

# Vorarbeiten zum Aufbau eines Prototypkalorimeters für die Endkappe des PANDA-Experiments

**Malte Deiseroth**

Bachelorarbeit in Physik  
vorgelegt dem Fachbereich Physik, Mathematik und Informatik (FB 08)  
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz  
am 13. August 2012

1. Gutachter: Prof. Dr. Frank Maas
2. Gutachter: Prof. Dr. Lucia Masetti



**Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, dass alle Stellen der Arbeit die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden als solche kenntlich gemacht sind und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Mainz, den 13. August 2012

Malte Deiseroth  
Hegelstraße 46  
55122 Mainz  
mdeisero@students.uni-mainz.de  
Matrikelnummer: 2665241



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Das PANDA Experiment</b>	<b>3</b>
2.1	Das PANDA Detektorkonzept . . . . .	3
2.2	Elektromagnetisches Kalorimeter . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Für den Prototypen wichtige Bauteile des elektromagnetischen Kalorimeters</b>	<b>7</b>
3.1	Bleiwolframatkristall, Typ II . . . . .	7
3.2	Die Avalanche-Photodiode . . . . .	8
3.3	Der Vorverstärker zum Auslesen der APD . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Grundlagen zum Messvorgang des Proto 8</b>	<b>11</b>
4.1	Myonen . . . . .	11
4.2	Durchgang von Myonen durch Materie . . . . .	11
4.3	Berechnung der von Myonen deponierten Energie aus der Signalhöhe. . . . .	13
<b>5</b>	<b>Der Aufbau eines Prototypen mit acht Kristallen</b>	<b>14</b>
5.1	Abschätzung des Verstärkungsfaktors der Avalanche-Photodioden bei verschiedenen Temperaturen . . . . .	16
5.2	Integration einer Lichtquelle in den Prototypen . . . . .	18
<b>6</b>	<b>Messungen des Rauschverhaltens bei verschiedenen Aufbauten</b>	<b>20</b>
6.1	Messung des Rauschpegels mit Twisted-Pair-Kabel . . . . .	22
6.2	Messung des Rauschpegels mit PCB und Twisted-Pair-Kabel . . . . .	22
6.3	Vergleich der Rauschpegel mit und ohne PCB . . . . .	24
6.4	Auswirkung des Hochspannungsnetzgerätes auf das Rauschen . . . . .	25
<b>7</b>	<b>Bestimmung des temperaturabhängigen Verstärkungsfaktors der Avalanche Photodioden</b>	<b>28</b>
7.1	Aufbau für die Bestimmung des relativen Verstärkungsfaktors. . . . .	28
7.2	Signale einer LED bei einer $+26\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ . . . . .	29
<b>8</b>	<b>Verteilung der Myonensignale beim Betrieb von 2 APDs und einem Szintillationskristall</b>	<b>32</b>
8.1	Aufbau für die Messung von 200 Myonensignalen . . . . .	32
8.2	Signale von Myonen aus der Höhenstrahlung . . . . .	32

<b>9 Fazit und Ausblick</b>	<b>41</b>
<b>10 Anhang</b>	<b>44</b>
10.1 Mathematica Code zur Auswertung von Rauschsignalen. . . . .	44
10.2 Mathematica Code zur Auswertung von Myonensignalen . . . . .	46
10.3 Analyse des Rauschpegels im Proto 8 . . . . .	55
10.4 Rauschpegel der einzelnen Kanäle des Hochspannungsnetzgerätes . . . . .	57

# 1 Einleitung

Durch stetig besser werdende experimentelle und theoretische Methoden ist es in dem vergangenen Jahrhundert möglich geworden, immer kleinere Strukturen aufzulösen und zu untersuchen. Die Reise ging dabei vom Atom zum Kern über die Nukleonen zu den Quarks. Die Annahme, dass die Welt aus kleinen einzelnen elementaren Bauteilen besteht, scheint sich zu bestätigen. Neben diesen elementaren Bauteilen des Universums kennt das Standardmodell der Physik drei Naturkräfte, die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung. Die Gravitation muss gesondert behandelt werden. Obwohl das Standardmodell in den letzten Jahren sehr erfolgreich war, lässt es doch einige Fragen offen und wird unter anderem wegen seinen 18 experimentellen Parametern oft als zu biegsam empfunden. Das PANDA-Experiment, an der „Facility for Antiproton and Ion Research“ (FAIR) in Darmstadt, soll dabei helfen, die fundamentalen Wechselwirkungen und Bestandteile des Universums besser zu verstehen. Dazu stellt das FAIR einen intensiven und gepulsten Ionenstrahl aus Antiprotonen zur Verfügung, der im „High Energy Storage Ring“ (HESR) zwischengespeichert wird. Die hochenergetischen Antiprotonen werden mit einem ruhenden Wasserstofftarget zur Kollision gebracht. Mittels eines komplexen Detektors (dem PANDA-Detektor) sollen die entstehenden Reaktionsprodukte analysiert werden. Ein wichtiger Bestandteil dieses Detektors ist das elektromagnetische Kalorimeter. Es dient zum hochpräzisen Nachweis von elektromagnetisch wechselwirkenden Teilchen, speziell die zur Strahlrichtung rückwärts gestreuten Reaktionsprodukte werden dabei in einer Rückwärtsendkappe untersucht. Um offene Fragen, die die Rückwärtsendkappe und das EMC betreffen, zu beantworten, wird an der Johannes Gutenberg Universität Mainz ein Prototyp namens Proto 16 entwickelt. Im Rahmen der Entwicklung dieses Prototypen wird zuerst eine Vorstufe aufgebaut, die den Namen Proto 8 trägt. Der Aufbau und erste Testmessungen mit dem Proto 8 sind Gegenstand dieser Bachelorarbeit.

In Kapitel 2 wird eine kurze Einführung in das Übergeordnete PANDA Experiment gegeben. Es werden einzelne, für diese Bachelorarbeit wichtige Aspekte des Detektorkonzepts wie das elektromagnetische Kalorimeter erklärt und der Proto 8 wird in den übergeordneten Rahmen dieses Experiments eingeordnet. In Kapitel 3 werden für den Proto 8 wichtige Bauteile wie das Szintillatormaterial Bleiwolframat oder die Avalanche-Photodiode beschrieben. Es geht dabei um deren physikalische Funktionsweise, ihre Leistungsfähigkeit und den Einsatz im Proto 8. Kapitel 4 beschäftigt sich mit den Grundlagen des Proto 8. Hier wird die Wechselwirkung zwischen Myonen und dem Szintillatormaterial erklärt. Der Messvorgang des Proto 8 wird beschrieben und die für die Auswertung wichtigen Parameter werden eingeführt. Kapitel 5 hat den Aufbau des Proto 8 zum Thema. Die für den Prototypen wichtigen Bauteile werden in ihrer Zusammenstellung erklärt. Die im Rahmen dieser Bachelorarbeit gemachten Änderungen werden beschrieben und der

## 1 Einleitung

Verstärkungsfaktor  $M$  der Avalanche-Photodiode wird für  $+26\text{ }^{\circ}\text{C}$  bestimmt. Kapitel 6 beschäftigt sich mit dem Rauschverhalten des Proto 8. Zur Untersuchung des Rauschpegels sind verschiedene Aufbauten getestet worden, wie z.B zwei mögliche Verbindungen zwischen Avalanche-Photodiode und Vorverstärker. Der Rauschpegel des Prototypen ist unter Verwendung des Hochspannungsnetzgerätes ISEG EHS 8 210pF und des ISEG NHQ 214M verglichen worden. In Kapitel 7 wird der relative Verstärkungsfaktor  $G$  der Avalanche-Photodiode durch Abkühlung von  $+26\text{ }^{\circ}\text{C}$  auf  $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$  bestimmt. Dies geschah durch Messung des Signals einer LED jeweils bei einer Temperatur von  $+26\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Durch Vergleichen der Signalhöhe konnte der relative Verstärkungsfaktor  $G$  bestimmt werden. Kapitel 8 enthält die Auswertung einer Messreihe von 200 Ereignissen, ausgelöst durch Myonen aus der Höhenstrahlung. Zuerst wird die Energieverteilung der von den Myonen im Kristall deponierten Energie histogrammiert. Danach wird die Korrelation zwischen zwei Avalanche-Photodioden untersucht, die zum Auslesen des selben Kristalls verwendet worden sind.

## 2 Das PANDA Experiment

Der Inhalt dieses Kapitels ist dem Technical Design Report [2] entnommen und kann dort genauer nachgelesen werden. Im Folgenden wird in groben Zügen das PANDA Experiment vorgestellt. Danach wird auf die für diese Bachelorarbeit relevanten Teile eingegangen.

Das Experiment zur Anti**P**rotonen **A**Nnihilation in **D**Armstadt PANDA, wird an der zukünftigen **F**acility for **A**ntiproton and **I**on **R**esearch FAIR in Darmstadt aufgebaut. Ziel des Experiments ist unter anderem die Suche nach exotischen Zuständen in der Massenregion des Charmoniums und die Wechselwirkung von Hadronen, die Charm-Quarks enthalten, mit Kernmaterie. Ein weiteres Forschungsthema ist auch die Nukleon-Hyperon-Wechselwirkung, da Hyperonen sehr effizient mit Antiprotonen erzeugt werden können. Diese experimentellen Ziele liefern die Vorgaben für den Aufbau des PANDA Experiments, wie Hochratenfestigkeit, Strahlungshärte, Impulsmessung sowie Energiemessung, so ist z.B. die Energieschwelle für die Detektion von Photonen des elektromagnetischen Kalorimeters EMC 1 MeV. Der Hochenergiespeicherring HESR am FAIR stellt einen gekühlten Antiprotonenstrahl mit einem Impuls von 1.5 GeV/c bis 15 GeV/c zur Verfügung. Die niedrige Ionenpulsbreite wird es ermöglichen, hadronische Resonanzen mit einer Breite von 50 – 100 keV zu messen, was 10 bis 100 mal besser ist als in einem Elektron-Positron-Collider möglich. Ein weiterer Vorteil von Proton-Antiproton-Collidern ist, dass Zustände mit allen Quantenzahlen aus Kollisionen erster Ordnung gebildet werden können.

Das PANDA Experiment ist ein Fixed-Target-Experiment. Die Antiprotonen werden auf ein Wasserstofftarget geschossen, das entweder in Form eines Strahls gefrorener Pellets, oder dünnen Wasserstoffclusterstrahlen vorliegt. Für Experimente mit Kernen, werden entweder dünne Folien, oder Drähte in den Strahl gebracht. Die angepeilte Luminosität ist  $2 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . Die angestrebte Auflösung der invarianten Masse beträgt etwa 1 %. Ereignisrate von  $20 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{s}}$  führen dazu, dass ein effizienter Ereignistrigger benötigt wird

### 2.1 Das PANDA Detektorkonzept

Der PANDA Detektor wird einen Raumwinkel von fast  $4 \pi$  abdecken. Da es sich um ein Fixed-Target-Experiment handelt, werden in den unterschiedlichen Bereichen des Detektors sehr unterschiedliche Reaktionsraten und Energien vorherrschen. Darum wird der Detektor aus zwei Teilen bestehen, zum einem aus dem Targetspektrometer, welches die Reaktionskammer umgibt und zum anderen aus dem Vorwärtsspektrometer, in welchem die vorwärts gestreuten Reaktionsprodukte detektiert werden.

Das Targetspektrometer, siehe hierzu Abbildung 2.1, detektiert die Reaktionsprodukte

## 2 Das PANDA Experiment

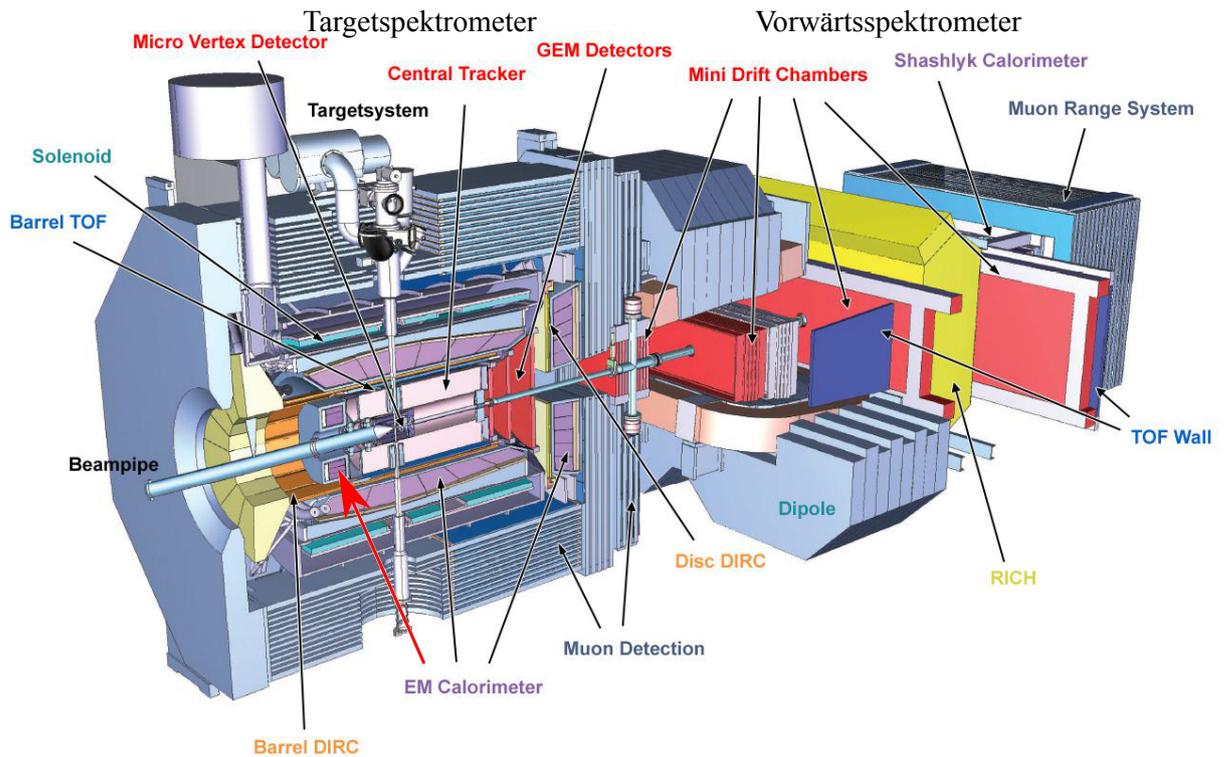


Abbildung 2.1: Modell des PANDA Detektors. Antiprotonen kommen von links und werden durch das Targetsystem mit Protonen zur Kollision gebracht. Reaktionsprodukte mit einem Winkel größer  $5^\circ$  in der Vertikalen und  $10^\circ$  in der Horizontalen werden vom Targetspektrometer detektiert. Nach vorne gestreute Reaktionsprodukte kommen in das Vorwärtsspektrometer. Der rote Pfeil markiert die Rückwärtsendkappe des Targetspektrometers, die für diese Bachelorarbeit wichtig ist. Quelle: [6]

mit einem Winkel größer  $5^\circ$  in der Vertikalen und  $10^\circ$  in der Horizontalen zur Strahlrichtung. Es hat einen in verschiedenen Schichten organisierten Aufbau, der einer Zwiebel ähnelt. Jede Schicht hat spezielle Aufgaben und erst aus der Gesamtheit der Information kann man auf die ursprünglichen Reaktionsprodukte rückschließen. Vom Strahl aus gesehen kommt als erstes der „Siliziumstreifen-Microvertexdetektor“ umgeben vom sog. „Straw-Tube-Tracker“. Beide zusammen bilden den Spurdetektor. In Abbildung 2.1 sind diese mit „Micro Vertex Detektor“ bzw. „Central Tracker“ gekennzeichnet. Mit dem Spurdetektor kann der Impuls von geladenen Teilchen im 2 T Magnetfeld des Solenoiden bestimmt werden. Außerhalb des Central Trackers befindet sich der Detektor „Detection of internally reflected Cherenkov light“ genannt DIRC. Außerhalb des DIRC befindet sich das EMC, welches wiederum umgeben wird von dem solenoidförmigen Magneten, der ein magnetisches Feld von 2 T parallel zur Strahlrichtung bereitstellt. Der Solenoid hat einen Durchmesser von 1.89 m und eine Länge von 2.75 m. Das Targetkalorimeter wird wegen

seiner Form auch Barrel- oder Fasskalorimeter genannt. Siehe Abbildung 2.1  
Für die Kalorimetrie der Reaktionsprodukte unter Rückwärtswinkel wird eine Rückwärtsendkappe gebaut. Der in dieser Bachelorarbeit verwendete Proto 8 ist ein Prototyp für das EMC dieser Rückwärtsendkappe (in Abbildung 2.1 gekennzeichnet durch den roten Pfeil). Für die unter einem Winkel von  $22^\circ$  bis  $5^\circ$  in der vertikalen und bis  $10^\circ$  in der horizontalen vorwärts gestreuten Reaktionsprodukte wird eine Vorwärtsendkappe des Targetspektrometers gebaut. Die geradeaus durchfliegenden Teilchen mit einem Winkel kleiner als  $5^\circ$  in der Vertikalen und  $10^\circ$  in der Horizontalen werden im Vorwärtsspektrometer detektiert. Das Vorwärtsspektrometer muss die höchsten Reaktionsraten verarbeiten können, da es sich um ein Fixed-Target-Experiment handelt. Zur Impulsmessung von geladenen Teilchen verfügt das Vorwärtsspektrometer über einen Dipolmagneten, der ein Feldintegral von  $2 \text{ Tm}$  auf einer Länge von  $1.4 \text{ m}$  mit einem Polschuhabstand von  $70 \text{ cm}$  hat.

(Quelle: [2])

## 2.2 Elektromagnetisches Kalorimeter

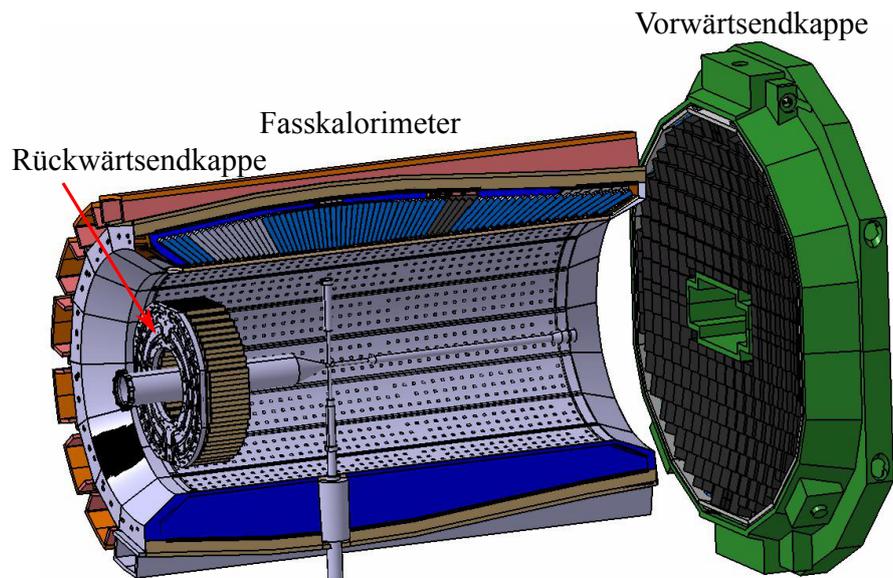


Abbildung 2.2: Die Vorwärtsendkappe des EMC ist grün dargestellt. Der rundliche Teil in der Mitte zeigt das Fasskalorimeter. Am linken Ende befindet sich die Rückwärtsendkappe. (Quelle: [12])

Im Targetspektrometer wird ein homogen absorbierendes elektromagnetisches Kalorimeter (EMC) aufgebaut, mit dem Energien im Bereich von wenigen MeV bis GeV nachgewiesen werden müssen. Als Szintillator hat man sich für Bleiwolframat  $PbWO_4$  (PWO) entschieden. PWO verfügt über eine hohe Dichte, gute Energieauflösung und kurze

## 2 *Das PANDA Experiment*

Lichtabklingzeiten. PWO hat jedoch verglichen mit anderen Szintillatoren eine geringe Lichtausbeute. Zum Auslesen der Kristalle werden „Large Area Avalanche Photo Diodes“ (LAAPDs oder APDs) verwendet. Diese LAAPDs verfügen über eine hohe Quanteneffizienz von  $\approx 70\%$  und eine aktive Fläche, die etwa vier mal größer ist als die der Photodioden von CMS. Der größte Teil des Targetspektrometers ist im Fasskalorimeter untergebracht, welches mit 11360 Kristallen von etwa 200 mm Länge ausgerüstet wird. Die Rückwärtsendkappe wird bestückt mit 592 Kristallen. Die 3600 Kristalle der Vorwärtsendkappe müssen größere Reaktionsraten und Energien verarbeiten können, darum werden die Kristalle der Vorwärtsendkappe mit Vakuumphototrioden ausgelesen. (Quelle: [2])

# 3 Für den Prototypen wichtige Bauteile des elektromagnetischen Kalorimeters

In diesem Kapitel geht es um die Teile des EMCs, die speziell für den Proto 8 von Bedeutung sind.

