# RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG



Robert Maiwald

Aufbau eines Teststandes zur Charakterisierung von Silizium-Photomultipliern

Bachelorarbeit

KIRCHHOFF-INSTITUT FÜR PHYSIK

# Fakultät für Physik und Astronomie Universität Heidelberg

BACHELORARBEIT im Studiengang Physik vorgelegt von

## **Robert Maiwald**

geboren in Frankfurt am Main

### September 2019

# Aufbau eines Teststandes zur Charakterisierung von Silizium-Photomultipliern

Diese Arbeit wurde ausgeführt von Robert Maiwald am Kirchhoff-Institut für Physik unter Betreuung von **Prof. Dr. Hans-Christian Schultz-Coulon**  Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde ein Teststand aufgebaut, der dazu dient Silizium-Photomultiplier (SiPMs) zu charakterisieren. Die Vorlage dafür war der von Tadday[5] entwickelte Teststand. Bei diesem wird eine Ulbrichtkugel (*integrating sphere*) verwendet, um diffuses Licht aus Lichtquellen zu erzeugen. Teil der Charakterisierung ist die Messung der Photonnachweiswahrscheinlichkeit (PDE –*Photo-Detection-Efficiency*), die über das Spektrum des sichtbaren Lichtes von 350 nm bis 1000 nm gemessen wird. Dafür wird die PDE mit gepulstem Licht für verschiedene Wellenlängen bestimmt und damit eine Sensitivitätsmessung über das Spektrum geeicht. Außerdem lassen sich die Wahrscheinlichkeiten für "Nachpulse" (*after-pulse*) und optische Übersprecher (*cross-talk*) bestimmen. Der Aufbau des Teststandes und die im Rahmen der Arbeit entwickelte Software ist darauf ausgelegt, Messungen möglichst automatisiert durchzuführen und bei Bedarf erweitert zu werden.

## Building a Teststand for Characterization of Silicon-Photomultipliers

In the scope of this bachelor's thesis, a test stand for the characterization of Silicon-Photomultipliers (SiPMs) was built. The setup is designed after the initial design by Alexander Tadday[5], which uses an integrating sphere to create an even light distribution from light sources. The test stand enables to measure the photo-detection-efficiency (PDE) of a SiPM over the visible light spectrum from 350 nm to 1000 nm. It uses PDE measurements from pulsed light sources to calibrate a measurement of the sensitivity of a SiPM over the spectrum. In addition, the probabilities for after-pulses and cross-talk can be measured with the setup. The test stand and the software are designed to allow a simple and mostly automatic characterization of SiPMs while enabling the addition of new features.

# Inhaltsverzeichnis

1.	1. Siliziumphotomultiplier				
	1.1.	Funktionsweise eines SiPMs	2		
		1.1.1. Halbleiter	2		
		1.1.2. pn-Übergang	5		
		1.1.3. Avalanche-Photo-Dioden (APDs)	6		
	1.2.	Charakteristika	7		
2.	Teststand für die Charakterisierung von SiPMs				
	2.1.	PDE	11		
		2.1.1. Absolute PDE	12		
		2.1.2. Relative Sensitivität	22		
	2.2.	Optisches Übersprechen	28		
	2.3.	"Nachpulse"	29		
3.	Zusa	ammenfassung	33		
Α.	Bild	er	34		

### 1. Siliziumphotomultiplier

Seit die Hochenergie-Physik damit angefangen hat Teilchen zu untersuchen, indem Kollisionen von Teilchen erzeugt werden und anschließend die Zerfallsprodukte untersucht werden, werden auch immer bessere Detektoren benötigt, um dies zu ermöglichen. Die Detektoren müssen dafür bei einer hohen Frequenz eine genaue Impuls- und Ortsauflösung der entstehenden einzelnen Teilchen liefern, damit Rückschlüsse auf die Eigenschaften der Kollisionsteilchen möglich sind.

Eine Teilchenart, die bei der Wechselwirkung von Teilchen entsteht, sind Photonen. Bei Photonen im optischen Spektrum<sup>1</sup> des Lichtes ist die Energie eines einzelnen Photons verhältnismäßig gering. Damit ein einzelnes Photon detektiert werden kann, muss der Sensor in der Lage sein, die Energie des Photons auf irgendeine Weise zu verstärken, da die Energie des Photons alleine nicht reicht, um ein elektrisches Signal zu erzeugen. Doch mittels der Halbleitertechnologie, die sich in den letzten Jahrzehnten immer weiter verbessert hat, ist es möglich Sensoren zu entwickeln, die in der Lage sind die absorbierte Energie eines Photons um den Faktor 10<sup>6</sup> zu verstärken – sogenannte Silizium-Photomultiplier (SiPMs). Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie im Vergleich zu anderen Technologien platzsparend sind und eine sehr hohe Zeit-und Ortsauflösung haben. Wegen der Leistungsfähigkeit dieser Sensoren zu messen. Dies lässt sich erreichen, indem Szintillatoren vor die SiPMs gebaut werden. Geladene Teilchen erzeugen in dem verwendeten Szintillator-Material Lumineszenz in Form von optischen Photonen. Diese lassen sich dann mit den SiPMs messen.

Neuere Experiment-Vorhaben, wie das Mu3e-Experiment, beruhen vollständig auf der Verwendung von SiPMs in Kombination mit Szintillatoren. Bei diesem Experiment soll der Muon-Zerfall in drei Elektronen untersucht werden und dabei nach Asymmetrien im Standardmodell gesucht werden, indem neue Zerfälle gefunden werden sollen. Mit den SiPMs wird bei dem Experiment die Spur der entstehenden Elektronen gemessen, aus der sich der Impuls der Elektronen berechnen lässt. Dies ist möglich, da ein Magnetfeld

 $<sup>^1\</sup>mathrm{Die}$  Wellenlänge liegt im sichtbaren Bereich.

angelegt wird, was dazu führt, dass sich die Spur des Elektrons in Abhängigkeit vom Impuls krümmt.[7]

Neben der Anwendung bei der Teilchendetektion in der Hochenergie-Physik werden SiPMs auch in der medizinischen Bildgebung verwendet. F11 Experiment

### 1.1. Funktionsweise eines SiPMs

SiPMs gehören zu der Klasse der Halbleiterdetektoren. Man macht sich dabei zunutze, dass sich die Leitereigneschaften von Halbleitern mit Verunreinigungen im Kristallgitter manipulieren lassen. Indem mehrere Veränderungen am Material vorgenommen werden, erhält man einen Sensor der Photonen absorbiert und in ein elektrisches Signal umwandelt.

#### 1.1.1. Halbleiter

Halbleiter liegen mit einer Leitfähigkeit von  $10^{-8}$  bis  $10^3 (\Omega \text{ cm})^{-1}$  zwischen Isolatoren und Metallen mit der Besonderheit, dass sich die Leitfähigkeit durch äußere Einwirkung leicht verändern lässt. Ihre besonderen Leitereigenschaften lassen sich mittels des Bändermodells beschreiben. Dabei wird angenommen, dass sich Elektronen in sogenannten "Energiebändern" befinden, die unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Befinden sich Elektronen im Leitungsband, bedeutet dies, dass sie sich im Material dem Modell nach frei bewegen können und zur Leitfähigkeit beitragen. Wenn sie sich hingegen im energetisch niedrigerem Valenzband befinden, sind sie gebunden und tragen nicht zur Leitfähigkeit bei.

Bei Metallen befinden sich Elektronen schon im Grundzustand (T = 0 K) im Leiterband und können sich frei im Metall bewegen. Deshalb haben Metalle eine hohe Leitfähigkeit. Im Gegensatz dazu befinden sich die Elektronen im Grundzustand bei Halbleitern und Isolatoren noch im Valenzband und die Materialien haben keine Leitfähigkeit. Der Grundzustand entspricht einer Füllung der Bänder bis zur sogenenannten Fermi-Kante (s. Abb. 1). Werden die Materialien erhitzt und haben eine Temperatur von über 0 K, dann sind die Bänder nicht bis zu einer klaren Kante gefüllt, sondern Elektronen er-



Abbildung 1: Bandstruktur bei Metallen, Halbleitern und Isolatoren[2] Die rote gestrichelte Linie ist die Fermi-Kante.

reichen durch die thermische Energie auch höhere Zustände. Die Fermi-Verteilung "zer-fließt" für höhere Energien, wie man Abb. 2 erkennen kann.



