


Vorbereitende Studien zum Bau eines
Prototyp-Kalorimeters für das
-Experiment

BACHELORARBEIT
vorgelegt von
OLIVER NOLL

Bachelorarbeit in Physik
Fachbereich Physik, Mathematik und Informatik (FB 08)
Johannes Gutenberg-Universität Mainz
1. Oktober 2012

1. Gutachter Prof. Dr. Frank Maas
2. Gutachter Prof. Dr. Josef Pochodzalla

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 Prüfbehörde vorgelegt wurde.

Mainz, den 1. Oktober 2012

Oliver Noll
Im Münchfeld 33
55122 Mainz
onoll@students.uni-mainz.de
Matrikelnummer: 2664848

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Der FAIR-Beschleuniger und das PANDA-Experiment	3
2.1. FAIR	3
2.2. PANDA	3
2.3. Die Detektoren von PANDA	4
2.3.1. Das Target-Spektrometer	4
2.3.2. Das Vorwärts-Spektrometer	5
2.3.3. Das elektromagnetische Kalorimeter im Target-Spektrometer	5
2.4. PROTO8 und seine Bauelemente	6
2.4.1. Der Grundaufbau von PROTO8	7
2.4.2. Anorganische Szintillatoren - Bleiwolframat-Kristalle	8
2.4.3. Avalanche-Photodiode	9
2.4.4. Vorverstärker der Avalanche-Photodiode	11
2.4.5. FlashADC	13
3. Auswertungsmethoden	14
3.1. Fehlerfortpflanzung	14
3.2. Statistisch verteilte Messwerte	14
4. Das atmosphärische Myon	16
5. Der Verstärkungsfaktor M der verwendeten APD	19
5.1. Der Verstärkungsfaktors M bei Raumtemperatur	19
5.2. Der relative Verstärkungsfaktor R	23
5.3. Der Verstärkungsfaktor M bei tiefer Temperatur	27
6. Rauschanalyse verschiedener Anschlusstypen	27
6.1. Der Einfluss der Temperatur auf die Rauschbreite	28
6.2. Die Kapsel-Lösung	31
6.3. Twisted-Pair	32
6.4. Patchpanel	33
6.5. Patchpanel mit Aluminiumrahmen	34
6.6. Patchpanel mit Twisted-Pair	36
6.7. Vergleich der verschiedenen Methoden	37
7. PROTO8 als Myonen-Detektor	38
7.1. Die Konfiguration von PROTO8	38
7.2. Das Trigger-System	40
7.3. Datenaufnahme von 200 Myon-Ereignissen mit dem FlashADC	43
8. Fazit und Ausblick	49
Literaturverzeichnis	51
Abbildungsverzeichnis	52

A. Root-Programm zur Bestimmung der Puls-Höhen	54
B. Die Verteilung der Myonenmessung in der Skalierung der FlashADC-Channels	56
C. Gesamte Verteilung der Puls-Höhen der Langzeitaufnahme	57