## 3.1 Bleiwolframatkristall, Typ II

Das EMC wird im „Barrel“, mit einer Länge von 2.75 m und einem Durchmesser von 1.89 m, untergebracht. Aus diesem Grund muss das EMC möglichst klein sein. Dies stellt hohe Ansprüche an das Szintillatormaterial, welches sehr kompakt sein muss. Dabei soll es über eine große Lichtausbeute, kurze Reaktionszeiten, gute Energieauflösung in einem großen Energiebereich und eine ausreichende Strahlungshärte verfügen. Die für das CMS-Experiment entwickelten Kristalle aus Bleiwolframat  $PbWO_4$  (PWO) erfüllen alle Anforderungen außer der Lichtausbeute. Um diese zu verbessern, ist ein spezielles Programm gestartet worden, dessen Ergebnis ist das so genannte PWO-II. Hierbei wurde die Kristallstruktur perfektioniert und gezielt Störstellen eingebracht, welche einen hohen Wirkungsquerschnitt haben, um Elektronen aus dem Leitungsband einzufangen. So wurde die Lichtausbeute um etwa den Faktor 2 erhöht. Das EMC wird außerdem im PANDA Detektor auf  $T = -25\text{ °C}$  gekühlt, dies erhöht die Lichtausbeute gegenüber Raumtemperatur um den Faktor 4. Als Ergebnis erhält man für 200 mm lange Kristalle bei  $18\text{ °C}$  mit einer bi-alkali Photokathode und einer Quanteneffizienz von  $\approx 20\%$  ungefähr 17 bis 20 Photoelektronen/MeV. (Quelle: [2, S. 51])

Die Folgen von Strahlenschäden für PWO Kristalle bei Raumtemperatur sind von Untersuchungen im Rahmen des CMS-Experiments bekannt. Untersuchungen bei  $0\text{ °C}$  zeigen, dass die Relaxationszeiten von Farbzentren sehr groß werden und Werte von über 200 h erreichen. Als Folge gibt es eine kontinuierliche und asymptotische Abnahme der Lichtausbeute. Dies führt dazu, dass die Kristalle ab einer Dosis von 30 – 50 Gy in Sättigung gehen, mit einer Abnahme der Lichtausbeute von bis zu 30 %. Da die tatsächlichen Strahlungshärten am PANDA-Experiment deutlich niedriger sind als z.B. am LHC, sind diese Effekte nur relevant für einen kleinen Teil in der Vorwärtskalorimeterendkappe. Bezieht man diese Effekte der verminderten Strahlungshärte bei tiefen Temperaturen durch Kühlung mit ein, so kann man sagen, dass durch das Arbeiten bei  $T = -25\text{ °C}$  die Lichtausbeute gegenüber Raumtemperatur um den Faktor 3 steigt.

Durchquert ein Myon den Szintillator, so deponiert es Energie nach Bethe-Bloch (Gleichung 4.1 aus Abschnitt 4.2) im Kristall. Das Meiste der Energie wird in Form von

### 3 Für den Prototypen wichtige Bauteile des elektromagnetischen Kalorimeters

Parameter	PWO	PWO-II
$\rho$	8.30 g/cm <sup>3</sup>	
$\tau_{decay}$	6.5 ns	
$\lambda_{max}$	420 nm	
relative LY	0.3 at RT	0.6 at RT
dLY/dT at RT	-2.7 %/°C	-3.0 %/°C
dE/dx (MIP)	10.2 MeV/cm	

Tabelle 3.1: Die Tabelle zeigt einige in dieser Bachelorarbeit wichtige Parameter von PWO und PWO-II.  $\lambda_{max}$  gibt das Intensitätsmaximum der abgestrahlten Wellenlänge an.  $\tau_{decay}$  die Abklingzeit. LY steht für Light Yield und bezeichnet die Lichtausbeute. Sie war der Hauptgrund für die Entwicklung von PWO-II. (Quelle: [2, S. 40] und [1, S. 303])

Phononen abgegeben, ein kleiner Teil aber kann Elektronen anregen, die beim Zurückfallen in den Grundzustand Photonen emittieren. Diese Materialeigenschaft wird durch die Lichtausbeute charakterisiert. Umwickelt man den Szintillatorkristall mit einer reflektierenden Folie, können die Photonen an einem Ende des Kristalls gesammelt werden.

## 3.2 Die Avalanche-Photodiode

Die untere Energieschranke des EMC von 1 MeV stellt hohe Ansprüche an die verwendeten Photodetektoren. Das EMC befindet sich in einem 2 T starken Magnetfeld, darum können keine konventionellen Photomultiplier eingesetzt werden. Das Ionisationssignal in einer PIN Photodiode von einem transmittierenden geladenen Teilchen ist so groß, dass auch diese nicht verwendet werden können. Aus diesem Grund hat man spezielle magnetfeldresistente und ionisationsarme Photodioden entwickelt. PWO hat eine relativ geringe Lichtausbeute, somit müssen Dioden mit einem internen Verstärkungsfaktor (Gain) genutzt werden. Für das Fasskalorimeter und die Rückwärtsendkappe führte das auf Avalanche-Photodioden (APD). Um das Signal zu maximieren, sollte die aktive Fläche der APDs möglichst groß sein, die hier verwendeten APDs haben eine aktive Fläche von  $6.8 \times 14 \text{ mm}^2$ . Ein Kristall hat eine Fläche von  $24.4 \times 24.4 \text{ mm}^2$  (Quelle: [2, S. 8]), deshalb können zwei APDs zum Auslesen eines Kristalls verwendet werden. Das Bedeckungsverhältnis beträgt etwa 32 %. Es ist zu beachten, dass der Verstärkungsfaktor der APDs sich mit der Temperatur ändert. Für 2 APDs ist das eine Messungen, die während dieser Bachelorarbeit gemacht wurde und die sich in Kapitel 7 befindet.

Avalanche Photodioden sind spezielle Dioden, die den Avalancheeffekt ausnutzen um Photonen zu detektieren. Im Wesentlichen handelt es sich um in Sperrrichtung geschaltete Dioden. Erreicht ein Photon die Absorptionsschicht (vgl. Abbildung 3.1) kann es ein Elektronen-Loch-Paar erzeugen, die Wahrscheinlichkeit für diese Erzeugung wird Quanteneffizienz genannt. Von der in Sperrrichtung angelegten Spannung wird das Loch ( $e^+$ ) in Richtung  $p^+$  dotierter Schicht gesaugt, während das Elektron ( $e^-$ ) in entgegengesetz-

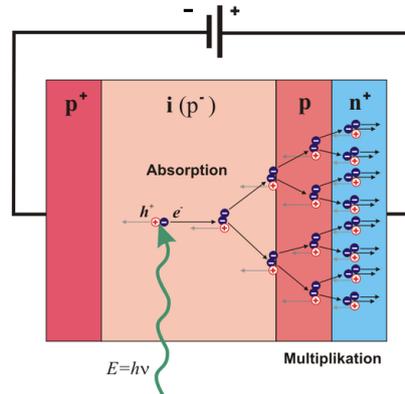


Abbildung 3.1: Skizze einer APD mit eingezeichnetem Avalancheeffekt. Quelle [8]

ter Richtung, also zur  $n^+$  dotierten Schicht gesaugt wird. Auf dem Weg zur Anode wird das Elektron durch das angelegte elektrische Feld beschleunigt und kann dabei weitere Elektronen-Loch-Paare erzeugen. Dieser Effekt heißt Avalancheeffekt, durch ihn wird das Signal verstärkt. Der Wert des Verstärkungsfaktors  $M$  hängt ganz wesentlich von der angelegten Sperrspannung und der Temperatur ab,  $M$  ist von der Größenordnung  $M = 50$  bis 200. Siehe dafür Abbildung 5.3 (Quelle: [7])

### 3.3 Der Vorverstärker zum Auslesen der APD

Obwohl die APDs bereits einen internen Verstärkungsfaktor von etwa 50 bis 200 haben, kann man ihr Signal noch nicht digitalisieren. Der durch ein Teilchen generierte Impuls enthält zu wenig Ladungsmenge und ist für eine Bestimmung der Energie nicht geeignet. Aus diesem Grund wurde ein spezieller: „Low Noise / Low Power Charge Preamplifier“ (Quelle: [9]) entwickelt, der speziell für die Auslesung der LAAPD Signale konzipiert ist. Dieser Vorverstärker steht zur Prototypenentwicklung zur Verfügung. Parallel wird ein ASIC entwickelt, der im finalen Aufbau verwendet wird. Da der Vorverstärker unmittelbar hinter den APDs angeschlossen werden muss (Quelle [4, S. 67]), wird sich auch der Vorverstärker im Magnetfeld des Solenoiden befinden und somit in einem 2 T Feld arbeiten. Der Vorverstärker muss möglichst wenig Leistung aufnehmen, weil er ebenfalls auf  $-25\text{ }^\circ\text{C}$  gekühlt wird. Der hier verwendete SP 883A01 hat eine Leistungsaufnahme von 45 mW bis 90 mW (Quelle: [9, S. 4] ), diese Leistungsaufnahme ist abhängig von der Rate und Leistung des Eingangssignals.

Um das Signal der APD zu verstärken und zu integrieren, verfügt der Vorverstärker über einen J-FET und eine rückgekoppelte Integrationsschaltung mit Operationsverstärker. (vgl. Abbildung 3.2). Das Signal wird dabei auf den Kondensatoren C1 und C2 zwischengespeichert und mit einer Abklingkonstante von  $\tau = 25\text{ }\mu\text{s}$  abgegeben. Misst man

### 3 Für den Prototypen wichtige Bauteile des elektromagnetischen Kalorimeters

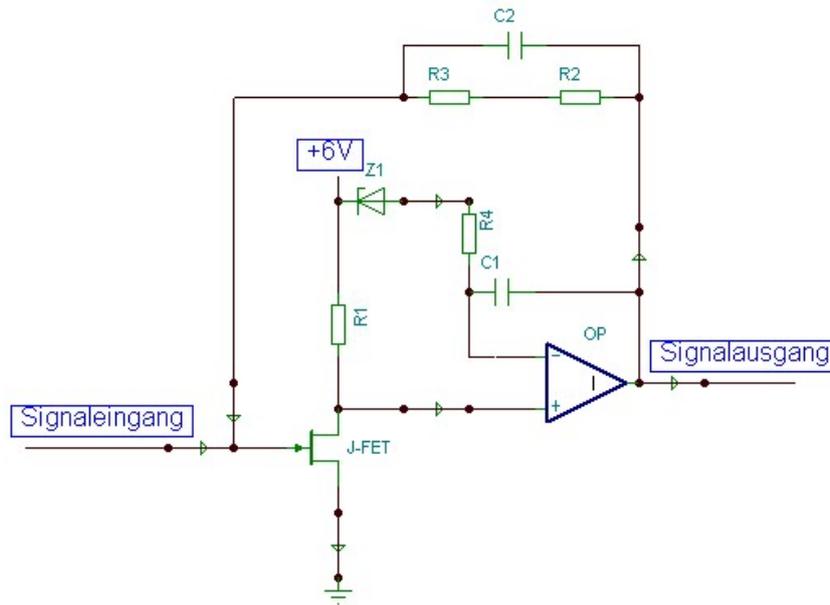


Abbildung 3.2: Skizze des Vorverstärkerschaltplans. Das Signal der APD steuert einen J-FET. Dieser ist mit einer integrierenden Operationsverstärkerschaltung verbunden. Das Signal am Signalausgang ist verstärkt, so dass es sich digitalisieren lässt. Der Schaltplan findet sich in Quelle: [9, S. 6]

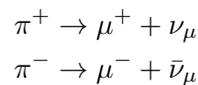
das Signal eines Myons am Ausgang des Vorverstärkers so erwartet man ein Signal, das instantan sein Maximum erreicht und mit einer Entladekurve der Form  $U_0 \cdot e^{t/\tau}$  abfällt.

# 4 Grundlagen zum Messvorgang des Proto 8

Der Aufbau des Proto 8, siehe im kommenden Kapitel 5, wurde dazu verwendet, um Myonen aus der Höhenstrahlung zu messen. In diesem Abschnitt werden die Grundlagen beschrieben, die Voraussetzung sind um den Versuchsaufbau zu verstehen.

## 4.1 Myonen

Myonen zählen zu den Elementarteilchen und sind schwere Schwesterteilchen der Elektronen. Sie gehören zur Gattung der Leptonen und tragen daher den Spin  $S = \frac{1}{2}$ . Ihre Masse beträgt etwa  $M = 105.7 \text{ MeV}/c^2$ . Somit sind sie ungefähr 207 mal schwerer als Elektronen. Ihre Ladung beträgt ebenfalls ein  $e^-$ . Wie das Elektron wechselwirken Myonen nur schwach und elektromagnetisch, nicht aber stark. Myonen, die die Erdoberfläche erreichen, entstehen in der Atmosphäre. Kosmische Teilchen erzeugen Teilchenschauer, in welchen unter anderem Pionen  $\pi$  erzeugt werden. Die Pionen zerfallen zum Teil in Myonen.



Als Faustregel gilt, dass etwa ein Myon pro Sekunde durch die Fläche einer ausgestreckten Hand fliegt. Inhalt aus Quelle: [11, S. 154ff] und [1, S. 233ff].

## 4.2 Durchgang von Myonen durch Materie

Beim Durchgang von geladenen Teilchen durch Materie kann es zu unterschiedlichen Prozessen kommen. Für diese Bachelorarbeit ist der Bereich minimal ionisierender Partikel (MIPs) interessant. Dieser Bereich wird beschrieben, durch die Bethe-Bloch-Formel Gleichung 4.1, für schwere Teilchen bei Energien, die noch keine elektromagnetischen Schauer auslösen.

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \quad (4.1)$$

- $K/A = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 / A$
- $I$ : mittlere Anregungsenergie in eV

#### 4 Grundlagen zum Messvorgang des Proto 8

- $\delta(\beta\gamma)$  Dichtekorrekturfaktor wegen des Energieverlusts durch Ionisation
- $A$ : Atomare Masse des Absorbers
- $Z$ : Ladungszahl des Absorbers
- $r_e$ : klassischer Elektronenradius
- $z$ : Ladung des Streuteilchens
- $N_A$ : Avogadrozahl
- $M$ : Masse des Streuteilchens

Zu beachten ist, dass bei großen Energien eine Abhängigkeit von der Teilchenmasse  $M$  in  $T_{max}$  zunehmend eine Rolle spielt. Ansonsten ist  $\langle dE/dx \rangle$  im wesentlichen eine Funktion von  $\beta$ . Für  $T_{max}$  gilt:

$$T_{max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e/M + (m_e/M)^2} \quad (4.2)$$

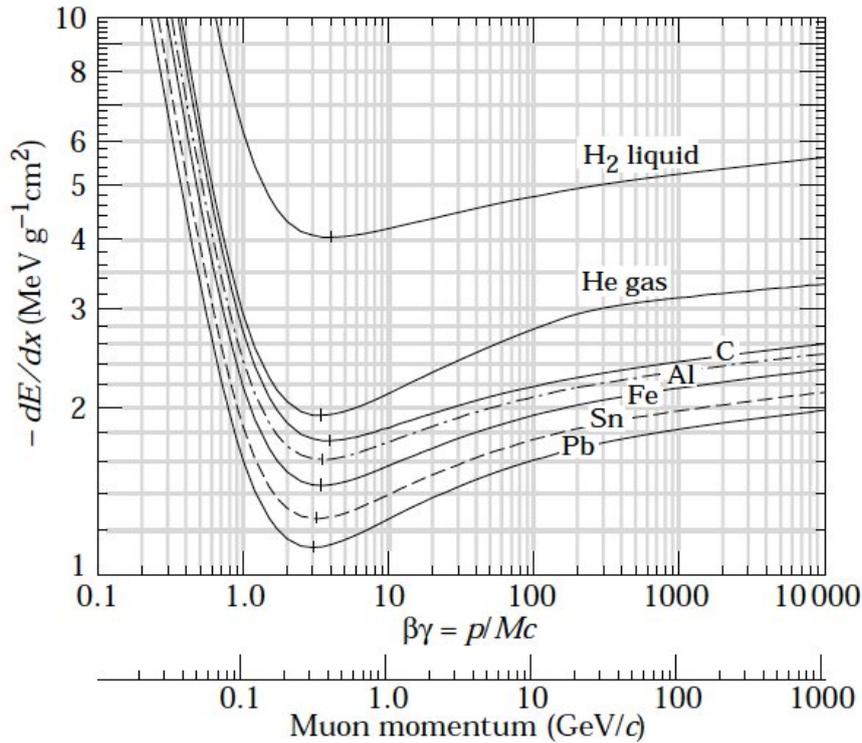


Abbildung 4.1: Mittlerer Energieverlust in flüssigem Wasserstoff, gasförmigem Helium, Kohlenstoff, Aluminium, Eisen, Zinn und Blei. Strahlungseffekte sind nicht berücksichtigt. Diese werden ab  $\beta\gamma \approx 1000$  wichtig. Im Minimum spricht man von minimal ionisierenden Teilchen (MIPs). Quelle: [1, S. 232]

Da im PANDA-Experiment Energien von bis zu 15 GeV erreicht werden und Myonen aus der Höhenstrahlung annähernd minimal ionisierend sind, ist der Energiebereich von  $\langle dE/dx \rangle$  der durch die Bethe-Bloch-Formel beschrieben wird, genau der Energiebereich, in dem sich die Myonen befinden. Die Wechselwirkung zwischen Szintillatormaterial und Myon wird also durch die Bethe-Bloch-Formel quantitativ beschrieben. Der Inhalt dieses Abschnittes stammt aus Quelle [1, S. 229].

### 4.3 Berechnung der von Myonen deponierten Energie aus der Signalhöhe.

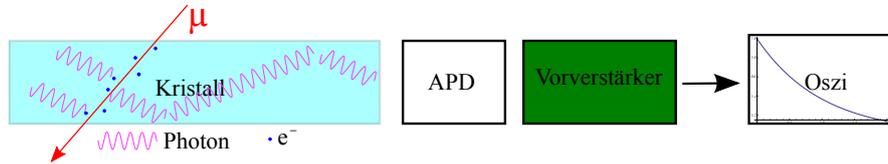


Abbildung 4.2: Skizze des Ablaufs vom Myon bis zum Signal. Links regt das Myon die Elektronen im Festkörper an. Diese regen sich zum Teil durch die Abgabe von Photonen wieder ab. Die Photonen regen in der aktiven Schicht der APD  $e^-$  ins Leitungsband an. Die Photoelektronen werden durch den Avalancheeffekt verstärkt. Im Vorverstärker wird das Signal ein weiteres mal verstärkt und integriert. Das Signal des Vorverstärkers lässt sich danach mit einem Oszilloskop auslesen.

In Kapitel 8 werden Signalhöhen  $U_{max}$  umgerechnet in von Myonen in Kristall deponierte Energie  $E$ . Im Folgenden wird die zu Grunde liegende Rechnung erklärt.

