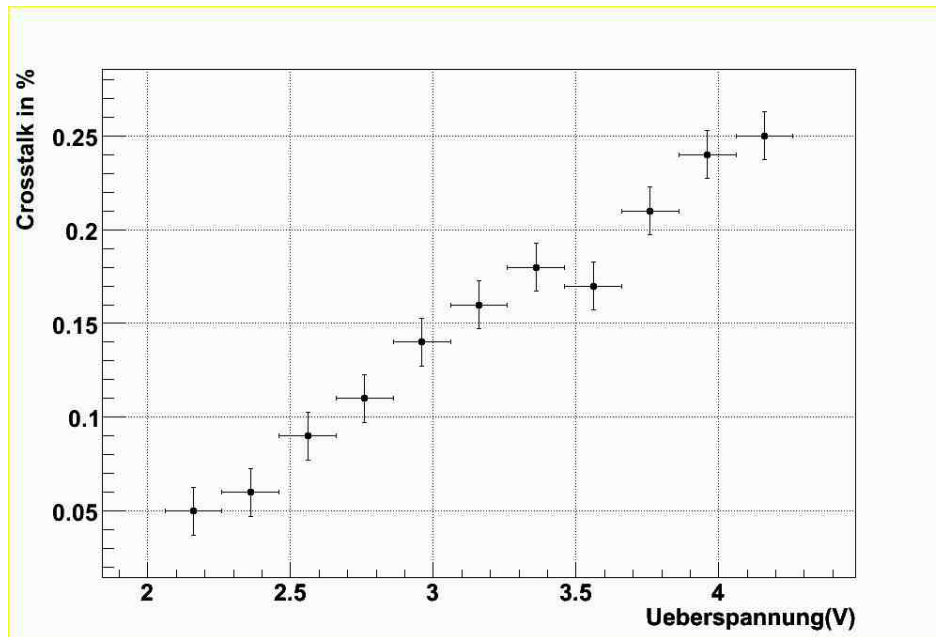


Bild 5.19: Quantisierung des Crosstalks, Crosstalkmenge in % als Funktion der Überspannung. Die Lichtausbeute wird als Anzahl der detektierten Photonen angegeben. $U_{Durch} = 75,94V$.

Der Anteil des Crosstalks beträgt etwa 10 bis 20% für einen Überspannungsbereich zwischen 2,7 und 3,4V. Wird der Crosstalk nur bei einer Überspannung von etwa 3V betrachtet, ergibt sich ein Crosstalkanteil von 15%.

5.2.4 Uniformität der Lichtverteilung im Szintillator

Es sollte eine Aussage darüber getroffen werden, an welcher Szintillatorposition der MPPC das meiste Licht detektieren kann. Die Lichtverteilung im Szintillator kann aber nicht direkt gemessen werden. Aus diesem Grund wurden Messungen des Spektrums und des Untergrundrauschens zur Lichtausbeute an zwei unterschiedlichen Positionen durchgeführt, Ecke und Mitte.

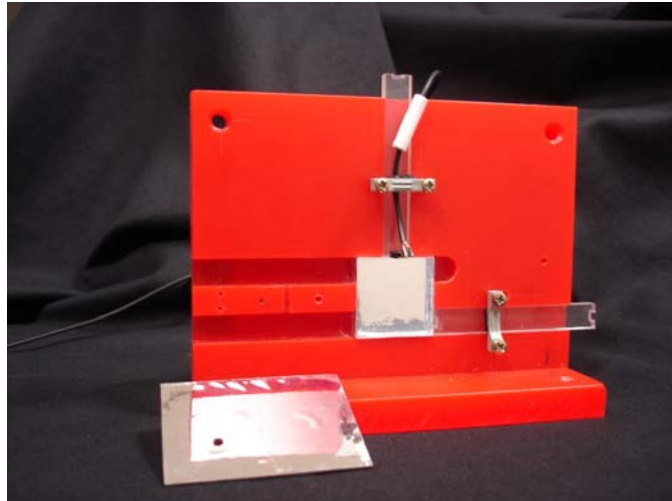


Bild 5.20: Plattform zur Verdeutlichung der Positionen Ecke und Mitte am Szintillator

Beim Vergleich der Lichtausbeuten zweier Messungen der ersten MPPC-Probe ergibt sich Bild 5.21. Die Messungen wurden mit der gleichen Probe eines MPPC und dem gleichen Szintillator durchgeführt. Es wurden die prozentualen Unterschiede der Messpunkte beider Messreihen berechnet. Bei der Mittelung der Ergebnisse ergab sich ein Unterschied der Messwerte in beiden Positionen von etwa 4,7%.

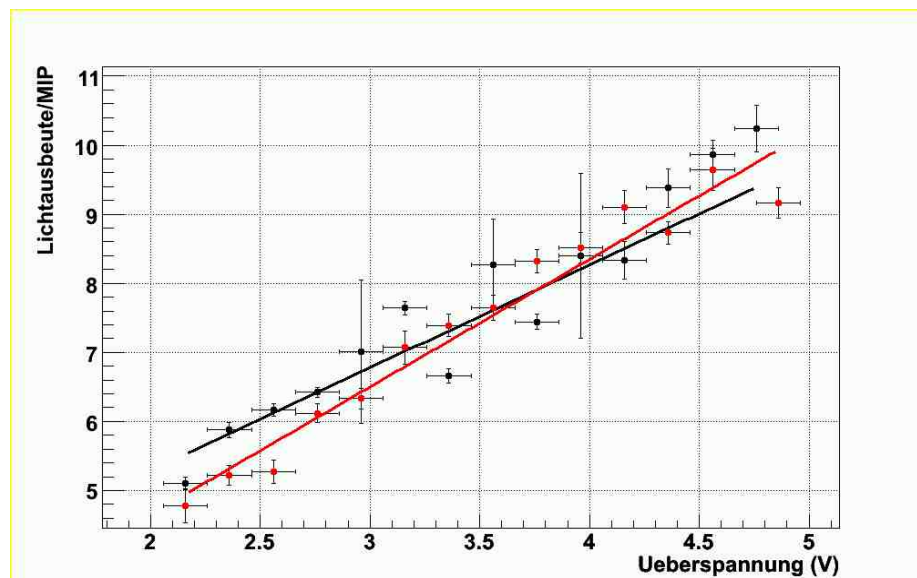


Bild 5.21: Vergleich der MPPC-Positionen Ecke und Mitte am Szintillator, schwarz = Mitte, rot = Ecke, erste MPPC-Probe. Die Lichtausbeute wird als Anzahl der detektierten Photonen angegeben. $U_{\text{Durch}} = 75,94\text{V}$.

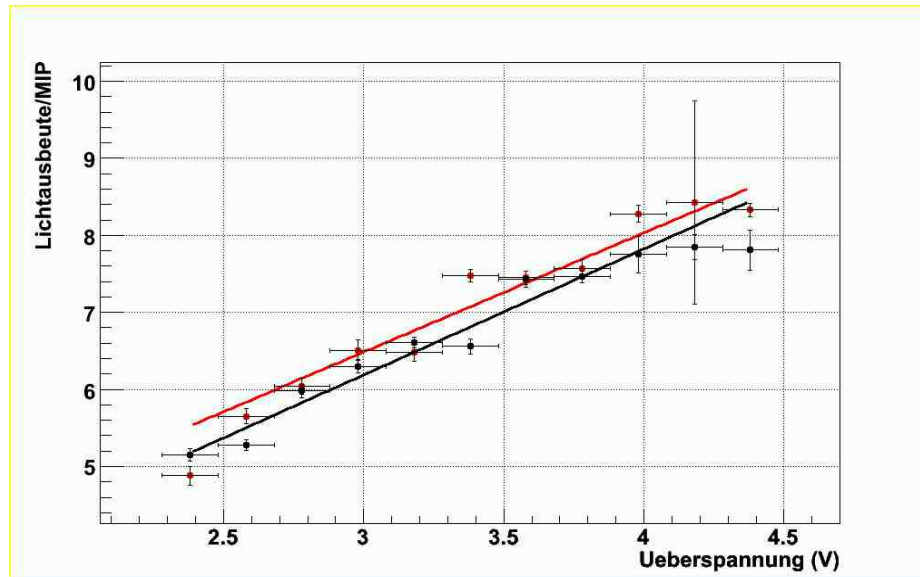


Bild 5.22: Vergleich der MPPC-Positionen Ecke und Mitte am Szintillator, schwarz = Mitte, rot = Ecke, zweite MPPC-Probe. Die Lichtausbeute wird als Anzahl der detektierten Photonen angegeben. $U_{Durch} = 75,94V$.