1. Einleitung

Der Mensch ist das einzige Lebewesen auf der Erde, das in der Lage ist über das Sein zu reflektieren. Warum ist etwas und warum ist nicht nichts? Dies ist eine Frage die der Mensch an sich und an die ihn umgebende Natur stellt. Wie lauten die Gesetze, die die Materie dazu bewegen so zu sein wie sie ist? Lange Zeit blieb dem Menschen nichts anderes übrig als mit Gedankenexperimenten das nicht Sichtbare zu erforschen. Bereits in der Antike behauptete Demokrit (460-371 v. Chr.), dass alle Materie aus unteilbaren (a tomos) Grundbausteinen besteht. Nach Demokrit sollte es nur eine begrenzte Anzahl dieser Grundbausteine geben und verschiedene Eigenschaften der Materie aus der Anordnung und Kombination dieser Bausteine im leeren Raum hervorgehen[1]. Heute, fast 2500 Jahre später, muss der Mensch sich nicht mehr nur auf Gedankenexperimente beschränken, sondern stellt seine Theorien der höchsten Instanz des Erkenntnisgewinnes, dem Experiment vor. Der aktuelle Stand dieser Erkenntnisse ist, dass alle Materie den vier Grundkräften unterworfen ist. Dabei bilden die schwache, die starke und die elektromagnetische Wechselwirkung die Grundpfeiler des Standardmodells. Die Gravitation ist die vierte Wechselwirkung. Sie ist jedoch noch nicht mit dem Standardmodell vereint und muss daher gesondert betrachtet werden. Möglicherweise werden in Zukunft übergeordnete Theorien diese Vereinigung vollziehen können. In atomarer und subatomarer Ebene spielt die Gravitation aber ohnehin kaum eine Rolle. So kann mit dem Standardmodell der Aufbau der Materie erklärt werden. Demnach unterscheidet sich unterschiedliche Materie durch ihre jeweiligen charakteristischen Atome. In diesem Punkt sollte Demokrit also recht behalten. Jedoch besitzen diese Atome eine innere Struktur und sind aus heutigem Wissensstand aus weiteren Teilchen-Hierarchien, bis runter zu den Quarks, aufgebaut. Wer nun an dieser Stelle meint, dass das letzte Kapitel der Elementarteilchenphysik schon geschrieben ist, liegt falsch. Gerade bei der starken Wechselwirkung, die durch die Quantenchromodynamik (QCD) beschrieben wird und mit der die unterste Teilchen-Hierarchie der Materie zusammengehalten wird, gibt es noch ungeklärte Fragen. So kann beispielsweise die starke Wechselwirkung im Bereich niedriger Energien noch nicht analytisch berechnet werden. Des Weiteren gibt es Phänomene die nach dem Standardmodell vorausgesagt werden aber noch nicht experimentell nachgewiesen wurden. Dazu gehören beispielsweise Glueballs, die vollständig aus den Eichbosonen der starken Wechselwirkung zusammengesetzt sind. Die Erforschung solcher Fragestellungen erfordert einen enormen technischen und finanziellen Aufwand. Aus diesem Grund schließen sich weltweit Forschungsgruppen zu Kollaborationen zusammen um diese Projekte stemmen zu können. Die PANDA-Kollaboration ist einer dieser Zusammenschlüsse. Sie realisiert momentan das Detektor-System PANDA am FAIR-Beschleuniger-Komplex in Darmstadt. Dabei spezialisieren sich verschiedene Arbeitsgruppen auf konkrete Bereiche dieses Detektors. Das Institut für Kernphysik der Universität Mainz entwickelt beispielsweise die Rückwärts-Endkappe des elektromagnetischen Kalorimeters mit dem die Energie von geladenen Partikeln gemessen werden kann.

Die vorliegende Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung eines Prototyp-Kalorimeters, das die Bezeichnung PROTO8 trägt. Damit sollen die Rahmenbedingungen der Rückwärts-Endkappe simuliert werden. Darunter zählen beispielsweise die beengte Räumlichkeit und die konstante Kühlung der Detektor-Komponenten auf -25 °C . Es müssen also Lösungen gefunden werden, die benötigte Anschlusselektronik so intelligent wie möglich zu platzieren. Dabei muss die Realisierung kompakt sein aber gleichzeitig gewährleisten, dass die durch die Elektronik produzierte Wärme abfließen kann. Außerdem soll der Rauschuntergrund der Signale auf ein Minimum reduziert werden und die Datenaufnahme verbessert und

automatisiert werden.

Kapitel 2 beschäftigt sich mit den relevanten Grundlagen, die für diese Bachelorarbeit benötigt werden. Darunter zählt der FAIR-Beschleuniger-Komplex mit dem PANDA-Detektor und dessen Bauelemente. Des Weiteren wird konkret auf PROTO8 eingegangen. Dabei werden alle wichtigen Bauteile einzeln erklärt.

Kapitel 3, 4 und 5 behandeln die notwendige Theorie und Experimente die für die spätere Datenauswertung gebraucht werden. Es muss beispielsweise die Frage beantwortet werden, wie viel Energie ein atmosphärisches Myon im Szintillator-Material des Detektors deponiert. Zudem weisen die Photodioden eine individuelle Charakteristik auf, wenn Szintillationslicht auf sie fällt. Diese Charakteristik muss bekannt sein, um quantitative Aussagen bei Messungen machen zu können.

Im 6. Kapitel wird eine Rauschpegel-Analyse für verschiedene Anschlussarten innerhalb von PROTO8 gemacht. Die Erkenntnisse dieses Kapitels fließen direkt in die Weiterentwicklung des Prototypen ein.

