

## BACHELOR THESIS

# Parametrisierung des Amplitudenspektrums einer SiPM bei zufällig verteiltem Lichteinfall

Parametrisation of the amplitude spectrum of a SiPM with randomly distributed light incidence

von

Matthias Herbert Anton Wöstmann 30. August 2023

## JUSTUS-LIEBIG-UNIVERSITÄT, GIESSEN II. PHYSIKALISCHES INSTITUT

 GUTACHTER: PROF. DR. KAI-THOMAS BRINKMANN
 GUTACHTER: PROF. DR. CLAUDIA HÖHNE BETREUER: DR. HANS-GEORG ZAUNICK

## Abstract

Silicon photomultipliers, or SiPMs for short, are semiconductor photodetectors that are able to detect the smallest amounts of light and, if required, single photons. Due to their design, they are not only very space-saving but also cost-effective compared to conventional detector systems and insensitive to magnetic fields. SiPMs are used in high-energy physics, medical diagnostics, nuclear medicine, etc. and also in astronomy, where they are used, for example, to detect muons from cosmic rays in combination with scintillators. Considering that SiPMs can theoretically be used to count single photons and thus measure photocurrents from weak light sources, there are several other possible applications, such as determining the magnitudes of faint stars in astronomy.

In this thesis, the possibility of measuring such weak photocurrents by means of a SiPM is investigated in more detail. For this purpose, a setup was first developed consisting of a SiPM and an LED as a light source. The collected data at different exposure levels of the SiPM were translated into amplitude spectra, which were analysed by means of a fit of several Gaussians to determine the total number of photons incident on the sensor. It was also noted that the 1 pe peak of the amplitude spectrum, under the Poissoin distributed radiation used, appears to be generally dominant, which is not the case under coincident exposure.

Subsequently, the number of photons measured by the SiPM was plotted against the calculated strength of the respective photocurrent from the LED. A good linear relationship was found at count rates between 400,000 and 600,000 photons per second, and any deviations were explained by looking at the experimental setup.

# Zusammenfassung

Silizium-Photomultipier, oder kurz SiPMs, sind Halbleiter Photodetektoren, die in der Lage sind geringste Lichtmengen und bei Bedarf einzelne Photonen nachzuweisen. Durch ihre Bauweise sind sie nicht nur sehr platzsparend sondern auch kostengünstig gegenüber herkömmlichen Detektorsystemen und unempfindlich gegenüber Magnetfeldern. So finden SiPMs unter anderem Anwendung in der Hochenergiephysik, medizinischen Diagnostik, Nuklearmedizin, etc. und auch in der Astronomie, wo sie beipielsweise zum Nachweis von Myonen aus Kosmischer Strahlung im Zusammenspiel mit Szintillatoren verwendet werden. Bedenkt man, dass SiPMs theoretisch dazu benutzt werden können, um einzelne Photonen zu zählen und damit Photoströme von schwachen Lichtquellen zu messen, ergeben sich noch einige weitere Anwendungsmöglichkeiten, beispielsweise die Bestimmung der Magnituden von lichtschwachen Sternen in der Astronomie.

In dieser Arbeit wird die Möglichkeit zur Messung solch schwacher Photoströme mittels einer SiPM genauer untersucht. Hierzu wurde zunächst ein Aufbau entwickelt, bestehend aus einer SiPM und einer LED als Lichtquelle. Die gesammelten Daten bei verschiedenen Belichtungsstärken der SiPM wurden in Amplitudenspektren übersetzt, welche mittels eines Fits von mehreren Gaußkurven untersucht wurden, um die Gesamtzahl der auf dem Sensor aufgetroffenen Photonen zu bestimmen. Dabei wurde auch festgestellt, dass der 1 pe Peak des Amplitudenspektrums, unter der verwendeten, zeitlich Poissoinverteilten Strahlung, allgemein dominant zu sein scheint, was unter koinzidenter Belichtung nicht der Fall ist.

Anschließend wurde die Anzahl der von der SiPM gemessenen Photonen gegen die berechnete Stärke des jeweiligen Photostroms von der LED aufgetragen, wobei ein guter linearer Zusammenhang bei Zählraten zwischen 400.000 und 600.000 Photonen pro Sekunde gefunden und etwaige Abweichungen unter Betrachtung des Versuchsaufbaus erläutert wurden.

# Inhaltsverzeichnis

1	$\mathbf{Einl}$	leitung		1
<b>2</b>	The	orie		<b>2</b>
	2.1	Der Si	lizium-Photomultiplier	2
		2.1.1	Aufbau	3
		2.1.2	Charakteristika	3
		2.1.3	Funktionsweise	4
	2.2	Das Si	PM-Spektrum	7
		2.2.1	Messung mit Analog-to-Digital-Converter	7
		2.2.2	Messung über Threshold	7
3	Vers	such		9
	3.1	Entwic	klung des Messaufbaus	9
		3.1.1	Analoger Messaufbau	9
		3.1.2	Erster Aufbau mit MuonPi	10
		3.1.3	Zweiter Aufbau mit $MuonPi$	10
	3.2	Finale	r Messaufbau	11
	3.3	Messu	ng	12
	3.4	Quant	eneffizienz der LED	13
	3.5	Datena	analyse	15
		3.5.1	Fouriertransformation des Amplitudenspektrums	17
		3.5.2	Abschätzung des 1 pe Peaks und des Untergrunds	17
		3.5.3	Fit durch ein Gaussian Mixture Model	18
		3.5.4	Berechnung des von der SiPM gemessenen Photostroms $\ \ldots \ \ldots \ \ldots \ \ldots$	19
	3.6	Auswe	rtung	20
	3.7	Abwei	chungen des Photostroms	23
	3.8	Ausbli	ck	24
	3.9	Schlus	sfolgerungen	25

Α	Zusätzliche Plots	27
В	Zusätzliche Tabellen	40

# 1 Einleitung

Silizium-Photomultipier (SiPMs) sind Halbleiter Photodetektoren, die in der Lage sind geringste Lichtmengen und bei Bedarf einzelne Photonen nachzuweisen. Durch ihre Bauweise sind sie nicht nur sehr platzsparend sondern auch kostengünstig gegenüber herkömmlichen Detektorsystemen, was sie besonders interessant für mögliche Versuchsaufbauten macht, bei denen niedrige Photoströme gemessen werden sollen. So war beispielsweise die ursprüngliche Idee dieser Arbeit, eine solche SiPM für den Einsatz in einem Teleskop zu testen, mit dem die Helligkeit lichtschwacher Sterne dann bestimmt werden könnte. Doch die möglichen Anwendungen einer solchen Technologie sind weit zahlreicher als das.

Das Ziel der Arbeit war es, das Amplitudenspektrum einer SiPM darauf zu untersuchen, wie es sich bei unterschiedlich starken Photoströmen verändert, um eine Möglichkeit zu finden, das SiPM Spektrum und die Helligkeit einer Testlichtquelle in Relation zueinander zu setzen. Wir werden in dieser Arbeit auf die Theorie hinter der Funktionsweise einer SiPM eingehen, welche externen Faktoren sie beeinflusst und untersuchen, wie das Spektrum zu Stande kommt, welches wir untersuchen wollen. Anschließend werden kurz die verschiedenen Versuchsaufbauten skizziert und wie und warum sie jeweils angepasst wurden. Außerdem wird gezeigt wie gemessen wurde, wie die Helligkeit der Testlichtquelle (LED) bestimmt und die Messdaten der SiPM analysiert wurden.

# 2 Theorie

### 2.1 Der Silizium-Photomultiplier

Ein Silizium-Photomultiplier, oder kurz SiPM, ähnelt in seiner grundlegenden Funktionsweise einer Photomultiplier Tube (PMT), bei der durch einzelne Photonen ausgelöste Strompulse gemessen werden können. Im Gegensatz zur PMT ist eine SiPM jedoch ein Festkörper-Photodetektor und kann dadurch viel kompakter gebaut werden. Da eine SiPM bei Absorption eines Photons einen mehrere Nanosekunden langen Strom aus  $10^5$  bis  $10^6$  Elektronen [3] erzeugt, hat sie, ähnlich wie eine PMT, eine Verstärkung (Gain).



Abbildung 2.1: Schematischer Querschnitt eines einzelnen Pixels (a) und äquivalenter elektrischer Schaltplan einer SiPM (b). [3]

#### 2.1.1 Aufbau

Eine SiPM setzt sich aus mehreren Mikrozellen (Pixeln) zusammen, die parallel zueinander geschaltet sind. Jede Mikrozelle besteht aus einer Avalanche Photodiode (APD) und einem Quench-Widerstand<sup>1</sup> ( $R_Q$ ), die in Reihe geschaltet sind (siehe Abb. 2.1).



Abbildung 2.2: Aufnahme einer KETEK 3350-EB SiPM.