Der Vergleich wurde auch für die zweite MPPC-Probe durchgeführt. Hier ergibt sich ein Unterschied der Messwerte von etwa 2,4%.

Mit diesen beiden Untersuchungen lässt sich also sagen, dass die Position keine Relevanz bzgl. der Lichtverteilung im Szintillator hat. Für eine eindeutige Aussage müssten nochmals genauere Messungen durchgeführt werden, da hier die Fehler für einige Punkte doch sehr groß erscheinen. Zudem scheint es, dass die Messungen von so genannten Ausreißern zu höheren Spannungen hin geprägt sind.

6 Indirekte Kopplung mit einem Wellenlängenschieber

6.1 Allgemeines

Die indirekte Kopplung unterscheidet sich zu der direkten durch einen Wellenlängenschieber (WLS), der im Szintillator eingelassen ist. Hierfür wurde ein Graben in den Szintillator eingearbeitet, der mit einem Radius diagonal durch den Szintillator verläuft.

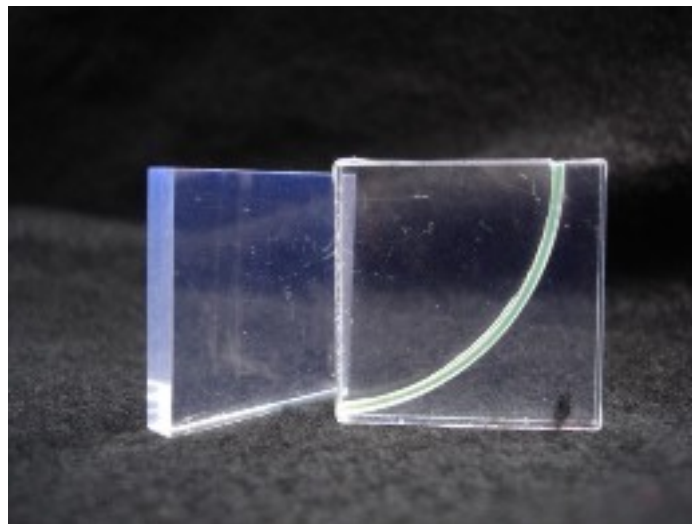


Bild 6.1: Szintillatoren für direkte und indirekte Kopplung

Die Resultate dieser Messung wurden zum Vergleich mit den vorangegangenen Messungen zur direkten Kopplung durchgeführt. Der Vorteil, der bei Verwendung eines Wellenlängenschiebers resultiert, ist die Tatsache, dass dem MPPC mehr Licht zugeführt werden kann. Das durch Strahlung entstandene Licht bewegt sich unregelmäßig im Szintillator. Durch den Wellenlängenschieber wird Licht, das auf diesen auftrifft direkt zum MPPC geleitet, während bei der direkten Kopplung das Licht zufällig auf den MPPC trifft. Zusätzlich ist die Fläche, mit der Licht aufgenommen werden kann, beim WLS größer als die des MPPC. Mit diesen Tatsachen wird eine höhere Photonennachweiss-effizienz für die indirekte Kopplungsmethode erwartet.

6.2 Messung und Auswertung

Der Messaufbau unterscheidet sich zu dem der direkten Kopplung nur durch den Wellenlängenschieber im Szintillatorinneren. Es wurden Spektren zur Lichtausbeute des MPPC und Untergrundspektren über einen Spannungsbereich von 78,5V bis 80,1V aufgenommen. Bild 6.2 zeigt die Lichtausbeute als Funktion der Überspannung.

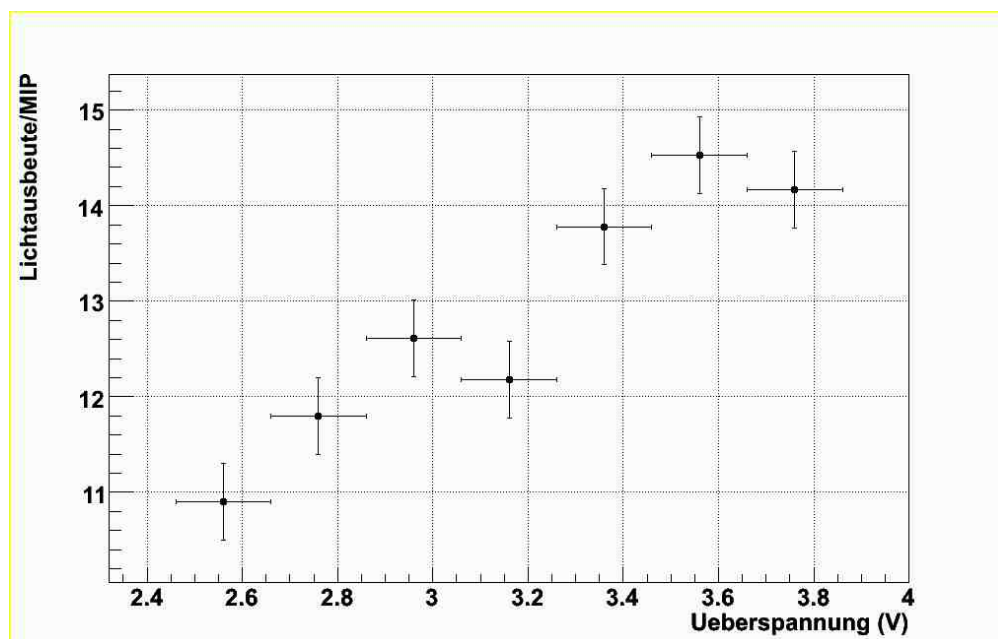


Bild.6.2: Lichtausbeute als Funktion der Überspannung, indirekte Kopplung. Die Lichtausbeute wird als Anzahl der detektierten Photonen angegeben.

6.3 Vergleich der Kopplungsmethoden

Zum Vergleich von direkter und indirekter Kopplung des gleichen Probestückes wurden die Funktionen für beide Kopplungsmethoden aufgetragen, Bild 6.3.

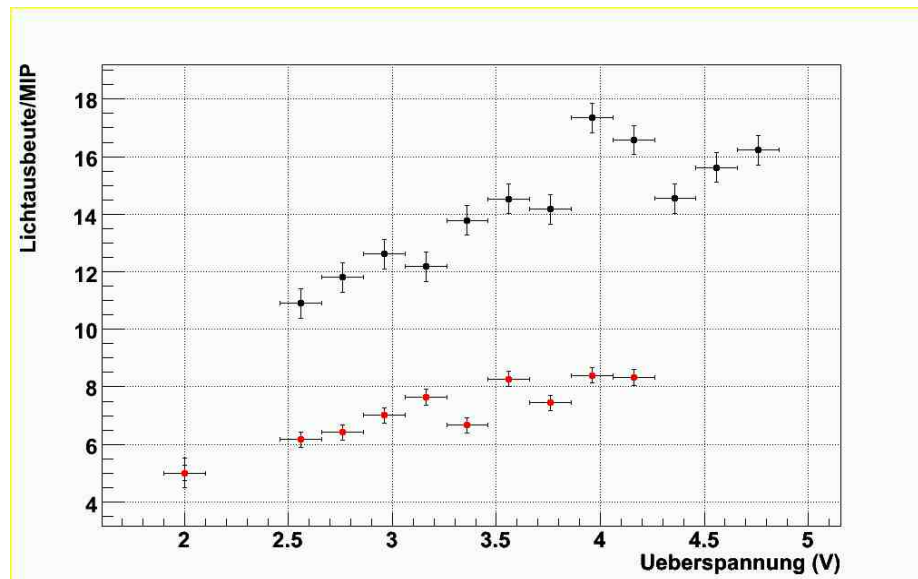


Bild 6.3: Lichtausbeute beider Kopplungsmethoden im Vergleich, rot = direkte Kopplung, schwarz = indirekte Kopplung. Die Lichtausbeute wird als Anzahl der detektierten Photonen angegeben.