Das 7. Kapitel handelt von der Erweiterung von PROTO8 zu einem funktionstüchtigen Myonen-Detektor. Neben dem Einbringen von aktuellen Forschungsergebnissen dieser Bachelorarbeit und der Konstruktion von notwendigen Hilfsmitteln zeichnet sich dieses Projekt dadurch aus, dass dabei auf Forschungsergebnisse aus allen vorangegangenen Bachelorarbeiten zurückgegriffen wird und PROTO8 nach unzähligen Laborstunden nun auch als automatisierter Detektor arbeiten kann.

Im 8. und letzten Kapitel werden die Erkenntnisse dieser Bachelorarbeit zusammengefasst und ein Ausblick für die zukünftigen Forschungsprojekte an PROTO8 bzw. an der neuen Evolutionsstufe PROTO18 gemacht.

2. Der FAIR-Beschleuniger und das PANDA-Experiment

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des PANDA-Experimentes behandelt. Dazu gehört der FAIR Beschleuniger-Komplex in dem das PANDA-Experiment einen Teilbereich des Forschungsspektrums abdeckt. Des Weiteren wird auf die Komponenten des PANDA-Experiments eingegangen, wobei das Hauptaugenmerk auf das elektromagnetische Kalorimeter in der Rückwärts-Endkappe geworfen wird.

2.1. FAIR

FAIR steht für **F**acility for **A**ntiproton and **I**on **R**eseach und ist ein von vielen Nationen getragener Beschleuniger-Komplex. Zurzeit wird er auf dem Gelände des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung in Darmstadt gebaut. Die Forschungsschwerpunkte liegen in der Atom- und Kernphysik, der Plasmaphysik und der Materialforschung. Durch hochenergetische Antiproton- und Ionenstrahlen werden in diesen Gebieten neue Erkenntnisse erhofft, die vorher unzugänglich waren.

Die Forschungsgruppe **NUSTAR** beschäftigt sich mit der Struktur von Atomkernen, von der beispielsweise die Entstehung schwerer Elemente abhängt. Dafür wird unter anderem mit dem Fragmentseparator (FRS) nach exotischen Kernen gesucht. Bei **CBM** wird das Phasendiagramm der Quantenchromodynamik in Regionen hoher Baryonendichte mittels Schwerionexperimenten erforscht. Der Forschungsbereich **APPA** untersucht die Wirkung von Strahlen auf Materialien und Zellen, womit beispielsweise Fortschritte in der Medizin zu erwarten sind. Außerdem werden der Atomaufbau und außergewöhnliche Plasmen untersucht. Die **PANDA**-Kollaboration untersucht mittels Proton-Antiproton-Annihilationreaktionen die starke Wechselwirkung durch die Suche nach exotische Zuständen der Materie und Experimente zur Struktur von Hadronen. In [Abbildung 1](#) sind die Ausmaße des Beschleuniger-Komplexes FAIR zu erkennen.

2.2. PANDA

Das **AntiProton-Annihilation at Darmstadt-Experiment**, kurz PANDA, untersucht Proton-Antiproton-Annihilationsprozesse. Die hier dargestellten Informationen über die Funktionsweise und die technischen Daten des PANDA-Experiments wurden dem *Technical Design Report*[2] und dem *Technical Progress Report*[3] entnommen und werden hier zusammengefasst.

Aus dem Beschleuniger FAIR wird ein Antiprotonstrahl mit einem Impuls zwischen 1,5 GeV/c und 15 GeV/c in den Synchrotron-Speicherring HESR eingekoppelt. Im HESR werden Antiprotonstrahlen hoher Güte gespeichert wodurch Hadronen-Resonanzen mit einer Genauigkeit von 50-100 keV vermessen werden können. Innerhalb von PANDA kollidiert der Antiprotonstrahl mit einem Target aus gefrorenem Wasserstoff oder einem Wasserstoff-Clusterjet. Die erzeugte Teilchen werden in verschiedene Detektoren, auf die im Folgenden noch genauer eingegangen wird, nachgewiesen. Das physikalische Programm des PANDA-Experiments widmet sich der Hadron-Spektroskopie sowie Untersuchungen zur Hadronstruktur. Außerdem wird die Hyperon-Nukleon-Wechselwirkung mit Hilfe von Hyperkernen untersucht. Darüber hinaus werden Modifikationen von Hadronen in Materie studiert.