Untersuchungen der PWO-II Kristalle mit einem Photomultiplier bei einer Quanteneffizienz von 18% haben eine Lichtausbeute von 90 Photoelektronen pro MeV ergeben. Dies führt auf eine Lichtausbeute der Kristalle von  $L = 500$  Photonen/MeV bei  $-25^\circ\text{C}$  (Quelle [2, S. 87]). Da eine APD eine aktive Fläche von  $6.8 \times 14 \text{ mm}^2$  (Quelle [2, S. 69]) und ein Kristall eine Kopffläche von  $24.4 \times 24.4 \text{ mm}^2$  (Quelle [2, S. 8]) hat, erhält man einen Flächenanteil von  $A = 16\%$  pro APD. Unter der Annahme homogen ausgeleuchteter Kristallendflächen, erreichen etwa 32% der Szintillationsphotonen die aktiven Flächen der APDs.

Der nächste wichtige Parameter ist der Verstärkungsfaktor  $M$  der APD. Dieser hängt stark von der angelegten Sperrspannung und der Temperatur ab. Er wird in Kapitel 7 bestimmt und ist für jede APD unterschiedlich. Für APD 111 beträgt er bei  $-23^\circ\text{C}$  und 325 V Sperrspannung  $M = 92$  und für APD 292  $M = 149$ . Für die verwendeten APDs wird eine Quanteneffizienz von  $Q = 70\%$  (Quelle [2, S. 87]) angenommen. Von der APD gelangt der Ladungsimpuls in den Vorverstärker. Dort wird der Impuls ein weiteres mal verstärkt und integriert (siehe hierzu Abschnitt 3.3). Der Verstärkungsfaktor des Vorverstärkers beträgt  $G_c = 0.5 \text{ V/pC}$  (Quelle [9, S. 4]). Mit diesen Angaben lässt sich aus der Signalhöhe  $U_{max}$  die vom einem Myon im Kristall deponierte Energie  $E$  bestimmen und zwar zu

$$E = \frac{U_{max}}{Q \cdot M \cdot A \cdot L \cdot G_c} \quad (4.3)$$

## 5 Der Aufbau eines Prototypen mit acht Kristallen

Proto 8 heißt der Aufbau, an dem diese Bachelorarbeit entwickelt worden ist. Proto steht für Prototyp und 8 bezeichnet die Zahl der verbauten Kristalle. Ziel des Proto 8 ist es, die zuvor beschriebenen Komponenten zu testen. Zentrale Komponenten, wie z.B. die Auswahl des Szintillatormaterials PWO, der Photosensoren LAAPDs, sowie deren Qualitätskontrolle werden im Rahmen der PANDA-EMC-Kollaboration gemeinsam entwickelt. Es existiert jedoch eine Reihe von Fragestellungen, die speziell für die Rückwärtsendkappe des Kalorimeters relevant ist. Dabei geht es um Aufbaubarkeit, Kühlung bzw. Isolation, Funktionalität und Ähnliches. In einem späteren Schritt wird der Proto 8 zum Proto 16 ausgebaut.

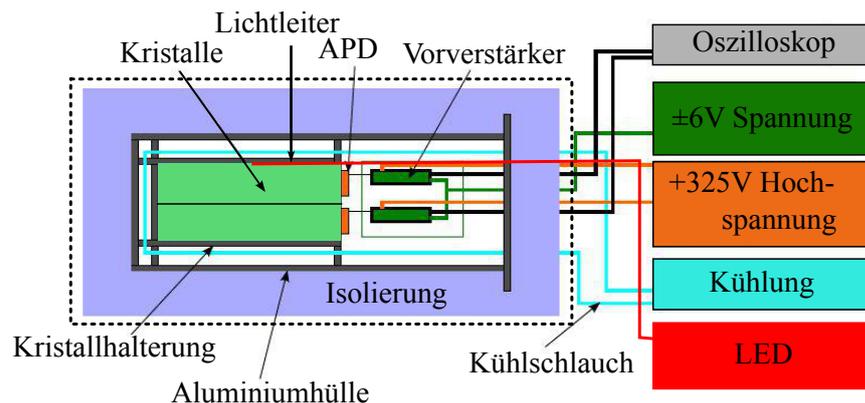


Abbildung 5.1: Skizze des Proto 8. Die LED wurde während dieser Bachelorarbeit integriert. Die gestrichelte Linie deutet eine lichtdichte Metallbox an, die den Aufbau umgibt. Quelle: [4, S. 24]

Abbildung 5.1 ist eine schematische Skizze des Aufbaus. Innerhalb der lichtdichten Metallbox (gestricheltes Rechteck in Abbildung 5.2) befindet sich eine Hülle aus Aluminium, die eine Kristallhalterung enthält, die bis zu 8 Kristalle fassen kann. Eine Skizze der Frontansicht der Kristallhalterung findet sich in Abbildung 5.2. Die Vorverstärker sind innerhalb der Aluminiumhülle untergebracht, und somit gekühlt. Sie sind angeschlossen an eine  $\pm 6V$  Versorgungsspannung. APD und Vorverstärker wurden meist mit einem Twisted-Pair-Kabel von etwa 3 cm Länge verbunden. Die Hochspannung für die APDs ist ebenfalls über die Vorverstärker an die APDs angelegt. Das verstärkte Signal wird

## 5 Der Aufbau eines Prototypen mit acht Kristallen

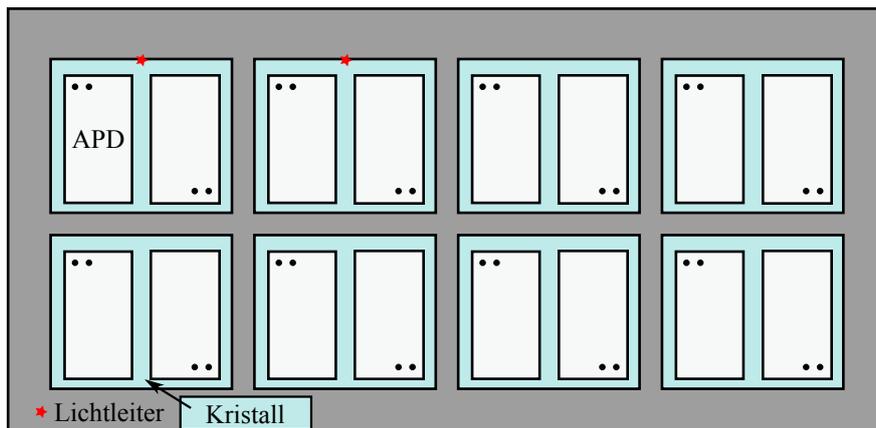


Abbildung 5.2: Skizze der Kristallhalterung in der Frontansicht. Die Lichtleiter wurden in den Spalt zwischen Folie und Kristall geschoben.

von einem Oszilloskop am Ausgang der Vorverstärker ausgelesen. Später soll hierfür ein Flash ADC verwendet werden. Auf den Einbau der LEDs wird in Abschnitt 5.2 detailliert eingegangen. Die Signalkabel sind über Adapter mit den an der Metallbox befestigten Steckern nach außen geführt. Die Hochspannungsversorgung der APDs, die  $\pm 6$  V Versorgung und die Kühlschläuche werden durch Löcher in der Metallbox in das Innere geführt. Die Löcher der Ein- und Ausgänge wurden vor der Datennahme mit schwarzem Klebeband lichtdicht verschlossen. Im Kühlaggregat ist Alkohol als Kühlmittel. Dieses konnte laut internem Sensor auf bis zu  $-40$  °C gekühlt werden. Die Kühlschläuche verlaufen zwischen Aluminiumhülle und Kristallhalterung in 4 Schleifen. Die Leitungen zur Kühlung sind bis zur Aluminiumhülle isoliert geführt (Rohrisolation aus dem Baubedarf). Trotzdem zeigten Messungen im Innern der Aluminiumhülle nur  $-19$  °C bis  $-23$  °C an.

## 5.1 Abschätzung des Verstärkungsfaktors der Avalanche-Photodioden bei verschiedenen Temperaturen

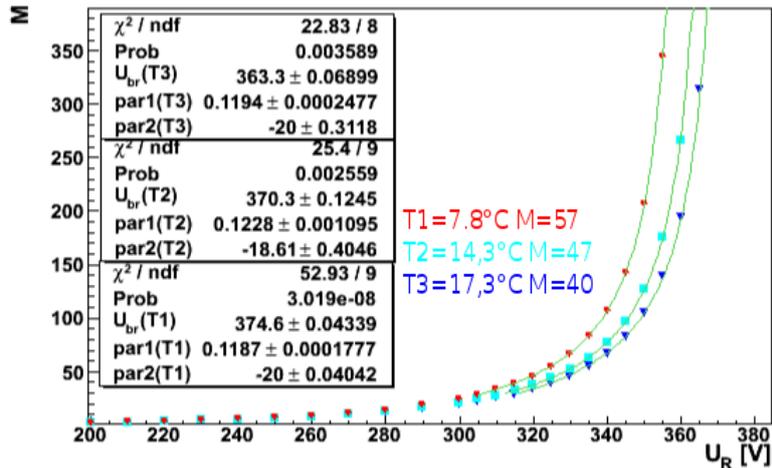


Abbildung 5.3: Verstärkungsfaktor  $M$  gegen die Sperrspannung  $U_R$  für eine APD bei drei verschiedenen Temperaturen. Der Gain-Faktor steigt exponentiell an bis zum Durchbruch. Quelle: [3]

In Kapitel 7 wird die Änderung des Verstärkungsfaktors  $M$  der APDs und des Vorverstärkers von  $+26\text{ °C}$  auf  $-23\text{ °C}$  bei einer Sperrspannung  $U_r$  von  $+325\text{ V}$  aus Messdaten bestimmt. Der Verstärkungsfaktor der APDs war aus Eichkurven bei 3 verschiedenen Temperaturen bekannt. Hierbei handelt es sich um erste Test-APDs. Für den späteren Aufbau werden die Verstärkungsfaktoren der APDs im Rahmen der Qualitätskontrolle vermessen. Aus diesem Grund musste erst der Verstärkungsfaktor  $M$  bei  $+26\text{ °C}$  bestimmt werden, damit mit der Messung aus Kapitel 7 der absolute Verstärkungsfaktor bei  $-23\text{ °C}$  bestimmt werden konnte. Die Werte von Tabelle 5.1 wurden dazu aufgetragen und eine Funktion der Form  $U_0 \cdot e^{-ct}$  als Fitfunktion verwendet. Aus dem Fit konnte  $M$  bei einer Temperatur von  $+26\text{ °C}$  bestimmt werden. Das Ergebnis ist in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

## 5 Der Aufbau eines Prototypen mit acht Kristallen

Das zu verwendende Fitmodell war bei dieser Abschätzung nicht klar. So wird üblicherweise  $\Delta M/\Delta T$  als eine Konstante angenommen, allerdings hängt dieses stark von der angelegten Sperrspannung  $U_r$  und der APD ab (siehe Quelle: [7]). Für die hier verwendeten APDs gibt es noch kein Datenblatt in dem man diese Eigenschaft nachlesen könnte. Frau Dr. Andrea Wilms hat allerdings die Vermutung geäußert, dass für diese APDs doch besser eine Exponentialfunktion als Fit verwendet werden sollte. Aus der Unsicherheit des Modells ist dann auch der Fehler für  $M(+26\text{ °C})$  bestimmt worden. Dazu wurde das Modell der Exponentialfunktion mit dem Modell einer Geraden verglichen. Aus der Differenz der Modelle ist dann der Fehler abgeschätzt worden.

$U_r$ in V	APD	T in °C	M	APD	T in °C	M
		8	55.3		7.8	49.4
+325	111	13.8	44.0	292	14.2	39.9
		18.3	39.5		19.1	35.7

Tabelle 5.1: Verstärkungsfaktor  $M$  für 3 verschiedene Temperaturen (Quelle [3]).

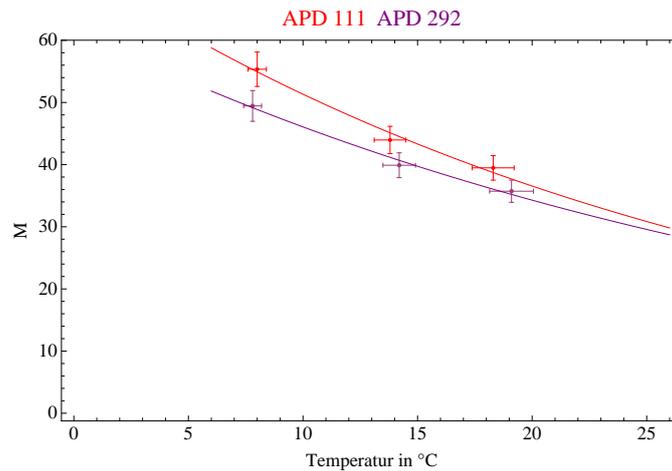


Abbildung 5.4: Die Daten aus Tabelle 5.1. Die Fitfunktion hat die Form  $M(T) = a \cdot e^{-cT}$ .  $M(+26\text{ °C})$  ist aus dem Fit errechnet worden. Diese Methode hat eine große Unsicherheit, da das zu verwendende Fitmodell nicht klar war. Die Quellenlage hierzu ist nicht eindeutig, siehe Quelle [7] und [3]. Die eingezeichneten Fehlerbalken zeigen einen relativen Fehler von 5 % an.

## 5 Der Aufbau eines Prototypen mit acht Kristallen

APD	111	292
M(26 °C)	29.8	28.7
$\Delta M(26 \text{ °C})$	3.3	2.1
$\chi^2$	2.07	0.969

Tabelle 5.2: Ergebnisse für  $M(+26 \text{ °C})$  durch die Fits aus Abbildung 5.4 und die  $\chi^2$  der Fitfunktionen

Mit dem Ergebnis aus Kapitel 7 kann man die Gesamtverstärkung des Systems abschätzen, wobei der Fehler sich durch Gauß'sche Fehlerfortpflanzung ergibt. Die Abschätzung

APD	M(-23 °C)	$\Delta M(-23 \text{ °C})$
111	92	10
292	149	10

Tabelle 5.3: Abschätzung des Verstärkungsfaktors  $M$  der APDs bei  $-23 \text{ °C}$  mit Hilfe der Ergebnisse aus Tabelle 5.2 und Kapitel 7.

aus Tabelle 5.3 enthält weitere Unsicherheiten. So wurde auch der Vorverstärker auf  $-23 \text{ °C}$  abgekühlt. Dieser enthält den J-FET BF862 von NXP Semiconductos (Quelle: [9]). Im Datenblatt (Quelle: [10]) findet sich jedoch keine Angabe über die Temperaturabhängigkeit des J-FET und ebenso auch nicht im Datenblatt des Vorverstärkers (Quelle [9]). Somit wurde dieser Wert nicht abgeschätzt und geht als nicht quantifizierbare Unsicherheit in den Verstärkungsfaktor mit ein. Die Unsicherheit des Hochspannungsnetzgerätes geht ebenfalls in den Fehler von  $M$  ein.  $M$  gegen  $U_r$  ist eine exponentiell ansteigende Funktion (vgl. Abbildung 5.3). Das Hochspannungsnetzgerät hat einen Ablesefehler von 1 V und schwankte während der Messung um 1 V bis 2 V. Als Fehlerformel für den Energieverlust  $E$  gilt nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{U_{max}\Delta M}{QM^2ALG_c}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_{max}}{QMALG_c}\right)^2} \quad (5.1)$$

da nur für den Wert von  $M$  und  $U_{max}$  Fehler quantitativ bekannt sind.

## 5.2 Integration einer Lichtquelle in den Prototypen

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit sind zwei LEDs über Lichtleiter in den Aufbau integriert worden. Abbildung 5.5 ist ein Bild der Verbindung zwischen LED und Lichtleiter. Abbildung 5.6 ist eine Skizze des Aufbaus. Beim Signalteiler ist zu beachten, dass er die Amplitude des Signals vom Frequenzgenerator halbiert. Wenn an der LED 4 V Eingangsspannung anliegen soll, muss am Frequenzgenerator 8 V eingestellt werden. Das LED-Driver-Bord dient dazu, das Signal mit der nötigen Leistung zu versorgen, um die LEDs betreiben zu können. Über eine Kopplung sind die LEDs jeweils mit einem Lichtleiter verbunden. Dieser Lichtleiter wird in den Zwischenraum zwischen Kristall und Folie

## 5 Der Aufbau eines Prototypen mit acht Kristallen



Abbildung 5.5: Bild der Verbindung zwischen Lichtleiter und LED. Die LED wurde mit Elastosil in die Kopplung geklebt. Der Lichtleiter kann an die Kopplung geschraubt werden.

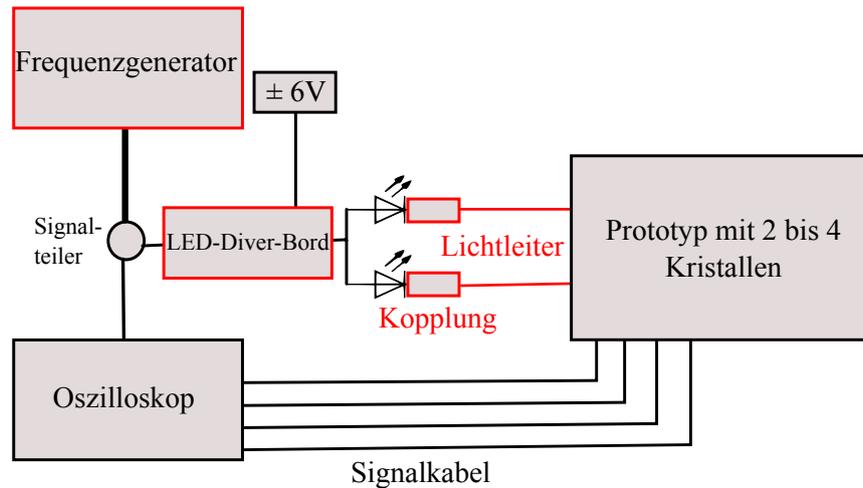


Abbildung 5.6: Skizze des Einbaus der LEDs. Das Signal des Frequenzgenerators wird über einen reflexionsfreien Signalteiler in den Triggereingang des Oszilloskops und das LED-Driver-Bord geleitet. Das LED-Driver-Bord gibt das Signal mit der nötigen Leistung an die LED weiter. Über eine Kopplung wird das Licht in die Lichtleiter eingespeist und zu den Kristallen geführt.

geschoben. Die LEDs sind dazu genutzt worden, um vergleichende Kalibrationsmessungen des Verstärkungsfaktors bei einer Raumtemperatur von  $+26\text{ }^{\circ}\text{C}$  und bei  $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$  zu machen. Ziel dieser Messungen war es, den temperaturabhängigen Verstärkungsfaktor  $M$  der APDs zu bestimmen. Siehe hierzu Kapitel 7.

## 6 Messungen des Rauschverhaltens bei verschiedenen Aufbauten

Es sind verschiedene Verbindungsarten von APD und Vorverstärker getestet worden. Untersucht werden sollte der Einfluss des Aufbaus auf das Rauschverhalten. Für diese Messungen wurde der Proto 8 auf etwa  $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$  gekühlt. Die Temperatur wurde dabei mit 3 Thermosensoren gemessen. Aus dem Mittelwert und der Standardabweichung wurde die Temperatur im Proto 8 bestimmt. Es wurden je zwei APDs mit Hochspannung (HV) versorgt. Die HV betrug bei diesen Messungen  $(330 \pm 1)\text{ V}$ . Die Messwerte wurden mit einem 4 Kanal Oszilloskop (Tektronix DPO 4104) aufgenommen, wobei jeweils nur 2 Kanäle abgespeichert wurden, weil nur 2 APDs gleichzeitig mit HV versorgt werden konnten. Das Oszilloskop hat bei jeder Messung 10000 Datenpunkte mit einen Abstand von 2 ns aufgenommen. Für die Analyse des Rauschverhaltens konnte allerdings nur die erste Hälfte der Daten verwendet werden, da im zweiten Teil das Triggerereignis lag, welches durch ein Myon ausgelöst worden war. Die Datensätze enthielten also bis zum Datenpunkt Nr. 5000 ausschließlich Rauschpegel und ab da ein Myonsignal, welches beim histogrammieren des Rauschpegels die Daten verfälscht hätte. In Abbildung 6.2 sind die Messdaten eines Rauschbandes exemplarisch dargestellt.