Abbildung 2: Die Fermi-Verteilung für verschiedene Temperaturen[2]

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/k_BT} + 1}$$
   
  $E$ : Energie eines Elektrons  
  $E_F$ : Energielevel der Fermi-Kante  
  $k_B$ : Boltzmann-Konstante

T: Temperatur in K

Bei Halbleitern ist die Energielücke  $E_g = E_L - E_V$  zwischen dem Valenzband mit oberer Energiekante  $E_V$  und dem Leitungsband mit unterer Energiekante  $E_L$  kleiner als bei Isolatoren. Dies ermöglicht Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband zu wechseln, wenn sie genug thermische Energie<sup>2</sup> haben. Dabei entsteht dort an der Bindung, wo sich das Elektron gelöst hat, ein Loch. Sowohl das Loch als auch das Elektron sind bewegliche Ladungsträger im Halbleiter und unterscheiden sich nur durch das Vorzeichen der Ladung und die effektive Masse.

Die Ladungsträgerdichte in Halbleitern lässt sich nicht nur durch die Temperatur verändern, sondern auch indem Störstellen im Kristallgitter erzeugt werden. Dies sind in der Regel Atome, die im Vergleich mit dem Halbleitermaterial ein Bindungselektron mehr oder weniger besitzen. Die Atome sind wie die anderen Atome des Halbleitermatierals im Gitter verbunden und verändern die Gitterstruktur nicht<sup>3</sup>. Nur das überflüssige bzw. fehlende Elektron verändert die Leitereigenschaften des Halbleiters. Wenn diese Fremdatome bei der Züchtung des Halbleiterkristalls miteingebracht werden, nennt man dies Dotierung. Dabei wird unterschieden zwischen zwei Arten von Fremdatomen:

- Donatoren Als Donatoren werden die Atome bezeichnet, die ein Bindungselektron mehr besitzen als die Hauptatome des Kristalls. Dadurch, dass das Elektron an keiner Bindung beteiligt ist, benötigt es weniger Energie, um das Leitungsband zu erreichen und sich frei bewegen zu können. Die Atome werden Donatoren genannt, weil sie ein Elektronen zur Leitfähigkeit beitragen.Die Elektronen hinterlassen an der Position des Atoms eine positive Raumladung, die unbeweglich ist, weil um das Atom weniger Elektronen als Protonen im Kern sind.
- Akzeptoren Als Akzeptoren werden die Atome bezeichnet, die ein Bindungselektron weniger besitzen. Sie haben damit nicht genug Elektronen für alle Bindungen in der Kristallstruktur. Dies führt dazu, dass ein freies Elektron bei dem Atom

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Das Elektron kann die Energie auch durch andere Quellen als durch thermische Stöße erhalten. Z. B. kann ein Photon absorbiert werden, was dem Elektron genug Energie gibt, um das Leitungsband zu erreichen.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Die Gitterstruktur würde sich verändern, wenn es sehr viele Störstellen gäbe. Allerdings ist das Verhältnis von Fremd- zu den Kristall-Atomen in der Regel sehr klein.

gebunden wird. Dadurch ist eine andere Bindung frei und es entsteht ein Loch, welches zur Leitfähigkeit beiträgt. An der Stelle des gebundenen Elektrons entsteht aus analogen Gründen eine negative Raumladungszone.Weil diese Atome Elektronen binden, werden sie Akzeptoren genannt.

Bereiche des Halbleiterkristalls, die mit Donatoren dotiert sind, nennt man n-dotiert. Solche die mit Akzeptoren dotiert sind, werden hingegen als p-dotiert bezeichnet.

### 1.1.2. pn-Übergang

Falls ein Halbleiter sowohl p- als auch n-dotiert ist, entsteht in der Grenzschicht, in der eine Dotierung in die andere übergeht, ein sogenannter pn-Übergang. In der Grenzschicht, in der Donatoren und Akzeptoren aufeinandertreffen, rekombinieren die überschüssigen Elektronen mit den freien Löchern.<sup>4</sup> So entsteht eine Raumladungszone von nicht-beweglichen Ladungen. Im p-dotierten Bereich ist die Ladung negativ und im ndotierten Bereich ist sie dagegen positiv. Die Ladungen erzeugen ein elektrisches Feld, was in Richtung der n-Dotierung zeigt, und dementsprechend eine Spannung, die über dem pn-Übergang abfällt(s. Abb. 3 und Abb. 4a). Der Bereich mit den Raumladungen wird auch Verarmungszone genannt, weil keine freien Ladungsträger verfügbar sind. Wird von außen eine Spannung an den pn-Übergang angelegt, kann in Durchlassrichtung (positive Spannung an die p-Seite) ein Strom fließen, während sich in Sperrrichtung (positive Spannung an die n-Seite) die Raumladungszone vergrößert und kein Strom fließt. Wird die Spannung in Sperrichtung allerdings groß genug kommt es zum sogennanten Durchbruch. Das elektrische Feld beschleunigt die Elektronen so stark, dass weitere Elektronen ausgelöst werden. Die Schwelle für diesen Durchbruch ist abhängig von der Temperatur, da die Elektronen bei einer höheren thermischen Energie, leichter ausgelöst werden können. Die Strom-Spannungs-Kennlinie ist in Abb. 4b aufgetragen. Der pn-Übergang als elektronisches Bauteil wird auch als Diode bezeichnet.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>In der Realität gibt es aufgrund der Fertigungsmöglichkeiten keine glatte Kante zwischen p- und n-Dotierung, sondern die Bereiche gehen ineinander über.



Abbildung 3: pn-Übergang mit rekombinierten Elektronen und Löchern.[6]

### 1.1.3. Avalanche-Photo-Dioden (APDs)

Avalanche-Photo-Dioden bestehen aus einem stark-dotierten pn-Übergang, an den eine hohe Spannung in Sperrichtung angelegt ist. Die Spannung liegt über der Durchbruchsspannung  $U_{Av}$ . Falls mttels des Photoeffekts ein Elektron-Loch-Paar in dem pn-Übergang entsteht, kann so eine sogenannte "Lawine" (*avalanche*) ausgelöst werden. Dabei werden weitere Elektron-Loch-Paare erzeugt und ein Strom fließt. Damit der Strom wieder abklingt, ist die Diode in Reihe mit einem Quench-Widerstand geschaltet (s. Abb. 5a), über den die Spannung dann soweit abfällt, dass sie unter der Durchbruchsspannung sinkt. Dann kann sich die Raumladungszone der APD wieder regenerieren. Die Raumladungszone wirkt wie ein Kondensator, der sich bei einer Lawine entleert. Deshalb brauchen APDs einige ns, um wieder ein gleich großes Signal zu liefern. Ein einzelner SiPM besteht aus vielen APDs, die nebeneinander angeordnet werden und parallel geschaltet werden, sodass sich die Signale addieren. Da die Lawinen immer die gleiche Verstärkung haben, erhält man ein Signal, was proportional zur Anzahl der ausgelösten APD-Pixel ist. Die Verstärkung bei einer Lawine ist abhängig von der Bauart der APD und kann über 1000 betragen. Ein Elektron löst dann über 1000 andere Elektronen aus,

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Die starken Schwankungen stammen von dem Verstärker, der an den SiPM angeschlossen wurde, um das Signal noch mehr zu verstärken. Im Mittel gleichen sich die Schwankungen aus.



Abbildung 4: Charakteristika eines pn-Übergangs.

die eine messbare Spannung erzeugen. Ein Signal eines Pixel wird auch Photo-Elektron genannt und je nach Anzahl der gleichzeitig ausgelösten Pixel mit 1pe, 2pe etc. abgekürzt. In Abbildung 5b ist der Spannungsverlauf für mehrere gleichzeitige Signale aus unterschiedlichen Pixeln dargestellt.

### 1.2. Charakteristika

Im vorigen Abschnitt wurde bereits die Verstärkung eines SiPMs angesprochen. Die Verstärkung ist unabhängig von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes und hängt nur von den Charakteristika des SiPMs und der sogennanten Überspannung  $U_{\text{Über}}$ ab, die wie folgt definiert ist:

$$U_{\rm Über} = U_{\rm Gegen} - U_{\rm Av} \tag{1}$$



Abbildung 5: Schaltung und Signalverlauf einer APD.