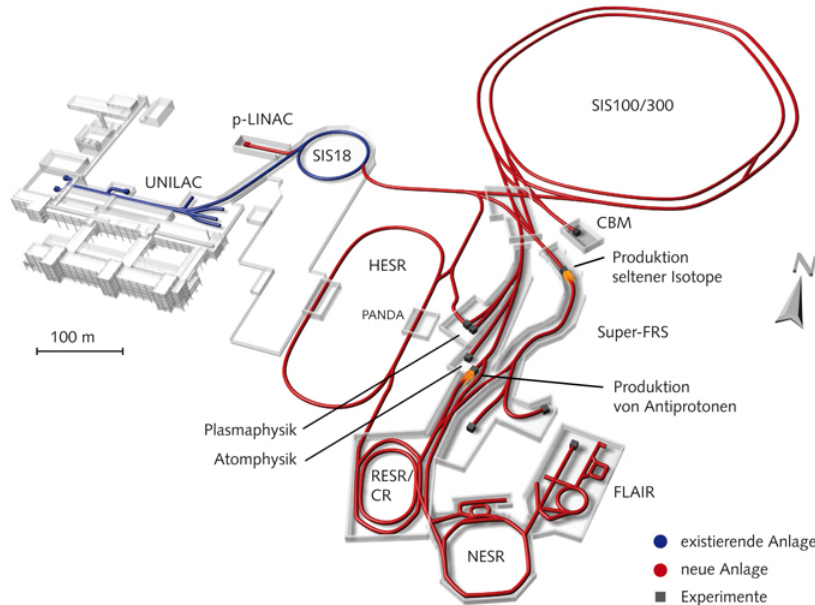


Abbildung 1: Der Beschleunigerkomplex FAIR auf dem Gelände der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt. Die Grafik zeigt die existierende Anlage und die geplanten Ausbaustufen.

2.3. Die Detektoren von PANDA

Der PANDA-Detektor ist in der Lage bei hohen Raten von bis zu 20 Millionen Ereignissen pro Sekunde und hoher Auflösung geladene als auch neutrale Teilchen zu detektieren. Um eine nahezu 4π -Raumabdeckung zu erreichen besteht das Detektor-System aus einem Target-Spektrometer und einem Vorwärts-Spektrometer die im Anschluss kurz erklärt werden. Am Ende dieses Kapitels wird auf das elektromagnetische Kalorimeter (EMC) mit der Rückwärts-Endkappe, die Forschungsobjekt dieser Bachelorarbeit ist, eingegangen. In [Abbildung 2](#) sind der Aufbau und die Ausmaße von Panda dargestellt.

2.3.1. Das Target-Spektrometer

Innerhalb des Target-Spektrometers befindet sich das Target. Das Kollisionszentrum wird schichtweise von unterschiedlichen Detektoren umhüllt. Diese gewährleisten eine Winkelabdeckung von $\theta=22^\circ$ - 140° . Den Anfang bildet ein Mikrovertex-Detektor (MVD) mit dem versetzte Zerfall-Vertices registriert werden. Die nächste Schicht bildet ein Gas-Spur-Detektor mit dem 3D-Spuren aufgenommen werden. Ein Ring-Abbildender-Cherenkov-Detektor umhüllt den Gas-Spur-Detektor. Mit ihm wird die Teilchenart bestimmt. Eine Ebene höher werden mit einem elektromagnetischen Kalorimeter aus 11360 Bleiwolframat-Kristallen die Teilchenenergien festgestellt. Ein supraleitender Solenoid bildet die vorletzte Schicht. Er ist in der Lage ein homogenes Magnetfeld von 2 Tesla mit einer Genauigkeit von $\pm 2\%$ zu erzeugen. Diese Genauigkeit ist wichtig um Rückschlüsse aus der Spur von geladenen Teilchen zu ziehen. Den Abschluss bildet ein Myonen-Detektor. Um Raumwinkelbereichen von über 140° bis 170° abzudecken wird eine elektromagnetische Rückwärts-Endkappe mit 540 Bleiwolframat-Kristallen angebracht. In [Kapitel 2.3.3](#) wird im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit noch

genauer auf die Rückwärts-Endkappe eingegangen.[2][3]

2.3.2. Das Vorwärts-Spektrometer

Um Teilchen mit hohen Energien und Impulsen von bis zu 8 GeV/c zu detektieren wurde das Vorwärts-Spektrometer entwickelt. Es deckt den Raumwinkelbereich von 5° bis 22° ab. Mini-Driftkammern ermöglichen eine Spurrekonstruktion. Auch hier kommt ein Ring-Abbildender-Cherenkov-Detektor und ein elektromagnetisches Kalorimeter zum Einsatz um die Art und Energie der Teilchen festzustellen.[2][3]