Die Mikrozellen sind in praktischen Anwendungen gleich groß und in einem rechteckigen Muster angeordnet, wobei die Größe einer einzelnen Zelle zwischen 10 µm und 100 µm liegen kann mit einigen hundert bis einigen zehntausend Zellen pro Gerät, je nach Art der SiPM. Standardmäßig ist die aktive Fläche einer SiPM  $(6 \times 6)$  mm<sup>2</sup> groß und kann Photonen von Infrarot bis Ultraviolett detektieren, wobei der Peak im sichtbaren Bereich des Spektrums liegt. [3]

#### 2.1.2 Charakteristika

Eine SiPM weist einige besondere Parameter auf, die sich zum einen je nach Aufbau unterscheiden, zum anderen aber auch bei einer Messung bedingt kontrolliert werden können. Im Folgenden sind einige wichtige Charakteristika aufgelistet [3, 7]:

Breakdown Voltage: entspricht der anliegenden Spannung, ab der die Stärke des elektrischen Feldes in der Raumladungszone groß genug ist, um eine Ladungskaskade auszulösen. Sie ist eine Eigenschaft der Struktur der SiPM und kann nicht während einer Messung geändert werden.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Der Quench-Widerstand  $R_Q$  sorgt dafür, dass die in der APD ausgelöste Ladungslawine nach möglichst kurzer wieder zum erliegen kommt, um die Totzeit der einzelnen Mikrozellen zu verringern.

- **Overvoltage:** entspricht der Differenz zwischen der anliegenden Bias-Spannung und der Breakdown Voltage und lässt sich bei einer Messung durch Anpassen der Bias-Spannung kontrollieren.
- **Gain:** ist definiert als die Ladungsmenge, welche für jedes detektierte Photon erzeugt wird. Er ist abhängig von der Overvoltage und kann daher in einer Messung kontrolliert werden.
- **Dark Count Rate:** ist die Hauptursache für den Untergrund der Zählrate und stammt in erster Linie von thermischen Elektronen, die im aktiven Volumen generiert werden. Sie ist abhängig von der aktiven Fläche, aber auch von der Overvoltage und der Temperatur und kann daher kontrolliert werden.
- Photon Detection Efficency (PDE): ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon in einer Zelle der SiPM einen Puls auslöst. Sie ist abhängig von der Wellenlänge des Photons und der Overvoltage und kann bei einer Messung verändert werden.

#### 2.1.3 Funktionsweise

Obwohl ihre Oberfläche aus einzelnen Pixeln aufgebaut ist, erzeugt eine SiPM ein einziges analoges Signal in Echtzeit. Der Output setzt sich aus einer Reihe von Waveforms zusammen, die eine diskrete Verteilung ihrer Amplituden aufweisen. Das Histogramm dieser Amplituden hängt von der Anzahl der gleichzeitig detektierten Photonen ab. Im Folgenden wird der Messprozess einer einzelnen Mikrozelle bei Bestrahlung mit Photonen näher erläutert.



Abbildung 2.3: Vereinfachte äuquivalente Schaltung einer SiPM (zwei repräsentative Mikrozellen) angeschlossen an eine externe Spannung  $V_{BIAS}$ . [3]

Die beiden Mikrozellen in Abbildung 2.3 sind parallel geschaltet und an eine externe Spannungsquelle  $V_{BIAS}$  angeschlossen. Eine einzelne Mikrozelle besteht aus einer Avalanche Photodiode (APD) und einem in Reihe geschalteten Quench-Widerstand  $R_Q$ . Der äquivalente Stromkreis der APD wird modelliert durch eine Parallelschaltung aus einem Kondensator  $C_J$  (entspricht der Kapazität der Raumladungszone oder Avalanche-Region in Abb. 2.1a) und einer Reihenschaltung, bestehend aus einem Schalter  $S^2$ , einer Spannungsquelle  $V_{BD}$  (entspricht der Breakdown-Spannung) und einem Widerstand  $R_S$  (entspricht dem Gesamtwiderstand der APD während einer Entladung). Ohne Licht und unter Vernachlässigung des Dark Counts, ist S offen und an  $C_J$  liegt die Spannung  $V_{BIAS}$  $(V_{BIAS} > V_{BD})$  an. Die Mikrozelle befindet sich in einem licht-sensitiven Zustand und die APD ist im Geiger-Modus<sup>3</sup>. Wenn nun von der Mikrozelle ein Photon absorbiert wird, erzeugt dies ein Elektron-Loch Paar, welches in der Avalanche-Region eine Ladungslawine auslöst. In dem Moment, wo die Lawine ausgelöst wird, schließt sich S und  $C_J$  entlädt sich über  $R_S$  ( $R_S \ll R_Q$ ) mit der Zeitkonstante  $\tau_1 = R_S C_J$ . Die Spannung an  $C_J$  nimmt ab und verringert die Wahrscheinlichkeit für eine Stoß-Ionisation der Ladungsträger. Bei optimalem  $R_Q$  wird diese Wahrscheinlichkeit schließlich so gering, dass die Ladungslawine verebbt. In diesem Moment wird S geöffnet und  $C_J$  wird mit der Zeitkonstante  $\tau_2 = R_Q C_J$  durch  $V_{BIAS}$  wieder aufgeladen.



Abbildung 2.4: Graph des Stromflusses bei Detektion eines Photons.

In Abbildung 2.4 beginnt die Ladungslawine bei  $t_i$  und fängt bei  $t_{max}$  an abzuebben. Die vordere Kannte des Pulses beginnt bei  $t_i$  und verhält sich bis  $t_{max}$  wie

$$i(t) \propto \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{R_S C_J}\right)\right],$$

 $<sup>^2\</sup>mathrm{Ein}$ geschlossener Stromkreis repräsentiert die Anwesenheit von freien Ladungsträgern in der Avalanche-Region.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Das heißt, sie wird über der Durchbruchsspannung betrieben.

wo der Puls sein Maximum von  $i_{max} \approx \frac{V_{BIAS} - V_{BD}}{R_Q + R_S} = \frac{\Delta V}{R_Q + R_S}$  erreicht und dann nach

$$i(t) \propto \exp\left(-\frac{t}{R_Q C_J}\right)$$

abnimmt. [3]

Die zeitliche Integration des Pulses liefert die gesamte übertragene Ladung Q:

$$Q = \int_{t_i}^{\infty} i(t) dt = \int_{t_i}^{t_{max}} \underbrace{i(t)}_{\propto \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{R_S C_J}\right)\right]} dt + \int_{t_{max}}^{\infty} \underbrace{i(t)}_{\propto \exp\left(-\frac{t}{R_Q C_J}\right)} dt.$$

Wenn man bedenkt, dass

$$\int_{t_i}^{t_{max}} i(t) \ dt \ll \int_{t_{max}}^{\infty} i(t) \ dt,$$

dann lässt sich folgendes annehmen:

$$Q \approx \int_{t_{max}}^{\infty} i(t) \ dt.$$

Daraus ergibt sich:

$$\int_{t_{max}}^{\infty} \exp\left(-\frac{t}{R_Q C_J}\right) dt = \left[-R_Q C_J \exp\left(-\frac{t}{R_Q C_J}\right)\right]_{t_{max}}^{\infty} = \underbrace{\overline{R_Q C_J}}_{t_{max}} \underbrace{\exp\left(-\frac{t_{max}}{R_Q C_J}\right)}_{i_{max}}$$

wobei der Einfachheit halber  $i(t) = \exp\left(-\frac{t_{max}}{R_Q C_J}\right)$  mit einer Proportionalitätskonstante von 1 angenommen wurde. Wenn man nun bedenkt, dass  $i_{max} \approx \frac{\Delta V}{R_Q + R_S}$  und  $R_S \ll R_Q$  dann findet man folgenden Ausdruck für die übertragene Ladung Q:

$$Q \approx i_{max} \tau_2 \approx \frac{\Delta V}{R_Q + R_S} \cdot R_Q C_J \approx C_J \Delta V.$$

Da dieser Ladungstransfer durch einen einzelnen Ladungsträger ausgelöst wurde, berechnet sich der Gain zu  $M = \frac{Q}{e}$ . Mit der vorigen Vereinfachung ist damit  $M \approx \frac{C_j \Delta V}{e}$ . Wenn zwei oder mehr Mikrozellen gleichzeitig von einem Photon getroffen werden, dann ist das Signal aufgrund der Parallelschaltung der Zellen eine lineare Superposition aus mehreren Waveforms wie der oben gezeigten (Amplitude A) und führt damit zu Amplituden von 2A, 3A, usw. Im Gegensatz dazu ist das Signal einer Mikrozelle, die von mehr als einem Photon gleichzeitig getroffen wurde, nicht von dem einer Zelle zu unterscheiden, die nur von einem einzigen Photon getroffen wurde und hat damit immer noch die Amplitude A.



Abbildung 2.5: Beispiel eines SiPM-Einzelphotoelektronenspektrums (einzelner Kanal). [5]

### 2.2 Das SiPM-Spektrum

#### 2.2.1 Messung mit Analog-to-Digital-Converter

Bestrahlt man eine SiPM mit Licht einer LED bei geringer Intensität und erstellt mittels der gemessenen Waveforms ein Histogramm, so erhält man ein Spektrum, wie es in Abbildung 2.5 zu sehen ist. Der Abstand zwischen den einzelnen Peaks des Spektrums entspricht gerade dem Gain der SiPM. Die einzelnen Peaks zeigen gerade die Anzahl der gemessenen n-Photonen Ereignisse an, wobei n für die Zahl der gleichzeitig ausgelösten Mikrozellen der SiPM steht<sup>4</sup>.

#### 2.2.2 Messung über Threshold

Anstelle eines Histogramms kann man den Output einer SiPM auch anders darstellen. Dazu führt man das Ausgangssignal der SiPM in einen Verstärker, der das Stromsignal in ein Spannungssignal umwandelt und verstärkt. Dieses wird dann an einen Diskriminator weitergegeben, welcher nur Pulse durchlässt, die oberhalb eines gewissen Spannungswertes (Threshold) liegen. Von diesen Pulsen wird dann eine Zählrate erstellt. Wiederholt man das für mehrere Thresholds, erhält man einen Graphen, wie in Abbildung 2.6.