Das Ergebnis lässt sich mit der Betrachtung der geometrischen Effizienz erklären. Die Anzahl detektierter Photonen für beide Kopplungsmethoden wird mit Gl. 1 bzw. 2 berechnet.

$$n_{dc} = PDE(\lambda)_b \cdot N_{dc} \cdot \varepsilon_{SiPM} \quad \text{Gl. 6-1}$$

$$n_{id} = PDE(\lambda)_g \cdot N_{ic} \cdot \varepsilon_{fibre} \quad \text{Gl. 6-2}$$

Index dc : direkte Kopplung

Index ic : indirekte Kopplung

$n_{dc, ic}$: detektierte Photonen für direkte und indirekte Kopplung

$N_{dc, ic}$: eingespeiste Photonen, wobei $N_{dc} = N_{ic}$

$PDE(\lambda)_{b, g}$: erreichte Photonendetektionseffizienz

$\varepsilon_{fibre, SiPM}$: geometrische Effizienz für beide Kopplungsmethoden

Die Gleichungen 1 und 2 werden zueinander ins Verhältnis gesetzt.

$$\frac{n_{dc}}{n_{ic}} = \frac{PDE(\lambda)_b \cdot N_{dc} \cdot \varepsilon_{dc}}{PDE(\lambda)_g \cdot N_{ic} \cdot \varepsilon_{ic}} \quad \text{Gl. 6-3}$$

$$N_{dc} = N_{ic}$$

$$\frac{n_{dc}}{n_{ic}} = \frac{PDE(\lambda)_b \cdot \varepsilon_{dc}}{PDE(\lambda)_g \cdot \varepsilon_{ic}} \quad \text{Gl. 6-4}$$

Unter der Bedingung $\frac{\varepsilon_{dc}}{\varepsilon_{ic}} \neq 0$ wird Gl. 4 nach $\frac{\varepsilon_{dc}}{\varepsilon_{ic}}$ aufgelöst.

$$\frac{\varepsilon_{dc}}{\varepsilon_{ic}} = \frac{PDE(\lambda)_g \cdot n_{dc}}{PDE(\lambda)_b \cdot n_{ic}} \quad \text{Gl. 6-5}$$

In Bild 6.4 wird die Detektionseffizienz von Photonen (PDE) des blausensitiven MPPC beschrieben. Es ist zu sehen, dass die PDE für eine Wellenlänge von $\lambda = 400\text{nm}$ höher ist als für $\lambda = 500\text{nm}$. Jetzt lassen sich die Anzahl der detektierten Photonen aus Bild 6.3 sowie die Werte der Photonendetektionseffizienz (PDE) aus Bild 6.4 in Gl. 5 einsetzen. Die Werte für die Photonenzahl beziehen sich auf eine Überspannung von $U_{\text{Über}} \approx 3\text{V}$.

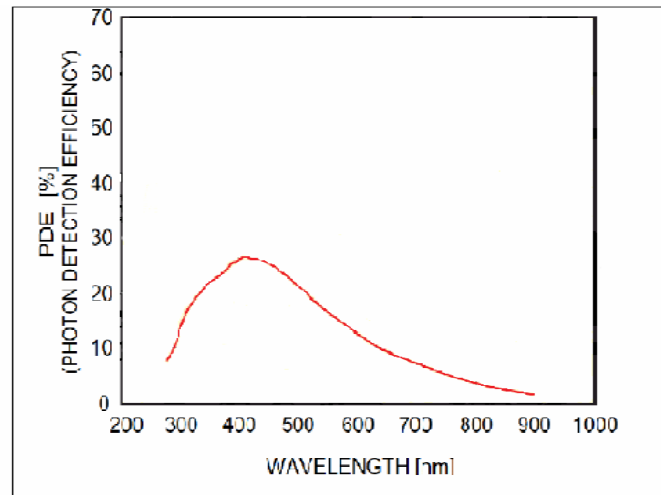


Bild 6.4: Verlauf der Photonennachweiseffizienz als Funktion der Wellenlänge

$n_{dc} = 7$ Photonen

$n_{ic} = 13$ Photonen

$PDE_b(\lambda = 400\text{nm}) \approx 25\%$

$PDE_g(\lambda = 500\text{nm}) \approx 20\%$

$$\frac{\varepsilon_{dc}}{\varepsilon_{ic}} = \frac{20\% \cdot 7 \text{ Photonen}}{25\% \cdot 13 \text{ Photonen}} = 0.43 \approx 43\%$$

Mit diesen Berechnungen konnte gezeigt werden, dass sich aufgrund der Geometrie des Wellenlängenschiebers und seiner lichtsammelnden und führenden Eigenschaften eine höhere Lichtausbeute für die indirekte Kopplung ergibt als für die direkte Kopplung.

7 Vergleich unterschiedlicher MPPC

Nach Abschluss der Messungen des 1600-Pixel-MPPC stand später auch eine andere Sorte MPPC zur Verfügung. Wie schon bei den ersten Probestücken handelt es sich um 5 Probestücke des blausensitiven MPPC der Firma Hamamatsu. Der Unterschied zu den bisher Untersuchten ist die Anzahl der Pixel; hier sind es 400.

Tabelle 7.1: Spezifikationen durch Hamamatsu bei $T_a = 25^\circ\text{C}$ [7.1]

Parameter	1600-Pixel-MPPC	400-Pixel-MPPC
<i>Effektive Fläche (mm^2)</i>	1	1
<i>Pixel-Größe ($\mu\text{m} \cdot \mu\text{m}$)</i>	25*25	50*50
<i>Photon-Detektions-Effizienz (%)</i>	25	50
<i>Betriebsspannung (V)</i>	77±10	70±10
<i>Verstärkung</i>	$2.75 \cdot 10^5$	$7.5 \cdot 10^5$

Zur Bildung der Photon-Detektions-Effizienz wird eine definierte Menge Licht auf die beiden unterschiedlichen MPPC gestrahlt und die Lichtausbeute gemessen. Die Pixelmaße und damit die lichtensitive Fläche sind größer und damit verantwortlich für eine höhere Lichtausbeute beim MPPC mit 400 Pixeln.

7.1 Charakterisierung

Die Messungen zur Charakterisierung wurden auf die gleiche Weise durchgeführt wie schon bei den 1600-Pixel-Modellen in Kapitel 4. Der Arbeitsbereich ergab sich zu 75,6 bis 76,6V. Für die Durchbruchspannung und die Kapazität wurden die in Kapitel 4 gezeigten Berechnungen für ein Probestück durchgeführt:

Tabelle 7.2: Vergleich von Durchbruchspannung und Kapazität der MPPC-Modelle

	400-Pixel-MPPC	1600-Pixel-MPPC
Durchbruchspannung U_{Durch} in V	$75,03 \pm 0,51$	75.9 ± 0.47
Kapazität in fF	$261 \pm 13,1$	23.3 ± 1.16

Die höheren Kapazitäten erklären sich durch:

$$C \approx \frac{A}{d} \quad \text{Gl. 7-1}$$

A: Pixelfläche

d: Breite der Raumladungszone

Werden die Fläche der Gräben und Widerstände vernachlässigt, lassen sich die Pixelmaße wie folgt berechnen:

Der MPPC hat eine Fläche von 1mm^2 . Vereinfachend wird gesagt, dass die Seiten jeweils 1mm lang sind. Wird nun weiter angenommen, dass sich die Pixel mit 20×20 auf die Fläche aufteilen, kann die Länge eines Pixels berechnet werden mit $l_{\text{Pixel}} = 1\text{mm}/20 \text{ Pixel}$. Daraus ergibt sich eine Länge von $l_{400} = 50\mu\text{m}/\text{Pixel}$ für den 400-pixel-MPPC. Für den 1600-Pixel-MPPC ergibt sich auf diese Weise eine Pixellänge von $l_{1600} = 25 \mu\text{m}/\text{Pixel}$.