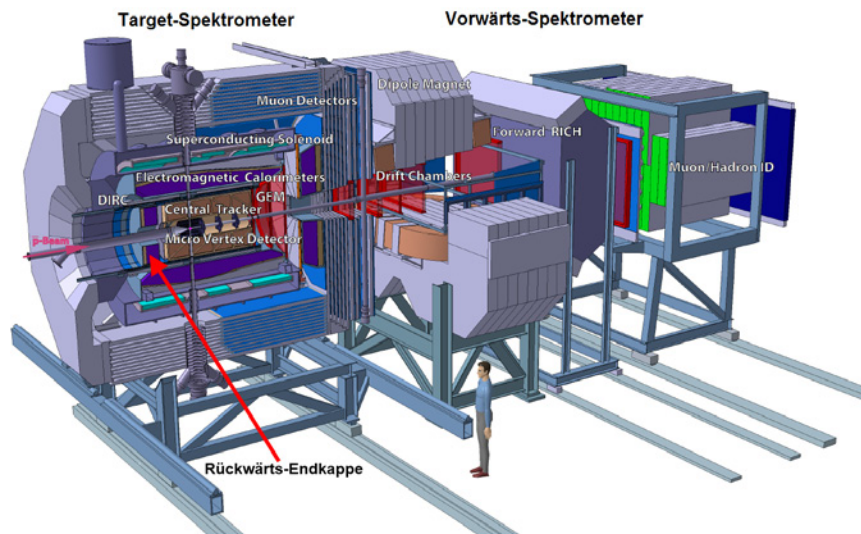


Abbildung 2: Die Grafik zeigt den Aufbau des PANDA-Detektors. Im Zentrum des Target-Spektrometers findet die Kollision zwischen Antiprotonen-Strahl und dem Wasserstoff-Pellet-Target oder dem Wasserstoff-Clusterjet statt. Für Raumwinkel über 140° wird die sogenannte Rückwärts-Endkappe des elektromagnetischen Kalorimeters eingesetzt. Sie wird derzeit vom Institut für Kernphysik der Universität Mainz entwickelt und ist Forschungsobjekt der vorliegenden Bachelorarbeit.[2]

2.3.3. Das elektromagnetische Kalorimeter im Target-Spektrometer

An das elektromagnetische Kalorimeter (EMC) des PANDA-Experiments werden besondere Anforderungen gestellt. Es befindet sich in der Innenseite der supraleitenden Spule des Solenoiden (Abbildung 2). Aufgrund des Platzmangels wird ein Szintillator-Material benötigt, das die radiale Ausdehnung des Kalorimeters so gering wie möglich hält. Dabei muss das Ansprechverhalten der Szintillatoren der hohen Ereignisrate gewachsen sein, eine angemessene Auflösung über das weite dynamische Energiespektrum der Photonen besitzen und letztlich beständig gegenüber der Strahlung sein. Im Vorfeld wurde sich auf eine Weiterentwicklung der an dem Large Hadron Collider (LHC) des CERN befindlichen CMS (Compact Muon Solenoid) und ALICE (A Large Ion Collider Experiment) verwendeten Szintillator-Kristallen geeinigt. Dieser weiterentwickelte Kristalltyp, PWO-II genannt, zeichnet sich vor allem durch verbesserte Lumineszenzeigenschaften aus. Um die Lichtausbeute weiter zu erhöhen werden

die Kristalle auf -25 °C abgekühlt. In [Kapitel 2.4.2](#) wird genauer auf die Funktionsweise und die physikalischen Eigenschaften der verwendeten Szintillator-Kristalle eingegangen. An jedem PWO-II-Kristall befinden sich zwei Avalanche-Photodioden ([Kapitel 2.4.3](#)), die das Szintillationslicht in elektrische Signale umwandeln. Diese Signale werden durch eine anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC) verstärkt und können anschließend verarbeitet werden. Das elektromagnetische Kalorimeter teilt sich in drei Bereiche auf. Den größten Winkelbereich von 22° bis 140° deckt der Fassteil ab. Dabei sind 11360 Bleiwolframat-Kristalle zylindrisch um das Kollisionszentrum angeordnet. Für kleine Winkelbereiche von 5° bis 22° sind in Vorwärtsrichtung 3600 Kristalle angebracht. Um auch stark zurückgestreute Partikel zu detektieren deckt die Rückwärts-Endkappe (REK) einen Raumwinkelbereich von 140° bis 170° ab. Diese Endkappe wird vom Institut für Kernphysik der Universität Mainz entwickelt und ist auch Thema der vorliegenden Bachelorarbeit. In [Abbildung 3](#) sind die Detektorelemente des elektromagnetischen Kalorimeters dargestellt. Des Weiteren sind in [Tabelle 1](#) die wichtigsten erforderten Eigenschaften des EMC zusammengefasst.[\[2\]\[3\]](#)