Da die Amplituden der Pulse diskrete Werte annehmen, verändert sich die Count Rate im Wesentlichen dort, wo der eingestellte Threshold einem ganzzahligen Vielfachen des Gains entspricht. Dies hat eine charakteristische "Stufenform" zur Folge. Bildet man die Ableitung dieser Messkurve, so

 $<sup>^4\</sup>mathrm{Der}$ 0 pe Peak aus Abb. 2.5 stellt keinen richtigen Peak, sondern die durch Rauschen verbreiterte Baseline (Pedastel) dar.

entsprechen deren Peaks gerade den Stellen, wo der Threshold die jeweiligen Werte der Amplituden der Pulse (1 pe, 2 pe, usw.) annimmt. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Count Rate dort nicht der einzelnen Peaks entspricht. Stattdessen entspricht die Zählrate an einem bestimmten Treshold in der Stufenform, dem Integral von dem besagten Threshold, über alle nachfolgenden Peaks, in einer entsprechenden Histogrammdarstellung. So entspricht beispielsweise die Count Rate bei 2 pe in Abbildung 2.6 der Summe der Count Rate des 2 pe Peaks und aller nachfolgenden Peaks in Abbildung 2.5.



Abbildung 2.6: Skizze einer Messung über Variation des Thresholds. Gemessene Zählraten (oben) zeigen charakteristische Stufenform - Ableitung (unten) erleichtert es, die Peaks zu identifizieren.

## 3 Versuch

### 3.1 Entwicklung des Messaufbaus

#### 3.1.1 Analoger Messaufbau



Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Analogen Messaufbaus.

Der erste Aufbau zum Aufzeichnen eines SiPM Spektrums war eine relativ simple Vorrichtung, die im Wesentlichen aus einem Diskriminator, einem Zähler und einer SiPM des Typs *KETEK 3350-EB* bestand. Die SiPM befand sich während der Messung in einem abgedichteten, dunklen Kasten (Blackbox). Eine Lichtquelle in Form einer LED wurde erst später hinzugefügt. Das Ausgangssignal wurde über einen Pre-Amp verstärkt und an einen Diskriminator weitergegeben, welcher alle Signale herausfilterte, die unterhalb eines bestimmten Schwellwerts lagen, der während der Messung angepasst werden konnte. Das gefilterte Signal wurde dann an einen Counter übergeben, der in zehn Sekunden Abständen (um genug Zeit zum Ablesen des Werts zu lassen) jeweils eine Sekunde lang die Anzahl der Ereignisse maß und auf einem Display anzeigte. Durch Auftragen der Zählrate gegen den eingestellten Schwellwert, ließ sich so ein einfaches Spektrum erstellen (Anhang A.1). Die Messung an diesem Aufbau wurde im Dunkeln durchgeführt. Da die charakteristische Stufenform, die für solche Messungen über einen Threshold typisch ist (siehe oben), hier nicht zu erkennen war, musste der Aufbau überarbeitet werden.

## 3.1.2 Erster Aufbau mit MuonPi

Für den nächsten Aufbau wurden die Spannungsquelle für den Bias, sowie die Schaltung aus Pre-Amp, Diskriminator, Counter und Gate Generator durch einen *MuonPi* (einen spezialisierten Raspberry Pi, welcher ursprünglich in kosmischen Schauer Detektoren zum Einsatz kommt) ausgetauscht, der all diese Funktionen in sich vereint.



Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des neuen Aufbaus mit MuonPi (a) und Foto des verwendeten MuonPi (b).

Zusätzlich wurde in der Blackbox über der SiPM eine LED angebracht, welche Licht auf den Sensor schien, um erste Messungen zur Abhängigkeit zwischen dem Photostrom und dem Ausgangssignal der SiPM durchzuführen (siehe Anhang A.2).

Die Messungen zeigten, dass die Zählrate bei der benutzten SiPM bereits sehr früh bei LED Strömen ab 200 nA einzubrechen schien. Nach diesen und weiteren Messungen wurde entschieden, den Aufbau weiter anzupassen um einen niedrigeren Photostrom zu erzielen, der (so die Hypothese) bessere Messwerte generieren sollte.

#### 3.1.3 Zweiter Aufbau mit MuonPi

Der dritte Aufbau unterscheidet sich im Wesentlichen nicht sehr von dem vorigen. Es wurde hauptsächlich die Blackbox ausgetauscht. Die neue Blackbox war einfacher lichtdicht zu halten und verfügte über ein eingebautes Gestell, welches die SiPM und die LED so halten konnte, dass sie in einer Linie waren. Zusätzlich wurde zwischen der LED und der SiPM eine Halterung für einen optischen Gradienten-Filter eingefügt, der sich entlang der Halterung verschieben ließ und so eine variable Abschwächung des Photostroms der LED bewirkte, je nachdem welcher Teil des Filters sich während der Messung zwischen der LED und dem Sensor der SiPM befand. Außerdem war die Halterung der SiPM so beschaffen, dass man die SiPM leicht mit einem Helligkeitssensor austauschen konnte, der für die Bestimmung des von der LED ausgehenden Photostroms verwendet wurde. Um die Temperaturabhängigkeit der SiPM zu berücksichtigen, wurde ein Temperatursensor an dieser angebracht.

Da sich trotz des neuen Aufbaus keine verlässlichen Daten gewinnen ließen, wurde der Aufbau wieder überarbeitet. Es wurde entschieden den *MuonPi* durch einen *Analog-to-Digital-Converter* (ADC) zu ersetzen, da dieser eine bessere Auflösung des SiPM-Spektrums ermöglichte, was die Auswertung vereinfachte. Außerdem wurde die *KETEK 3350-EB* durch eine *KETEK 3350-WB* ersetzt.



Abbildung 3.3: 3D-Modell der Halterung. Der Aufbau beinhaltet eine LED (befestigt an Rückseite des roten Querbalkens oben), einen optischen Filter (auf der Halterung darunter, kann längs verschoben werden) und eine SiPM bzw. einen *Thorlabs* Helligkeitssensor (ganz unten).

### 3.2 Finaler Messaufbau

Der finale Messaufbau befand sich in einer abgedunkelten "Blackbox", welche die LED, den optischen Filter und eine SiPM des Typs *KETEK 3350-WB* mit einem Vorverstärker (Pre-Amp)



Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des finalen Messaufbaus.

enthielt. Der Photonenfluss der verwendeten Kingbright APDA1806VBC/D LED ließ sich über ihre Stromstärke an einem SourceMeter regeln. Das Licht der LED wurde von einem Thorlabs NDL-25C-2 Filter noch weiter abgeschwächt, bevor es auf der SiPM ankam, welche während des Versuchs mit einer Bias-Spannung von 31 Volt betrieben wurde. Das Messsignal der SiPM wurde dann über einen Pre-Amp verstärkt, der wiederum mit einer Spannung von 5 Volt betrieben wurde. Das so verstärkte Signal gelangte schließlich an einen CAEN V1730S ADC, der an einen Computer mit der Messsoftware CoMPASS angeschlossen wurde. Der Temperatursensor aus dem vorigen Aufbau, konnte aus technischen Gründen nicht im finalen Messaufbau verwendet werden.

#### 3.3 Messung

Es wurden insgesamt zwölf Messungen mit der SiPM durchgeführt (elf bei Belichtung und eine Dunkelmessung), bei unterschiedlichen Stromstärken der LED. Die Daten der SiPM wurden mittels eines Computers mit der *CoMPASS* Software von analogen in digitale Werte umgewandelt und in Histogrammform gespeichert.

Da für die Auswertung die Helligkeit der LED bei den verschiedenen Stromstärken benötigt wurde, ist diese mit einem separaten Helligkeitssensor gemessen worden. Genauer wurde ein *Thorlabs S120VC* Standard Photodiode Power Sensor verwendet. Dieser ersetzte in dem oben beschriebenen Versuchsaufbau die SiPM und den Pre-Amp und wurde an eine *Thorlabs PM100D* Digital Handheld Optical Power and Energy Meter Console angeschlossen, welche wiederum mit einem Computer verbunden war. Da der Helligkeitssensor jedoch nicht in dem Bereich empfindlich war, in dem die SiPM betrieben wurde, musste zunächst die Quanteneffizienz der LED berechnet werden um durch die jeweils anliegende elektrische Leistung die Helligkeit der LED abschätzen zu können.

### 3.4 Quanteneffizienz der LED

Für die Berechnung der Quanteneffizienz wurden mit einem Powermeter 16 Messungen der Helligkeit bei verschiedenen Stromstärken der LED durchgeführt. Um die Helligkeit besser messen zu können, wurde bei viel höheren Stromstärken der LED gemessen, als bei den Messungen mit der SiPM, und der optische Filter wurde aus dem Aufbau entfernt. Die Ergebnisse dieser Messung sind zusammen mit der jeweils an der LED anliegenden Stromstärke und Spannung in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Tabelle 3.1: Messwerte für die Berechnung der Quanteneffizienz der LED. Die mittlere Strahlungsleistung wurde über ein Powermeter gemessen.