Dann ergibt sich für den 400er MPPC eine viermal größere Kapazität als für den 1600er MPPC, wenn davon ausgegangen wird, dass sich die Breite der Raumladungszone nicht ändert. Berechnet wurde für den 400er MPPC eine etwa 11mal größere Kapazität. Dies kann entweder dadurch erklärt werden, dass die lichtensitive Fläche eines Pixels kleiner ist, weil sich die Widerstände auf den Pixeln befinden. Oder die höhere Differenz hat ihre Ursache in der Änderung der Dicke der Raumladungszone, was aber nicht belegt werden kann.

Der lineare Bereich des 400-Pixel-Modells liegt zwischen 76 und $76,8\text{V}$. Die Dunkelrate ist in diesem Bereich 10 bis 50kHz groß. Bei dem 1600-Pixel-Modell lag der Arbeitsbereich höher, nämlich $78,1$ bis $81,3\text{V}$. Für diesen größeren Spannungsbereich beträgt die Dunkelrate 20 bis 180kHz . Die Dunkelraten beider MPPC verhalten sich ähnlich.

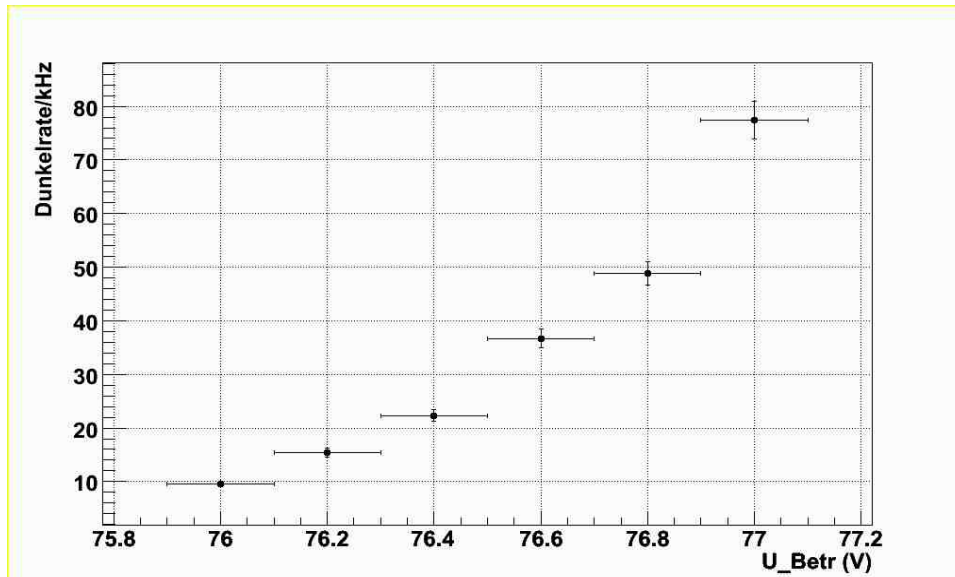


Bild 7.1: Dunkelrate als Funktion der Betriebsspannung, der Arbeitsbereich liegt zwischen 76 und 78,8V mit einer Dunkelrate von 120 bis 400kHz.

7.2 Lichtausbeute

Die höhere Lichtausbeute der 400-Pixel MPPC ist durch die größeren Pixelflächen zu erklären. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Pixel von einem Photon getroffen wird, steigt mit der Größe der Pixelfläche.

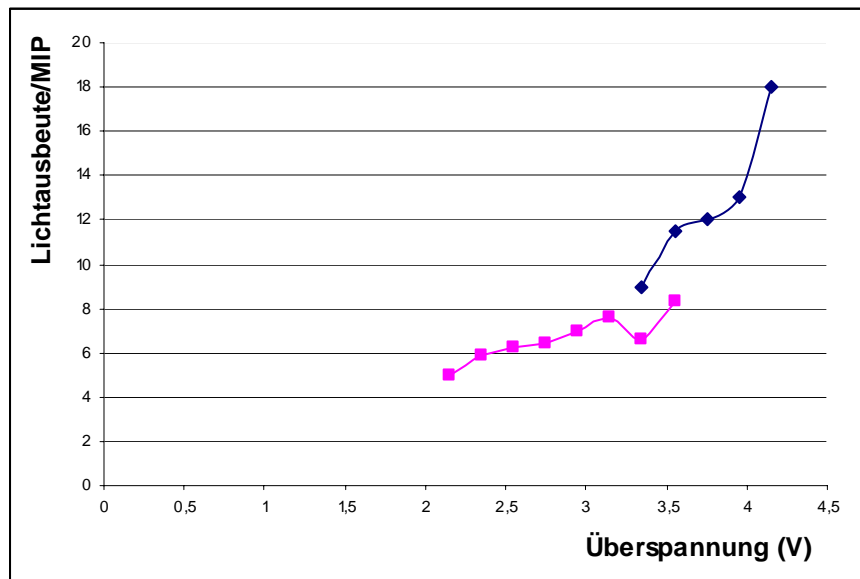


Bild 7.2: Vergleich der Lichtausbeute beider MPPC-Modelle, blau = 400-Pixel-MPPC, pink = 1600-Pixel-MPPC. Die Lichtausbeute wird als Anzahl der detektierten Photonen angegeben.

Vergleicht man die Lichtausbeuten der beiden MPPC-Modelle, so stellt sich die Frage, ob es sinnvoll ist, für den Kalorimeterprototyp den 400-Pixel-MPPC zu verwenden. Bei einem MPPC mit geringerer Pixelanzahl stellt sich aber schneller ein Sättigungseffekt ein, wenn alle Pixel gefeuert werden. In diesem Fall kann kein anderes Photon mehr detektiert werden. Der dynamische Messbereich ist bei einer größeren Pixelanzahl größer. Lässt sich also mit dem 1600-Pixel-MPPC für die Anwendung eine ausreichende Menge von Licht detektieren, könnte dieser die Forderungen des Konzepts des Hadronenkalorimeters besser erfüllen.

8 Uniformitätsuntersuchung des Teilchendurchgangsortes

8.1 Entwurf eines Kollimators

Da die Reflexionen im Szintillator unregelmäßig stattfinden, kann bisher keine konkrete Aussage über die Abhängigkeit der Lichtausbeute vom Eintrittsort der Elektronen im

Szintillator getroffen werden. Aus diesem Grund wurde ein Kollimator entworfen, der die Strahlung der Quelle begrenzt und auf einen schmalen Strahl vermindert. Entwurf und die Herstellung wurden in dieser Arbeit nur nachvollzogen und nicht selbst durchgeführt.

Beim Entwurf eines Kollimators ist vor allem darauf zu achten, dass das Material ausreichend dick ist. Ansonsten würde die durch Wechselwirkung entstandene Bremsstrahlung aus dem Material teilweise austreten können und das Messergebnis verfälschen. Um eine ausreichende Abschirmung entwerfen zu können, wurde die Reichweite von β -Teilchen in unterschiedlichen Materialien betrachtet.