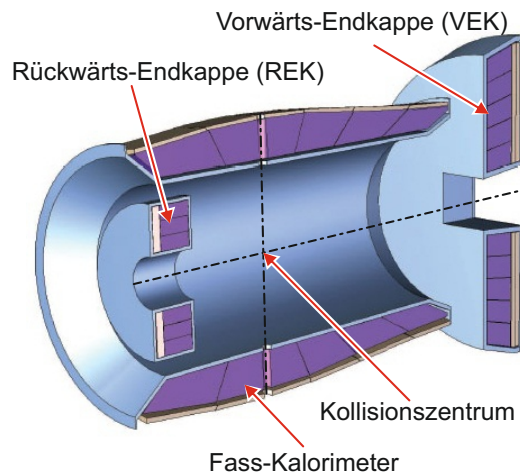


Abbildung 3: Die Grafik zeigt das elektromagnetische Kalorimeter des PANDA-Experimentes mit Vorwärtsrichtung, Fassteil und Rückwärts-Endkappe[\[2\]](#)

2.4. PROTO8 und seine Bauelemente

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Prototypen “PROTO8”. Mit PROTO8 ist es möglich den Einsatz der Detektorelemente der Rückwärts-Endkappe des elektromagnetischen Kalorimeters zu simulieren. Dabei liegen ähnliche Randbedingungen vor wie später im PANDA-Experiment. Die Forschungsschwerpunkte liegen in der Entwicklung einer adäquaten Ausleseelektronik, der Minimierung des Rauschpegels der Nutzsignale und der Optimierung der Spannungsversorgung der Vorverstärker. Zusätzlich werden auch Lösungen für konzeptionelle Probleme gesucht, wie zum Beispiel die Verbesserung der gleichmäßigen Kühlung des Prototypen. Ferner soll mit einem Trigger-System der spätere Detektorbetrieb simuliert werden. Im Folgenden wird der Grundaufbau von PROTO8 erklärt und auf einzelne Komponenten eingegangen, die auch später in der Rückwärts-Endkappe Verwendung finden.

	erforderliche Eigenschaft		
Allgemeine Parameter			
Energieauflösung $\frac{\sigma_E}{E}$	$\leq 1\% \oplus \frac{2\%}{\sqrt{E/GeV}}$		
Energiegrenze (Photonen) E_{thres}	10 MeV (20 MeV toleriert)		
Energiegrenze (einzelner Kristall) E_{xtl}	3 MeV		
RMS Rauschen (Energie äquivalent) σ_{noise}	1 MeV		
Raumwinkelabdeckung von 4π	99%		
Durchschnittliche Zeit zw. Fehlern t_{mtbf}	2000y		
Teildetektor Parameter			
	REK	Fass-Kalori.	VEK
Raumwinkelbereich	$\geq 140^\circ$	$\geq 22^\circ$	$\geq 5^\circ$
Energiebereich von E_{thres} bis	0,7 GeV	7,3 GeV	14,6 GeV
Raumwinkelanteil von Kristallausmaß θ	4°		1°
räumliche Auflösung σ_θ	0,5°	0,3°	0,1°
max. Signallast $f_\gamma (E_\gamma > E_{xtl})$	60 kHz		500 kHz
($p\bar{p}$ -Events max. Signallast) $f_\gamma (E_\gamma > E_{xtl})$	100 kHz		500 kHz
shaping time t_s	400 ns		100 ns
Strahlungsresistenz bei $p\bar{p}$ -Events	0,15 Gy	7 Gy	125

Tabelle 1: Anforderungen an das elektromagnetische Kalorimeter des PANDA-Experimentes.
Die Werte beziehen sich auf eine Luminosität von $L = 2 \cdot 10^{32} cm^{-2} s^{-1}$, [2]