 $U_{\text{Gegen}}$  ist die Spannung, die in Sperrrichtung an die APD angelegt ist. Für die Verstärkung V gilt[5]:

$$V = \frac{C_{\text{Pixel}}}{q_e} \cdot U_{\text{Über}} \tag{2}$$

 $q_e$  ist die Elementarladung eines Elektrons und  $C_{\text{Pixel}}$  ist die Kapazität der Sperrschicht in einer APD. Damit ist die Verstärkung direkt abhängig von der Durchbruchspannung  $V \propto -U_{\text{Av}}$ , welche stark temperaturabhängig ist<sup>6</sup>, wie in Abschnitt 1.1.2 beschrieben. Diese Temperaturabhängigkeit muss bei der Charakterisierung von SiPMs berücksichtigt werden, da viele Eigenschaften von der anliegenden Spannung abhängig sind. Um zu vermeiden, dass neben der Gegenspannung noch die genaue Temperatur des SiPMs gemessen werden muss, werden in der Regel alle Eigenschaften in Abhängigkeit zur Überspannung angegeben. Eine der wichtigsten Größen eines SiPMs ist die Photonnachweiswahrscheinlichkeit (PDE - Photo-Detection-Efficieny). Sie gibt an, wie viele einfallende Photonen pro Wellenlänge bei einem SiPM ein Signal erzeugen. Näherungsweise

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>Die Änderung liegt im Bereich von 55 mV/K.[5, S. 82]

setzt sie sich aus dem Produkt der Quantenausbeute (QE - Quantum-efficiency), dem phototaktiven Flächenanteil ( $f_A - Fill$ -factor) und der Wahrscheinlichkeit ( $P_G$ ), dass ein Elektron-Loch-Paar einen Geiger-Durchbruch auslöst, zusammen.[3]

$$PDE = QE \times f_A \times P_G \tag{3}$$

Die Quantenausbeute gibt an, wie viele Photonen Elektron-Loch-Paar erzeugen und ist dabei abhängig von der Wellenlänge der einfallenden Photonen. Sie wird durch die Absorptionsfähigkeiten des Halbleitermaterials und der Abdeckung der Pixel limitiert. SiPMs können in der Regel zwischen 350 nm und 1000 nm sensitiv sein. Der photoaktive Flächenanteil ist durch die Platzierung und Größe der einzelnden APDs limitiert und liegt in der Regel zwischen 20% und 80%. Wenn die APDs zu nah aneinander platziert werden, verstärkt sich das elektrische Rauschen. Zusammen mit einer Quantenausbeute QE von bis zu 80% und einer Geiger-Wahrscheinlichkeit  $P_G$  von bis zu 90% können PDEs von bis zu 60% erreicht werden.[3, Kap. 10] Es kann allerdings auch zu einem falschen Signal kommen, bei dem kein Photon absorbiert wurde. Diese Singale werden auch als Rauschen bezeichnet. Grundsätzlich kommen drei Ursachen dafür in Frage:

#### • Thermische Erregung eines Elektrons

Wenn sich durch thermische Energie ein Elektron-Loch-Paar bildet, kann dies eine Lawine auslösen. Das Signal, das so entsteht, kann nicht von einem echten Signal unterschieden werden.

Durch eine höhere Temperatur erhöht sich die Anzahl der zufällig entstehenden Elektron-Loch-Paare und damit die Wahrscheinlichkeit für eine thermische Auslösung des SiPMs. Die Wahrscheinlichkeit erhöht sich außerdem, wenn die Gegenspannung erhöht wird, weil damit die Wahrscheinlichkeit steigt, dass ein Elektron-Loch-Paar eine Lawine auslöst.

#### • "Nachpulse"

Elektronen einer Lawine können während der Lawine von einem Atom eingefangen werden. Erst nach einer gewissen Zeit werden sie wieder frei und können verspätet eine weitere Lawine auslösen. Da bei einem SiPM nicht die einzelnen Pixel ausgelesen werden, sondern immer nur die ganze Matrix, lässt sich nicht genau klassifizieren, ob zwei aufeinanderfolgende Signale durch einen Nachpuls entstanden sind, oder ob die zwei Signale aus unterschiedlichen Pixeln bzw. die zwei Signale unabhängig aus einem Pixel stammen. Wenn sich die Kapazität des Pixels noch nicht regeneriert hat, lässt sich ein Nachpuls an der geringeren Signalhöhe erkennen.

Die Wahrscheinlichkeit für Nachpulse ist abhängig von der Verstärkung und erhöht sich damit bei steigender Gegenspannung.

### • Optische Übersprecher

Bei einer Lawine in einer APD werden auch optische Photonen erzeugt.[4] Diese Photonen können einen Nachbar-Pixel in einem SiPM erreichen und dort ebenfalls eine Lawine auslösen. Optische Übersprecher erhöhen ein bereits vorhandenes Signal und lassen sich nur bei einem 1-Photon-Signal (1pe-Photo-Elektron) ausschließen.

Die Wahrscheinlichkeit für optische Übersprecher ist ebenso abhängig von der Verstärkung und steigt damit mit der Gegenspannung an.

### 2. Teststand für die Charakterisierung von SiPMs

Um entscheiden zu können, welcher SiPM für einen bestimmten Anwendungsrahmen am besten geeignet ist, ist es wichtig genau zu wissen, welche Eigenschaften ein SiPM hat. Dazu wurde im Rahmen dieser Bachelorarbeit ein Teststand aufgebaut, der sich an dem Teststand von Klaus Tadday orientiert.[5] Der Aufbau ist dazu in der Lage folgende Eigenschaften zu bestimmen:

- PDE
- Wahrscheinlichkeit für "Nachpulse"
- Wahrscheinlichkeit für optisches Übersprechen

Mit dem Teststand soll es ermöglicht werden neue SiPMs möglichst schnell und unkompliziert zu charakterisieren.

### 2.1. PDE

Mit dem Messaufbau ist es möglich die PDE eines SiPM über einen Bereich von 350 nm bis 1000 nm zu bestimmen. Durch die besondere statistische Auswertung der Ergebnisse enthält die PDE keine falsche Vergrößerung durch "Nachpulse" oder optisches Übersprechen.

Um dies zu erreichen wird die PDE für einzelne Wellenlängen mittels gepulster Lichtquellen wie Lasern und LEDs absolut berechnet. Mit diesen Werten kann eine relative Sensitivitäts-Messung über das genannte Spektrum genormt werden. Für die PDE-Messung wird eine Lichtquelle mit geringer Intensität und möglichst gleichmäßiger Lichtverteilung benötigt. Bei diesem Aufbau wird dies mit einer Ulbrichtkugel realisiert. Die Kugel ist innen mit reflektierender Farbe bestrichen und hat eine Eingangsöffnung durch die das Licht einfallen kann sowie zwei Ausgänge. Am ersten Ausgang ist eine Kontroll-Diode befestigt, die die Intensität des Lichtes bestimmt. Am zweiten Ausgang ist eine Lochblende angebaut, hinter der der SiPM befestigt wird. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 6 skizziert. Am Eingang der Ulbrichtkugel kann mittels Glasfaserkabel die Xenon-Lampe



Abbildung 6: Versuchsaufbau zur Bestimmung der PDE.

mit dem Monochromator, ein Laser oder eine beliebige andere Lichtquelle angeschlossen werden. Oben auf der Ulbrichtkugel befindet sich eine geeichte Photodiode<sup>7</sup>, die benutzt wird, um die Lichtintensität hinter der Lochblende zu bestimmen. Dazu wird die Intensität am oberen Ausgang und hinter der Lochblende mit der Diode gemessen und das Verhältnis gebildet. Der SiPM wird mit einer Hochspannungsquelle<sup>8</sup> mit einer Sperrspannung versorgt und das Signal anschließend um den Faktor 50 verstärkt<sup>9</sup>, bevor es von einem digitalen Oszilloskop<sup>10</sup> ausgelesen wird. Alle Messungen erfolgen über die Auswertung der Daten des Oszilloskops.