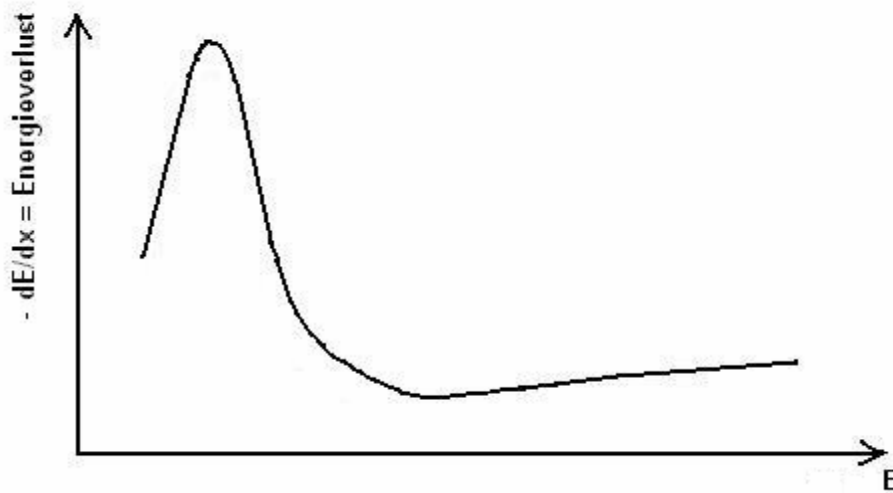


Bild 8.1: Energieverlust dE/dx als Funktion der kinetischen Energie eines geladenen Teilchens

In Bild 8.1 ist der Energieverlust eines Elektrons über seiner kinetischen Energie aufgetragen. Wenn ein geladenes Teilchen in Materie eintritt, beginnt es mit den Atomrümpfen des Materials durch Stoßionisation zu wechselwirken. Hat das Material eine hohe Dichte, wechselwirken die Teilchen stärker mit dem Material und die Reichweite ist kurz. Je höher die kinetische Energie des mit der Materie wechselwirkenden Elektrons, desto weniger Energie verliert es. Ein schweres geladenes Teilchen kann aus Impulserhaltungsgründen keine größeren Anteile seiner Energie bei einem Stoß mit einem Elektron verlieren [8.1]. Die Reichweite eines geladenen Teilchens kann wie folgt berechnet werden [8.2]:

$$dE = \frac{dE}{dx} \cdot dx \quad \rightarrow \quad dx = \frac{dE}{dE/dx} \quad \text{Gl. 8-1}$$

$$\int_0^R dx = R = \int_{E_{kin,0}}^0 \frac{1}{dE/dx} \cdot dE \quad \text{Gl. 8-2}$$

E: Kinetische Energie des Teilchens

$E_{kin,0}$: Kinetische Energie des Teilchens bei Eintritt in das Material

dE/dx : Anteil Energie, der pro zurückgelegter Wegstrecke abgegeben wird, siehe Bild 8.1

R: Reichweite = im Material zurückgelegte Strecke (bis $E = 0$)

Wenn das Material dick genug ist, können die Elektronen ihre Energie vollständig abgeben. In Bild 8.2 ist eine Zeichnung des Kollimators zu sehen, wie er in den folgenden Messungen benutzt worden ist.

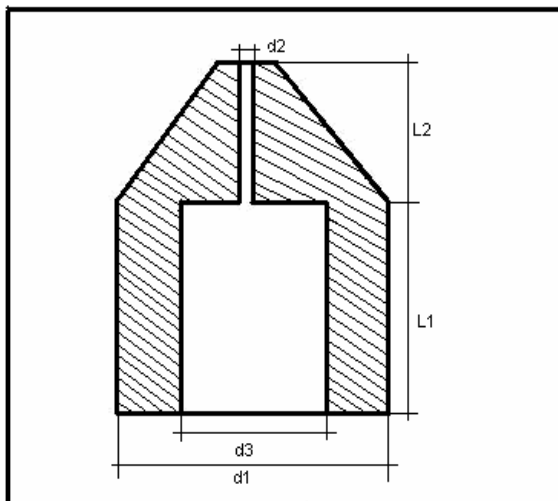


Bild 8.2: Zeichnung des Kollimators im Schnitt

Maße des Kollimators:

$d_1 = 12 \text{ mm}$
 $d_2 = 1 \text{ mm}$
 $d_3 = 7,5 \text{ mm}$
 $L_1 = 10 \text{ mm}$
 $L_2 = 10 \text{ mm}$

Der Kollimator ist so gebaut, dass er sich auf die Quelle aufschrauben lässt.

8.2 Messaufbau

Die geladenen Teilchen der Quelle treffen an unterschiedlichen Positionen auf dem Szintillator auf. Mit dem Versuchsaufbau aus Kapitel 5 konnte bereits gezeigt werden, dass sich an den MPPC-Positionen „edge“ und „middle“ kaum Unterschiede ergaben.

Eine genauere Untersuchung sollte die Abhängigkeit der Lichtausbeute vom Teilcheneintrittsort an unterschiedlichen Positionen auf dem Szintillator ergeben. Um die Positionen definieren zu können, wurde auf die Oberseite des Szintillators Millimeterpapier aufgeklebt.

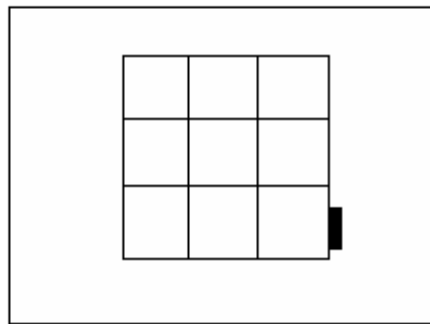


Bild 8.3: Einteilung des Szintillators in 9 gleich große Felder

8.3 Messung und Auswertung

Bei der ersten Messung in Position 1, Bild 8.4, wurde jedoch ein sehr kleines Signal aufgenommen. Auch nach Vergrößerung der Bohrung von $d_2 = 1\text{mm}$ auf $2,5\text{mm}$ konnten keine sichtbaren Verbesserungen erzielt werden. Zur Demonstration wurden drei Signalspektren an drei unterschiedlichen Positionen auf dem Szintillator aufgenommen, Bild 8.5 bis 8.7. Das eigentliche Signal ist eindeutig kleiner als das Untergrundrauschen. Die kleine Signalgröße ist auf die Absorption der Strahlung im Kollimator zurückzuführen. Die Teilchen der Ruthenium-Quelle werden im Kanal gestreut und im Kollimatormaterial und in der Luft absorbiert. So kommt nur eine geringe Anzahl Teilchen im Szintillator an, um den Photo-Effekt hervorzurufen. Zu dieser Tatsache wurde die Schwelle am Diskriminator nicht entsprechend eingestellt. Das Untergrundrauschen schiebt sich leider zu weit in das Signalspektrum hinein. Im Vergleich zu den bereits gezeigten Signalspektren ist der erste Peak nicht mehr so gut vom Signal zu trennen. Die Signalgröße kann daher zu stark durch Schwankungen des Untergrundrauschens beeinflusst werden und eine Aussage über evtl. Abhängigkeiten der MPPC-Positionen kann nicht gemacht werden. Hierzu sollte bei Wiederholung der

Messungen die Schwelle am Diskriminator erhöht werden. So ließe sich der Einfluss des Untergrundrauschens verringern und der Anteil des Signals erhöht werden. Leider wurde für diese Messungen wegen der geringen Rate sehr viel Zeit beansprucht, so dass eine Wiederholung in dieser Arbeit nicht mehr möglich war.