2.4.1. Der Grundaufbau von PROTO8

Mit PROTO8 können acht Bleiwolframat-Kristalle samt Avalanche-Photodioden und Vorverstärkern gleichzeitig betrieben werden. Dafür werden die Kristalle in eine Kristallfassung aus Aluminium geschoben. An den Seitenflächen der Kristallfassung verlaufen Kühlschläuche. Die Kristallfassung wird wiederum in eine Isolierbox geschoben. Durch den Isolierbox-Deckel verlaufen sämtliche Kühlschläuche und Anschlusskabel. Des Weiteren wird die Isolierbox in eine lichtdichte Aluminiumbox gelegt. Diese hat innen und außen Kupplungsstücke für die Stromversorgung und die Signalkabel. In [Abbildung 4](#) ist die Grundkonfiguration von PROTO8 illustriert.

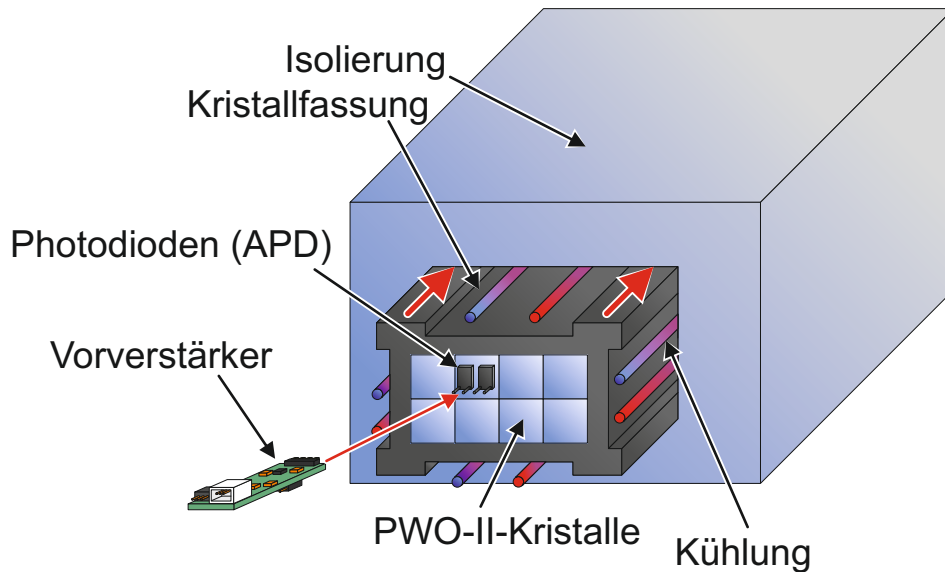


Abbildung 4: Die Grafik zeigt die Grundkonfiguration von PROTO8. Die Kristallfassung samt Kristallen wird in die Isolierbox geschoben. Auf jeder Seitenfläche der Kristallfassung verläuft eine Kühlschleife. Die Isolierbox wird mit einem Deckel geschlossen und in die lichtdichte Aluminiumbox gelegt.

2.4.2. Anorganische Szintillatoren - Bleiwolframat-Kristalle

Szintillatoren sind in der Lage Teilchen zu detektieren, die über die elektromagnetische Wechselwirkung interagieren. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie über einer gewissen Schwellenenergie eine nahezu lineare Abhängigkeit des Signals von der deponierten Teilchenenergie haben. Durch ihre schnelle Ansprechzeit sind Experimente möglich, die eine genaue Zeitauflösung erfordern. Zudem reduziert sich dadurch die Totzeit des Messvorganges. Beim PANDA-Experiment werden anorganische Bleiwolframat-Kristalle ($PbWO_4$) benutzt. Diese sind eine Weiterentwicklung der Kristalle, die schon im CMS-Experiment am CERN benutzt werden. Diese Weiterentwicklung wird PWO-II genannt und besteht im Wesentlichen aus einer Verbesserung der Lumineszenzeigenschaft. Die Lichtausbeute wurde um den Faktor zwei gegenüber den CMS-Bleiwolframat-Kristallen verbessert. Kühlt man die PWO-II-Kristalle im Kalorimeterbetrieb auf $-25\text{ }^\circ\text{C}$ ab, verbessert sich die Lichtausbeute noch einmal um den Faktor 4,5 [2] im Gegensatz zu $+25\text{ }^\circ\text{C}$. Die Bleiwolframat-Kristalle weisen zusätzlich eine für anorganische Szintillatoren unüblich schnelle Zerfallszeit auf. Dadurch können 95% der Photonen innerhalb von 300 bis 400 ns gemessen werden. Sowohl im elektromagnetischen Kalorimeter als auch in PROTO8 werden die Kristalle einzeln mit einer Reflexionsfolie umhüllt. Dabei wird eine Stirnfläche ausgespart um dort die Avalanche-Photodioden anzukleben. Die Reflexionsfolie soll verhindern, dass Szintillationslicht von den Nachbarkristalle den Kristall erreicht. Eine ausführliche Beschreibung und Untersuchung der Reflexionsfolien findet sich in der Bachelorarbeit von Christina Haberkorn[6]. In Tabelle 2 sind die Eigenschaften von dem verwendeten PWO-II-Kristallen aufgelistet.