### 2.1.1. Absolute PDE

Zur Bestimmung der absoluten PDE wird als Lichtquelle ein Laser<sup>11</sup> verwendet. Der Lasertrigger wird auf den zweiten Eingang des Oszilloskops gelegt, sodass der SiPM genau zum Laserpuls ausgelesen werden kann. Die Frequenz des Laser darf nicht zu hoch eingestellt werden, damit der SiPM nicht unter seiner Regenerationszeit aktiviert wird

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>Photodiode von Oriel Modell 818-UV mit Auslesegerät Modell 842PE

 $<sup>^{8}</sup>$ Keithley6487

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup>Phillip Modell 6954

 $<sup>^{10}</sup>$ Picoscope 6402C

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>Picosecond Laser System Controller EIG20000X mit verschiedenen Laserköpfen

und die Signalhöhe abnimmt. Außerdem muss darauf geachtet werden, dass der SiPM im linearen Bereich betrieben wird. Es dürfen nicht mehrere Photonen pro Laserimpuls auf den gleichen Pixel treffen, da pro Pixel nur ein Photon registriert werden kann. Nachdem der Laser gefeuert hat, wird die Spannung  $U_{\text{SiPM}}$ , die am Oszilloskop gemessen wird, für einen Zeitraum zwischen 50 ns bis 100 ns integriert und in ein Histogramm aufgetragen, welches auch Photospektrum genannt wird (s. Abb. 7). Der Integrationszeitraum wird so gewählt, dass das Photospektrum möglichst genau ist und darf deshalb nicht zu lange gewählt werden, weil ansonsten das regelmäßige Rauschen das Spektrum verzerrt. Der Zeitraum muss für jeden SiPM-Typ neu angepasst werden.



(a) Signalform mit
Integrationsbereich. Die beiden
Markierungen zeigen den
Integrationsbereich. Bei 0 ns wird
das Oszilloskop durch den
Pulsgeber des Lasers getriggert,
aber das Signal entsteht erst 40 ns
später.



(b) Beispiel eines resultierenden Photospektrums. Wenn die Integrationszeit zu lang ist, entstehen neben den Photo-Elektronen Spitzen noch kleinere Nebenspitzen durch Rauschen des SiPM und des Verstärkers.

Abbildung 7: Integrationsbereich und Beispiel eines Photospektrums mit dem SiPM Hamamatsu S13360-1350CS"0307

**Statistische Auswertung** Aus dem Photospektrum soll die mittlere Zahl der detektierten Photonen  $n_{pe}$  ausgelesen werden. Wegen der geringen Anzahl an Photonen wird davon ausgegangen, dass die Anzahl der Poisson-Statistik folgt. Das Spektrum ist allerdings durch thermisches Rauschen, "Nachpulse" und optisches Übersprechen verschoben. Unter Annahme einer Poisson-Verteilung ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit kein Photo-Elektron zu messen:

$$P(0, n_{pe}) = e^{-n_{pe}}$$
(4)

$$n_{pe} = -\ln P(0, n_{pe}) \tag{5}$$

Die Wahrscheinlichkeit  $P(0, n_{pe})$  lässt sich aus dem Spektrum berechnen, indem die Anzahl der Ereignisse mit keinem Photo-Elektron  $N_0$  durch die Gesamtanzahl  $N_g$  geteilt wird. Die Anzahl  $N'_0$  im gemessenen Spektrum ist aber nicht gleich der tatsächlichen Anzahl  $N_0$ . Sie ist im Spektrum verringert durch Signale, die thermisch ausgelöst worden sind. Deshalb wird noch eine Dunkelmessung ausgewertet, die zufällig getriggert worden ist. Aus dieser Messung erhält man die Wahrscheinlichkeit, dass ein Pixel ein falsches Signal liefert mit  $P_{therm} = N_0^{dunkel}/N_g^{dunkel}$ .  $N_0^{dunkel}$  und  $N_g^{dunkel}$  sind dabei jeweils die Anzahl der Ereignisse, bei denen kein Pixel ein Signal liefert, bzw. die Gesamtanzahl der Ereignisse. Für  $P(0, n_{pe})$  ergibt sich damit:

$$P(0, n_{pe}) = \frac{P(0, n'_{pe})}{P_{therm}}$$
(6)

Aus den beiden Messungen lässt sich die bereinigte mittlere Photo-Elektron-Zahl berechnen:

$$n_{pe} = -\ln\left(\frac{N_0'}{N_g'}\right) + \ln\left(\frac{N_0^{dunkel}}{N_g^{dunkel}}\right)$$
(7)

Um zu bestimmen, welche Ereignisse zu  $N_0$  gezählt werden, muss ein Limit bestimmt werden, bis zu dem aufsummiert wird. Dafür wird die relative Verstärkung aus dem Photospektrum berechnet. An die Positionen aller Spitzen aus dem Photospektrum wird eine Gerade f(x) angepasst, deren Steigung m gleich der relativen Verstärkung  $V'^{12}$ . Das

 $<sup>^{12}</sup>$ Bei dem Versuchsaufbau wird die Verstärkung Vnicht direkt gemessen, sondern die Spannung, die über den Quenching-Widerstand abfällt. Diese ist proportional zur Verstärkung und kann deshalb genauso verwendet werden, um die Berechnungen durchzuführen. Allerdings ist sie keine charakteristische Größe des SiPMs

Limit l setzt sich aus dem Ordinatenabschnitt c und der halben Steigung zusammen (s. Abb. 9c):

$$f(x) = mx + c \tag{8}$$

$$l = 0.5 \cdot m + c \tag{9}$$

Bei der Bestimmung der Summationsgrenzen wurde beim ursprünglichen Teststand die Ope-Spitze mit einer Gaußfunktion gefittet und bis zu  $3-\sigma$  integriert. Das war möglich, weil zur Messung des Photospektrums ein QDC (*Quarge-to-Digital-Converter*) verwendet wurde, der Ladung in ein digitales Signal verwandelt. Diese Geräte haben einen elektronischen Versatz des Signals. Dadurch liegt die Ope-Spitze nicht bei 0, sondern bei einem höheren Wert. An dieser Position ist die Spitze gauß-verteilt. Bei der Messung des Photospektrums mit einem Oszilloskop liegt die Spitze bei 0. Sie hat deswegen keine linke Flanke und ist dementsprechend nicht gauß-verteilt. Deswegen wird die beschriebene Methode angewendet, um die Summationsgrenze zu bestimmen.

Aus der mittleren Zahl der detektierten Photonen kann mittels des Verhältnisses der Lichtintensität zwischen Lochblende und oberem Ausgang  $R_{0,6}$  die *PDE* berechnet werden:

$$PDE = \frac{n_{pe} \cdot R_{0,6} \cdot f}{P_{opt} / \left(\frac{hc}{\lambda}\right)} \tag{10}$$

f ist die Frequenz des verwendeten Lasers, mit der multipliziert wird, um die Anzahl an detektierten Photonen pro Sekunde zu erhalten. Im Nenner wird die gemessene optische Leistung durch die Energie eines einzelnen Photons der Wellenlänge  $E_{\lambda} = \frac{hc}{\lambda}$  geteilt, um die Anzahl der Photonen zu erhalten.

**Aufbau** Der SiPM zusammen mit der Ulbrichtkugel befinden sich auf einem optischen Tisch, der durch eine Abdeckung verdunkelt ist. Die Auslese- und Steuergeräte befinden sich außerhalb und werden mit Kabeln und Glasfaserleitungen mit dem Aufbau unter der Abdeckung verbunden. Das hat die Vorteile, dass bei eventuellen Umbauten die Positionierung des SiPM nicht beeinträchtigt wird und dass die Temperatur unter der Abdeckung durch die Kühlung der Geräte nicht so stark beeinträchtigt wird. Das Signal des SiPM wird vor dem Oszilloskop noch mit einem Verstärker verstärkt. Dieser wurde im Rahmen des Aufbaus mit einer passiven Kühlung ausgestattet.

Der Laser, das Oszilloskop und das Auslesegerät für die geeichte Diode werden über eine USB-Verbindung mittels einer seriellen Schnittstelle gesteuert und ausgelesen. Für die Hochspannungsquelle wurde eine RS-232 Verbindung auch mit einer seriellen Schnittstelle verwendet. Damit können alle Messungen automatisch durchgeführt werden und die Messparameter auch aus der Entfernung angepasst werden.

Der SiPM ist an einer Aluminiumbox befestigt, in der sich die notwendigen Schaltungen befinden, um den SiPM vor dem elektrischen Hintergrund zu schützen. Die Box lässt sich mit einem manuellen Positionierungssystem vor der Lochblende so ausrichten, dass alles Licht den SiPM erreicht. Dies ist für die statistische Auswertung essentiell, weil die Berechnung der *PDE* mit dem Verhältnis  $R_{0,6}$  sonst nicht möglich ist. Bei einer Blende mit einem Durchmesser von 0,6 mm lässt sich zeigen, dass es einen Bereich gibt, in welchem alles Licht auf den SiPM fällt (s. Abb. 8).