		Mittlere	
LED-Strom [mA]	LED-Spannung [V]	Strahlungsleistung $[\mu W]$	
0,5	2,830	2,591	
$0,\!6$	2,867	3,060	
0,7	2,900	3,506	
$0,\!8$	2,929	$3,\!936$	
0,9	2,958	$4,\!357$	
$1,\!0$	2,984	4,757	
$1,\!1$	3,010	$5,\!137$	
$1,\!2$	3,034	5,510	
$1,\!3$	3,063	5,868	
$1,\!4$	3,084	6,213	
1,5	$3,\!102$	6,564	
$1,\!6$	$3,\!119$	$6,\!901$	
1,7	$3,\!137$	7,252	
$1,\!8$	$3,\!153$	7,585	
1,9	3,169	$7,\!857$	
$2,\!0$	$3,\!183$	8,183	

Laut dem Datenblatt [6] beträgt der Viewing Angle der LED 25°, das heißt, dass unter einem Winkel von  $25^{\circ}/2$ , also  $12,5^{\circ}$  die gemessene Intensität nur noch 50 % der Peak Intensität beträgt. Nehmen wir vereinfachend an, dass die Lichtintensität innerhalb des von  $\theta = 12,5^{\circ}$  eingeschlossenen Raumwinkels genau der Hälfte der von der LED insgesamt abgestrahlten Lichtleistung entspricht. Unter der Annahme, dass innerhalb des betrachteten Raumwinkels die Photonen bei gleichem Abstand r von der LED gleichmäßig verteilt sind und mittels der gemessenen, auf dem Sensor aufgekommenen Strahlungsleistung, lässt sich die gesamte, von der LED abgestrahlte Lichtleistung

#### abschätzen.

So berechnet sich zunächst der Raumwinkel  $\Omega$  der von  $\theta$  eingeschlossen ist über:

$$\Omega = \int d\Omega = \int_0^\theta \sin \vartheta \, d\vartheta \int_0^{2\pi} d\varphi$$
$$= 2\pi \int_0^\theta \sin \vartheta \, d\vartheta$$
$$= 2\pi (1 - \cos \theta)$$

Im Abstand r von der LED ergibt sich dann eine Fläche von

$$A_{\Omega} = \Omega r^2 = 2\pi r^2 (1 - \cos \theta)$$

Für das Verhältnis f zwischen gemessener ( $P_{Sensor}$ ) und insgesamt abgestrahlter Strahlungsleistung ( $P_{Gesamt}$ ) der LED, ergibt sich damit folgender Zusammenhang:

$$f = \frac{P_{Sensor}}{P_{Gesamt}} \approx \frac{A_S}{2A_\Omega} = \frac{A_S}{4\pi r^2 (1 - \cos\theta)}$$
(3.1)

mit  $A_S$  für die aktive Fläche des Sensors. Der Faktor zwei im Nenner stammt aus der Überlegung, dass  $\Omega$  nur die Hälfte der gesamten Strahlungsleistung der LED einschließt.

Stellt man nun (3.1) nach  $P_{Gesamt}$  um, setzt  $\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$  für  $A_S$  ein (kreisförmige Sensorfläche) und teilt durch die an der LED abfallenden elektrischen Leistung  $(P_{LED})$ , so erhält man einen Ausdruck für die Quanteneffizienz  $\eta$ :

$$\eta = \frac{P_{Gesamt}}{P_{LED}} \approx 16 \cdot (1 - \cos \theta) \left(\frac{r}{d}\right)^2 \left(\frac{P_{Sensor}}{P_{LED}}\right),\tag{3.2}$$

Mit  $r = 3,2 \text{ cm}, d = 9,5 \text{ mm}, \theta = 12,5^{\circ}, P_{LED}$  aus Tabelle B.1 und  $P_{Sensor}$  aus Tabelle 3.1 erhalten wir durch Einsetzen in Gleichung (3.2) eine Abschätzung für die jeweilige, effektive Qunateneffizienz bei verschiedenen Stromstärken der LED. Die Ergebnisse sind in Tabelle B.1 im Anhang aufgelistet<sup>1</sup>. Trägt man die Werte für die Quanteneffizienz gegen die jeweilige LED-Stromstärke auf, so ergibt sich der Plot in Abbildung 3.5.

Insgesamt ist zwischen den Messwerten ein exponentieller Zusammenhang der Form

$$\eta_u + \eta_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot I_{LED}) \tag{3.3}$$

zu erkennen, wobei  $\eta_u$ ,  $\eta_0$  und  $\alpha$  Parameter des Fits sind und  $I_{LED}$  die Stromstärke an der LED.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Für die Abschätzung der Fehler der Quanteneffizien<br/>z $\Delta \eta$ wurde eine Gauß'sche Fehlerfortpflanzung über Gleichung 3.2 durchgeführt, wobei sich der Fehler hauptsächlich aus dem Fehler für den Abstand r ergibt: <br/>  $\Delta \eta \approx \left|\frac{\partial \eta}{\partial r}\right| \Delta r$ , mit  $\Delta r = 1 \,\mathrm{mm}$ .



Abbildung 3.5: Fit der effektiven Quanteneffizienz gegen LED-Stromstärke.

Durch einen Fit der entsprechenden Funktion an die Werte lässt sich für die Stromstärken, bei denen die LED während der Messung der SiPM Count Rate betrieben wurde, die entsprechende Quanteneffizienz extrapolieren, woraus sich wiederum Rückschlüsse auf die gesamte, von der LED abgestrahlte Leistung ziehen lassen. Dies wird später in der Auswertung noch relevant.

### 3.5 Datenanalyse

Die bei jeder Messung erzeugten Histogramme weisen Peaks in regelmäßigen Abständen zueinander auf. Wie bereits im Theorieteil erwähnt, entspricht dabei der Abstand zwischen diesen Peaks gerade dem Gain, welcher bei konstanter Überspannung ebenfalls konstant ist. Idealerweise würden daher die Peaks in diesen Histogrammen nur diskrete Linien sein, deren Höhe von der Anzahl der gemessenen n-Photonen Ereignisse abhängt. Realistisch sind diese jedoch (durch elektrisches Untergrundrauschen, Leckströme, Rundungsfehler im ADC, etc.) zu breiteren Gaußkurven geweitet, welche sich im Histogramm überlappen [2, 4]. Um diese Summe an Gaußkurven in ihre einzelnen Komponenten aufzuteilen und die Korrekte Anzahl an Photonen zu bestimmen, welche während einer Messung auf die SiPM treffen, wurde für die Datenanalyse ein Programm in Python erstellt<sup>2</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Der Code ist einsehbar unter https://github.com/Atlas2711/SiPM-Amplitude-Spectrum-Fit

Das Programm ließt eine CSV-Datei mit den Daten für das jeweilige Amplitudenspektrum im ADC count Format ein, sowie zwei Parameter: Die Anzahl der Peaks  $N_{Peaks}$  (inklusive des 0 pe Peaks), auf welche sich das Programm beschränken soll und den ersten Bin  $Bin_0$ , ab dem das Spektrum untersucht werden soll und der idealerweise kurz vor dem 0 pe Peak liegt.

Hat man dem Programm die Parameter und Daten eines entsprechenden Histogramms übergeben, so versucht es über ein *Gaussian Mixture Model* (GMM) [1] eine Reihe von Parametern zu finden, um das Spektrum als eine Summe von Gaußkurven darzustellen<sup>3</sup>. Das Programm arbeitet hierzu im Wesentlichen die folgenden drei Schritte ab: Fouriertransformation des Amplitudenspektrums, Abschätzung des 1 pe Peaks und des Untergrunds, und schließlich Fit durch ein *Gaussian Mixture Model*. Die ersten beiden Schritte wurden dabei im Wesentlichen aus dem Python Modul *PeakOTron* übernommen [8] da insbesondere ohne die Bereinigung des Untergrunds eine Anwendung des GMM nicht ohne Weiteres möglich war. Um die Arbeitweise des Programms etwas besser nachvollziehen zu können, wird sie anhand eines Beispiels erklärt. Hierzu betrachten wir Abbildung 3.6, die ein Histogramm einer Messung mit einer *KETEK 3350-WB* bei Dunkelheit, mit einer Bias-Spannung von 31 V zeigt.



Abbildung 3.6: Beispiel eines Amplitudenspektrums einer SiPM.

Die Werte für die beiden Eingangsparameter seien  $N_{Peaks} = 10$  und  $Bin_0 = 20$  was bedeutet, dass das Programm nur die ersten zehn Peaks (einschließlich des 0 pe Peaks) untersucht, da diese noch eine gute Auflösung haben und sich daher leichter analysieren lassen, und, dass das Programm alles links des ADC counts von 20 ignoriert, da dieser Bereich (kurz vor dem 0 pe Peak) nicht für die Auswertung relevant ist.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass der 0 pe Peak zwar ebenfalls durch eine Gaußkurve genähert wird, darüber hinaus aber praktisch keine Funktion in der späteren Auswertung hat.

#### 3.5.1 Fouriertransformation des Amplitudenspektrums

Zunächst wird die Fouriertransformierte des Amplitudenspektrums berechnet mithilfe des Fast Fourier Transform (FFT) Algorithmus von numpy. Das Absolutquadrat dieser liefert uns die power spectral density, welche in Abbildung 3.7 zu sehen ist und durch einen kubischen Spline gefittet wurde. Indem nun der "niedrigste" (am weitesten links gelegene) Peak identifiziert und der Kehrwert seiner Position bestimmt wird, erhält man einen guten Wert für den effektiven Gain des Spektrums  $G_{FFT}^*$ .