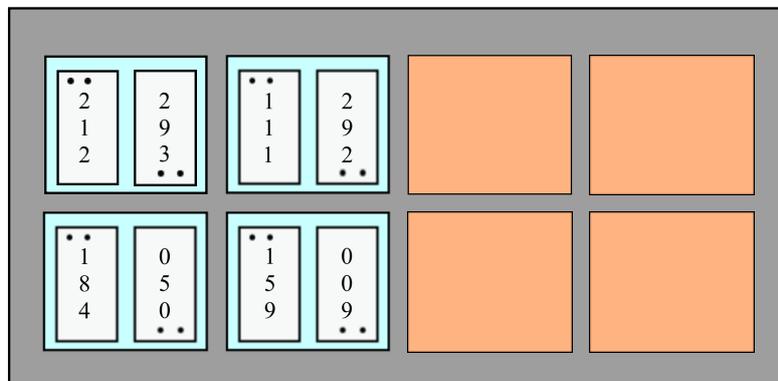


Abbildung 6.1: Die Skizze zeigt den Aufbau für die Messung der Rauschpegels mit Twisted-Pair-Kabel + PCB und ohne PCB. Es waren vier Kristalle im Einsatz und 4 Platzhalter aus Kupfer. Es wurden jeweils zwei übereinander liegende APDs gleichzeitig gemessen, wobei die oberen APDs mit Twisted-Pair-Kabeln angeschlossen waren und die unteren über ein PCB und Twisted-Pair-Kabel. Von den APDs 111 und 159 gibt es keine Daten, da diese zum Zeitpunkt der Datennahme nicht korrekt funktionierten.

## 6 Messungen des Rauschverhaltens bei verschiedenen Aufbauten

Kristall	Vorverstärker	APD	$U_r$ in V
1713	56	212	+330
	49	293	+330
1716	83	111	+330
	39	292	+330
1711	75	184	+330
	79	50	+330
1720	82	159	+330
	62	009	+330

Tabelle 6.1: Setup für die Messungen mit und ohne PCB.

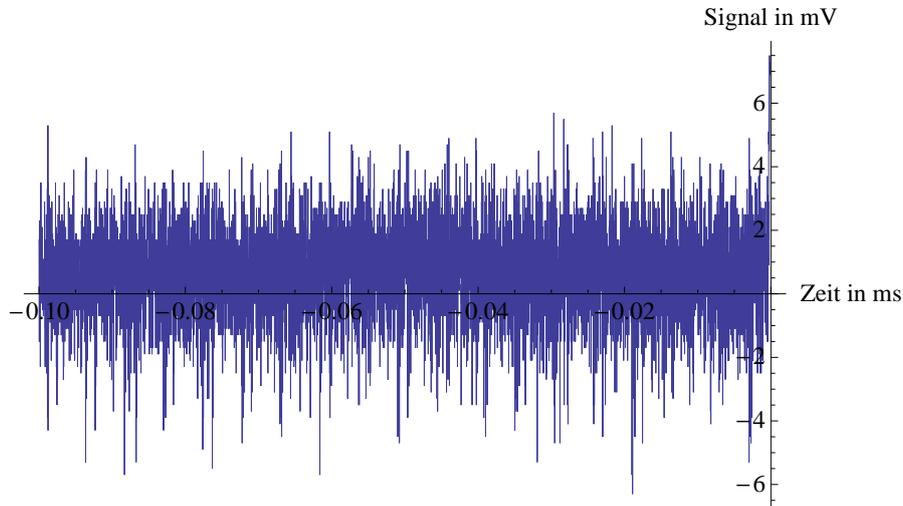


Abbildung 6.2: Die Abbildung zeigt exemplarisch das Rauschband einer APD. Die Zeitachse ist negativ, da bei 0 s das Triggerereignis lag, welches für die Analyse des Rauschverhaltens nicht von Bedeutung ist.

Die Daten des Rauschpegels wurden histogrammiert und normiert. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Normalverteilung (Gleichung 6.1) ist an das Histogramm gefittet worden. Es ist zu beachten, dass das Integral über ein Intervall  $[a,b]$  die Wahrscheinlichkeit, einen Messwert in  $[a,b]$  zu erhalten, ist. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Normalverteilung hat die Form:

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \quad \text{mit} \quad \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (6.1)$$

Der Mathematicacode der zur Auswertung verwendet worden ist, findet sich im Anhang unter: Abschnitt 10.1.

## 6.1 Messung des Rauschpegels mit Twisted-Pair-Kabel

Bei diesem Aufbau waren die APDs über ein Twisted-Pair-Kabel mit den Vorverstärker verbunden. Die Temperatur des Aufbaus betrug  $T = (-24.0 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ . Es sind 5 mal Messdaten für APD 212, 3 mal für APD 293 und 2 mal für APD 292 genommen worden. Für APD 111 gibt es keine Messwerte. Alle Messungen wurden wie oben beschrieben histogrammiert. Ein beispielhaftes Histogramm ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Alle weiteren Histogramme sind im Anhang unter Abbildung 10.2 zu finden. Die Ergebnisse befinden sich in Tabelle 6.2.

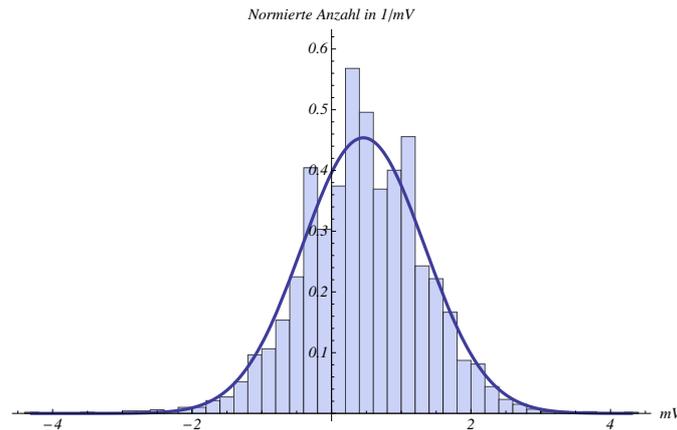


Abbildung 6.3: Histogramm des Rauschpegels der APD 212. Vorverstärker und APD waren über Twisted-Pair-Kabel verbunden. Bei dem Histogramm handelt es sich um ein Histogramm der Wahrscheinlichkeitsdichte. Das Integral über das Intervall  $[a,b]$  gibt die Wahrscheinlichkeit an, einen Messwert in  $[a,b]$  zu erhalten. Die Fitfunktion wird durch Gleichung 6.1 beschrieben.

	APD 212	APD 293	APD 292
$\sigma$ in mV	0.886	2.07	0.815
$\mu$ in mV	0.364	0.284	-0.0475

Tabelle 6.2: Tabelle mit den Parametern der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion. Während der Messung von APD 293 hat es vermutlich eine Einstreuung gegeben. Deshalb ist der Rauschpegel viel größer.

## 6.2 Messung des Rauschpegels mit PCB und Twisted-Pair-Kabel

Weiter ist ein Aufbau getestet worden, bei dem die APD mit einer Aluminiumkapsel auf den Kristall geklebt wurde. Zwischen Aluminiumkapsel und APD befindet sich ein PCB,

## 6 Messungen des Rauschverhaltens bei verschiedenen Aufbauten

der zur Stabilitätssicherung dient und die Pins der APD schützt. Der Vorverstärker ist mit einem Twisted-Pair-Kabel an den PCB angeschlossen worden.

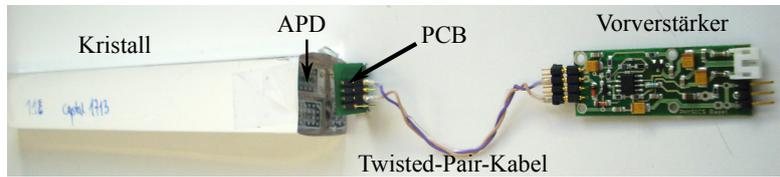


Abbildung 6.4: Verbindung zwischen APD und Vorverstärker mit PCB und Twisted-Pair-Kabel. Untersucht werden soll der Einfluss auf das Rauschen durch den Aufbau. Der PCB war während der Messung von einer Aluminiumkapsel umgeben, die zur besseren Übersicht für das Foto abgenommen worden ist.

Wie bereits zuvor erklärt, sind die Messungen dieses Aufbaus gleichzeitig mit denen aus Abbildung 6.3 gemacht worden. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass alle Parameter nach Möglichkeit gleich waren und somit maximale Vergleichbarkeit zwischen den Messungen besteht. Zum Vergleich wird in Abbildung 6.5 wieder ein Histogramm angegeben, die übrigen Histogramme sind im Anhang in Abbildung 10.3 dargestellt. Die Ergebnisse für  $\sigma$  und  $\mu$  finden sich in Tabelle 6.3

	APD 184	APD 050	APD 009
$\sigma$ in mV	1.60	3.01	1.03
$\mu$ in mV	0.50	0.42	0.41

Tabelle 6.3: Ergebnisse der Messungen mit Aluframe + PCB + Twisted-Pair-Kabel Verbindung zwischen APD und Vorverstärker.

In Tabelle 6.3 sieht man, dass die Messdaten von APD 50 eine deutlich größere Standardabweichung  $\sigma$  haben. Da es sich bei den Daten von APD 50 und APD 293 um verschiedene Kanäle derselben Messung handelt, ist die Ursache hier wahrscheinlich eine Einstreuung.

## 6 Messungen des Rauschverhaltens bei verschiedenen Aufbauten

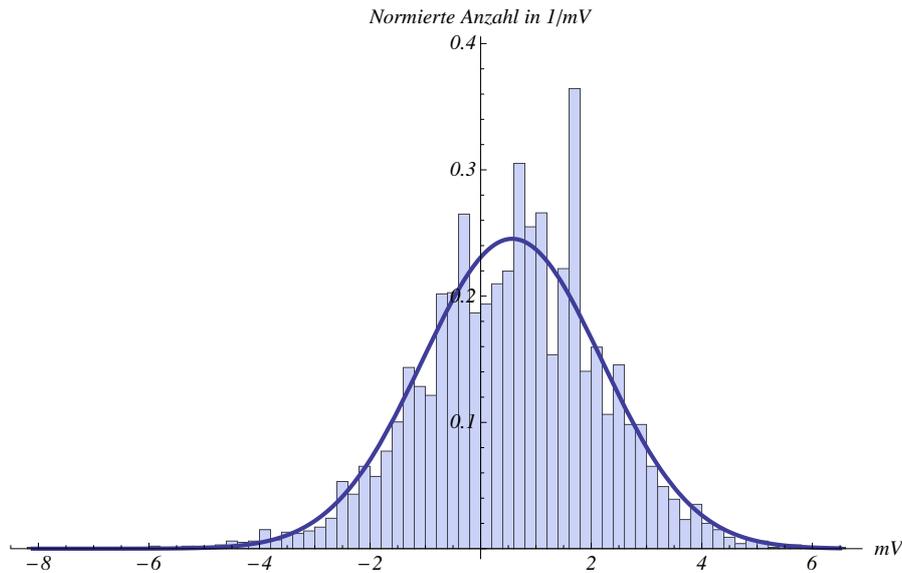


Abbildung 6.5: Histogramm des Rauschpegels. Die Verbindung zwischen APD und Vorverstärker wurde mit PCB + Twistet-Pair-Kabel realisiert. Ausgewertet worden ist wie auch schon in Abbildung 6.3. Diese Messung ist gleichzeitig mit der Messung von Abbildung 6.3 gemacht worden, um eine möglichst große Vergleichbarkeit zu erhalten.

### 6.3 Vergleich der Rauschpegel mit und ohne PCB

In Tabelle 6.4 werden die Ergebnisse aus den Messungen zur besseren Übersicht miteinander verglichen. Die Werte von  $\sigma$ (mit PCB) sind im Mittel etwa 50 % größer als die von  $\sigma$ (ohne PCB). Die Werte von  $\sigma$  für die 2. Messung sind etwa 3 mal größer als der Wert von  $\sigma$  für die anderen Messungen. Der Wert  $\sigma$ (mit PCB)/ $\sigma$ (ohne PCB) ist für die 3. Messung mit 26 % am kleinsten und für die 1. Messung mit 80 % am größten. Die einzelnen Rauschpegel variieren stark. Dies kann man entweder auf die APDs oder auch die Vorverstärker zurückführen. Mit den hier durchgeführten Messungen lässt sich das nicht abschließend klären. Der Unterschied von  $\sigma$ (ohne PCB) zu  $\sigma$ (mit PCB) könnte bei jeweils 3 Messungen Zufall sein. Um dies auszuschließen müssten mehr Messungen gemacht werden, damit man eine bessere Statistik erhält. Um die Vergleichbarkeit weiter zu erhöhen, könnte man die Messung wiederholen, aber nur eine APD und einem Vorverstärker verwenden. So könnte der baubedingte Unterschied der Elektronik, als Rauschquelle ausgeschlossen werden.

## 6 Messungen des Rauschverhaltens bei verschiedenen Aufbauten

		1.Messung	2.Messung	3. Messung
		APD 212	APD 293	APD 292
ohne PCB	$\sigma$ in mV	0.886	2.07	0.815
	$\mu$ in mV	0.364	0.284	-0.0475
		APD 184	APD 050	APD 009
mit PCB	$\sigma$ in mV	1.60	3.01	1.03
	$\mu$ in mV	0.50	0.42	0.41
$\sigma(\text{mit PCB})/\sigma(\text{ohne PCB})$		80 %	46 %	26 %

Tabelle 6.4: Die Ergebnisse zusammengefasst mit relativer Änderung von  $\sigma(\text{mit PCB})$  und  $\sigma(\text{ohne PCB})$ . Der PCB vergrößert den Rauschpegel um etwa 50%. Der hier gemessene Unterschied könnte aber auch auf die APDs und/oder Vorverstärker zurück zu führen sein.

## 6.4 Auswirkung des Hochspannungsnetzgerätes auf das Rauschen

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit ist das Hochspannungsnetzgerät (HV) ISEG EHS 8 210pF an die APDs des Proto 8 angeschlossen worden. Im Folgenden wird sein Einfluss auf das Rauschverhalten des Prototypen untersucht. Dazu wird der Rauschpegel unter Verwendung von ISEG EHS 8 210pF und ISEG NHQ 214M verglichen.

Der Aufbau der Messung war prinzipiell der Gleiche wie auch schon in Abbildung 6.1, allerdings waren nur die beiden oberen Kristalle angeschlossen. In Verwendung waren folgende Teile:

Kristall	Vorverstärker	APD	$U_r$ in V
1713	56	212	+325
	64	293	+325
1716	83	111	+325
	62	292	+325

Tabelle 6.5: Aufbau für die Messung der Rauschpegels mit der ISEG EHS 8 210pF HV.

Es wurden jeweils vier Kanäle der HV angeschlossen. Anschließend wurden zwei mal Messwerte genommen. Auf diese Weise wurden alle Kanäle durchgemessen. Die Temperatur in der Aluminiumhülle betrug während der Messung  $(-21 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Die Daten wurden wie in Kapitel 6 histogrammiert, normiert und eine Dichtefunktion der Normalverteilung gefittet. Abbildung 6.8 zeigt einen solchen Datensatz und Abbildung 6.9 das

## 6 Messungen des Rauschverhaltens bei verschiedenen Aufbauten



Abbildung 6.6: Die HV ISEG EHS 8 210pF . Man sieht die 4×8 Kanäle der HV. Angesteuert wird die HV mithilfe eines Computers.



Abbildung 6.7: Die HV ISEG NHQ 214M . Diese HV verfügt nur über 2 Kanäle und wird über zwei Drehknöpfe gesteuert.

zugehörige Histogramm. Weitere Histogramme sind im Anhang unter Abbildung 10.4. Für alle  $2 \times 32$  Messungen der ISEG EHS 8 210pF HV ist so ein  $\sigma_i$  und  $\mu_i$  bestimmt worden (vgl. Tabelle 10.1), wobei der Index deutlich machen soll, um die wievielte Messung es sich handelt. Von diesen  $2 \times 32$   $\sigma_i$  und  $\mu_i$  Werten wurde der Mittelwert  $\bar{\sigma}$  und  $\bar{\mu}$  bestimmt.

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad \bar{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mu_i \quad (6.2)$$

Dies ist in Gleichung 6.3 angegeben. Da es sich bei  $\bar{\sigma}$  und  $\bar{\mu}$  um Mittelwerte handelt, kann man für diese eine Standardabweichung angeben. In Gleichung 6.3 ist das der Fehler auf die Werte von  $\bar{\sigma}$  und  $\bar{\mu}$ .

$$\bar{\sigma} = (5.3 \pm 1.8) \text{ mV} \quad \bar{\mu} = (0.8 \pm 0.2) \text{ mV} \quad (6.3)$$

Gegenüber den Ergebnissen für  $\sigma$  aus Abschnitt 6.1, hat sich der Wert von  $\bar{\sigma}$  um den Faktor Sieben vergrößert. Unter Verwendung des Hochspannungsnetzgerätes ISEG EHS 8 210pF steigt der Rauschpegel gegenüber dem ISEG NHQ 214M deutlich an. Dieser Rauschpegel ist für weitere Tests nicht geeignet. Trotzdem muss ein Ersatz für ISEG NHQ 214M gefunden werden, da es nur zwei Kanäle besitzt, und in einem nächsten Schritt, Messungen mit bis zu 32 APDs gleichzeitig gemacht werden sollen.

6 Messungen des Rauschverhaltens bei verschiedenen Aufbauten

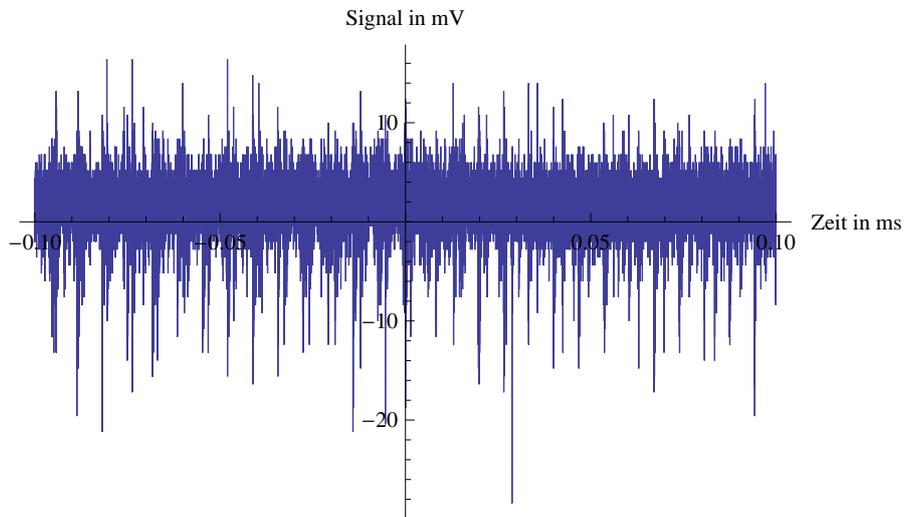


Abbildung 6.8: Messdaten unter Verwendung der ISEG EHS 8 210pF HV.