**Messroutine** Im Folgenden soll eine kurze Erklärung des Messablaufs für die Verwendung des Teststandes gegeben werden. Die Messungen teilen sich auf in Messung und Analyse. So kann die Auswertung im nachhinhein noch weiter angepasst werden und mit den Rohdaten erneut durchgeführt werden.

Die einzelnen Messpunkte werden in der Reihenfolge aufgelistet, in der sie gemessen werden sollten.

 $R_{0,6}$  Um die PDE für einen SiPM bei einer Wellenlänge zu bestimmen, muss zuerst das Verhältnis  $R_{0,6}$  gemessen werden. Dafür wird an beiden Ausgängen jeweils eine Messung mit Laser und eine Dunkelmessung ohne Laser durchgeführt. So erhält man die Werte  $P_{\text{Oben}}$ ,  $P_{\text{Seite}}$ ,  $P_{\text{Oben}}^{\text{dunkel}}$  und  $P_{\text{Seite}}^{\text{dunkel}}$ . Für  $R_{0,6}$  gilt:

$$R_{0,6} = \frac{P_{\text{Oben}} - P_{\text{Oben}}^{\text{dunkel}}}{P_{\text{Seite}} - P_{\text{Seite}}^{\text{dunkel}}}$$
(11)

 $R_{0,6}$  sollte auf diese Weise mehrfach bestimmt werden und damit ein Mittelwert gebildet werden, um statistische Schwankungen auszugleichen. Die Analyse-Software ermöglicht es, dass die Messergebnisse automatisch eingelesen und ausgewertet werden, wenn mehrere Messungen von allen Intensitäten vorliegen. Für die zwei Laser, die im weiteren Messaufbau verwendet worden sind, erhält man folgende Ergebnisse:

Wellenlänge [nm]	Verhältnis $R_{0,6}$
374	$5607,\!56 \pm 116,\!07$
459	$5644,\!48 \pm 60,\!89$

Tabelle 1: Vergleich der gemessenen PDEs mit den Angaben des Herstellers

**Positionierung des SiPM** Um den SiPM zu positionieren, wird der SiPM mittels des manuellen Positionierungssystems ungefähr auf die Mitte der Lochblende ausgerichtet. Wobei er nah genug an der Blende befestigt sein muss, sodass der Lichtkegel klein genug bleibt. Mit dem Messprogramm kann dann die beste Position bestimmt werden, indem verschieden Messungen um den Mittelpunkt gemacht werden.



Abbildung 8: Positionierung des SiPMs vor der Lochblende mit Durchmesser  $0,6\,\mathrm{mm}.$ 

 $n_{pe}$  Um die mittlere Anzahl der Photonen zu bestimmen, werden Photon-Spektren für verschiedene Gegenspannungen aufgenommen (wie z. B. 9a). Währenddessen wird

mit der Photodiode die optische Leistung gemessen. Dies wird sowohl mit eingeschaltetem Laser und ohne Laser durchgeführt. Der Teststand ermöglicht es, dass mehrere Messungen hintereinander automatisch durchgeführt werden können, indem der Laser an- und ausgeschaltet wird und die Spannungsquelle eine Rampe durchfährt.

Um die Positionen der Maxima in den Messdaten zu finden, werden die Daten aus der Messung abhängig von der Verteilung der Messergebnisse automatisch formatiert, sodass der Achsenabschnitt den wichtigen Teil des Photospektrums umfasst. In Abbildung 9b lässt sich der Unterscheid von der neuen Formatierung im Vergleich zur unbearbeiteten Darstellung in Abbildung 9a erkennen. Aus dem Histogramm wird die Position der Spitzen bestimmt und gefittet, wie in Abbildung 9c gezeigt ist. Daraus wird das Limit für die Summation der Ereignisse nach Gleichung 9 berechnet. Bei der Erkennung der Spitzen kann es vorkommen, dass das Analyse-Programm die Position der Spitzen falsch bestimmt, wenn die Spitzen bei höheren Werten beginnen auszufransen. Dies ist beispielhaft in Abbildung 10a dargestellt. Bei niedrigeren Werten geschieht dies in der Regel nicht, da die Intensität des Lasers vor der Messung so angepasst werden sollte, dass die Intensität nicht zu hoch ist und die ersten Spitzen deutlich zu erkennen sind. Deshalb fängt der Fit für die Verstärkung bei den ersten Spitzen an und bricht dann ab, wenn ein Punkt 20 % über oder unter der extrapolierten Fit-Gerade liegt (s. Abb. 10b). Mit diesen Methoden eignet sich das Analyse-Programm dazu beliebige Photospektren unabhängig von der Verstärkung oder der mittleren Anzahl der Photo-Elektronen auszuwerten. Die Auswertung kann fast vollständig automatisiert durchgeführt werden, da selbst die zugehörigen Dunkelmessungen von dem Programm selbstständig gefunden werden.

Mit dem Fit über die Verstärkung wird auch die Durchbruchspannung des SiPM bestimmt. Aus der Verstärkung bei den einzelnen Gegenspannungen kann durch einen linearen Fit nach Gleichung 1 die Überspannung ermittelt werden. Dadurch können alle Werte in Abhängigkeit der Überspannung angegeben werde.

 $P_{opt}$  Die optische Leistung wird parallel zu den Photospektren gemessen. Mit dem Analyse-Programm werden aus allen Werten die Mittelwerte zu  $P'_{opt}$  und  $P^{dunkel}_{opt}$  be-



(d) Summationsbereich bei dem Photospektrum.

(e) Summationsbereich bei dem Dunkelspektrum.

Abbildung 9: Analyse-Routine.



(a) Ein Photospektrum mit schlecht bestimmten Spitzen. Die rechte Spitze ist eindeutig falsch bestimmt.



(b) Die Positionen der Spitzen und der Fit durch die Punkte. Der Fit bricht vor dem letzten Punkt ab, weil dieser nicht innerhalb der Kriterien liegt.

Abbildung 10: Beispiel des automatischen Fits der Spitzen.

stimmt. Daraus lässt sich die optische Leistung mit  $P_{\text{opt}} = P'_{\text{opt}} - P^{\text{dunkel}}_{\text{opt}}$  berechnen.

**PDE** Um die PDE zu bestimmen werden alle benötigten Werte aus den jeweiligen Auswertungs-Dateien eingelesen und damit die PDE nach Formel 10 berechnet. Um eine möglichst fehlerfreie Berechnung auszuführen zu erhalten, empfiehlt es sich mehrere PDEs bei gleicher Laserintensität zu erstellen und davon den Mittelwert zu bilden, um die statistischen Schwankungen zu korrigieren (s. Abb. 11).<sup>13</sup> Denn die einzelnen Messungen müssen kurz bleiben, damit die Temperatur des SiPM annähernd konstant bleibt, weil sich sonst die Überspannung während einer Messung verschiebt.

Um den Mittelwert der Messungen zu bestimmen, müssen die einzelnen Messpunkte in der richtigen Reihenfolge sortiert werden, weil sich die Überspannung zwischen den Messungen aufgrund von Temperaturänderungen unterscheidet. Das Analyse-Programm ist in der Lage alle Messdaten in ein gemeinsames Diagramm zu sortieren und aus den nebeneinanderliegenden Punkten einen Mittelwert zu bilden und den Fehler des Mittelwertes zu berechnen.

 $<sup>^{13}</sup>$ Die statistischen Schwankungen des Lasers werden bei der Bestimmung von  $R_{0,6}$  berücksichtigt und müssen es dementsprechend auch bei der PDE.



Abbildung 11: Ergebnis einer einzelnen Messung mit dem SiPM Hamamatsu S13360-1350CS bei einer Wellenlänge von 459 nm.