Abbildung 3.7: Fouriertransformierte des Beispielspektrums. Der Wert für  $G_{FFT}^*$  entspricht dem Kehrwert der x-Koordinate des ersten Peaks.

#### 3.5.2 Abschätzung des 1 pe Peaks und des Untergrunds

Im nächsten Schritt werden die Minima zwischen den Peaks identifiziert und durch einen kubischen Spline gefittet. Dazu benötigen die betrachteten Peaks eine gute Auflösung, was hier für die ersten zehn der Fall ist. Der so abgeschätzte Untergrund wird dann von dem Amplitudenspektrum abgezogen und die Werte für die einzelnen counts auf ganze Zahlen abgerundet. Sollte bei der Subtraktion ein negativer Wert für die counts herauskommen, so wird dieser auf Null gesetzt. Der 1 pe Peak wird leicht als der höchste Peak des Spektrums identifiziert<sup>4</sup> und dient als Ausgangspunkt, um im nächsten Schritt die Positionen der anderen Peaks zu bestimmen.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Die Tatsache, dass dies für alle behandelten Spektren der Fall ist, lässt sich in den Abbildungen A.3 - A.14 im Anhang feststellen und wurde der Einfachheit halber so in das Programm integriert, um die Positionen der 1 pe Peaks leicht abschätzen zu können. Die allgemeine Dominanz des 1 pe lässt sich hierbei sehr Wahrscheinlich auf die zufällige Koinzidenz der untersuchten Photonen zurückführen.



Abbildung 3.8: Abschätzung des Signaluntergrunds und der Position des 1 pe Peaks des Beispielspektrums. Man beachte, dass nur die ersten zehn Peaks dargestellt sind.

#### 3.5.3 Fit durch ein Gaussian Mixture Model

Im letzten Schritt werden zunächst die Positionen der anderen Peaks geschätzt. Hierzu verwendet man  $\mu_1^* + (n-1) \cdot G_{FFT}^*$  wobei  $n \in (0, 1, \ldots, N_{Peaks} - 1)$  und  $\mu_1^*$  der geschätzte Mittelwert des 1 pe Peaks ist. Die so gewonnenen Werte werden dann zusammen mit dem bereinigten Spektrum an die Funktion *GaussianMixture* aus dem Python Modul *Scikit-learn* übergeben [1]. Das Programm findet dann eine Reihe von Gaußkurven, welche das Spektrum so gut wie möglich abdecken. Die darauß gewonnenen Mittelwerte für die einzelnen Peaks werden dann benutzt, um die Funktion nochmal zu initialisieren. Schließlich wird sie ein drittes und letztes mal aufgerufen, diesmal mit den zuvor gewonnenen Mittelwerten und Standardabweichungen für die einzelnen Peaks. Dieses mehrmalige Aufrufen der Funktion wurde hauptsächlich gemacht, um bessere Werte für die weiter hinten gelegenen Peaks zu finden. Das Programm gibt dann zum Schluss die in Tabelle 3.2 aufgeführten Werte in einer CSV-Datei aus.

Eine Funktion f(x), welche das Amplitudenspektrum beschreibt, ist dann schließlich von der Form:

$$f(x) = N_E \cdot \sum_{i=0}^{N_{Peaks}-1} \frac{w_i}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x-\mu_i)^2}{\sigma_i^2}\right),$$
(3.4)

wobei

$$\sum_{i=0}^{N_{Peaks}-1} w_i = 1.$$
(3.5)

Diese Funktion wird noch auf den zuvor abgeschätzten Untergrund addiert, damit man das Ergebnis besser mit dem ursprünglichen Spektrum vergleichen kann (siehe Abbildung 3.9).

Parameter	Beschreibung
N	Anzahl der insgesamt gemessenen
$IV_E$	Ereignisse (abzüglich des Untergrunds).
$w_i$	Gewichtung des $i$ -ten Photoelektronen-Peaks.
$\sigma_i^2$	Varianz des <i>i</i> -ten Photoelektronen-Peaks.
$\mu_i$	$\label{eq:Mittlere} \mbox{Position des $i$-ten Photoelektronen-Peaks}.$



Tabelle 3.2: Ausgegebene Werte des Programms. Die Werte für  $w_i$ ,  $\sigma_i^2$  und  $\mu_i$  kommen jeweils einmal für jeden der  $N_{Peaks}$  Peaks vor.

Abbildung 3.9: Endergebnis des Fits. Die Funktion aus dem GMM wurde auf den zuvor bestimmten Untergrund aufaddiert.

#### 3.5.4 Berechnung des von der SiPM gemessenen Photostroms

Mit der gefundenen Funktion, welche die einzelnen Peaks des Amplitudenspektrums beschreibt, ist es möglich die Anzahl der Photonen zu bestimmen, welche innerhalb der Messzeit (30 s) auf der SiPM detektiert wurden. Wie bereits im Theorieteil dieser Arbeit erläutert wurde, findet sich in den einzelnen Peaks die Anzahl der gemessenen n-Photonen Ereignisse. Das bedeutet, die Anzahl der Ereignisse im 1 pe Peak entspricht der Anzahl von Ereignissen, bei denen nur eine Mikrozelle der SiPM ausgelöst wurde, der 2 pe Peak enthält die Anzahl von Ereignissen, bei denen genau zwei Mikrozellen gleichzeitig ausgelöst wurden, und so weiter. Da man in erster Näherung annehmen kann, dass jede Mikrozelle von nur einem einzigen Photon ausgelöst wurde, muss man nur die einzelnen Summanden des Fits aus Gleichung 3.4 integrieren<sup>5</sup>, welche die jeweiligen Peaks beschreiben, um

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Die Gaußkurven werden alle im Integral zu 1, sodass nur die jeweiligen Gewichte  $w_i$  der Peaks und das  $N_E$  vor der Summe noch übrig bleiben.

die Gesamtzahl der Ereignisse in einem Peak zu erhalten. Multipliziert man diese dann noch mit der Ordnung n des jeweiligen Peaks, so findet man für die insgesamt detektierten Photonen folgende Formel:

$$N_{Photons} = N_E \cdot \sum_{n=1}^{N_{Peaks}-1} n \cdot w_n.$$
(3.6)

Mit  $w_n$  und  $N_E$  wie in Tabelle 3.2 und den Gleichungen (3.4) und (3.5) beschrieben. Diese Berechnung wird von dem Programm ebenfalls durchgeführt und das Ergebnis in der CSV-Datei für das Amplitudenspektrum am Ende ausgegeben.

### 3.6 Auswertung

Um die Ergebnisse besser analysieren zu können, müssen die bei der Messung verwendeten LED Ströme noch in Photonenflüsse umgerechnet werden. Mithilfe des zuvor gefundenen Modells für die Quanteneffizienz, lassen sich die jeweiligen Effizienzen bei den einzelnen Stromstärken berechnen und mittels der gefundenen Werte für die Quanteneffizienz der LED und der an dieser abfallenden elektrischen Leistung, lassen sich nun Werte für die gesamte Strahlungsleistung der LED bei diesen geringen Stromstärken abschätzen.

Diese Werte sind allerdings nur theoretische Vorhersagen, tatsächlich könnte sich die Quanteneffizienz bei sehr niedrigen Stromstärken ganz anders verhalten und es ist auch möglich, dass die LED unterhalb eines bestimmten Grenzstroms gar nicht erst leuchtet.

Wird allerdings zunächst davon ausgegangen, dass unser Modell zumindest näherungsweise korrekt ist, so muss aus der gesamten Strahlungsleistung noch der Teil ermittelt werden, welcher tatsächlich auf die SiPM fällt. Hierzu lässt sich wieder Formel (3.1) verwenden. Nach  $P_{Sensor}$  umgestellt ergibt sich

$$P_{Sensor} \approx \underbrace{\frac{1}{10}}_{\text{Filter}} \cdot \frac{A_S \cdot \overbrace{P_{LED} \cdot \eta}^{P_{Gesamt}}}{4\pi r^2 (1 - \cos \theta)}, \tag{3.7}$$

wobei  $P_{Gesamt} = P_{LED} \cdot \eta$  eingesetzt und die rechte Seite mit der Abschwächung des im Aufbau verwendeten Filters (10%) multipliziert wurde.

Schließlich findet sich der Photonenfluss auf der SiPM, indem die gefundene Strahlungsleistung durch die Energie eines einzelnen Photons aus der LED geteilt wird, da diese näherungsweise nur Photonen der gleichen Wellenlänge  $\lambda$  erzeugt. Die Energie eines einzelnen Photons berechnet sich über

$$E_{Photon} = \frac{hc}{\lambda}.$$
(3.8)

Mithilfe von (3.7) und (3.8) erhalten wir damit insgesamt für den geschätzten Photonenfluss  $\Phi$  auf der SiPM:

$$\Phi = \frac{P_{Sensor}}{E_{Photon}} \approx \frac{A_S \cdot P_{LED} \cdot \eta \cdot \lambda}{40\pi h c r^2 (1 - \cos \theta)}$$
(3.9)

wobei h das Planck'sche Wirkungsquantum und c die Lichtgeschwindigkeit ist. Mit  $A_S = 9 \text{ mm}^2$ ,  $\lambda = 465 \text{ nm}[6], \theta = 12,5^{\circ}$  und  $P_{LED}, \eta$  aus Tabelle B.2 im Anhang, wobei  $P_{LED}$  aus  $U_{LED} \cdot I_{LED}$ und  $\eta$  aus dem gefundenen Modell für die Quanteneffizienz (3.3) berechnet wurde.