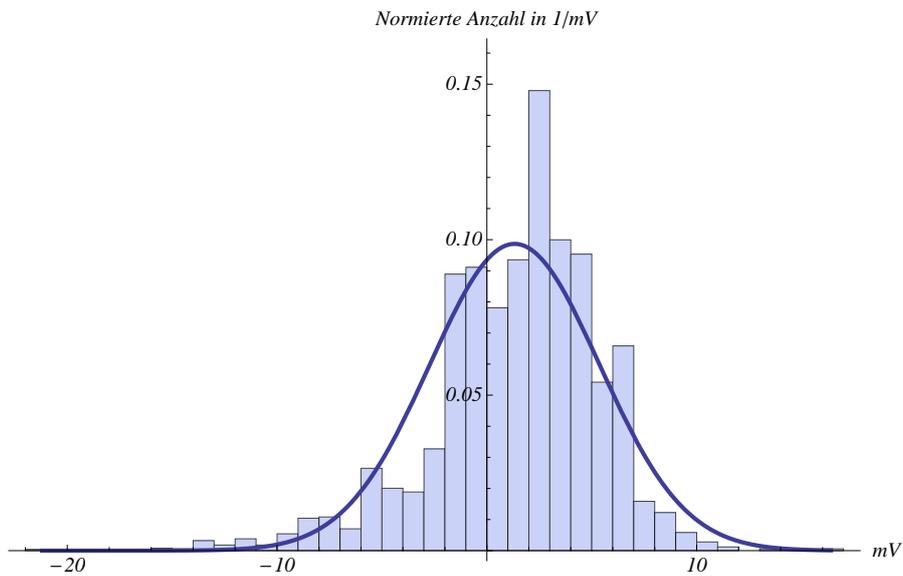


Abbildung 6.9: Histogrammierte Daten der Messung mit APD 293 von Kanal CH405 der ISEG NHQ 214M HV. Für die Fitfunktion gilt:  $\sigma_i = 4.1 \text{ mV}$  und  $\mu_i = 1.3 \text{ mV}$

# 7 Bestimmung des temperaturabhängigen Verstärkungsfaktors der Avalanche Photodioden

Um die Energie von Myonen bestimmen zu können, ist es von größter Wichtigkeit, den Verstärkungsfaktor  $M$  der verwendeten APDs bei der angelegten Sperrspannung  $U_r$  und bestehender Temperatur zu kennen. Diese Kenngrößen sind jedoch nur bis  $7.8\text{ }^\circ\text{C}$  bekannt und so war es nötig, die relative Änderung der Verstärkung  $G$  durch Abkühlung von Raumtemperatur auf  $-23\text{ }^\circ\text{C}$  zu bestimmen, um auf den absoluten Verstärkungsfaktor  $M$  rückschließen zu können. Deshalb wurde eine Vergleichsmessung durchgeführt. Zuerst wurde das Signal einer LED bei einer Raumtemperatur von  $(+26 \pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$  gemessen. Danach wurde der Aufbau auf  $(-23 \pm 1)\text{ }^\circ\text{C}$  gekühlt und die Messung wiederholt. Aus dem Verhältnis der beiden Signalhöhen wurde der relative Verstärkungsfaktor  $G$  durch Abkühlung bestimmen.

## 7.1 Aufbau für die Bestimmung des relativen Verstärkungsfaktors.

Der Aufbau für die Bestimmung des relative Verstärkungsfaktors  $G$  enthielt die gleichen Kristalle, Vorverstärker und APDs wie schon Abschnitt 6.4.

Kristall	Vorverstärker	APD	$U_r$ in V
1713	56	212	+325
	64	293	+325
1716	83	111	+325
	62	292	+325

Tabelle 7.1: Konfiguration für die Bestimmung des relativen Verstärkungsfaktors. Jeder Kristall wurde mit einem eigenen Lichtleiter und einer eigenen LED angesteuert.

Alle APDs waren über Twisted-Pair-Kabel mit den Vorverstärkern verbunden. Der Aufbau der LEDs und Lichtleiter ist in Abschnitt 5.2 beschrieben. Die LED Pulssequenz bestand aus einem  $-8\text{ V}$  großen,  $350\text{ ns}$  langem Rechteckpuls, der sich alle  $160\text{ }\mu\text{s}$  wieder-

## 7 Bestimmung des temperaturabhängigen Verstärkungsfaktors der Avalanche Photodioden

holte. Bei der Wahl der Sperrspannung  $U_r$  war zu beachten, dass man bei einer Raumtemperatur von  $+26\text{ }^\circ\text{C}$  (kleiner Verstärkungsfaktor) noch ein ausreichend großes Signal der LED erhielt, gleichzeitig aber nicht die APDs gefährdete, wenn man dieselbe Sperrspannung  $U_r$  bei  $-23\text{ }^\circ\text{C}$  (größerer Verstärkungsfaktor) anlegte. Durch Ausprobieren wurde eine Sperrspannung  $U_r$  von  $+325\text{ V}$  als geeignet ausgewählt.

### 7.2 Signale einer LED bei einer $+26\text{ }^\circ\text{C}$ und $-23\text{ }^\circ\text{C}$

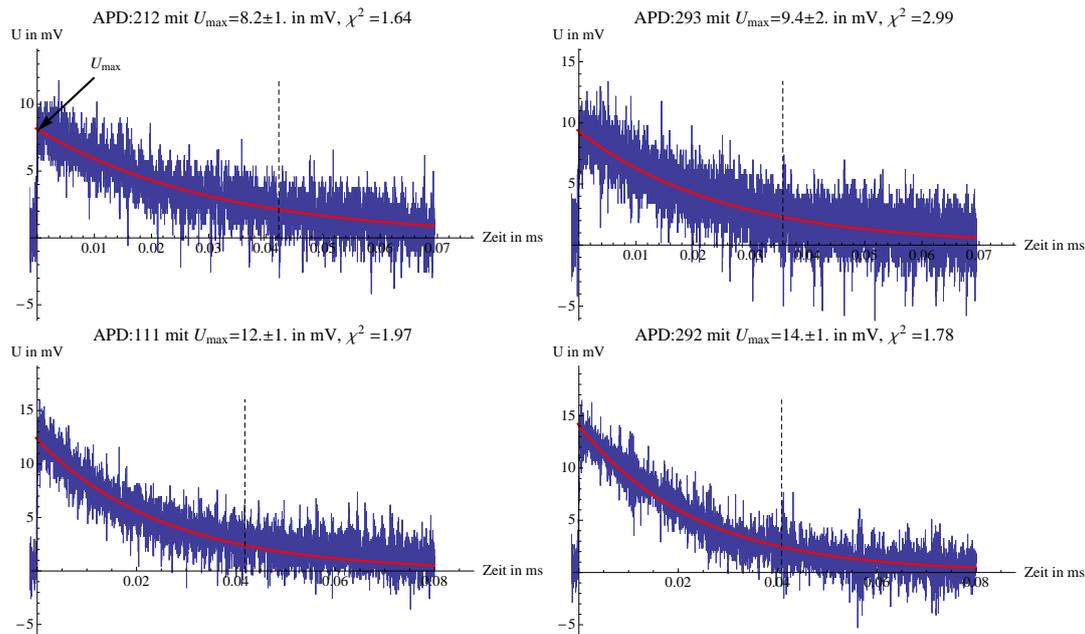


Abbildung 7.1: Signal einer LED bei  $T=+26\text{ }^\circ\text{C}$ . Die rote Linie gibt den Fit an die Daten an. Die gestrichelte graue Gerade gibt an, bis wohin die Daten für den Fit verwendet worden sind. Der Fit beginnt 20 Datenpunkte hinter der  $U(t)$ -Achse. Die Ergebnisse für den Wert von  $U_{max}$  variieren um fast 60 %. APD 212 und 293 teilen sich einen Kristall, einen Lichtleiter und eine LED. Bei APD 111 und 292 ist es ebenso. Bei der Fitfunktion handelt es sich um eine Funktion der Form  $U_0 \cdot e^{-ct}$ . Die Fits wurden mit Mathematica und der Funktion `NonlinearModelFit` erstellt. Siehe hierzu im Anhang Abschnitt 10.2

## 7 Bestimmung des temperaturabhängigen Verstärkungsfaktors der Avalanche Photodioden

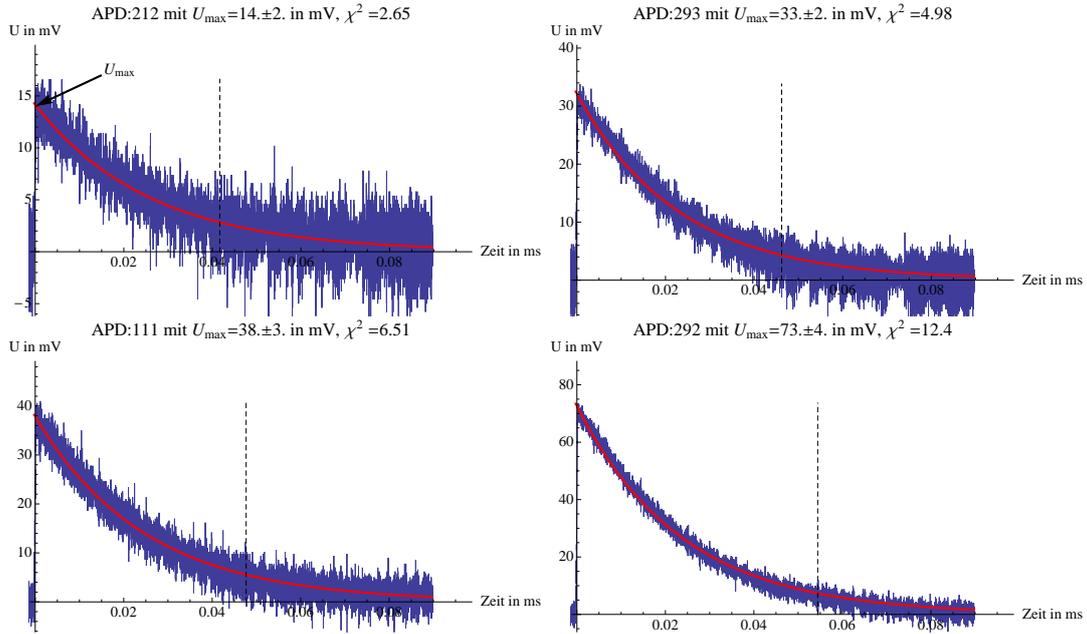


Abbildung 7.2: Signal der LED bei  $T = -23\text{ °C}$ . Die Daten sind Analog zu Abbildung 7.1 ausgewertet worden. Die Signalhöhe  $U_{max}$  hat sich bei allen APDs gegenüber Raumtemperatur erhöht. APD 292 zeigt den größten Zuwachs. APD 212 den geringsten.

Kristall	Vorverstärker	APD	T in °C	$U_{max}$ in mV	G
1713	56	212	+26	$8 \pm 1$	$1.7 \pm 0.3$
			-23	$14 \pm 2$	
	64	293	+26	$9 \pm 2$	$3.5 \pm 0.8$
			-23	$32 \pm 2$	
1716	83	111	+26	$12 \pm 1$	$3.1 \pm 0.4$
			-23	$38 \pm 3$	
	62	292	+26	$14 \pm 1$	$5.2 \pm 0.5$
			-23	$74 \pm 4$	

Tabelle 7.2: Zusammenfassung der Ergebnisse für die Bestimmung des relativen Verstärkungsfaktors  $G$  bei einer Sperrspannung von +325 V.

Zur Bestimmung des Wertes von  $U_{max}$  aus den Daten ist eine Exponentialfunktion der Form  $U(t) = U_0 \cdot e^{-ct}$  verwendet worden. Der Wert von  $U_{max}$  ergab sich aus  $U(0)$ , so dass  $U_{max} = U(0) = U_0$  ist. In Kapitel 8 gilt dieser Zusammenhang im allgemeinen nicht mehr, weshalb hier bereits die Unterscheidung eingeführt wird. In Abbildung 7.2 und Abbildung 7.1 wird  $U_{max}$  deutlich gemacht durch den schwarzen Pfeil. Die Unsicherheit von  $U_{max}$  wurde bestimmt aus der Standardabweichung der Residuen zwischen

## 7 Bestimmung des temperaturabhängigen Verstärkungsfaktors der Avalanche Photodioden

Fitfunktion und Daten. Der relative Verstärkungsfaktor  $G$  konnte mit Hilfe von  $U_{max}^w$  und  $U_{max}^k$  bestimmt werden.  $U_{max}^w$  bezeichnet  $U_{max}$  bei  $+26\text{ °C}$  und  $U_{max}^k$  steht für  $U_{max}$  bei  $-23\text{ °C}$ .

$$G = \frac{U_{max}^k}{U_{max}^w}$$

Mit dem Fehler  $\Delta G$  durch Gauß'sche Fehlerfortpflanzung

$$\Delta G = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_{max}^k}{U_{max}^w}\right)^2 + \left(\frac{U_{max}^k \cdot \Delta U_{max}^w}{(U_{max}^w)^2}\right)^2}$$

Tabelle 7.2 entnimmt man, dass der Wert von  $G$  zwischen 1.7 und 5.2 variiert. APD 293 und 111 haben ähnliche Werte für  $G$  von etwa 3.5 und 3.1. Am größten ist der Wert des relativen Verstärkungsfaktors  $G$  für APD 292. Er ist etwa 65 % größer als der  $G$  Wert von APD 293 oder APD 111 und etwa 3 mal größer als der von APD 212.

Abschließend bleibt zu sagen, dass die  $U_{max}$  Werte und somit auch die Werte des relativen Verstärkungsfaktors  $G$  von APD zu APD sehr stark variieren, obwohl versucht wurde, möglichst alle Parameter gleich zu halten um eine vergleichbare Messung zu erstellen. Es ist zweifelhaft ob der Unterschied von APD 212 und APD 292 noch baubedingt ist. Bei der Bestimmung von  $G$  ist die Änderung der Signalhöhe durch den Vorverstärker vernachlässigt worden. Dieser geht als eine nicht quantifizierbare Unsicherheit in den Wert von  $G$  mit ein. Qualitativ lässt sich aber sagen, dass dies ein systematischer Fehler ist, den Wert von  $G$  größer erscheinen lässt als er ist.

# 8 Verteilung der Myonensignale beim Betrieb von 2 APDs und einem Szintillationskristall

In diesem Kapitel werden 200 Signale von Myonen analysiert. Hierbei handelt es sich um Teilchen aus der Höhenstrahlung, die von Myonen dominiert wird. Der Einfachheit halber wird im folgenden nur noch von Myonen gesprochen. Ziel war es, zu Testzwecken Statistik zu sammeln, um diese dann mit den Erwartungen vergleichen zu können.

## 8.1 Aufbau für die Messung von 200 Myonensignalen

Der Aufbau war der gleiche wie in Abbildung 6.1. Es wurden die Bauteile aus Tabelle 8.1 verwendet.

Kristall	Vorverstärker	APD	$U_r$ in V
1716	83	111	325
	62	292	325

Tabelle 8.1: Bestückung für die Messung von 200 Myonensignalen.

Wegen des geringeren Rauschpegels ist das Hochspannungsnetzgerät ISEG NHQ 214M verwendet worden. Zum Zeitpunkt der Datennahme hatten APD 111 und APD 292 augenscheinlich das beste Signal/Rausch Verhältnis. Daher wurden diese für die Messung verwendet. Die Temperatur betrug während der Messung  $(-20 \pm 2)^\circ\text{C}$  und nicht wie im vorherigen Kapitel 7  $(-23 \pm 1)^\circ\text{C}$ , da die Außentemperatur höher war. Als Trigger wurde auf dem Kanal der APD 111 eine Triggerschwelle von 17 mV eingestellt. Das entspricht nach Gleichung 4.3 mit  $M = 73$  einer Triggerschwelle von etwa 40 MeV. Eine derart hohe Triggerschwelle war nötig, da es sonst sehr oft zu Ereignissen kam, die keine Myonensignatur aufwiesen. Zur Aufnahme der Ereignisse wurde am Oszilloskop „Single-Puls-Methode“ eingestellt. Anschließend musste einige Sekunden auf ein Ereignis gewartet werden. Die Daten wurde abgespeichert und der „Single-Puls-Modus“ wieder aktiviert. So wurden alle Ereignisse von Hand abgespeichert und zurückgesetzt.

## 8.2 Signale von Myonen aus der Höhenstrahlung

In Abbildung 8.1 und Abbildung 8.2, sind die Daten eines Ereignisses, welches durch ein Myon ausgelöst worden ist, dargestellt. In Abbildung 8.3 und Abbildung 8.4 sind

## 8 Verteilung der Myonensignale beim Betrieb von 2 APDs und einem Szintillationskristall

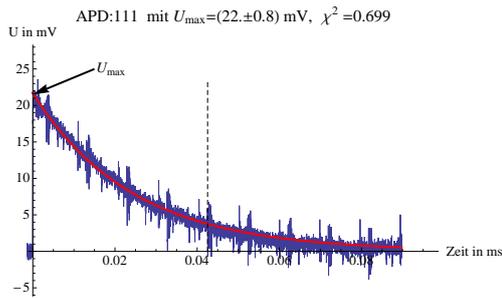


Abbildung 8.1: Signal eines Myonereignisses in APD 111.

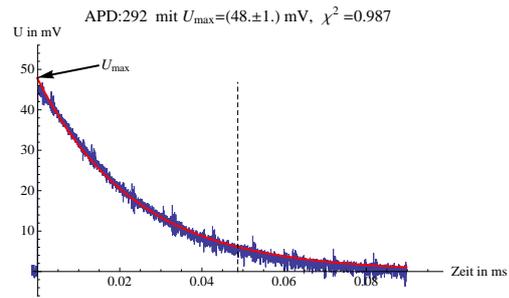


Abbildung 8.2: Signal des selben Myonereignisses wie in Abbildung 8.1 detektiert mit APD 292.

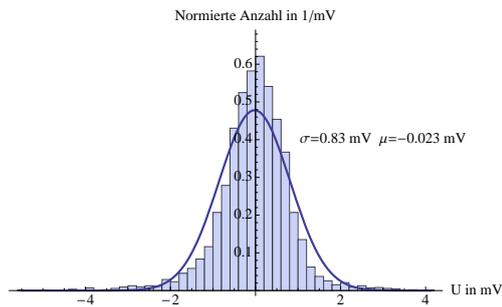


Abbildung 8.3: Histogramm der Residuen zwischen Fit und Daten für die Daten aus Abbildung 8.1.

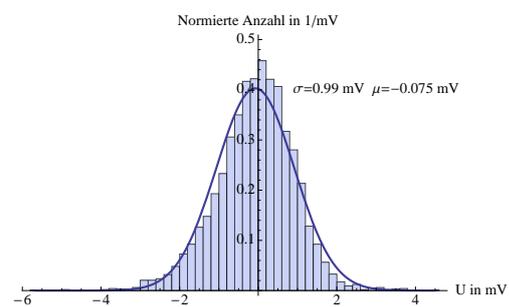


Abbildung 8.4: Histogramm der Residuen zwischen Fit und Daten für die Daten aus Abbildung 8.2.

## 8 Verteilung der Myonensignale beim Betrieb von 2 APDs und einem Szintillationskristall

die Residuen zwischen Fit und Daten Histogrammiert worden. Als Fit für die Daten der Signale ist eine Funktion der Form  $U(t) = U_0 \cdot e^{-ct}$  verwendet worden. Es gibt Datensätze bei denen  $U_{max} \neq U_0$  ist (siehe Abbildung 8.7). Aus diesem Grund wurde ein sog. Laplace-Filter programmiert, welcher in einem Datensatz Kanten findet.

```
yk =  
  Table[  
    Sum[y[[i + k]] - y[[i]]  
      , {k, 1, j}]  
    ],  
  {i, 1, Length[y] - (j)}  
  ];
```

Der mit Mathematica geschriebene Laplace-Filter.

y bezeichnet eine Liste aus Spannungswerten. Der Laufindex i gibt den Wert von y an der i'ten Stelle aus. j bestimmt die Empfindlichkeit des Filters. Je größer j ist, desto mehr Elemente werden summiert. Damit ist der Filter weniger anfällig für zufällige Sprünge in den Daten, benötigt aber auch mehr Rechenzeit. Für die Auswertung der Daten ist ein j von 32 verwendet worden. Mit diesem j konnten alle Kanten gefunden werden. Die Wirkungsweise des Filters wird deutlich gemacht in Abbildung 8.5 und Abbildung 8.6. In Abbildung 8.7 ist der Unterschied zwischen  $U_{max}$  und  $U_0$  graphisch dargestellt. Der Fehler  $\Delta U_{max}$  von  $U_{max}$  kommt aus der Standardabweichung der Residuen zwischen Fitfunktion und Daten (vgl. Abbildung 8.3 und Abbildung 8.4).