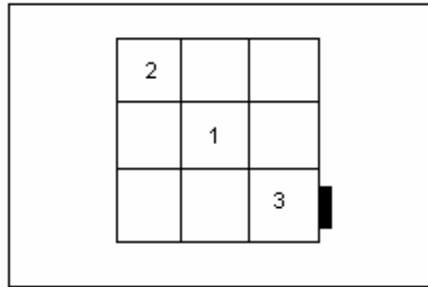


Bild 8.4: Positionen der radioaktiven Quelle auf den Szintillatorfeldern

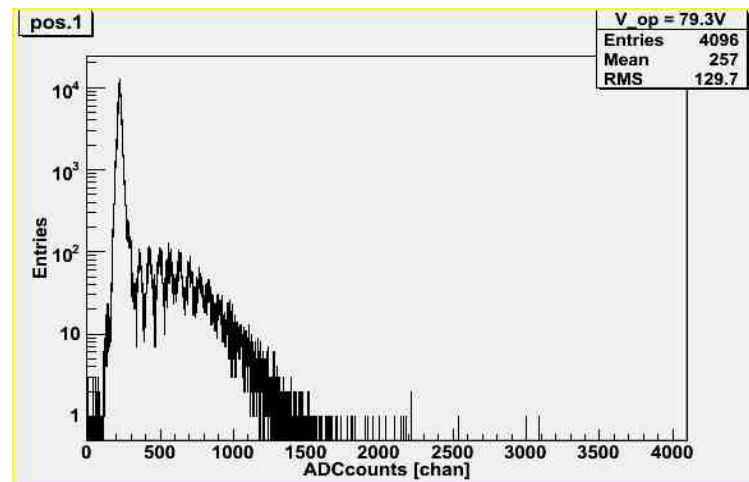


Bild 8.5 Quellenposition 1 auf dem Szintillator

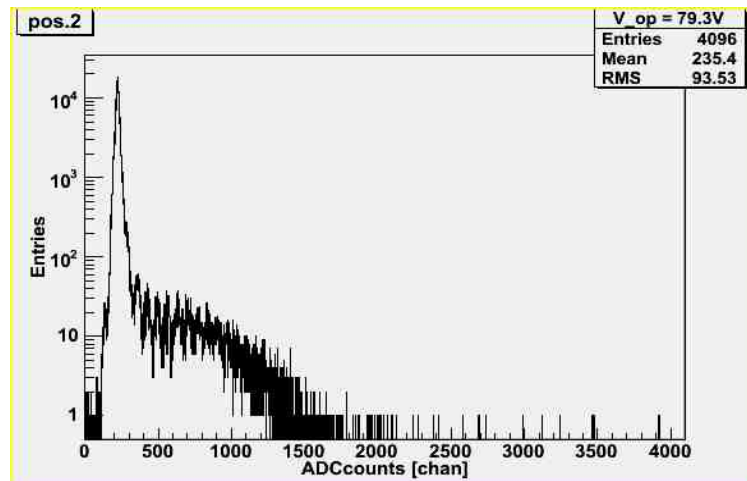


Bild 8.6: Quellenposition 2 auf dem Szintillator

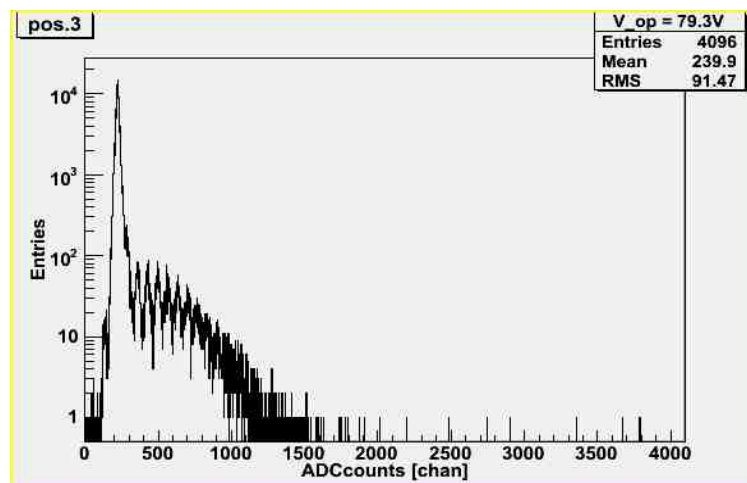


Bild 8.7: Quellenposition auf dem Szintillator

9 Optimierung des Reflektors

Zur Optimierung des Systems MPPC-Szintillator wurde eine weitere Überlegung angestellt. Wie gut ist die bisher benutzte Reflexionsfolie¹⁷ und gibt es eine Alternative? Als Alternative wurde ein Spezialpapier, Tyvek¹⁸, ausgewählt.

Diese Messungen wurden mit zwei unterschiedlichen Szintillatoren gleicher Bauart durchgeführt. Es wurde die direkte Kopplung angewendet und in beiden Messungen derselbe MPPC verwendet.

Zur ersten Messung wurde der Szintillator wie schon in den vorangegangenen Messungen komplett mit Reflexionsfolie umhüllt. Es wurde nur ein kleines Fenster von etwa 2mm an der MPPC-Position freigelassen. Bei der zweiten Messung wurde der Szintillator komplett mit Tyvek eingeschlagen. Auch hier wurde ein kleines Fenster offen gelassen.

Wie schon in Kapitel 5.2 wurden auch hier das Signal- und das Untergrundspektrum aufgenommen. Aus den gewonnenen Daten wurde wiederum die Lichtausbeute berechnet und die Ergebnisse miteinander verglichen.

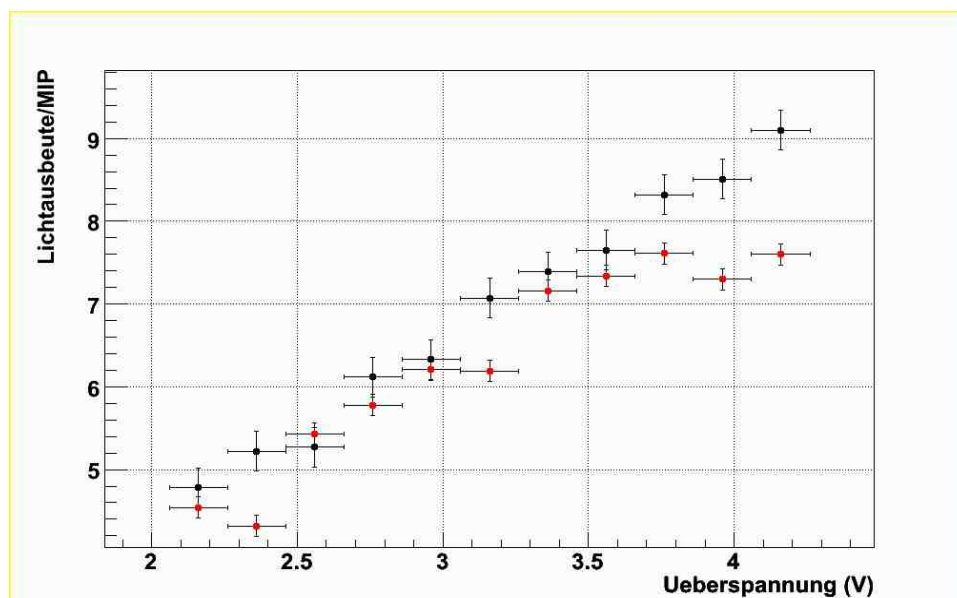


Bild 9.1: Vergleich von Reflexionsfolie und Tyvek-Papier mit der Lichtausbeute als Funktion der Überspannung

¹⁷ Reflexionsfolie 3M, ...

Bild 9.1 zeigt den direkten Vergleich der Messungen mit unterschiedlichen Reflexionsmaterialien. Die obere Messreihe, schwarze Punkte, zeigt das Resultat der Lichtausbeute mit der Reflexionsfolie. Die untere Messreihe zeigt das Resultat mit Tyvek als Reflexionsmaterial, rote Messreihe. Für den Spannungsbereich von etwa $U_{\text{Über}} = 0$ bis 3.6V stimmen die Ergebnisse beider Messreihen innerhalb der Fehler überein.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Der blausensitive MPPC sollte in dieser Diplomarbeit charakterisiert werden, was die Eingrenzung des Arbeitsbereiches durch Linearitätsuntersuchen der Dunkelrate und der Verstärkung beinhaltet. Dabei konnte ein Arbeitsbereich zwischen 78 und 80V für die Betriebsspannung festgelegt werden, in diesem deshalb alle nachfolgenden Messungen durchgeführt wurden. Zur Charakterisierung des MPPC galt es ebenso die Durchbruchspannung und die Kapazität zu berechnen, da die Kenntnis dieser Werte wichtig für die Anwendungen ist.