**Ergebnisse** Der Versuchsaufbau wurde exemplarische mit dem Hamamatsu S13360-1350CS für Laser mit Wellenlängen 374 nm und 459 nm getestet. Die PDE ist in Abbildung 12 gezeigt. Der Hersteller Hamamatsu gibt für diesen SiPM eine PDE von 40 % bei einer Wellenlänge von 450 nm bei einer Überspannung von 5 V an. Für 370 nm beträgt die PDE ungefähr 30 %. Dies liegt deutlich über den Ergebnissen, die mit dem Teststand gemessen worden sind. Wie in Abbildung 12 erkennbar, liegt die PDE bei 450 nm bei  $\sim$ 23 % und die PDE bei 374 nm bei  $\sim$ 16 %. Auch bei höheren Überspannungen liegt die PDE deutlich unter den Herstellerangaben (s. Tabelle 2). Mögliche Ursache für diese



Abbildung 12: PDE des SiPM Hamamatsu S13360-1350CS.

Wellenlänge [nm]	PDE Hamamatsu <sup>14</sup>	PDE Teststand	
	$U_{\ddot{\mathrm{U}}\mathrm{ber}} = 5\mathrm{V}$	$U_{\rm Über} = 5{\rm V}$	$U_{\rm \ddot{U}ber} = 10{\rm V}$
374	30%	16%	19%
459	40%	23%	28%

Tabelle 2: Vergleich der gemessenen PDEs mit den Angaben des Herstellers.

Abweichung könnte der SiPM sein, der schon länger im Labor verwendet wurde und dabei möglicherweise nicht sachgemäß behandelt worden ist, sodass die PDE darunter gelitten hat. Außerdem wurde der SiPM aufgrund einer falschen Beschriftung teilweise weit über der empfohlenen Arbeitsspannung betrieben, während der Teststand aufgebaut worden ist. Falls dies der Fall ist, lässt sich das überprüfen, indem ein neuer SiPM charakterisiert wird. Eine andere Erklärung für die Abweichung wäre, dass Messgenauigkeit der geeichten Photodiode nachgelassen hat. In der Folge könnte auch das gemessene Verhältnis  $R_{0,6}$  zu niedrig sein, bzw. die gemessene optische Leistung zu hoch.

#### 2.1.2. Relative Sensitivität

Für die Sensitivitätsmessung wird als Lichtquelle eine Xenon-Bogen-Lampe verwendet, deren Licht durch einen Monochromator<sup>15</sup> gefiltert wird. Damit lässt sich der Bereich von 350 nm bis 1000 nm hinreichend abdecken. Hier ist es nicht mehr wichtig, dass alles Licht den SiPM trifft, das duch die Lochblende fällt. Deshalb wird eine größere Lochblende mit Durchmesser 0,8 mm verwendet, was unter anderem den Vorteil hat, das sich das Intensitätsverhältnis von oberem Ausgang zur Lochblende leichter messen lässt, weil mehr Licht durch die Lochblende fällt. Der SiPM wird während der Messung zufällig ausgelesen, was in dem Fall einer kontinuierlichen Messung entspricht. Die Sensitivität des SiPM enthält bei dieser Messung auch alle falschen Signale durch "Nachpulse",

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup>Die PDEs, die von Hamamatsu gemessen worden sind, beinhalten nicht die Vergrößerung durch "Nachpulse" und optische Übersprecher

 $<sup>^{15}</sup>$ Oriel 77250

optisches Übersprechen und thermische Signale. Sie berechnet sich mit:

$$S = \frac{\bar{U}_{\rm SiPM} \cdot R_{0,8} / V'}{P_{opt} / \left(\frac{hc}{\lambda}\right)} \tag{12}$$

Dabei ist  $\overline{U}_{SiPM}$  die gemittelte Spannung, die von dem Oszilloskop gemessen wird. Die entstehende Sensitivitätskurve wird mit absoluten PDE-Werten geeicht. Dadurch wird die Messung von falschen Signalen bereinigt. Eigentlich wäre das Verhältnis der Lichtintensität zwischen oberem Ausgang und Blende damit auch redundant. Aber weil das Verhältnis von der Geometrie der Ulbrichtkugel abhängt und sich mit der Wellenlänge ändert, ist es auch hier wichtig das relative Verhältnis  $R_{0,8}$  zu bestimmen. V' bezeichnet die gemessene relative Verstärkung bei der gleichen Überspannung. Die gemessene Verstärkung ist unabhängig von der Wellenlägne.

**Aufbau** Der Monochromator, der für diesen Versuchsaufbau zur Verfügung stand, war zu Beginn der Bachelorarbeitsphase nicht mehr funktionstüchtig. Aufgrund von Materialermüdung war ein Zahnrad aus der Antriebsschaltung durchgebrochen, mit der der Spiegel im Inneren bewegt werden sollte. Mit Hilfe der mechanischen Werkstatt konnte das Zahnrad mit dem zugehörigen Ritzel ausgetauscht werden. Da die amerikanischen Hersteller ein anderes Normsystem für die Zahnräder verwendet haben, hat sich mit den neuen Zahnrädern das Übersetzungsverhältnis von 48 : 24 auf 52 : 25 geändert. Dies wurde in der zugehörigen C++-Bibliothek angepasst. Nach der mechanischen Reparatur musste der Monochromator neu geeicht werden. Dafür wurde die Xenon-Lampe und die Photodiode aus dem Teststand verwendet. Es wurde ein Spektrum mit der Photodiode aufgenommen und die charakteristische Spitze in der Intensität bei 827 nm[1] als Eichpunkt verwendet, um die Skala des Monochromators zu eichen.

Die Xenon-Lampe, die mit dem Monochromator verwendet wird, muss vor der Messung mehrere Stunden aufheizen, bis sie eine gleichmäßige Intensität erreicht. Damit mehrere Messungen abwechselnd mit Dunkelmessungen automatisch durchgeführt werden können, ist vor der Xenon-Lampe ein Filterrad angebracht. Dieses lässt sich mit dem Computer ansteuern und kann das komplette Licht der Xenon-Lampe blockieren.



Abbildung 13: Intensitätsspektrum der Xenon-Bogenlampe aufgenommen mit der Photodiode. Der charakteristische Spitze bei 827 nm ist als Eichpunkt gefittet. (Die Messung hat vor der Eichung stattgefunden, was sich an der falschen Skala der Wellenlänge erkennen lässt.)

So muss die Lampe nicht ausgeschaltet werden.

Ansonsten unterscheidet sich der Aufbau von dem Aufbau zur Messung der absoluten PDE nur dadurch, dass eine Lochblende mit einem Durchmesser von 0.8 mm anstatt 0.6 mm verwendet wird. Das hat den Vorteil, dass die Intensität des Lichtes, das auf den SiPM fällt, höher ist, weil sonst die Intensität mit dem kleineren Durchmesser bei der Xenon-Lampe zu gering ist, um eine gute Messung zu erhalten. Der Lichtkegel liegt mit der größeren Lochblende auf dem gesamten Bereich des SiPM und auch außerhalb. Das führt dazu, dass das Verhältnis  $R_{0,8}$  auch nur relativ verwendet werden kann und nicht absolut. Dies ist auch ein weiterer Grund, weshalb die richtige PDE nicht auf diese Weise ohne die Verwendung der Eichmessungen gemessen werden kann.

#### Messroutine

 $R_{0,8}$  Das Verhältnis  $R_{0,8}$  wird ähnlich wie das Verhältnis  $R_{0,6}$  in 11 bestimmt. Allerdings wird dabei das Spektrum von 350 nm bis 1000 nm in Schritten von 10 nm durchfahren. Aus mehreren Messungen werden für die einzelnen Wellenlängen Mittelwerte gebildet. Die Schwankungen sind allerdings stärker als bei den Lasermessungen und die Intensitäten ohne Einstrahlung der Xenon-Lampe wirken sich wegen der geringen Intensität des Lichtes deutlich stärker aus.

**Positionierung des SiPMs** Die Positionierung erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie bei der Messung zur absoluten PDE. Allerdings ist es bei der relativen Sensitivität nicht wichtig, dass der SiPM genau in der Mitte der Lochblende platziert ist, weil der Lichtkegel nicht vollständig auf dem SiPM liegt. Trotzdem sollte darauf geachtet werden, wie der SiPM platziert ist, damit eine möglichst viel Licht auf den SiPM fällt.

V' Die relative Verstärkung muss für die eingestellte Gegenspannung vorher mit der Messroutine der absoluten PDE bestimmt werden.