8 Verteilung der Myonensignale beim Betrieb von 2 APDs und einem Szintillationskristall

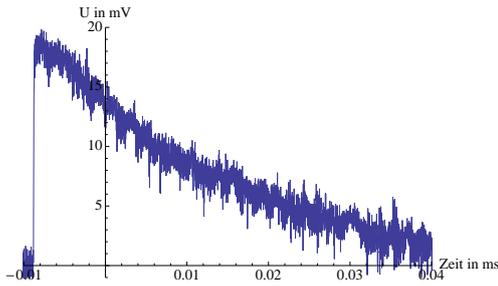


Abbildung 8.5: Datensatz vor der Anwendung des Laplace-Filters.

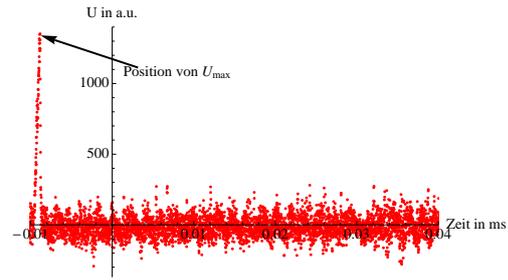


Abbildung 8.6: Der Datensatz aus Abbildung 8.5 nach der Anwendung des Laplace-Filters.

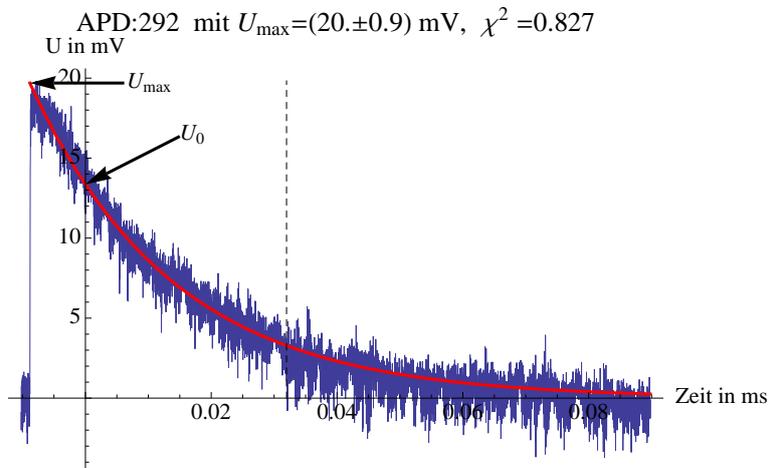


Abbildung 8.7: Datensatz nach der Auswertung durch das Mathematicascript. Die Kante wird automatisch gesucht und ein Fit erstellt.  $U_{\max}$  ist der Wert des Fits am Punkt des größten mittleren Anstiegs des Datensatzes. Durch die Pfeile soll noch einmal der Unterschied von  $U_0$  und  $U_{\max}$  deutlich gemacht werden.

## 8 Verteilung der Myonensignale beim Betrieb von 2 APDs und einem Szintillationskristall

Aus dem Wert von  $U_{max}$  ist mithilfe von Gleichung 4.3 die im Kristall deponierte Energie  $E$  bestimmt worden, wobei für APD 111 der Wert des Verstärkungsfaktor  $M = 92$  und für APD 292  $M = 149$  eingesetzt worden ist. Der Fehler auf die Energie  $\Delta E$  ergibt sich aus Gleichung 5.1. Die Unsicherheit auf den Wert des Verstärkungsfaktors  $\Delta M$  ist jeweils  $\pm 10$ .

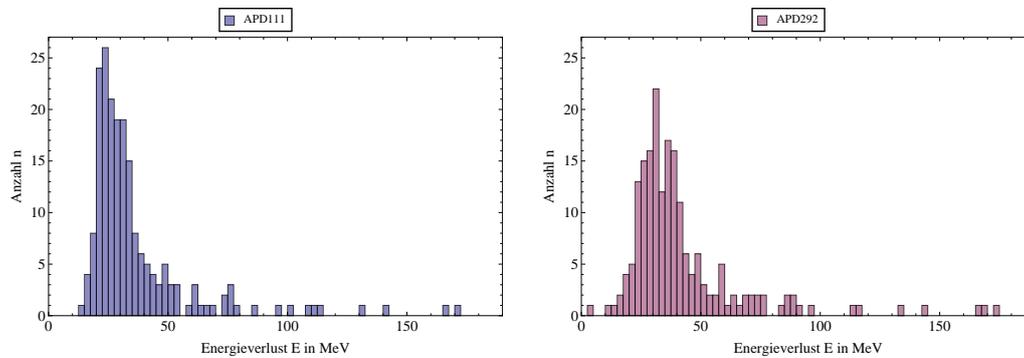


Abbildung 8.8: Histogramme der Verteilung des Energieverlustes  $E$  der Myonen aus der Höhenstrahlung. Links (blau) die Verteilung gemessen mit APD 111 und rechts (rosa) die Verteilung gemessen mit APD 292.

In Abbildung 8.8 ist die Energieverteilung jeweils für eine APD histogrammiert worden. Links sind die Daten, von APD 111 (blau) und rechts die Daten von APD 292 (rosa), dargestellt. Die Verteilung in den Daten von APD 111 scheint dabei etwas schmaler zu sein als die von APD 292. Das Maximum der Verteilung liegt aber für beide Histogramme bei etwa 20 MeV bis 30 MeV.



## 8 Verteilung der Myonensignale beim Betrieb von 2 APDs und einem Szintillationskristall

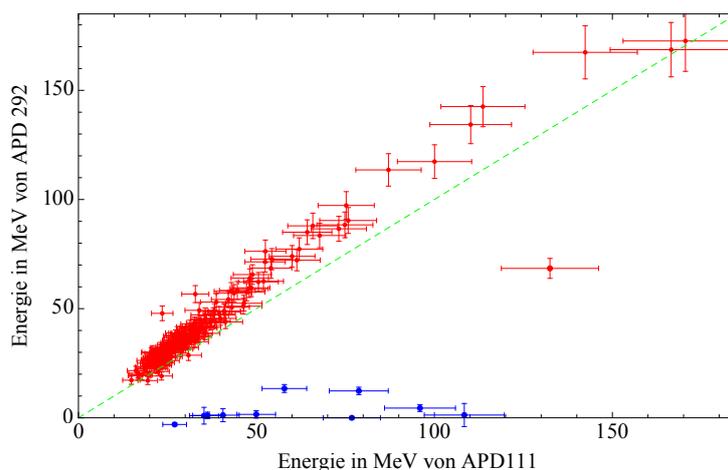


Abbildung 8.10: Energieverlust  $E$  der Myonen in Abhängigkeit der einzelnen APDs. Die grüne Gerade entspricht einer Ursprungsgerade. Rot sind Punkte die von beiden APDs detektiert worden sind. Blau sind Punkte die ein Signal in APD 111 hinterließen, nicht aber in APD 292. Die Signalhöhe in APD 292 kommt aus einem fehlgeschlagenen Fit.

In Abbildung 8.10 ist die Korrelation zwischen den Signalen der APDs aufgetragen. Zum Vergleich ist deshalb eine grüne Ursprungsgerade eingetragen worden. Die Fehler wurden mit Gleichung 5.1 errechnet. Fast alle Messpunkte liegen oberhalb der Ursprungsgerade. Grund hierfür könnte der nicht sehr genau bestimmte Verstärkungsfaktor  $M$  bei  $-23\text{ }^\circ\text{C}$  sein. Bei größeren Energien scheinen die Messpunkte wieder in Richtung der Gerade zu kippen. Die Statistik ist hier jedoch mit wenigen Messpunkten nicht sehr gut. Es könnte aber ein Hinweis auf eine Nichtlinearität der APDs sein.

Beim automatischen Fitten an die  $2 \times 200$  Datensätze gab es einige Probleme, die im Folgenden beschrieben werden. Betrachtet man noch einmal Abbildung 8.7, so kann man sehen, dass der Fit den Wert von  $U_{max}$  leicht überschätzt. Die Form des Signals ist in der Nähe des Maximums  $U_{max}$  gegenüber der Exponentialfunktion leicht abgeflacht. Das heißt, der Wert von  $U_{max}$  wurde von dem Fit immer leicht überschätzt. Bei kleinen  $U_{max}$  spielte dies noch keine Rolle (vgl. Abbildung 8.11). Bei steigender Signalhöhe wird der Einfluss aber größer.

Der Trigger des Oszilloskop war auf 17 mV im Kanal der APD 111 eingestellt. Trotzdem gibt es von APD 111 Datensätze mit Myonensignatur, die keinen Datenpunkt enthalten, der über 17 mV liegt. Siehe hierzu Abbildung 8.11. Warum die Daten trotzdem aufgenommen werden konnten, ist nicht klar. Es lässt sich aber vermuten, dass das Oszilloskop beim sampeln der Daten den eigentlichen Triggerpunkt verworfen hat, oder das Oszilloskop interne Filter verwendet, die solche Effekte zur Folge haben. Eine einfache Erklärung wäre, dass das Oszilloskop eine andere Triggerschwelle hat, als auf dem Display angegeben wird.

In Abbildung 8.11 kann man sehen, warum Ereignisse leicht unterhalb der „wahren“

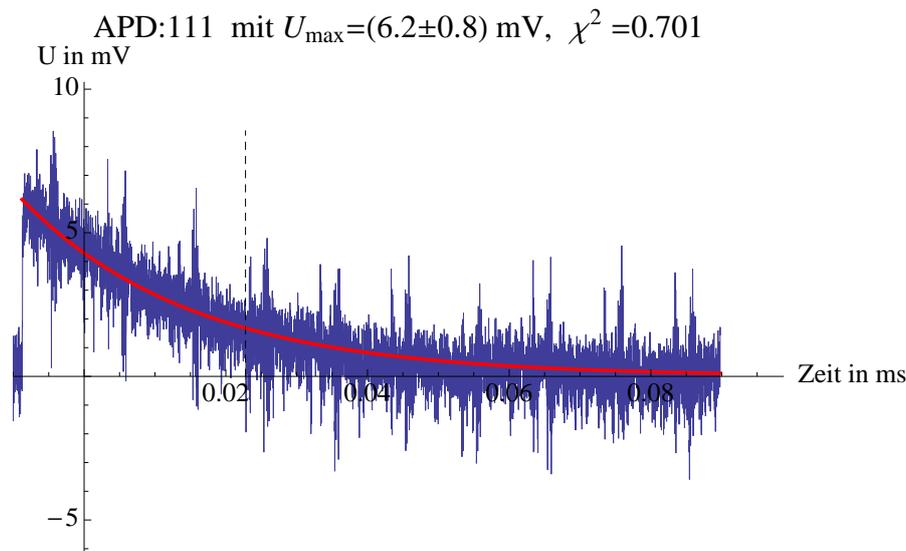


Abbildung 8.11: Das mit APD 111 detektierte Ereignis mit der geringsten Energie. Der größte Spannungswert  $U$  in dem Datensatz liegt bei 8.55 mV und somit etwa 9 mV unter der am Oszilloskop eingestellten Triggerschwelle

Triggerschwelle detektiert werden können. Erzeugt ein Myon einen Impuls, dessen Signal knapp unter der Triggerschwelle liegt, so kann das Rauschen dazu führen, dass der Trigger trotzdem feuert und der Puls detektiert wird. Der Verstärkungsfaktor  $M$  von APD 292 ist fast 2 mal größer als der von APD 111. Daher kam es vor, dass Messwerte vom Oszilloskop abgeschnitten worden sind (siehe dazu Abbildung 8.12). Solche Messwerte sind im Histogramm nicht berücksichtigt worden. Bei APD 111 trat dieser Fall zwei mal ein, bei APD 292 sechs mal.

In Abbildung 8.13 sieht man, dass nur in dem Kanal von APD 111 ein Signal detektiert wurde. Die Messwerte von APD 292 zeigen hingegen ein Rauschband. Diese Messungen sind der Grund für die in Abbildung 8.10 blau gezeichneten Punkte. Der Versuch eine Exponentialfunktion an diese Daten zu fitten schlägt fehl und somit wird ein zufälliger Wert für die Energie berechnet. Sieben weitere Datensätze von APD 292 sind deshalb nicht in das Histogramm in Abbildung 8.9 eingegangen. Alles in Allem sind von APD 111 198 und von von APD 292 187 Myonensignale in das Histogramm eingegangen.

Abschließend bleibt zu sagen, dass die Erwartungen weitestgehend erfüllt worden sind. Mit dem halb bestückten Aufbau des Proto 8 ließen sich 200 Myonen messen und deren Energie bestimmen. Das erhaltene Histogramm (Abbildung 8.9) hat die erwartete Form mit einem Maximum im Bereich von 20 MeV bis 30 MeV. Die Ergebnisse der einzelnen APDs korrelieren (siehe Abbildung 8.10). Das Rauschen des Aufbaus ist nach wie vor ein Problem und wird in Zukunft gesenkt werden müssen. Die größte Unsicherheit stellt der Verstärkungsfaktor  $M$  dar. Für die in dieser Bachelorarbeit durchgeführten Analysen konnte er mit hinreichender Genauigkeit abgeschätzt werden. In Zukunft wird es aber nötig sein den Verstärkungsfaktor  $M$  genauer zu kennen. In einem weiteren Schritt wird

## 8 Verteilung der Myonensignale beim Betrieb von 2 APDs und einem Szintillationskristall

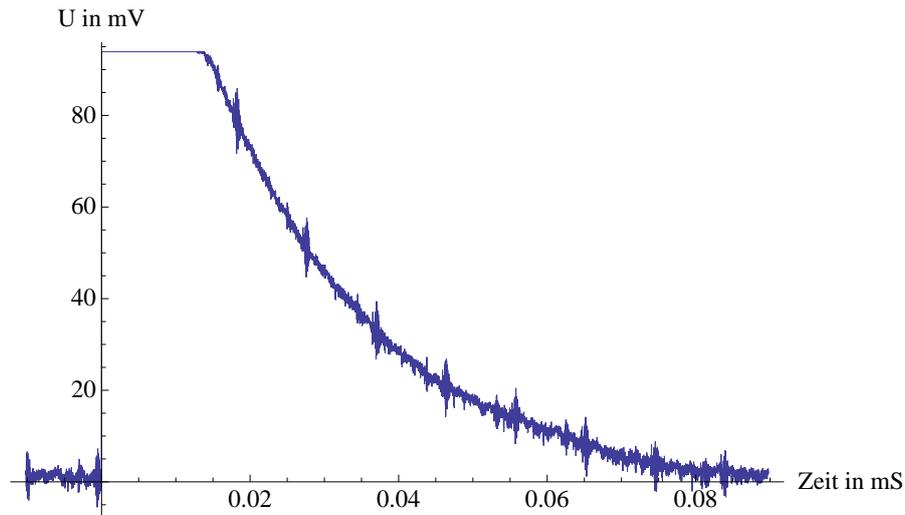


Abbildung 8.12: Das Myon hat ein Signal hinterlassen, das vom Oszilloskop abgeschnitten worden ist. Da die Spitze fehlt, wurden solche Daten nicht für das Histogramm verwendet.

an stelle des Oszilloskops ein Flash ADC verwendet werden. Daher ist das Problem mit der Triggerschwelle für den Proto 16 nicht weiter relevant.

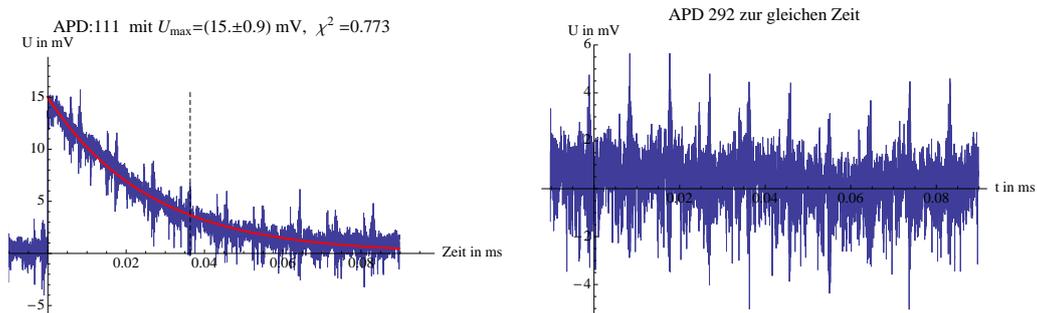


Abbildung 8.13: Links in dem Kanal von APD 111 ist ein Ereignis detektiert worden. Rechts in dem Kanal von APD 292 nicht.

## 9 Fazit und Ausblick

Ziel der Bachelorarbeit war der Aufbau und ein erster Test des Proto 8. Dieses konnte erreicht werden. Es sind etwa 200 Myonen aus der Höhenstrahlung unter Verwendung eines Kristalls und zweier APDs detektiert worden. Die von diesen Myonen im Kristall deponierte Energie, konnte, mit einer für einen ersten Test zufriedenstellenden Genauigkeit, bestimmt werden. Ergebnis war, dass die meisten Myonen beim Durchqueren etwa 20 bis 30 MeV Energie im Kristall deponieren. Die Höhe des Kristalls beträgt 2.44 cm und  $|\langle dE/dx \rangle|$  für MIPs in PWO-II ist ungefähr 10.2 MeV. Somit ist 20 MeV bis 30 MeV ein Ergebnis, dass sich mit den Erwartungen deckt. Die Integration zweier LEDs und Lichtleiter in den Aufbau war nötig, da der Wert des Verstärkungsfaktor  $M$  der APDs bei  $-23^\circ\text{C}$  nicht bekannt war. Der so abgeschätzte Wert für  $M$  ist jedoch nicht sehr genau und sollte in Zukunft genauer bestimmt werden. Das ISEG EHS 8 210pF Hochspannungsnetzgerät stellte sich als nicht sehr gut heraus. Gegenüber dem ISEG NHQ 214M vergrößerte es den Rauschpegel um einen Faktor von fast 7. Für den Aufbau des Proto 16 muss das ISEG EHS 8 210pF entweder verbessert oder ausgetauscht werden. Die Verwendung des PCBs führte dazu, dass der Rauschpegel sich um etwa 50 % vergrößerte. In Zukunft könnte man einen Test machen, bei dem die Vorverstärker ohne Twisted-Pair-Kabel direkt auf die Pins des PCB gesteckt werden. Dieser Aufbau scheint mechanisch stabil zu sein und könnte ähnliche Ergebnisse liefern wie die Verbindung nur mit Twisted-Pair-Kabel. Während dieser Bachelorarbeit wurden Temperaturen von  $-20^\circ\text{C}$  bis  $-23^\circ\text{C}$  im Innern des Proto 8 erreicht. Die Temperatur war dabei abhängig von der Außentemperatur. In einem nächsten Schritt müssen Kühlung und Isolation verbessert werden, damit zuverlässig auf  $-25^\circ\text{C}$  gekühlt werden kann. Möchte man den Proto 8 mit 8 vollständig bestückten Kristallen ausrüsten, so sollte eine praktikable Lösung für die Vielzahl an Kabeln gefunden werden. Jeder Vorverstärker wird von drei Kabeln versorgt. Diese Kabel halten schlecht und lösen sich leicht vom Vorverstärker. Möchte man den Proto 8 zuverlässig ausrüsten können, sollten die Vorverstärker über Steckerbuchsen verfügen, damit die Kabel besser halten.

Abschließend bleibt zu sagen, dass im Rahmen dieser Bachelorarbeit erste Testmessungen mit dem Proto 8 durchgeführt werden konnten und plausible Ergebnisse erzielt worden sind. Die hier erhaltenen Ergebnisse können in Zukunft als Referenz für Verbesserungen des Proto 8 und Proto 16 verwendet werden.