Nun lassen sich die gemessenen Werte der SiPM Counts mit dem geschätzten Photonenfluss auf der SiPM vergleichen. Tabelle 3.3 zeigt diese Werte zusammen mit der Stromstärke, bei der die LED während der Messung betrieben wurde<sup>6</sup>.

LED-Strom [nA]	Photonenfluss auf SiPM [1/s]	SiPM Counts in $30\mathrm{s}$	Daten
0	\	11.219.023	Abb. A.3
5	$7,88(\pm0,57) imes10^5$	11.645.080	Abb. A.4
10	$1,64(\pm 0,12)  imes 10^6$	11.973.365	Abb. $A.5$
100	$1,80(\pm0,13) imes10^{7}$	12.083.214	Abb. A.6
1.000	$1,93(\pm 0,14)  imes 10^8$	12.185.455	Abb. A.7
10.000	$2,03(\pm 0,15)  imes 10^9$	13.050.526	Abb. A.8
12.500	$2,55(\pm0,18) imes10^9$	14.091.470	Abb. A.9
25.000	$5,17(\pm0,37) imes10^9$	16.332.279	Abb. A.10
37.500	$7,81(\pm0,57) imes10^9$	17.692.053	Abb. A.11
50.000	$1,04(\pm 0,08) \times 10^{10}$	17.565.247	Abb. A.12
62.500	$1,31(\pm 0,09) \times 10^{10}$	15.367.210	Abb. A.13
75.000	$1,57(\pm 0,11) \times 10^{10}$	14.694.764	Abb. A.14

Tabelle 3.3: Messwerte der SiPM KETEK 3350-WB.

Werden die Werte in einem Plot gegeneinander aufgetragen, ergibt sich Abbildung 3.10. Es lassen sich prinzipiell drei unterschiedliche Bereiche identifizieren, markiert mit I, II und III.

In Teil I lässt sich erkennen, dass die Datenpunkte fast senkrecht anzusteigen scheinen. Das lässt sich dadurch erklären, dass der Photonenfluss der LED selbst noch zu gering ist um deutliche Veränderungen in der Count Rate zu verursachen, vermutlich liegt der Strom sogar unterhalb der Schwelle, ab der sie überhaupt Photonen erzeugen kann. Die Veränderung der Counts wird hier im Wesentlichen von der temperaturbedingten, höheren Dark Count Rate verursacht, da sich die SiPM insbesondere zwischen den ersten Messungen wahrscheinlich deutlich aufgewärmt hat. In II ist

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>Die Fehler für  $\Delta \Phi$  wurden hier erneut über eine Gauß'sche Fehlerfortpflanzung abgeschätzt, wobei der größte Teil des Fehlers sich wieder aus dem Fehler für r ergibt:  $\Delta \Phi \approx \left|\frac{\partial \Phi}{\partial r}\right| \Delta r$ , mit  $\Delta r = 1$  mm.



Abbildung 3.10: Plot der SiPM Counts gegen den abgeschätzten Photonenfluss. Inset zeigt Messwerte bei geringen Photoströmen.

dagegen ein linearer Zusammenhang zwischen dem Photonenfluss der LED und den SiPM Counts zu erkennen, welcher gleich noch genauer untersucht wird. In III fallen die Counts zu höheren Photonenflüssen hin ab. Dies lässt sich dadurch erklären, dass für zu hohe Lichtströme auf der SiPM die Count Rate anfängt einzubrechen, da die einzelnen Mikrozellen in Sättigung gehen.

Insgesamt sind die Bereiche I und III also für die Auswertung unbrauchbar und geben hauptsächlich Aufschluss darüber, in welchem Bereich die LED betrieben werden muss um gute Resultate zu erzielen. Bezogen auf die SiPM Count Rate liegt dieser Bereich zwischen 400.000 und 600.000 Photonen pro Sekunde (inklusive Dunkelzählrate). Für die weitere Auswertung betrachten wir daher zunächst nur Bereich II.

Um die Messwerte besser untersuchen zu können, musste zunächst die Dark Count Rate bestimmt werden. Die eigens dafür durchgeführte Messung aus Tabelle 3.3 kann dafür nicht verwendet werden, da sich wie weiter oben erklärt die Dark Count Rate nach den ersten Messungen beträchtlich erhöht hat. In Abbildung 3.11 wurde eine Gerade an die Messwerte aus Bereich II gefittet. Der y-Achsenabschnitt dieser Gerade gibt die Dark Count Rate der Messwerte an und liegt bei 4 · 10<sup>5</sup> Counts pro Sekunde. Dieser Wert dürfte näherungsweise konstant sein, da Temperaturmessungen der SiPM ergeben haben, dass hauptsächlich während der ersten Messungen die Temperatur zunächst um mehrere Grad steigt, bevor sie sich bei einem stabilen Wert einpendelt. Da sich außerdem keine großen Abweichungen der Messwerte von der Geraden zeigen, ist in diesem Bereich von einer näherungsweise stabilen Temperatur auszugehen. Genau kann das für dieses Experiment jedoch nicht gesagt werden, da notwendige Änderungen am Aufbau es schwierig machten, einen Temperatursensor an diesen anzuschließen. Die genaue Protokollierung der Betriebstemperatur der SiPM wäre daher insbesondere für zukünftige Messungen interessant, sollte in Zukunft ein ähnliches Experiment durchgeführt werden. Ansonsten zeigen die Messwerte in diesem Bereich einen guten, linearen Zusammenhang.



Abbildung 3.11: Fit der Messwerte aus Region II des Plots in Abbildung 3.10.

### 3.7 Abweichungen des Photostroms

Betrachtet man die Photon Counts in Abbildung 3.11 und zieht die geschätzte Dark Count Rate von den Messwerten ab, so stellt sich heraus, dass der geschätzte Photostrom der LED um mehr als vier Größenordnungen höher ist, als der Wert für die entsprechende Photonenzählrate der SiPM. Dies ist eine drastische Abweichung wenn man bedenkt, dass im Idealfall das Verhältnis zwischen diesen beiden Werten 1:1 sein sollte. Diese Abweichung lässt sich auf mehrere Arten erklären:

- Der Wert für den Photostrom ist nur eine Schätzung, die auf mehreren Annahmen basiert, die auch nicht zutreffen können oder zumindest nicht in dem Rahmen, wie sie für die Abschätzung benutzt wurden. Insbesondere das erstellte Modell der Quanteneffizienz könnte sich bei sehr niedrigen LED-Strömen als falsch herausstellen, da lediglich von höheren Stromstärken aus nach unten extrapoliert wurde.
- Da der Aufbau ursprünglich nicht für die KETEK 3350-WB SiPM ausgelegt war, welche in dem Versuch benutzt wurde, kann es zum Beispiel durch eine Fehlerhafte Ausrichtung der SiPM auf die LED zum Verlust von Photonen gekommen sein (siehe Abbildung 3.12).
- 3. Auch wenn der Effekt eher gering ausfallen wird, besteht auch die Möglichkeit, dass die SiPM nicht alle Photonen detektieren konnte, welche auf den Sensor trafen. Wenn beispielsweise ein Photon während der Totzeit eines Pixels auf diesen trifft, oder wenn mehrere Photonen gleichzeitig auf einer Mikrozelle auftreffen, würden diese nicht von der SiPM registriert werden. solche Effekte wirken sich allerdings erst bei sehr viel höheren Photoströmen sichtbar aus, wo sie zum Einbrechen der Count Rate beitragen.



Abbildung 3.12: Seitliche Aufnahme der Halterung mit neuer SiPM. Die genaue Ausrichtung auf die LED war aufgrund der Dimensionen der neuen SiPM nicht möglich.

### 3.8 Ausblick

Wie oben erwähnt, war unser Aufbau nicht für die Messung mit der KETEK 3350-WB mit Pre-Amp ausgelegt und eine entsprechende Anpassung nicht ohne weiteres möglich. So war beispielsweise die Halterung, welche für die ursprüngliche SiPM vorgesehen war, nicht mit der neuen kompatibel, was die genaue Ausrichtung der SiPM schwierig machte. Außerdem war die Kiste, welche als Blackbox fungierte, zu klein für die Halterung mit der neuen SiPM, sodass zusätzlich eine Decke über den Aufbau gelegt werden musste, um Licht aus der Umgebung aus dem Aufbau zu halten. Für zukünftige Experimente wäre es daher angemessen einen komplett neuen Aufbau zu verwenden, mit einer Halterung speziell für die KETEK 3350-WB und ihren Pre-Amp, sowie eine Blackbox in welche all dies problemlos hineinpasst. Ähnlich wie bei unserem Aufbau könnte auch eine Halterung für einen entsprechenden Powersensor von Thorlabs eingebaut werden, damit dessen Sensor und der Sensor der SiPM den gleichen, genau gemessenen Abstand zur LED haben, was die Abschätzung des Photostroms genauer machen sollte. Um die Auswirkungen der Dark Count Rate zu reduzieren würde es sich außerdem anbieten, den Aufbau in einer Temperatur stabilisierten Umgebung zu platzieren (z.B. einer Klimakammer), was den Untergrund im SiPM Spektrum reduzieren und damit auch eine Auswertung leichter machen sollte. Will man noch weiter gehen, so könnte man versuchen, die Messung zu automatisieren, zum Beispiel mit Hilfe eines FPGAs, welches die Messergebnisse direkt in eine Photonen Zählrate übersetzt, was die direkte Untersuchung und den Vergleich der Messergebnisse ermöglichen würde.