Da der MPPC nur eine 1mm² große Fläche besitzt, wird er bei direkter Kopplung zufällig mit Licht aus dem Szintillator bestrahlt. Aus diesem Grund wurde der MPPC an zwei unterschiedlichen Positionen am Szintillator angebracht, die Lichtausbeuten gemessen und die Ergebnisse verglichen. Es ging um die Vermessung der Lichtverteilung im Szintillator und der Höhe der Lichtausbeute. Hierbei kam es zu einer Übereinstimmung der Ergebnisse beider Positionen. Es besteht also keine Abhängigkeit von der Position am Szintillator.

Des Weiteren sollten zwei unterschiedliche Kopplungsarten verglichen werden, bei denen Licht in ein elektronisches Signal umgewandelt wird. Die im jetzigen Prototyp des Hadronenkalorimeters verwendete Kopplung baut sich aus einem Szintillator auf, der über einen Wellenlängenschieber mit dem SiPM verbunden ist. Durch die Möglichkeit, mit dem neuen MPPC-Modell direkt blaues Licht detektieren zu können,

¹⁸ Tyvek, Paper Union, 105g/m², Artikel-Nr. 76810..00

wird der Wellenlängenschieber überflüssig. Es wurden Messungen der Lichtausbeute durchgeführt, bei denen der blausensitive direkt und indirekt über den Wellenlängenschieber mit dem Szintillator gekoppelt worden ist. Es ergab sich für die indirekte Kopplung eine höhere Lichtausbeute als für die direkte Kopplung, was auf die lichtsammelnde und -führende Eigenschaft des Wellenlängenschiebers im Szintillator zurück zu führen ist. Es war an dieser Stelle keine Verbesserung nachzuweisen. Auf den Einsatz des Wellenlängenschiebers kann also wegen seiner lichtsammelnden Eigenschaften nicht verzichtet werden.

Wegen Überlagerungen von Untergrundrauschen und MPPC-Signal mussten beide Anteile getrennt werden. Bei dieser Auswertung der Ergebnisse zur direkten Kopplung wurde geprüft, ob der Signalanteil des MPPC-Signals bei gleichzeitiger Begrenzung des Untergrundrauschens ausreichend groß ist. Hierbei ergab sich für das MPPC-Signal ein Nutzanteil von 95%. Die Stabilität des Messaufbaus ist mit einer Streuung von 3% nach der Diskriminierung gegeben.

Ein weiterer Punkt, den es zu untersuchen galt, war die Abhängigkeit der Lichtausbeute vom Eintrittsort der Teilchen in den Szintillator. Durch Wechseln des Einstrahlungsortes der radioaktiven Quelle sollte untersucht werden, ob sich das emittierte Licht um den Ort des Teilcheneintritts verteilt oder eine statistische Verteilung im gesamten Szintillator entsteht. Hier konnten wegen des Untergrundrauschens keine Ergebnisse gewonnen werden. Bei nachfolgenden Messungen wäre auf die ausreichende Diskriminierung des Rauschens zu achten.

Ein weiterer Vergleich konnte zwischen zwei MPPC mit unterschiedlicher Pixelanzahl gemacht werden. Der Vergleich zwischen 1600 Pixeln und 400 Pixeln ergab eine höhere Lichtausbeute für den MPPC mit 400 Pixeln. Hierbei muß allerdings berücksichtigt werden, dass der Messbereich eines 1600-Pixel-MPPC größer ist als der eines MPPC mit 400 Pixeln. Werden alle Pixel gefeuert, hat ein MPPC mit höherer Pixelanzahl einen höheren dynamischen Messbereich als ein MPPC mit geringerer Pixelanzahl. Wird ein Pixel durch ein einfallendes Photon gefeuert, kann es erst wieder ein neues Photon detektieren, wenn der Quenchingwiderstand die Lawinen im MPPC zum Erliegen gebracht hat.

Insgesamt haben die MPPC sehr viel versprechende Eigenschaften. Für die direkte Kopplung ist die Lichtausbeute jedoch noch etwas klein. Da das Untergrundrauschen

aber gering ist, könnte man ohne Schwierigkeiten einen MPPC mit größerer Oberfläche verwenden. Die neuartigen MPPC können auch in der indirekten Kopplung verwendet werden. Hier sind Lichtausbeute und das Untergrundrauschen auch jetzt schon sehr attraktiv. Es besteht weiterhin Entwicklungspotential [10.1].

Verwendete Abkürzungen

AD-Wandler	-	Analog-Digital-Wandler
APD	-	Avalanche Photodiode
C	-	Kapazität der Dioden
Desy	-	Deutsches Elektronen-Synchrotron
HCAL	-	Hadronenkalorimeter
ILC	-	International Linear Collider
MIP	-	minimal ionisierende Teilchen
MPPC	-	Multi Pixel Photon Counter
PM	-	Photomultiplier
SiPM	-	Silizium Photomultiplier
U_{Betr}	-	Betriebsspannung der SiPM
U_{Durch}	-	Durchbruchspannung
$U_{\text{Über}}$	-	Überspannung an der SiPM, $U_{\text{Über}} = U_{\text{Betr}} - U_{\text{Durch}}$

Quellenverzeichnis

- [2.1] Wolfgang Bludau, Halbleiter-Optoelektronik, Hanser Verlag, München, 1.Auflage, 1995
- [2.2] Nicola D'Ascenzo, Characterization of Silicon Photomultipliers as a photodetector for Positron Emission Tomography, Diplomarbeit, University of Pisa, 6.07.2005, www.desy.de/~ndasc/
- [2.3] Erika Garutti, Silicon-Photomultiplier technology and their application in a calorimeter for the ILC, bei Desy Hamburg, Vortrag vom 14.12.2006
- [2.4] Paul A. Tipler, Physik, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, 3. Auflage, 1994
- [2.5] Desy
- [2.6] Benjamin Lutz, Commissioning of the Readout Electronics for the Prototypes of a Hadronic Calorimeter and a Tailcatcher and Muon Tracker, Diplomarbeit, Universität Hamburg, Mai 2006
- [2.7] Hamamatsu Photonics Deutschland GmbH, Arzbergerstr. 10, 82211 Herrsching am Ammersee, Kat.Nr.KAPD0002E01, Januar 2007 DN
http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/mppc_kapd0002e01.pdf
- [3.1] Bruch, Diplomarbeit, RWTH Aachen, 2006
- [3.2] William R. Leo, Techniques for nuclear and particle physics experiments, Springer Verlag, Berlin, 2. Auflage, 1994
- [5.1] Lothar Papula, Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Band 3, Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 4.Auflage, Mai 2001
- [7.1] Hamamatsu Photonics Deutschland GmbH, Arzbergerstr. 10, 82211 Herrsching am Ammersee, Kat.Nr.KAPD0002E01, Januar 2007 DN
http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/mppc_kapd0002e01.pdf
- [8.1] Paul A. Tipler, Physik, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, 3. Auflage, 1994, S.1413
- [8.2] Prof. Dr. Herrmann Kolanowski, Einführung in die Astroteilchenphysik, Desy Zeuthen, Humboldt Universität zu Berlin, Vorlesungsskript, 2005/06
- [10.1] Felix Sefkow, Projektkoordinator, FLC-Gruppe, Desy Hamburg