# Literaturverzeichnis

- [1] K.Nakamura, et al. Particle Physics Booklet, Juli 2010
- [2] Technical Design Report for: PANDA Electromagnetic Calorimeter (EMC), Oktober 2008, [http://www-panda.gsi.de/framework/det\\_iframe.php?section=Calorimetry](http://www-panda.gsi.de/framework/det_iframe.php?section=Calorimetry)
- [3] Dr. Andrea Wilms, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung Darmstadt, persönlicher Kontakt
- [4] Christina Haberkorn, Bachelorarbeit, Vorarbeiten zum Aufbau eines Prototypen für die Rückwärtsendkappe des elektromagnetischen Kalorimeters des PANDA-Experiments, 2012
- [5] [http://www-panda.gsi.de/framework/det\\_iframe.php?section=Calorimetry](http://www-panda.gsi.de/framework/det_iframe.php?section=Calorimetry)
- [6] [http://www-panda.gsi.de/framework/det\\_iframe.php?section=Full%20View](http://www-panda.gsi.de/framework/det_iframe.php?section=Full%20View)
- [7] Characteristics and use of SI APD [http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/Characteristics\\_and\\_use\\_of\\_SI\\_APD.pdf](http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/Characteristics_and_use_of_SI_APD.pdf)
- [8] [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:APD3\\_German.png&filetimestamp=20111220071803](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:APD3_German.png&filetimestamp=20111220071803)
- [9] Physics Basel, Discrete Preamplifier for APD Readout, März 2008 <http://ebookbrowse.com/datasheet-vpt-preamp-sp883a01-pdf-d267001626>
- [10] Datenblatt des BF862 J-FET von NXP Semiconductors, <http://www.nxp.com/products/automotive/rf/mosfets/BF862.html>
- [11] Bogdan Povh, Teilchen und Kerne, Eine Einführung in die physikalischen Konzepte, 7. Auflage 2006, Springer-Verlag
- [12] MariaCarmen, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung Darmstadt, persönlicher Kontakt

# 10 Anhang

## 10.1 Mathematica Code zur Auswertung von Rauschsignalen.

```
Needs["Splines"]
Needs["ErrorBarPlots"]
Needs["PlotLegends"]
SetOptions[{Plot,ListPlot,ParametricPlot,Plot3D,Graphics},
           BaseStyle->{14,FontFamily->"Times",Italic}];

SetOptions[{Plot,ErrorListPlot,ParametricPlot},PlotStyle->{Thickness[0.005]}];
SetOptions[ListPlot,PlotStyle->{Red,PointSize[0.005]}];
SetOptions[{ListPlot,Plot,Histogram},ImageSize->600];
Daten[i_]:=
Module[{},
SetDirectory[NotebookDirectory[]<>"../..//Messwerte"];
Piecewise[
{Import["AlleDaten/tek000"<>ToString[i]<>".csv"],i<10},
{Import["AlleDaten/tek00"<>ToString[i]<>".csv"],10<=i<100},
{Import["AlleDaten/tek0"<>ToString[i]<>".csv"],100<=i}
}]
]
Kopf[i_]:=Daten[i][[1;;15]]
Data[i_]:=10^3*Daten[i][[16;;Length[Daten[i]]-1]]
X[i_]:=Data[i][[All,1]](*Zeit in ms*)
Y[i_,n_]:=Data[i][[All,n+1]](*Werte aus Datensatz i in Kanal n in mV*)

(*Macht die Daten in die Form {x,y}*)
CH[i_,n_]:=Transpose[{X[i],Y[i,n]}]
(*histogrammiert und beschriftet zwei Datensätze*)
Hist[YData_,n1_,n2_]:=Histogram[YData,{.2},PlotRange->
All,AxesLabel->{"mV","normierte Anzahl n"},ChartLegends->Placed[{"APD"<>
ToString[n1],"APD"<>ToString[n2]},Top]]
Histogram[{Y[129,1],Y[130,1]}]
(*Verkürzen der Daten um das Rauschen zu analysieren. Es werden alle Daten bis
Trigger-10 genommen*)
PosMax[i_]:=Position[X[i],0.00002][[1,1]];
```

## 10 Anhang

```

Xk[i_]:=X[i][[1;;PosMax[i]-20]];
Yk[i_,n_]:=Y[i,n][[1;;PosMax[i]-20]];
CHk[i_,n_]:=CH[i,n][[1,1;;PosMax[i]-20]];
(*Macht einen Fit an die Daten*)
histofitmodul[data_]:=Module[{},
DistributionFitTest[data,Automatic,"HypothesisTestData"]
]
(*Hypotesentest an die Daten mit fit und Plot*)
H1[data_]:=DistributionFitTest[data,Automatic,"HypothesisTestData"]

normalfit[data_,x_]:=PDF[H1[data]["FittedDistribution"],x]
\[Sigma][data_]:=\[FormalY]/.H1[data]["FittedDistributionParameters"]
\[Mu][data_]:=\[FormalX]/.H1[data]["FittedDistributionParameters"]

fitplot[data_,APDnumber_]:=Plot[normalfit[data,x],{x,Min[data],Max[data]},
PlotLabel->"APD"<>ToString[APDnumber],AxesOrigin->{0,0},AxesLabel-> {"mV","Anzahl n"}
]
(*Ein Modul, dass eine Normalverteilung an die Daten fittet und dann einen array
mit {fitfunktion,\[Sigma],\[Mu]} ausgibt*)
hfitmodul[data_]:=Module[{h,fitfunc,\[Sigma],\[Mu]},
h=DistributionFitTest[data,Automatic,"HypothesisTestData"];
fitfunc[x_]=PDF[h["FittedDistribution"],x];
\[Sigma]=\[FormalY]/.h["FittedDistributionParameters"];
\[Mu]=\[FormalX]/.h["FittedDistributionParameters"];
{\[Sigma],\[Mu]}
]
(*Das fitmodul um gut\[Sigma] berechnen zu können*)
\[Sigma]hfitmodul[data_]:=Module[{h,fitfunc,\[Sigma],\[Mu]},
h=DistributionFitTest[data,Automatic,"HypothesisTestData"];
fitfunc[x_]=PDF[h["FittedDistribution"],x];
\[Sigma]=\[FormalY]/.h["FittedDistributionParameters"];
\[Sigma]
]
(*Das fitmodul um gut\[Mu] berechnen zu können*)
\[Mu]hfitmodul[data_]:=Module[{h,fitfunc,\[Sigma],\[Mu]},
h=DistributionFitTest[data,Automatic,"HypothesisTestData"];
fitfunc[x_]=PDF[h["FittedDistribution"],x];
\[Mu]=\[FormalX]/.h["FittedDistributionParameters"];
\[Mu]
]
(*Histogramm an die Daten*)
histo[data_]:=
Histogram[data,Automatic,"PDF",

```

```

AxesLabel-> {"mV","Anzahl n"},AxesOrigin->{0,0}
]
(*Übereinander Legen von Fit und Daten*)
HF[data_,APDnumber_]:=
Show[
histo[data],
fitplot[data,APDnumber]
]

(*Ergebnis des Fits und der Daten in anschaulicher Form in Mathematica*)
Histofit[data_,Datensatznummer_,APDnumber_]:=
Grid[
{
{"Datensatz",Datensatznummer},
{"APD nummer",APDnumber},
{"Plot",HF[data,APDnumber]},
{"\[Sigma]",\[Sigma][data]},
{"\[Mu]",\[Mu][data]},
{"Anzahl der Messpunkte",Length[Yk[data][[1]]]}
},
Frame->All
]
(*Ergebnis als Tabel, so dass man es gut in Latex exportieren kann*)
Histofitlatex[data_,Datensatznummer_,APDnumber_]:=
{
{"Datensatz",Datensatznummer},
{"APD nummer",APDnumber},
{"Plot",HF[data,APDnumber]},
{"\[Sigma]",\[Sigma][data]},
{"\[Mu]",\[Mu][data]},
{"Anzahl der Messpunkte",Length[Yk[data][[1]]]}
}
(*Erstellt die Ergebnisse für mehrere Messungen*)
Table[
Histofit[Yk[41+n,2],41+n,184],
{n,0,9}
]

```

## 10.2 Mathematica Code zur Auswertung von Myonensignalen

```

Needs["Splines`"]
Needs["ErrorBarPlots`"]

```

## 10 Anhang

```
Needs["Parallel`Developer`"]
Needs["PlotLegends`"]
SetOptions[{Plot,ListPlot,ParametricPlot,Plot3D,Graphics},
           BaseStyle->{14,FontFamily->"Times"}];

SetOptions[{Plot,ErrorListPlot,ParametricPlot},PlotStyle->{Thickness[0.005]}};
SetOptions[ListPlot,PlotStyle->{Red,PointSize[0.007]}};
SetOptions[{ListPlot,ListLinePlot,Plot,Histogram},ImageSize->500];
M1=92.38;
(*verstärkungsfaktor der APD 111*)
M2=149.29824;(*verstärkungsfaktor der APD 292*)

Ca=270;(*Condensatorkapazität 270 pF*)
VproC=0.5*10-3;(*mV pro pC output des Preamp*)
QproMeV=0.957*10-3;(*aus Beispielrechnung für 1MeV Photon in pC/MeV*)
elm=1.602176487*10-19;
lightspeed=299792458; (*m/s*)
h=4.135667516*10-21;(*MeVs*)
\[Lambda]=420*10-9;(*Lichtwellenlänge in m*)
AF=(14*7)/(24*24);(*Aktive Fläche*)
QF=0.7;(*Quanteneffizienz*)
PhproMeV=500;(*Lichtausbeute von PW02*)
\[CapitalDelta]M=10; (*Fehler auf den Gain.*)
\[CapitalDelta]VproC=0;(*Die zu den Werten gehörenden Fehler*)
\[CapitalDelta]AF=0;
\[CapitalDelta]QF=0.1;
\[CapitalDelta]PhproMeV=0.1;
SetDirectory[NotebookDirectory[]<>"../../Messwerte"];

Clear[m,x,b,a,c1]
APD111={{8,55.3433},{13.8,43.961},{18.3,39.48}};
APD292={{7.80,49.44},{14.20,39.899},{19.10,35.72}};
p1=ListPlot[{APD111,APD292},AxesOrigin->{5,30}];
gerade=m x+b;
model=a*E-c1 x;
f111=NonlinearModelFit[APD111,gerade,{m,1},{b,70},x];
f292=NonlinearModelFit[APD292,gerade,{m,1},{b,70},x];
fm111=NonlinearModelFit[APD111,model,{a,c1},x];
fm292=NonlinearModelFit[APD292,model,{a,c1},x];
fp111=Plot[f111[x],{x,6,26},PlotStyle->Red];
fp292=Plot[f292[x],{x,6,26},PlotStyle->Purple];
fmp111=Plot[fm111[x],{x,6,26},PlotStyle->Red];
fmp292=Plot[fm292[x],{x,6,26},PlotStyle->Purple];
\[CapitalDelta]M111=fm111[26]-f111[26];
```

## 10 Anhang

```

\[CapitalDelta]M292 =fm292[26]-f292[26];
T1S=Show[p1,fmp292,fmp111,
PlotRange->All,
AxesOrigin->{0,0},
PlotLabel->(Style["APD 111",Red]Style[" APD 292",Purple]),
Frame->True,
FrameLabel->{"Temperatur in \[Degree]C","M"}
];
Grid[{{T1S,"",""},
{"APD","111","292"},
{"Fit",fm111["BestFit"],fm292["BestFit"]},
{"M(26)",NumberForm[fm111[26],3],NumberForm[fm292[26],3]},
{"\[CapitalDelta]M(26)",NumberForm[\[CapitalDelta]M111,2],
NumberForm[\[CapitalDelta]M292,2]},
{"\[Chi]^2",NumberForm[fm111["EstimatedVariance"],
3],NumberForm[fm292["EstimatedVariance"],3]}
}]

(*Importiert die Daten und macht die Einheiten in ms und mV
i muss eine 3 stellige Zahl sein.*)
Daten[i_]:=Module[{}],
(*SetDirectory[NotebookDirectory[]<>"../../Messwerte"];*)
Piecewise[{}
{Import["AlleDaten/tek000"<>ToString[i]<>".csv"],i<10},
{Import["AlleDaten/tek00"<>ToString[i]<>".csv"],10<=i<100},
{Import["AlleDaten/tek0"<>ToString[i]<>".csv"],100<=i}
}]
]
Kopf[i_]:=Daten[i][[1;;15]]
Data[i_]:=10^3*Daten[i][[16;;Length[Daten[i]]-1]]
X[i_]:=Data[i][[All,1]](*Zeit in ms*)
Y[i_,n_]:=Data[i][[All,n+1]](*Werte in Kanal i aus Datensatz n in mV*)

(*Macht die Daten in die Form {x,y}*)
CH[i_,n_]:=Transpose[{X[i],Y[i,n]}]
(*Das Folgende Modul findet das Maximum in einem Datensatz mit Hilfe des
Laplacefilters über j=32 Werte. Es gibt an Position 1 die Stelle des Maximums aus
und an Position 2 den t Wert des Maximums. Maximum und t0 werden
global ausgegeben.*)
PosMax[Daten_]:=
Module[{xi,yi,j,yif,xif,mMximum},
Clear[tm,Maximum,outputdata];
xi=Daten[[All,1]];
yi=Daten[[All,2]];

```

## 10 Anhang

```

j=31;(*Gibt an über wie viele Werte summiert werden soll*)
yif=
Table[
Sum[yi[[i+k]]-yi[[i]]
,{k,1,j}],
{i,1,Length[yi]-(j)}
];
(*xif=Drop[xi,Length[yif]-Length[xi]];(*Zum debuggen*)
outputdata=Transpose[{xif,yif}];*)
Maximum=Ordering[yif,-1][[1]];
t0=xi[[Maximum]];
{Maximum,t0}
]
(*Bestimmung des Fitintervalls für einen Channel. Daten hat die Form {{X},{Y}}*)
Peakintervall[Daten_]:=
Module[{X,Y,Ende,n,PM},
X=Daten[[All,1]];(*Zeit in ms*)
Y=Daten[[All,2]];(*Werte Kanal 1 in mV*)
PM=PosMax[Daten][[1]]+10;(*PosMax aus Laplace +10 wegen aufstieg*)
(*PosMax=Ordering[Y,-1][[1]];*)(*Zwei Möglichkeiten den Start zu bestimmen*)
(*PosMax=Position[X,0.00001][[1,1]];*)(*
(*Zweite Möglichkeiten das Ende zu bestimmen*)
(*Ein vielfaches der Standardabweichung*)
(*Ende=StandardDeviation[Daten[[1;;PosMax-10]][[2]]];*)(*
(*oder ein Bruchteil des Maximums*)
Ende=0.1Mean[Y[[PM+10;;PM+30]]];

n=1;
While[
Mean[ Y[[PM+n;;PM+n+10]]]>Ende,
n++
];
Daten[[PM;;PM+n]]
]
fitmodul[Daten_]:=Module[
{model},
Clear[fitdaten,fit,umaxfit,c,U0];
fitdaten=Peakintervall[Daten];
model=U0 E^(-c (t));
fit=NonlinearModelFit[fitdaten,model,{{U0,30},{c,41}},t];
umaxfit=fit[t0];
c=c/.fit["BestFitParameters"];
U0=U0/.fit["BestFitParameters"];

```

## 10 Anhang

```
fit
]

(*Macht eine Fehlerrechnung nach Gauß für die Energie*)

\[CapitalDelta]Energiewert[Gain_,umaxfit_]:=((umaxfit*10^(-12))/
(Gain^2 QF AF VproC PhproMeV elm)*0.5Gain)

(*Mach einen fit und speichert global einen Energiewert und umaxfit*)
fitgain[Daten_,Gain_] :=Module[
{model,VproC,elm,AF,QF,PhproMeV},
Clear[fitdaten,fit,umaxfit,c,U0,Energiewert];
fitdaten=Peakintervall[Daten];
model=U0 E^(-c (t));
fit=NonlinearModelFit[fitdaten,model,{U0,30},{c,41}],t];
umaxfit=fit[t0];
c=c/.fit["BestFitParameters"];
U0=U0/.fit["BestFitParameters"];
VproC=0.5*10^3;(*mV pro pC output des Preamp*)
elm=1.602176487*10^(-19);
AF=(14*6.8)/(24.4*24.4);(*Aktive Fläche*)
QF=0.7;(*Quanteneffizienz*)
PhproMeV=500;(*Lichtausbeute von PW02*)
(*Energie in MeV*)
Energiewert=(umaxfit*10^(-12))/(Gain QF AF VproC PhproMeV elm);
\[CapitalDelta]E=\[CapitalDelta]Energiewert[Gain,umaxfit];
{fit,Energiewert}
]

(*Berechnet die Energie in MeV aus einem gegebenen U Wert in mV bei Gain M*)
EnergieausU[U_,M_] :=Module[{VproC,elm,AF,QF,PhproMeV},

VproC=0.5*10^3;(*mV pro pC output des Preamp*)
elm=1.602176487*10^(-19);
AF=(14*6.8)/(24.4*24.4);(*Aktive Fläche*)
QF=0.7;(*Quanteneffizienz*)
PhproMeV=500;(*Lichtausbeute von PW02*)
(*Energie in MeV*)
(U*10^(-12))/(M QF AF VproC PhproMeV elm)
]

(*Bestimmt die Energie aus Daten und Gain*)
Energie[Daten_,Gain_] :=
```

## 10 Anhang

```
Module[{f1},
Clear[Energiewert];
f1=fitgain[Daten,Gain];
Energiewert
];

(*Mache einen fit an die Daten und stelle alles graphisch dar*)
fitplot[Daten_,APDnumber_]:=Module[{daten,tmax,tende,plotdaten,fitplotpur,endeplot},
Clear[fitplotout,umax]
fitmodul[Daten];
(*daten=Peakintervall[Daten];*)
(*Entweder Maximum des verkürzten Datensatzes, oder des Gesamten*)
(*Verkürzt*)
tende=Max[fitdaten[[All,1]]];
(*Gesamt*)
tmax=Max[Daten[[All,1]]];
(*Max spannung für höhe der Gerade*)
umax=Max[Daten[[All,2]]];

(*fit[t]=fitmodul[Daten][t];*)
(*Bestimmt das umax für die Darstellung im label*)
(*umaxfit=fit[t0];*)
plotdaten=
ListLinePlot[
Daten,
PlotRange->{{-0.0012,tmax+0.1tmax},{-6.2,umax+0.2umax}},
AxesLabel->{"Zeit [ms]","U [mV]"},
AxesOrigin->{0,0},
PlotLabel->"APD:<>ToString[APDnumber]<>" mit "<>
"Subscript[U, max]="<>ToString[NumberForm[umaxfit,3]]
];
fitplotpur=Plot[fit[t],{t,t0,tmax},PlotStyle->{Red,Thick}];
(*Endplot gibt das ende des Fitbereiches an*)
endeplot=ParametricPlot[{tende,t},{t,0,umax},PlotStyle->{Dashed,Black}];
fitplotout=Show[plotdaten,fitplotpur,endeplot]
]

(*Fitplotgain macht den Plot mit Energie aus gain, Es kann dann mit Energiewert
die Energie ausgelesen werden*)
fitplotgain[Daten_,APDnumber_,Gain_]:=Module[{daten,tmax,tende,plotdaten,
fitplotpur,endeplot},
```

## 10 Anhang

```
Clear[fitplotout,umax]
fitgain[Daten,Gain];
(*Entweder Maximum des verkürzten Datensatzes, oder des Gesamten*)
(*Verkürzt*)
tende=Max[fitdaten[[All,1]]];
(*Gesamt*)
tmax=Max[Daten[[All,1]]];
(*Max spannung für höhe der Gerade*)
umax=Max[Daten[[All,2]]];
(*Bestimmt das umax für die Darstellung im label*)
plotdaten=
ListLinePlot[
Daten,
PlotRange->{{-0.0012,tmax+0.1tmax},{-6.2,umax+0.2umax}},
AxesLabel->{"Zeit [ms]","U [mV]"},
AxesOrigin->{0,0},
PlotLabel->"APD:"<>ToString[APDnumber]<>" mit "<>
"Subscript[U, maxfit]="<>ToString[NumberForm[umaxfit,3]]
];
fitplotpur=Plot[fit[t],{t,t0,tmax},PlotStyle->{Red,Thick}];
(*Endplot gibt das ende des Fitbereiches an*)
endeplot=ParametricPlot[{tende,t},{t,0,umax},PlotStyle->{Dashed,Black}];
fitplotout=Show[plotdaten,fitplotpur,endeplot]
]
```

```
(*Macht aus einem Datensatz + Gain einen Schönen Plot*)
schoen[Data_,APDnummer_,Gain_] :=
Module[{plot},
plot=fitplotgain[Data,APDnummer,Gain];
Grid[
{
{"Plot",plot},
{"Fitfunktion"," Subscript[U, 0] * E^(-c t)"},
{"Subscript[U, 0]",NumberForm[U0,3]},
{"c",NumberForm[c,3]},
{"\Chi^2",NumberForm[fit["EstimatedVariance"],3]},
{"Energie",NumberForm[Energiewert,2]},
{"Subscript[U, max]",NumberForm[umax,3]}
}
]
]
```