#### 3.9 Schlussfolgerungen

Der Versuch zeigt zwar, dass es prinzipiell möglich ist, einen Zusammenhang zwischen einem gegebenen Photostrom und dem Messsignal einer SiPM herzustellen, allerdings ist der Messaufbau hierzu noch nicht ganz ausgereift. Es zeigt zwar in die richtige Richtung, doch um bessere, vergleichbarere Ergebnisse zu erzielen, sollte der Aufbau noch einmal überarbeitet werden.

Für die Bestimmung des 1 pe Peaks (siehe Abschnitt 3.5.2) wurde in dem Programm, welches für die Datenanalyse verwendet wurde, einfach der höchste Peak des Amplitudenspektrums mit diesem identifiziert, was für alle aufgenommenen Histogramme (Abbildungen A.3 - A.14) der Fall ist. Dies trifft bei zeitlich koinzidenter Beleuchtung (beispielsweise bei Szintillatoren) nämlich nicht zu. Die Tatsache, dass die untersuchte Strahlung zeitlich Poissoinverteilt auf die SiPM trifft scheint hier dafür zu sorgen, dass der 1 pe Peak in allen untersuchten Fällen, dominiert.

Der Photostrom, mit dem die SiPM für eine Messung bestrahlt werden sollte, wurde bei der Auswertung festgestellt und liegt zwischen 400.000 und 600.000 Photonen pro Sekunde (inklusive Dark Count).

Die grundlegende Methode zur Datenanalyse unter Verwendung eines GMM scheint zunächst vielversprechend und sollte bei künftigen, ähnlichen Versuchen, berücksichtigt werden. Im Wesentlichen liegt das Problem momentan bei der genauen Kalibrierung des Photostroms. Es sei außerdem darauf hingewiesen, dass Effekte wie *Optical Crosstalk* nicht berücksichtigt wurden.

# Danksagung

Zuallererst möchte ich mich bei meiner Kommilitonin Kim Wahler bedanken, mit der ich nicht nur zusammen im Labor gearbeitet habe, sondern mit der ich mich auch über unsere jeweiligen Ergebnisse austauschen konnte. Nach den ersten vergeblichen Bemühungen ein Thema für eine Bachelorarbeit in der Experimentalphysik zu finden, zu dem sich tatsächlich auch Experimente durchführen ließen, war es für mich sehr aufbauend zu wissen, dass ich nicht mit diesem Problem alleine war.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Professor Dr. Kai Brinkmann dafür bedanken, dass es uns (Kim Wahler und mir) möglich war, innerhalb seiner Arbeitsgruppe die nötigen Versuche durchzuführen und schlussendlich unsere Bachelorarbeiten zu schreiben.

Außerdem gilt mein Dank natürlich Dr. Hans-Georg Zaunick dafür, dass er nicht nur bei der Wahl des Themas der Arbeit geholfen, und uns so einen reibungslosen Übergang von unserem ursprünglichen Thema der veränderlichen Sterne zu SiPMs ermöglicht hat, sondern auch dafür, dass er immer Fragen beantwortet und Feedback zu den ersten Entwürfen dieser Arbeit gegeben hat.

Ich möchte außerdem René Schubert und Thomas Wasem danken, ohne deren handwerkliches Geschick wir nicht in der Lage gewesen wären, unseren Versuchsaufbau zu realisieren.

Mein Dank gilt außerdem allen, die uns in den wöchentlichen Labormeetings zugehört und mit Rat und Tat zur Seite standen, wenn wir glaubten in einer Sackgasse zu sein.

Zu guter Letzt möchte ich mich noch bei meiner Familie bedanken, insbesondere bei meinen Eltern Christiane und Bernd Wöstmann, die unter anderem diese Arbeit Korrektur gelesen haben und mich darüber hinaus auch immer unterstützt und an mich geglaubt haben, sowie bei meiner kleinen Schwester Stefanie, die mich gerade in den letzten Jahren immer wieder aufgebaut hat.

An all diese Menschen, und auch alle, die jetzt vielleicht nicht erwähnt wurden, aber trotzdem auf die ein oder andere Weise dies hier ermöglicht haben, noch einmal von ganzem Herzen: **Danke!** 

# Anhang A: Zusätzliche Plots



Abbildung A.1: Plot der ersten analogen Messung der Zählrate, aufgetragen gegen den eingestellten Threshold. Die Messpunkte zeigen nicht die charakteristische Stufenform.



Abbildung A.2: Messungen der Zählrate gegen eingestellten Threshold bei unterschiedlichen LED-Stromstärken.



KETEK 3350-WB Amplitude Spectrum Fit ( $I_{LED} = 0.0 \text{ nA}$ )

Abbildung A.3: Fit des Spektrums einer KETEK 3350-WB bei Dunkelheit.



KETEK 3350-WB Amplitude Spectrum Fit ( $I_{LED} = 5.0$  nA)

Abbildung A.4: Fit des Spektrums einer KETEK 3350-WB bei Belichtung:  $I_{LED} = 5 \text{ nA}$ .



KETEK 3350-WB Amplitude Spectrum Fit ( $I_{LED} = 10.0$  nA)

Abbildung A.5: Fit des Spektrums einer KETEK 3350-WB bei Belichtung:  $I_{LED} = 10$  nA.



KETEK 3350-WB Amplitude Spectrum Fit ( $I_{LED} = 100.0 \text{ nA}$ )

Abbildung A.6: Fit des Spektrums einer KETEK 3350-WB bei Belichtung:  $I_{LED} = 100 \text{ nA}$ .



KETEK 3350-WB Amplitude Spectrum Fit ( $I_{LED} = 1.0 \ \mu A$ )

Abbildung A.7: Fit des Spektrums einer KETEK 3350-WB bei Belichtung:  $I_{LED} = 1 \,\mu\text{A}$ .



KETEK 3350-WB Amplitude Spectrum Fit ( $I_{LED} = 10.0 \ \mu A$ )

Abbildung A.8: Fit des Spektrums einer KETEK 3350-WB bei Belichtung:  $I_{LED} = 10 \,\mu\text{A}$ .



KETEK 3350-WB Amplitude Spectrum Fit ( $I_{LED} = 12.5 \ \mu$ A)

Abbildung A.9: Fit des Spektrums einer KETEK 3350-WB bei Belichtung:  $I_{LED} = 12,5 \,\mu\text{A}$ .



KETEK 3350-WB Amplitude Spectrum Fit ( $I_{LED} = 25.0 \ \mu A$ )

Abbildung A.10: Fit des Spektrums einer *KETEK 3350-WB* bei Belichtung:  $I_{LED} = 25 \,\mu\text{A}$ .





Abbildung A.11: Fit des Spektrums einer *KETEK 3350-WB* bei Belichtung:  $I_{LED} = 37,5 \,\mu\text{A}$ .



KETEK 3350-WB Amplitude Spectrum Fit ( $I_{LED} = 50.0 \ \mu$ A)

Abbildung A.12: Fit des Spektrums einer *KETEK 3350-WB* bei Belichtung:  $I_{LED} = 50 \,\mu\text{A}$ .



KETEK 3350-WB Amplitude Spectrum Fit ( $I_{LED} = 62.5 \ \mu A$ )

Abbildung A.13: Fit des Spektrums einer *KETEK 3350-WB* bei Belichtung:  $I_{LED} = 62,5 \,\mu\text{A}$ .



KETEK 3350-WB Amplitude Spectrum Fit ( $I_{LED} = 75.0 \ \mu A$ )

Abbildung A.14: Fit des Spektrums einer *KETEK 3350-WB* bei Belichtung:  $I_{LED} = 75 \,\mu\text{A}$ .

# Anhang B: Zusätzliche Tabellen

LED-Strom [mA]	LED-Spannung [V]	Elektrische Leistung [mW]	Effektive Quanteneffizienz
0,5	2,830	1,415	$(0,788\pm0,049)\%$
$0,\!6$	2,867	1,720	$(0,766\pm0,048)\%$
0,7	2,900	2,030	$(0,743\pm0,046)\%$
0,8	2,929	2,343	$(0,723\pm0,045)\%$
0,9	2,958	$2,\!662$	$(0,704\pm0,044)\%$
1,0	2,984	$2,\!984$	$(0,\!686\pm0,\!043)\%$
$1,\!1$	3,010	3,311	$(0{,}668 \pm 0{,}042)\%$
1,2	3,034	$3,\!641$	$(0{,}651\pm 0{,}041)\%$
$1,\!3$	3,063	$3,\!982$	$(0,\!634\pm0,\!040)\%$
$1,\!4$	3,084	4,318	$(0{,}619\pm 0{,}039)\%$
1,5	$3,\!102$	$4,\!653$	$(0,\!607\pm0,\!038)\%$
$1,\!6$	$3,\!119$	4,990	$(0,595\pm0,037)\%$
1,7	$3,\!137$	$5,\!333$	$(0,\!585\pm0,\!037)\%$
$1,\!8$	$3,\!153$	$5,\!675$	$(0,575\pm0,036)\%$
1,9	3,169	6,021	$(0{,}562\pm 0{,}035)\%$
$^{2,0}$	$3,\!183$	6,366	$(0{,}553\pm 0{,}035)\%$

Tabelle B.1: Effektive Quanteneffizienzen bei verschiedenen Stromstärken. Die elektrische Leistung wurde durch  $I_{LED} \cdot U_{LED}$  berechnet.