 $P_{\text{opt}}$  Die Intensität des Lichtes wird parallel zum SiPM für jeden Wellenlängenabschnitt ausgelesen. Zusätzlich muss noch eine Dunkelmessung gemacht werden, damit aus der gemessenen optischen Intensität  $P'_{\text{opt}}$  die optische Intensität  $P_{\text{opt}}$  ohne Erhöhung durch ein Dunkelsignal  $P_{\text{opt}}^{\text{dunkel}}$  berechnet werden kann. Es gilt wie bei der absoluten PDE-Messung  $P_{\text{opt}} = P'_{\text{opt}} - P_{\text{opt}}^{\text{dunkel}}$ .

 $U_{\rm SiPM}$  Die Spannung  $U_{\rm SiPM}$ , die am Widerstand des SiPM, abfällt wird für jede Wellenlänge integriert und durch die Messzeit t geteilt, um die mittlere Spannung zu erhalten. Zusammen mit der relativen Verstärkung erhält man damit die durchschnittliche Anzahl an Photo-Elektronen pro Messzeit mit  $\frac{n_{\rm pe}}{\Delta t} = \frac{\bar{U}_{\rm SiPM}}{V'}$ .

**S** Um die Sensitivität des SiPM aus den Messergebnissen zu bestimmen, werden von dem Analyse-Programm alle benötigten Variablen eingelesen (bis auf die relative Verstärkung V', die angegeben werden muss). Damit wird automatisch eine Sensitivitätskurve erstellt und kann gemittelt werden, wenn mehrere Messungenergebnisse vorhanden sind. Bei der relativen Sensitivität ist es noch wichtiger mehrere kurze Messungen zu machen und den Mittelwert aus diesen zu bilden, da die Intensität der Lampe schwanken kann.





(c) Intensität am oberen Ausgang mit Dunkelmessung.



(b) Vergleich der Intensitäten der beiden Ausgänge abzüglich der Dunkelmessung.



(d) Intensität am seitlichen Ausgang mit Dunkelmessung.

Abbildung 14: Lochblende 0,8 mm.

**Ergebnisse** Bei den Tests der Messroutine kam es zu einem Problem, was verhindert hat, dass die relative Sensitivität bestimmt werden konnte. Die Messung des Verhältnisses  $R_{0,8}$  hat eindeutig falsche Ergebnisse geliefert. Eine Messukurve ist beispielhaft in Abbildung 14a gezeigt. Man erkennt, dass das Verhältnis im Bereich der Wellenlänge 350 nm gegen 0 geht und im Bereich 820 nm die charakteristischen Spitzen des Xenon-Spektrums zeigt, welche in Abbildung 13 erkennbar sind. Das Verhalten von  $R_{0,8}$  in Abbildung 14a lässt sich erklären, indem man  $P_{\text{Oben}} - P_{\text{Oben}}^{\text{dunkel}}$  und  $P_{\text{Seite}} - P_{\text{Seite}}^{\text{dunkel}}$  (um einen Faktor vergrößert) miteinander vergleicht (s. Abb. 14b). Zusätzlich ist auch noch  $P_{\text{Seite}}^{\text{dunkel}}$  abgebildet. Man erkennt, dass die Hintergrund-Intensität, die mit  $P_{\text{Seite}}^{\text{dunkel}}$  gemessen wird, im Bereich niedriger Wellenlängen unter 500 nm dominiert. Es wurden

folgende Veränderungen beim Versuchaufbau durchgeführt, um bessere Ergebnisse zu erhalten, welche leider alle erfolglos blieben. Es wurde dabei versucht den Hintergrund möglichst zu minimieren bwz. die Intensität des Xenon-Lichtes zu erhöhren, um ein besseres Verhältnis von Signal zu Hintergrund zu erhalten.

#### • Optische Isolation

Die Abdeckung auf dem optischen Tisch, die den Aufbau vor Licht schützen soll, wurde mit schwarzen Klebeband noch weiter abgedeckt, um sicherzustellen, dass kein Licht von außen eindringen kann.

#### • Messungen bei Nacht

Das Labor wurde bei den Messungen sowieso schon mit einer schwarzen Markise vor Sonneneinstrahlung geschützt. Allerdings ist diese nicht komplett deckend, weshalb noch schwache Sonnenstrahlen in den Raum eindringen können. Um zu vermeiden, dass diese sich auf die Messung auswirken, wurden mehrere Messungen nach Sonnenuntergang im Labor durchgeführt.

#### • Erhöhung der Lichtintensität

Es wurde versucht die Intensität des Lichtes zu erhöhen, welches die Ulbrichtkugel erreicht. Das meiste Licht der Xenon-Lampe wird im Monochromator und vor dem Eingang des Glasfaserkabels absorbiert, weshalb die Lichtintensität nicht das volle Potenzial erreicht hat. Deshalb wurde versucht mittels einer Linse das Licht weiter zu fokussieren, damit es weniger Verluste an den Blenden am Ein- und Ausgang des Monochromators gibt. Leider war es mit den verwendeten Materialien nicht möglich die Intensität signifikant zu erhöhen.

Alle Maßnahmen brachten keine signifikante Veränderung im Verhältnis zwischen Hintergrund zu Lichtintensität mit sich. Bei Tests zur Lichtisolation der Abdeckung des optischen Tischs hat sich auch gezeigt, dass die Auswirkungen von Licht im Raum fast keine Veränderung des Hintergrundes mit sich bringen. Um das Verhältnis  $R_{0,8}$  bestimmen zu können, wäre es dementsprechend am sinnvollsten zu versuchen, den Lichtweg zu optimieren, da dort das größte Potenzial für eine Verbesserung liegt.

### 2.2. Optisches Übersprechen

Optische Übersprecher entstehen durch optische Photonen, die bei einer Lawine in einem Pixel entstehen und eine Lawine in einem benachbarten Pixel auslösen können. Die Wahrscheinlichkeit für optische Übersprecher hängt von der Größe der Lawine also der Verstärkung ab und damit von der Überspannung. Um die Wahrscheinlichkeit für optische Übersprecher zu messen, werden thermische Signale als Auslöser untersucht. Die Wahrscheinlichkeit für thermische Photo-Elektronen ist so gering, dass angenommen werden kann, dass bei zwei gleichzeitig ausgelösten Pixeln ein optischer Übersprecher stattgefunden hat. Die Wahrscheinlichkeit für optische Übersprecher  $P_{\text{Über}}$  kann dann aus dem Verhältnis der Ereignisse mit mehr als einem Photo-Elektron  $N_{1,5pe}$  und Ereignissen mit genau einem Photo-Elektron  $N_{0,5pe}$ .

$$P_{\text{Über}} = \frac{N_{1,5\text{pe}}}{N_{0,5\text{pe}}} \tag{13}$$

Der Index 1, 5pe bzw. 0, 5pe bezieht sich dabei auf die Trigger-Höhe, die verwendet wird, um ein Signal zu erkennen.

**Aufbau** Um für die Messung besser abgedunkelt als auf dem optischen Tisch durchführen zu können, wird der SiPM in einer lichtundurchlässigen Box platziert, die zusätzlich abgeklebt ist und nur Eingänge für die Gegenspannung und den Ausgang zum Oszilloskop hat. Das ausgehende Signal wird vor dem Oszilloskop noch einmal verstärkt. Die Gegenspannung kann mit dem Computer gesteuert werden und dann durch das Oszilloskop ausgelesen werden.

**Messroutine** Um die Wahrscheinlichkeit genau bestimmen zu können, werden viele Messdaten benötigt. Im Gegensatz zum Teststand von Tadday[5] wird deshalb nicht der Trigger am Oszilloskop verwendet, weil sonst mehrfach gemessen werden müsste, um die verschiedenen Trigger-Schwellen abzudecken. Außerdem müsste die Trigger-Schwelle für jede Gegenspannung neu angepasst werden, weil die Schwelle von der Verstärkung abhängt.<sup>16</sup> Stattdessen wird die Ausgangsspannung aufgezeichnet und in der Ursprungsform gespeichert. Das Analyse-Programm kann dadurch in feinen Schritten die Trigger-Schwelle erhöhen und dabei die Ereignisse zählen ohne, dass erneute Messungen nötig wären.

**Digitaler Trigger** Aus einer Messung fallen bei dieser Methode eine große Menge an Daten an, die ausgewertet werden müssen. Deshalb musste bei der Konzeption des digitalen Triggers auch Effizienz berücksichtigt werden. Der Trigger arbeitet mit den fünf letzten eingelesenen Werten aus dem Spannungsverlauf. Falls der dritte Wert über der aktuellen Triggerschwelle liegt, wird der richtige Algorithmus gestartet. Dabei wird eine Gerade über die fünf Werte gefittet, anhand deren Eigenschaften entschieden wird, ob der Trigger ausgelöst wird. Dabei werden die Steigung sowie die absoluten Höhen des ersten und letzten Wertes berücksichtigt. Die genauen Kriterien können je nach Form des Signals angepasst werden.