Abbildungsverzeichnis

- 2.1 Schema einer pn-Diode, aus [2.1]
- 2.2 Schematischer Aufbau der pin-Diode und resultierendes elektrisches Feld bei Anlegen einer Spannung $U_{\text{Betr}} > U_{\text{Durch}}$, aus [2.1]
- 2.3 Schaltungs bild eines SiPMs zur Verdeutlichung des Geiger Modes, Quenchingwiderstände R1 bis Rn und APDs D1 bis Dn , aus [2.1]
- 2.4 Aufbau einer Avalanche-Photodiode in einem SiPM, aus [2.1]
- 2.5 Schaltungs bild eines SiPMs zur Verdeutlichung des Geiger Modes
- 2.6 Schema des Grabens zwischen den Pixeln, aus [2.3]
- 2.7 Schematischer Aufbau einer Avalanche-Diode im SiPM, aus [2.3]
- 2.8 Foto eines SiPMs, aus [2.3]
- 2.9 Amplitude der Dunkelrate
- 2.10 Beobachtung des Crosstalkeffekts unter dem Mikroskop, aus [2.3]
- 2.11 Schema des Übersprechens ,aus [2.3]
- 2.12 Szintillatoranordnung in einer Kassette des Kalorimeterprototyps, aus [2.3]
- 3.1 Foto des Messaufbaus im Labor
- 3.2 Inhalt der Box
- 3.3 Platine zur Steuerung der Betriebsspannung des MPPCs und Signalauskopplung
- 3.4 Organische Szintillatoren mit und ohne integrierten Wellenlängenschieber (WLS).
- 3.5 Schematischer Aufbau eines Photomultipliers, Marten Holtmann
- 3.6 Trigger mit Photomultiplier und Szintillator
- 4.1 Blockschaltbild des Messaufbaus zur Messung der Dunkelrate
- 4.2 Dunkelrate als Funktion der Betriebsspannung, $U_{\text{Betr}} = 77,4$ bis $79,0\text{V}$
- 4.3 Dunkelrate als Funktion der Betriebsspannung, $U_{\text{Betr}} = 78,1$ bis $81,3\text{V}$
- 4.4 Blockschaltbild des Messaufbaus zur Messung des Signalspektrums
- 4.5 Lichtbestrahlung des MPPCs durch eine LED
- 4.6 Signalspektrum eines MPC bei Bestrahlung durch eine LED
- 4.7 Untergrundspektrum, Rauschen des MPPC und der Elektronik ohne Bestrahlung durch eine LED

-
- 4.8** Verstärkung als Funktion der Überspannung für verschiedene MPPC-Probestücke
 - 5.1** Blockschaltbild des Messaufbaus zur Messung der Lichtausbeute
 - 5.2** Plattform zur reproduzierbaren Befestigung des MPPC
 - 5.3** Befestigung des MPPC in den Stäbchen mit Verbindung zur elektronischen Auslese
 - 5.4** Externer Trigger
 - 5.5** Signalspektrum mit direkter Kopplung bei $U_{\text{Betr}} = 78,1\text{V}$
 - 5.6** Untergrundspektrum mit direkter Kopplung bei $U_{\text{Betr}} = 80,1\text{V}$
 - 5.7** Mittelwert über Maxima
 - 5.8** Mittelwertberechnung mit Gauß-Fit
 - 5.9** Multi-Gauß-Fit über Signalspektrum zur Berechnung der mittleren Verstärkung
 - 5.10** Lichtausbeute/MIP als Funktion der Überspannung, $U_{\text{Durch}} = 75,94\text{V}$
 - 5.11** Prüfung der Stabilität der Messung anhand der Lichtausbeute als Funktion der Überspannung, $U_{\text{Durch}} = 75,94\text{V}$
 - 5.12** Überlagern von Untergrund- und Signalspektrum als Beispiel, aus [2.3]
 - 5.13** Untergrundrauschen als Funktion der Schnitte
 - 5.14** Untergrundrauschen als Funktion der Schnitte, vergrößert
 - 5.15** Anwendung des Schnitts von 2,5 Pixeln auf das Signalspektrum
 - 5.16** Gauß-Fit über Untergrund
 - 5.17** Effizienz als Funktion der Überspannung, $U_{\text{Durch}} = 75,94\text{V}$
 - 5.18** Verteilung des Untergrundrauschens auf elektronisches Rauschen, Dunkelstrom, Crosstalk
 - 5.19** Quantisierung des Crosstalks, Crosstalkmenge in % als Funktion der Überspannung, $U_{\text{Durch}} = 75,94\text{V}$
 - 5.20** Plattform zur Verdeutlichung der Positionen Ecke und Mitte am Szintillator
 - 5.21** Vergleich der MPPC-Positionen Ecke und Mitte am Szintillator, schwarz = Mitte, rot = Ecke, erste MPPC-Probe
 - 5.22** Vergleich der MPPC-Positionen Ecke und Mitte am Szintillator, schwarz = Mitte, rot = Ecke, zweite MPPC-Probe
 - 6.1** Szintillatoren für direkte und indirekte Kopplung

- 6.2** Lichtausbeute als Funktion der Überspannung, indirekte Kopplung
- 6.3** Lichtausbeute beider Kopplungsmethoden im Vergleich, rot = direkte Kopplung, schwarz = indirekte Kopplung
- 6.4** Verlauf der Photonennachweisschiffizienz als Funktion der Wellenlänge, aus [2.7]
- 7.1** Dunkelrate als Funktion der Betriebsspannung, der Arbeitsbereich liegt zwischen 76 und 77V mit einer Dunkelrate von 10 bis 80kHz
- 7.2** Vergleich der Lichtausbeute beider MPPC-Modelle, schwarz = 400-Pixel-MPPC, rot = 1600-Pixel-MPPC
- 8.1** Energieverlust dE/dx als Funktion der kinetischen Energie eines geladenen Teilchens, aus [8.1]
- 8.2** Zeichnung des Kollimators im Schnitt
- 8.3** Einteilung des Szintillators in 9 gleich große Felder
- 8.4** Positionen der radioaktiven Quelle auf den Szintillatorfeldern
- 8.5** Quellenposition 1 auf dem Szintillator
- 8.6** Quellenposition 2 auf dem Szintillator
- 8.7** Quellenposition 3 auf dem Szintillator
- 9.1** Vergleich von Reflexionsfolie und Tyvek-Papier mit der Lichtausbeute als Funktion der Überspannung

Gleichungsverzeichnis

- 4.1 Berechnung der Dunkelrate in Hz
- 4.2 Umskalierung der Verstärkung
- 4.3 Berechnung der Überspannung
- 4.4 Linearer Zusammenhang zwischen Ladung und Spannung
- 4.5 Steigung aus Bild 4.9
- 5.1 Berechnung der Anzahl detektierter Photonen pro MIP
- 5.2 Gaußsche Normalverteilung, aus [5.1]
- 5.3 Berechnung der Überspannung und des Fehlers
- 5.4 Berechnung der Überspannung
- 5.5 Berechnung des Fehlers der Überspannung
- 5.6 Aufsummierung des Untergrundes
- 5.7 Aufsummierung des Untergrundes in unterschiedlichen Grenzen
- 5.8 Abschätzung der Dunkelrate
- 5.9 Aufsummierung des Signalspektrums
- 5.10 Aufsummierung des Signalspektrums ab dem gewählten Schnitt
- 5.11 Aufsummierung des Untergrundes
- 5.12 Berechnung der Effizienz ε zur Betrachtung der Mengenanteile
- 5.13 Verhältnis der Anteile des Crosstalks über dem des Dunkelstroms
- 8.1 Energieverlust pro Weg
- 8.2 Berechnung der Reichweite

Tabellenverzeichnis

- 2.1** Tabelle der Quarks, aus [2.4]
- 2.2** Kenndaten des MPPC von Hamamatsu, aus [2.6]
- 4.1** Ergebnisse der Durchbruchspannung für die jeweiligen Probestücke
- 4.2** Ergebnisse der Kapazitäten für die jeweiligen Probestücke
- 7.1** Spezifikationen durch Hamamatsu bei $T_a = 25^\circ\text{C}$, aus [2.7]
- 7.2** Vergleich von Durchbruchspannung und Kapazität der MPPC-Modelle