Tabelle B.2: Berechnete Werte für elektrische Leistung  $(I_{LED} \cdot U_{LED})$  und effektive Quanteneffizienz der LED.

LED-Strom [nA]	LED-Spannung [V]	Elektrische Leistung [nW]	Effektive Quanteneffizienz
5	1,870	9,35	$(0,934\pm0,011)\%$
10	1,942	$19,\!42$	$(0{,}934 \pm 0{,}011)\%$
100	2,131	213,1	$(0,\!934\pm0,\!011)\%$
1.000	2,287	2.287	$(0,\!934\pm0,\!011)\%$
10.000	2,424	24.240	$(0,931\pm0,011)\%$
12.500	$2,\!437$	30.462,5	$(0,930\pm0,011)\%$
25.000	2,479	61.975	$(0,\!926\pm0,\!011)\%$
37.500	2,506	93.975	$(0,922\pm0,011)\%$
50.000	2,526	126.300	$(0,918\pm0,011)\%$
62.500	2,542	158.875	$(0,914\pm0,011)\%$
75.000	2,557	191.775	$(0,\!909\pm0,\!011)\%$

# Literatur

- F. Pedregosa u. a. "Scikit-learn: Machine Learning in Python". In: Journal of Machine Learning Research 12 (2011), S. 2825–2830.
- [2] V Álvarez u. a. "Design and characterization of the SiPM tracking system of NEXT-DEMO, a demonstrator prototype of the NEXT-100 experiment". In: *Journal of Instrumentation* 8.05 (2013), T05002.
- [3] Slawomir Piatek. What is an SiPM and how does it work? Okt. 2016. URL: https://hub. hamamatsu.com/us/en/technical-notes/mppc-sipms/what-is-an-SiPM-and-how-doesit-work.html. [aufgerufen am 15. Juli 2023].
- [4] Ettore Segreto u. a. "Liquid Argon test of the ARAPUCA device". In: Journal of Instrumentation 13.08 (2018), P08021.
- [5] Olin Pinto. Operation and Calibration of a Highly Granular Hadron Calorimeter with SiPM-on-Tile Read-out. Scientific Figure on ResearchGate. Available at: https://www.researchgate. net/figure/SiPM-single-photoelectron-spectrum-of-a-single-channel\_fig2\_ 340374552. Apr. 2020. [aufgerufen am 3. August 2023].
- [6] APDA1806VBC/D Datenblatt D. Kingbright. Mai 2021. URL: https://www.mouser.de/ datasheet/2/216/APDA1806VBC\_D-1374643.pdf. [aufgerufen am 21. August 2023].
- [7] onsemi. Introduction to the Silicon Photomultiplier (SiPM) (A. Juli 2021. URL: https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND9770-D.PDF. [aufgerufen am 15. Juli 2023].
- [8] Jack Rolph u. a. PeakOTron: A Python Module for Fitting Charge Spectra of Silicon Photomultipliers. 2023. DOI: 10.48550/ARXIV.2301.11833. URL: https://arxiv.org/abs/2301. 11833.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematischer Querschnitt eines einzelnen Pixels (a) und äquivalenter elektrischer	
	Schaltplan einer SiPM (b). [3]	2
2.2	Aufnahme einer <i>KETEK 3350-EB</i> SiPM	3
2.3	Vereinfachte äuquivalente Schaltung einer SiPM (zwei repräsentative Mikrozellen)	
	angeschlossen an eine externe Spannung $V_{BIAS}$ . [3]	4
2.4	Graph des Stromflusses bei Detektion eines Photons	5
2.5	Beispiel eines SiPM-Einzelphotoelektronenspektrums (einzelner Kanal). [5]	7
2.6	Skizze einer Messung über Variation des Thresholds. Gemessene Zählraten (oben)	
	zeigen charakteristische Stufenform - Ableitung (unten) erleichtert es, die Peaks zu	
	identifizieren	8
3.1	Schematische Darstellung des Analogen Messaufbaus.	9
3.2	Schematische Darstellung des neuen Aufbaus mit $MuonPi$ (a) und Foto des verwen-	
	deten $MuonPi$ (b)	10
3.3	3D-Modell der Halterung. Der Aufbau beinhaltet eine LED (befestigt an Rückseite	
	des roten Querbalkens oben), einen optischen Filter (auf der Halterung darunter,	
	kann längs verschoben werden) und eine SiPM bzw. einen $\mathit{Thorlabs}$ Helligkeitssensor	
	(ganz unten).	11
3.4	Schematische Darstellung des finalen Messaufbaus.	12
3.5	Fit der effektiven Quanteneffizienz gegen LED-Stromstärke.	15
3.6	Beispiel eines Amplitudenspektrums einer SiPM.	16
3.7	Fouriertransformierte des Beispielspektrums. Der Wert für $G^{\ast}_{FFT}$ entspricht dem	
	Kehrwert der x-Koordinate des ersten Peaks.	17
3.8	Abschätzung des Signaluntergrunds und der Position des 1 pe Peaks des Beispiel-	
	spektrums. Man beachte, dass nur die ersten zehn Peaks dargestellt sind. $\ \ldots$ .	18
3.9	Endergebnis des Fits. Die Funktion aus dem GMM wurde auf den zuvor bestimmten	
	Untergrund aufaddiert	19

3.10	Plot der SiPM Counts gegen den abgeschätzten Photonenfluss. Inset zeigt Messwerte	
	bei geringen Photoströmen.	22
3.11	Fit der Messwerte aus Region II des Plots in Abbildung 3.10.	23
3.12	Seitliche Aufnahme der Halterung mit neuer SiPM. Die genaue Ausrichtung auf die	
	LED war aufgrund der Dimensionen der neuen SiPM nicht möglich.	24
A.1	Plot der ersten analogen Messung der Zählrate, aufgetragen gegen den eingestellten	
	Threshold. Die Messpunkte zeigen nicht die charakteristische Stufenform. $\ldots$ .	27
A.2	Messungen der Zählrate gegen eingestellten Threshold bei unterschiedlichen LED-	
	Stromstärken.	27
A.3	Fit des Spektrums einer <i>KETEK 3350-WB</i> bei Dunkelheit	28
A.4	Fit des Spektrums einer <i>KETEK 3350-WB</i> bei Belichtung: $I_{LED} = 5 \text{ nA.} \dots$	29
A.5	Fit des Spektrums einer <i>KETEK 3350-WB</i> bei Belichtung: $I_{LED} = 10 \text{ nA }$	30
A.6	Fit des Spektrums einer <i>KETEK 3350-WB</i> bei Belichtung: $I_{LED} = 100 \text{ nA.} \dots$	31
A.7	Fit des Spektrums einer <i>KETEK 3350-WB</i> bei Belichtung: $I_{LED} = 1 \mu A.$	32
A.8	Fit des Spektrums einer <i>KETEK 3350-WB</i> bei Belichtung: $I_{LED} = 10 \mu\text{A.}$	33
A.9	Fit des Spektrums einer <i>KETEK 3350-WB</i> bei Belichtung: $I_{LED} = 12.5 \mu\text{A.}$	34
A.10	Fit des Spektrums einer <i>KETEK 3350-WB</i> bei Belichtung: $I_{LED} = 25 \mu\text{A.}$	35
A.11	Fit des Spektrums einer <i>KETEK 3350-WB</i> bei Belichtung: $I_{LED} = 37.5 \mu\text{A.}$	36
A.12	2 Fit des Spektrums einer <i>KETEK 3350-WB</i> bei Belichtung: $I_{LED} = 50 \mu\text{A.}$	37
A.13	Fit des Spektrums einer <i>KETEK 3350-WB</i> bei Belichtung: $I_{LED} = 62.5 \mu\text{A.}$	38
A.14	Fit des Spektrums einer <i>KETEK 3350-WB</i> bei Belichtung: $I_{LED} = 75 \mu\text{A.}$	39

# Tabellenverzeichnis

3.1	Messwerte für die Berechnung der Quanteneffizienz der LED. Die mittlere Strah-	
	lungsleistung wurde über ein Powermeter gemessen.	13
3.2	Ausgegebene Werte des Programms. Die Werte für $w_i, \sigma_i^2$ und $\mu_i$ kommen jeweils	
	einmal für jeden der $N_{Peaks}$ Peaks vor	19
3.3	Messwerte der SiPM <i>KETEK 3350-WB</i>	21
B.1	Effektive Quanteneffizienzen bei verschiedenen Stromstärken. Die elektrische Leis-	
	tung wurde durch $I_{LED} \cdot U_{LED}$ berechnet	40
B.2	Berechnete Werte für elektrische Leistung $(I_{LED} \cdot U_{LED})$ und effektive Quanteneffi-	
	zienz der LED.	41

## Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, die vorgelegte Thesis selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt zu haben, die ich in der Thesis angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Thesis erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der "Satzung der Justus-Liebig-Universität zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis" niedergelegt sind, eingehalten. Entsprechend § 22 Abs. 2 der Allgemeinen Bestimmungen für modularisierte Studiengänge dulde ich eine Überprüfung der Thesis mittels Anti-Plagiatssoftware.

Datum

Unterschrift