(\*Verkürzt die Daten um die viel zu großen Werte zu beseitigen, die in Datensätzen entstehen, wenn kein Myon in der Messung war\*)

## 10 Anhang

```
Clear[n,false1,value1,ENk]
false1={1};
value1={1};
ENk={1};
n=1;
While[n<Length[EN],
If[
  EN[[n]]>226,
  (*Print[{180+n,1}];(* Zeile mit der Man die Bösen findet*)*)
  false1=Insert[false1,180+n,-1];(*Mach einen Vektor mit den Bösen*)
  value1=Insert[value1,EN[[n]],-1];(*Schreibt auch die Energievektoren der Bösen auf*)
  (*EN=Drop[EN,{n}];*)
  Print["Zu hohes Myon an der Stelle "<>ToString[n]<>" von EN"];
  Print["Zu hohes Myon in der Messung "<>ToString[180+n]<>" von APD 111"],
  (*Ab hier alle eingaben bei If false. so wird Korrektur Vektor erstellt*)
  ENk=Insert[ENk,EN[[n]],-1];
];
n++;
];

Clear[n,false2,value2,EN2k]
false2={1};
value2={1};
EN2k={1};
n=1;
While[n<Length[EN2],
If[
  EN2[[n]]>140,(*159 wäre der richtige Wert würde aber eine gute Messung nur
  wegen überfittung wegschmeißen*)
  (*Print[{180+n,2}];(* Zeile mit der Man die Bösen findet*)*)
  false2=Insert[false2,180+n,-1];(*Mach einen Vektor mit den Bösen*)
  value2=Insert[value2,EN2[[n]],-1];(*Schreibt auch die Energievektoren der Bösen auf*)
  (*EN2k=Drop[EN2,{n}];*)
  Print["Zu hohes Myon an der Stelle "<>ToString[n]<>" von EN2"<>
  " in Messung "<>ToString[180+n]],
  (*Ab hier alle eingaben bei If false. Ein weiters If prüft ob Werte zu klein*)
  If[EN2[[n]]<2,
  false2=Insert[false2,180+n,-1];(*Mach einen Vektor mit den Bösen*)
  value2=Insert[value2,EN2[[n]],-1];(*Schreibt auch die Energievektoren der Bösen auf*)
  Print["Kein Myon an der Stelle "<>ToString[n]<>" von EN2"<>" in Messung "
  <>ToString[180+n]],
  EN2k=Insert[EN2k,EN2[[n]],-1];
]];
];
```

## 10 Anhang

```
n++
];
(*False enthält die nach dem Filter ausgeworfenen Elemente value deren Energie Werte*)
(*False enthält die nach dem Filter ausgeworfenen Elemente value deren Energie Werte*)
false1=Rest[false1];
value1=Rest[value1];
ENk=Rest[ENk];

false2=Rest[false2];
value2=Rest[value2];
EN2k=Rest[EN2k];
```

### 10.3 Analyse des Rauschpegels im Proto 8

Abbildung 10.1: Alle Histogramme die zur Analyse des Rauschpegels ohne PCB erstellt worden sind.

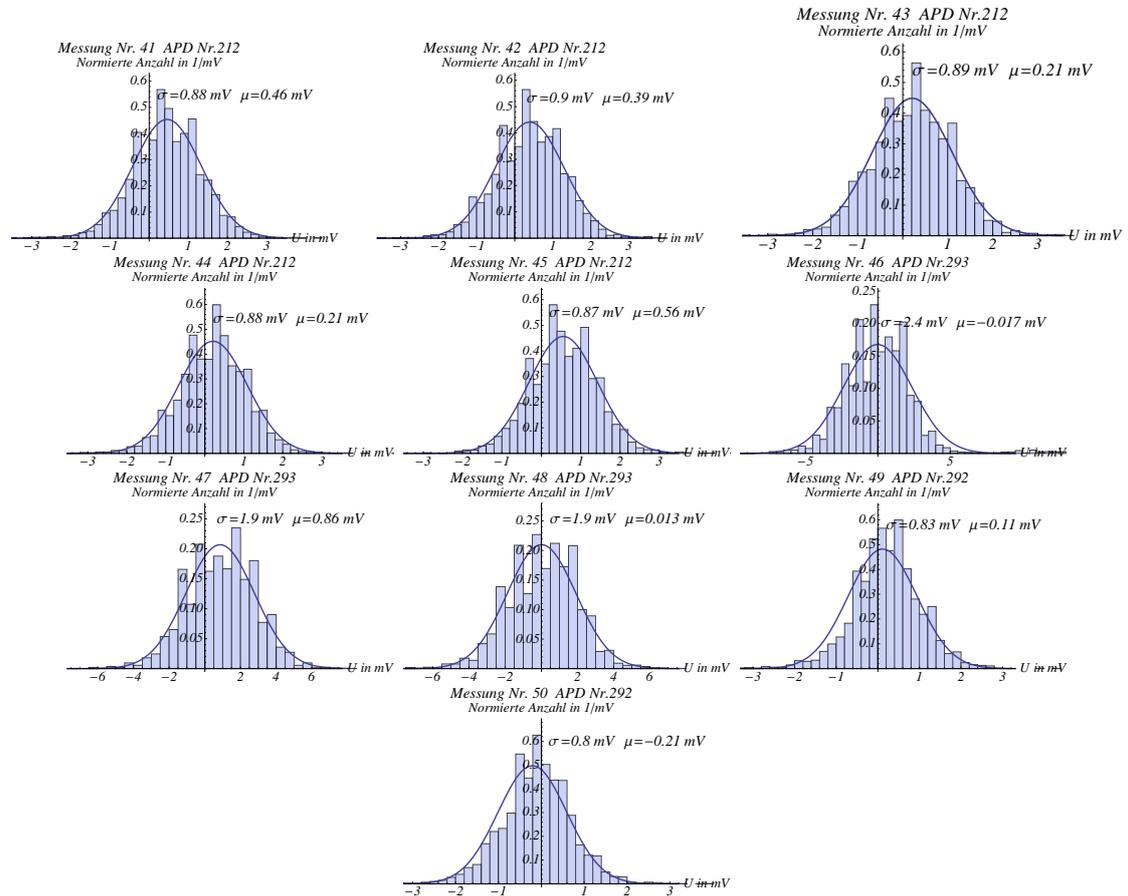
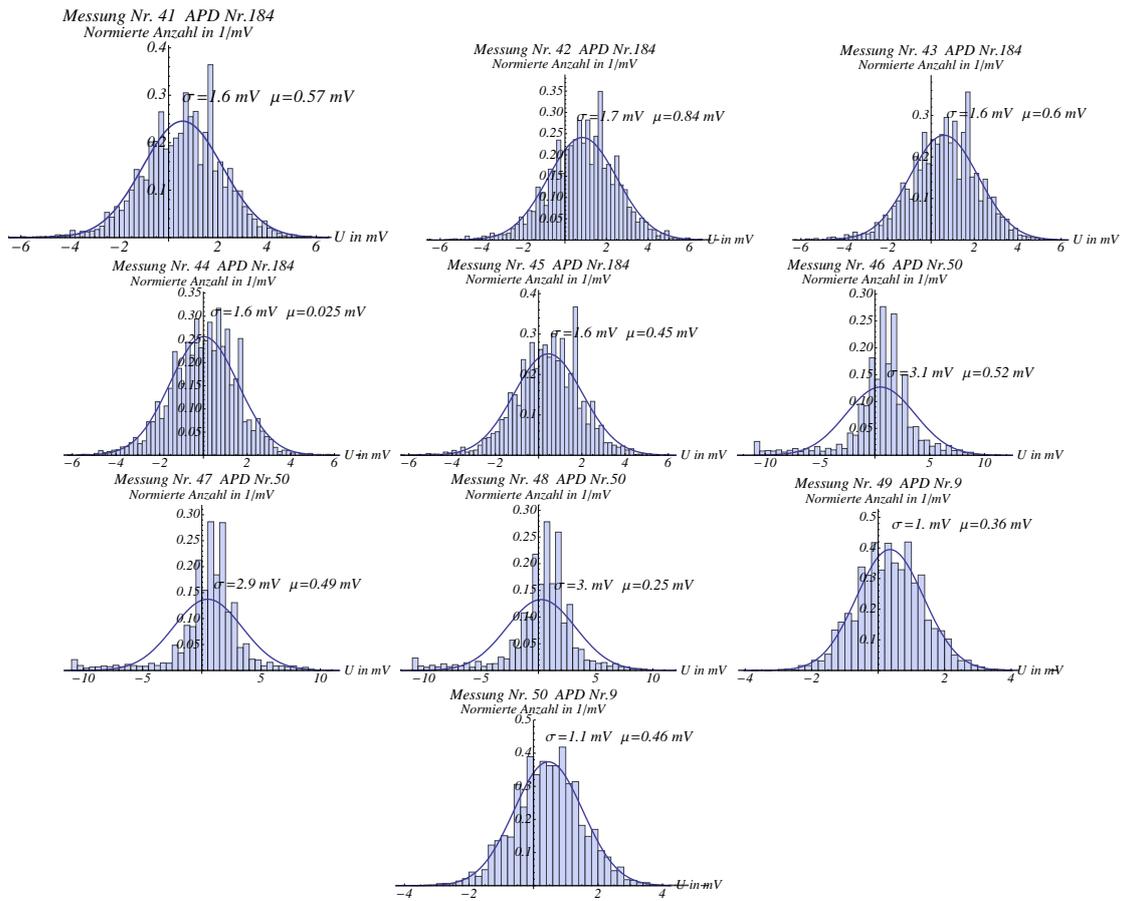


Abbildung 10.2: Alle Histogramme die zur Analyse des Rauschpegels ohne PCB erstellt worden sind.

## 10 Anhang

Abbildung 10.3: Alle Histogramme die zur Analyse des Rauschpegels mit PCB erstellt worden sind.

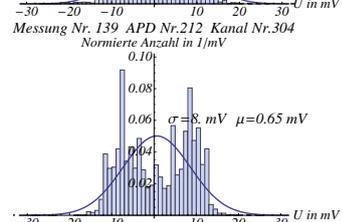
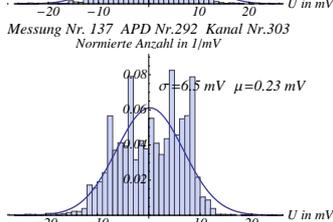
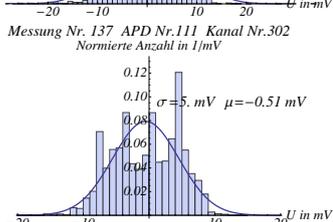
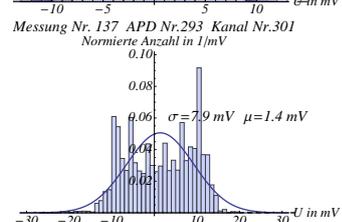
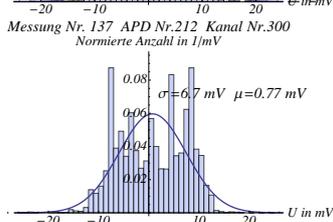
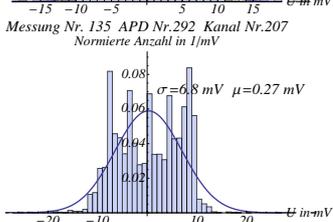
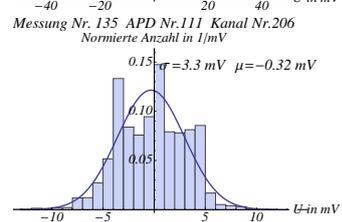
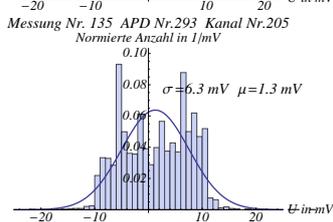
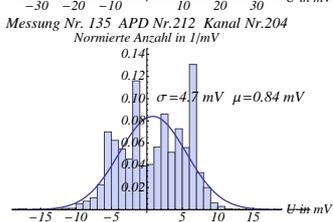
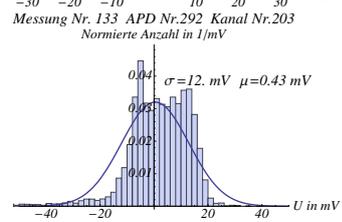
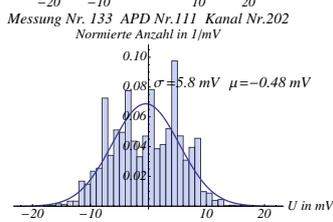
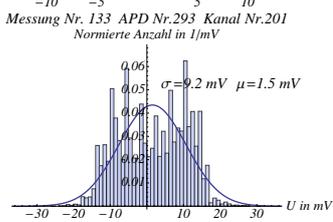
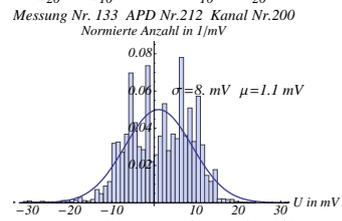
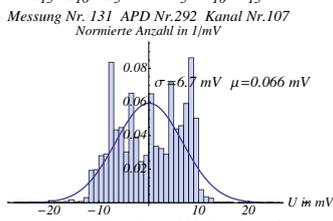
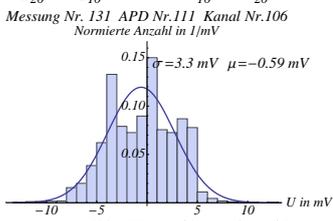
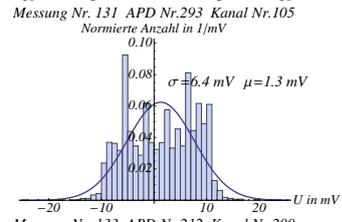
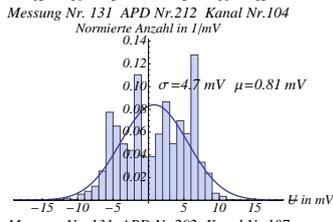
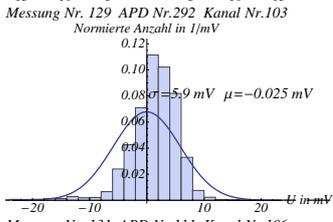
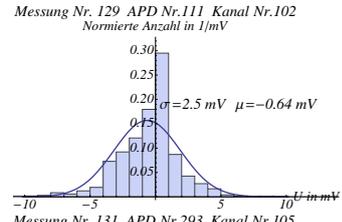
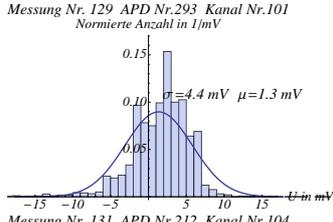
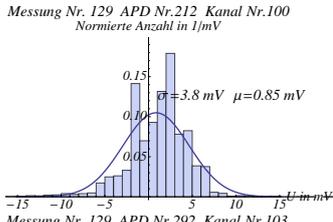


## 10.4 Rauschpegel der einzelnen Kanäle des Hochspannungsnetzgerätes

APD	Kanal	$\sigma$ in mV	$\mu$ in mV
212	CH100	4.1	0.86
293	CH101	4.8	1.3
111	CH102	2.9	-0.58
292	CH103	5.9	0.27
212	CH104	4.9	0.86
293	CH105	6.6	1.3
111	CH106	3.5	-0.63
292	CH107	6.8	0.06
212	CH200	4.1	0.71
293	CH201	5.1	1.3
111	CH202	3.	-0.64
292	CH203	5.3	0.36
212	CH204	4.8	0.79
293	CH205	6.4	1.3
111	CH206	3.4	-0.43
292	CH207	6.9	0.24
212	CH300	5.1	0.74
293	CH301	6.1	1.4
111	CH302	3.9	-0.52
292	CH303	5.4	0.16
212	CH304	5.8	0.69
293	CH305	7.	1.2
111	CH306	4.1	-0.45
292	CH307	6.2	0.22
212	CH400	4.7	0.76
293	CH401	5.5	1.5
111	CH402	3.6	-0.55
292	CH403	5.2	0.16
212	CH404	4.5	0.66
293	CH405	5.8	1.3
111	CH406	3.6	-0.67
292	CH407	6.3	0.2
Mittelwert		$5.7 \pm 2.2$	$0.4 \pm 0.7$

Tabelle 10.1: Tabelle mit den Standardabweichungen für das Rauschen der einzelnen Kanäle des HV Crates von WIENER.

# 10 Anhang



## 10 Anhang

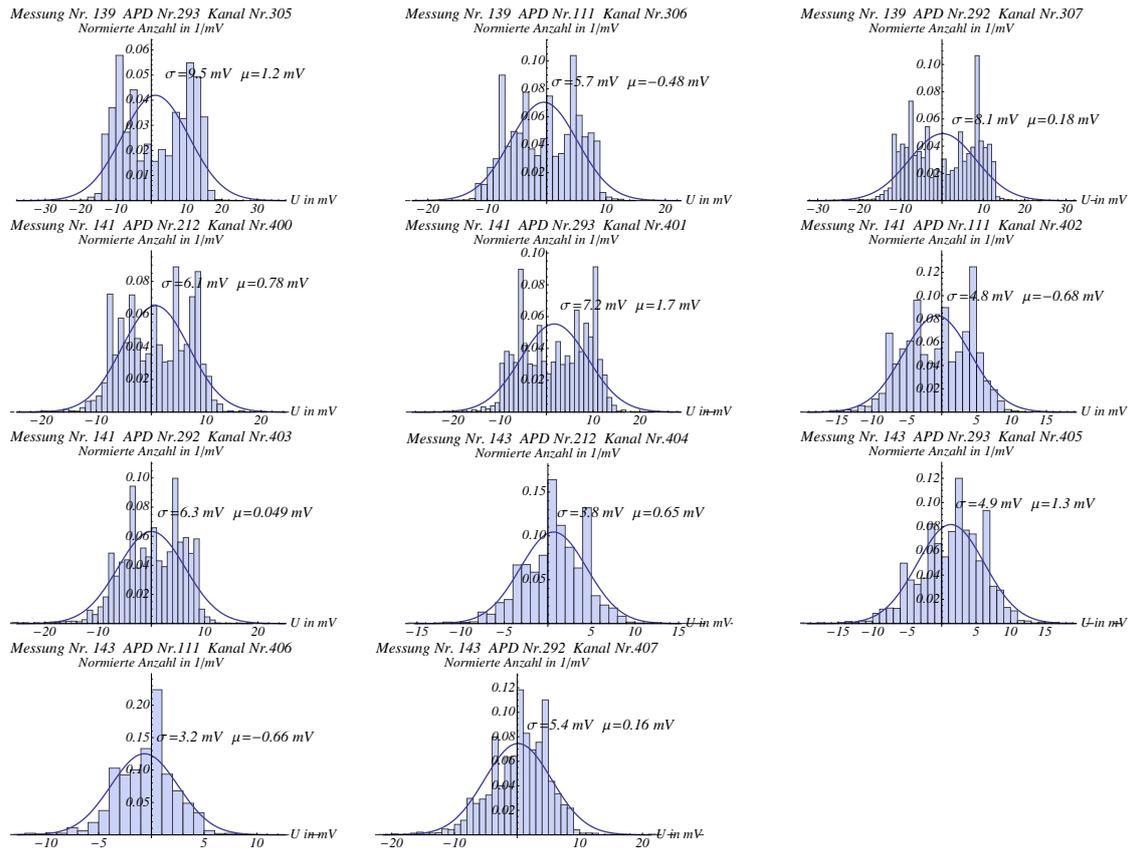


Abbildung 10.4: Abbildung der Histogramme der Nullmessungen in den einzelnen Kanälen der HV ISEG EHS 8 210pF . Ein Kanal bezeichnet einen Ausgang an der HV.