Diese strengen und aufwendigen Kriterien sind nötig, da die Signalform von Störungen durch den Verstärker und anderem elektronischen Rauschen überlagert ist.

**Ergebnisse** Die Messroutine für optische Übersprecher wurde vor der Abgabe der Bachelorarbeit nicht fertiggestellt. Das liegt daran, dass der Fertigstellung der Messroutine zur Bestimmung der PDE vorrang eingeräumt worden ist, weil dies der Fokus der Arbeit war. Die Messroutine ist aus diesem Grund noch nicht optimiert und muss noch überarbeitet werden. Eine kurze Testmessung zeigt allerdings, dass das Messprinzip funktioniert und mit mehr Daten verbessert werden kann, wie man in Abbildung 15 sehen kann.

### 2.3. "Nachpulse"

Die Wahrscheinlichkeit für Nachpulse wird wie bei optischen Übersprechern durch eine Analyse des Rauschens des SiPMs gemessen. Der Messaufbau ist dabei gleich wie für die

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup>Ein weiterer Grund für diese Methode ist die lange Dauer einer Messung im Vergleich zur Auswertung mit einem Analyseprogramm.



Abbildung 15: Beispielmessung der Verteilung von dem Rauschen eines SiPM in Abhängigkeit der Signalhöhe. Die Schwelle bei 0,5pe ist markiert. Bei längeren Messungen würde man weitere Schwellen von 1,5pe etc. erkennen.

optischen Übersprecher.

Um die Wahrscheinlichkeit zu bestimmen, wird der Zeitabstand zwischen aufeinanderfolgenden Signalen gemessen. Die enstehende Verteilung kann mit zwei Exponentialfunktionen gefittet werden, welche die Wahrscheinlichkeitsdichte für thermische Photo-Elektronen  $n_{\rm tP}(\Delta t)$  und für Nachpulse  $n_{\rm NP}(\Delta t)$  in Abhängigkeit der Zeitdifferenz  $\Delta t$ zum vorigen Signal angeben:

$$n_{\rm tP}(\Delta t) = N_{\rm tP} / \tau_{\rm tP} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{\rm tP}}}$$
(14)

$$n_{\rm NP}(\Delta t) = N_{\rm NPs} / \tau_{\rm NPs} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{\rm NPs}}} + N_{\rm NPl} / \tau_{\rm NPl} \cdot e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{\rm NPl}}}$$
(15)

Die Zeitkonstante  $\tau_{tP}$  entspricht der Rate für die Messung von thermischen Signalen mit  $N_{tP}$  als Anzahl der der Signale. Die Wahrscheinlichkeitsdichte für Nachpulse  $n_{NP}(\Delta t)$ 

kann in zwei Exponentialfunktionen aufgeteilt werden, um den Fit zu verbessern.[5] Dabei wird zwischen einem schnellen Nachpuls NPs und einem langsamen Nachpuls NPl unterschieden mit  $N_{\text{NPs}}$  und  $N_{\text{NPl}}$  als entsprechender Anzahl an Signalen mit zugehörigen Zeitkonstanten  $\tau_{\text{NPs}}$  und  $\tau_{\text{NPl}}$ . Für die Nachpuls-Wahrscheinlichkeit gilt dann:

$$P_{NP} = \frac{\int_0^\infty n_{\rm NP} \,\mathrm{d}\Delta t}{\int_0^\infty (n_{\rm NP} + n_{\rm tP}) \,\mathrm{d}\Delta t} \tag{16}$$

**Aufbau** Der Aufbau ist identisch zu dem Aufbau zur Messung der Wahrscheinlichkeit für optische Übersprecher.

**Messroutine** Die Messroutine ist auch ähnlich wie bei den optischen Übersprechern. Bei einer Messung des Rauschens eines SiPMs können sowohl die optischen Übersprecher als auch die Nachpulse analysiert werden. Dadurch muss weniger gemessen werden und aus einer einzelnen Messungen können beide Wahrscheinlichkeiten hereausgefunden werden. Der Trigger-Algorithmus ist hierbei auch identisch und wird auf eine Schwelle von 0, 5pe eingestellt, um alle Ereignisse zu messen.

**Ergebnisse** Aus den oben genannten Gründen konnte für die Nachpulse nur eine Testmessung mit wenigen Daten gemacht werden. Diese zeigt, dass die Messroutine im Prinzipt funktioniert, wie man in Abbildung 16 erkennen kann.



Abbildung 16: Verteilung der Singale über der Zeitdifferenz zum vorherigen Signal mit den Fits aus Gleichung 14 und 15.

## 3. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit sollte ein Teststand zur Charakterisierung von SiPMs aufgebaut werden. Der Aufbau des Teststandes und die Methoden zur Messung orientieren sich an dem Teststand von Tadday[5]. Dabei wurden die gleichen Messmethoden verwendet und auch ein ähnlicher Aufbau. Im Unterschied zum alten Aufbau wird bei dem neuen Teststand ein Oszilloskop verwendet, mit dem es möglich ist alle Messungen durchzuführen, ohne für jede Messroutine ein anderes Messgerät verwenden zu müssen. Für diesen neuen Aufbau mussten die Geräte konfiguriert werden und die vorhandene Software zur Ansteuerung der Geräte musste erweitert werden. Außerdem wurde komplett neue Software zum Durchführen der Messungen und Analysen entwickelt. Die Charakterisierung eines SiPM sollte dabei so einfach wie möglich gestaltet werden, weshalb alle Abläufe der Messungen vom Computer gesteuert werden, wenn dies möglich ist.

Die Messroutine zur Bestimmung der absoluten PDE ist bereits fertig und funktionsfähig, während die Messroutine zur Sensitivitätsmessung zwar prinzipiell funktioniert, aber ohne das Verhältnis der Lochblende zum Ausgang nicht ausgewertet werden kann. Die Messroutine zu optischen Übersprechern und "Nachpulsen" funktioniert prinzipiell auch, aber sie wurde nicht weiter getestet, weil die Fehlerbehebung bei der Messung zur Sensitivität Priorität hatte.

Der Teststand kann in Zukunft, wenn die Messung des Verhältnisses der Lochblende zum Ausgang gemessen werden kann, für kommerzielle SiPMs verwendet werden. Der getrennte Aufbau unter der Abdeckung auf dem optischen Tisch kann für genauere Messungen, die mit fester Temperatur durchgeführt werden sollen, auch in einen temperierten Ofen verlegt werden.

## A. Bilder



Abbildung 17: Geräte des Teststandes außerhalb des optischen Tisches.



Abbildung 18: Ulbrichtkugel mit Anschlüssen unter der Abdeckung des optischen Tisches.



Abbildung 19: Xenon-Bogenlampe mit Monochromator und Filterrad.



(a) Das gebrochene Zahnrad im inneren des Monochromators.



(b) Die neuen reparierten Zahnräder.

Abbildung 20: Überblick über den Austausch der Zahnräder.



Abbildung 21: Verstärker mit improvisierter Kühlung und ein anderer Verstärker zum Vergleich.

## Literatur

- Michael W. Davidson. Xenon Arc Lamps. 27. Aug. 2019. URL: http://zeisscampus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/xenonarc.html.
- [2] Wolfgang Demtröder. Experimentalphysik 3. Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [3] Hermann Kolanoski und Norbert Wermes. *Teilchendetektoren*. Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [4] Roger Newman. "Visible Light from a Siliconp-nJunction". In: *Physical Review* 100.2 (Okt. 1955), S. 700–703.
- Klaus Alexander Tadday. "Scintillation Light Detection and Application of Silicon Photomultipliers in Imaging Calorimetry and Positron Emission Tomography". Diss. Heidelberg U., 2011.
- [6] Frank Thuselt. Physik der Halbleiterbauelemente: Einführendes Lehrbuch für Ingenieure und Physiker (Springer-Lehrbuch) (German Edition). Springer, 2011.
- [7] D. Wiedner. "Status of the Mu3e detector". In: Journal of Instrumentation 12.06 (Juni 2017), S. C06028–C06028.

## Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ort, Datum

Unterschrift