Abbildung 5: Die Grafik zeigt einen Bleiwolframat-Kristall mit angeklebten Photodioden mit der so genannten Patchpanel-Methode auf die später noch eingegangen wird. Der Kristall ist 20 cm lang und hat eine Grundfläche von 24,4 mm x 24,4 mm.

Eigenschaft	phys. Größe	Wert	Einheit
Abmaß	$b \times h \times l$	$24,4 \times 24,4 \times 200$	mm^3
Dichte	ρ	8,28	$\frac{g}{cm^3}$
Strahlungslänge	X_0	0,89	cm
Molièreradius	R_M	2,00	cm
Abklingzeit	τ_{fast}	10	ns
	τ_{slow}	30	ns
Maximum der abgestrahlten Wellenlänge	$\lambda_{max,fast}$	420	nm
	$\lambda_{max,slow}$	425	nm
Energieverlust für min. ion. Teilchen	$\frac{dE}{dx}$ (MIP)	10,1	$\frac{MeV}{cm}$
hygroskopisch	-	nein	-
Δ Lichtausbeute/ Δ Temperatur	$\frac{dLY}{dT}$	-3,0	$\frac{\%}{C}$

Tabelle 2: Eigenschaften des PWO-II-Kristalls ([4], S.306, Tabelle 28.4),[2], MIP = Minimal ionisierende Partikel

2.4.3. Avalanche-Photodiode

Um das Szintillationslicht der Bleiwolframat-Kristalle in ein messbares Signal umzuwandeln, werden bei der Rückwärts-Endkappe des elektromagnetischen Kalorimeters großflächige Avalanche-Photodioden (LAAPD) eingesetzt, die im Folgenden meist mit APD abgekürzt werden. Bei der Wahl der Photodiode wurde darauf geachtet, dass diese auf der Wellenlänge des Szintillationslichtes der PWO-II-Kristalle empfindlich ist (siehe dazu [Tabelle 2\[2\]](#)). Es wurde sich auf die Serie 8664 mit der Fabrikat-Nummer 8664-1010 der Firma Hamamatsu geeinigt. Details zu diesem Typen finden sich im Datenblatt [11]. Dabei ist zu beachten, dass die Maße abweichen (14 x 7 mm), weil diese speziell für das PANDA-Experiment angepasst wurden. Die Avalanche-Photodiode ist aus Silizium gefertigt und unterscheidet sich von einer herkömmlichen PIN-Diode in ihrem Schichtaufbau. Die Schichtreihenfolge ist $p^+ - i - p - n^+$. Dabei ist p^+ stark positiv und n^+ stark negativ dotiert. Wird in Sperrichtung (minus an p^+ und plus an n^+) eine Hochspannung angelegt, vergrößert sich dadurch die Raumladungszone. Besitzt ein Photon eine höhere Energie $E = h\nu$ als der Bandlückenabstand wird ein Elektron in das

Leitungsband gehoben. Es entsteht ein Elektronen/Loch-Paar, wobei das Elektron durch die hohe Spannung in Richtung n^+ -Schicht und das Loch in Richtung p^+ -Schicht beschleunigt wird. Durch das starke elektrische Feld am $p - n^+$ -Übergang, wird das Elektron dort besonders stark beschleunigt. Es kommt zu einem Lawinen-Effekt, wobei Sekundärelektronen aus ihrer Bindung ausgelöst werden und einen messbaren Strom erzeugen.

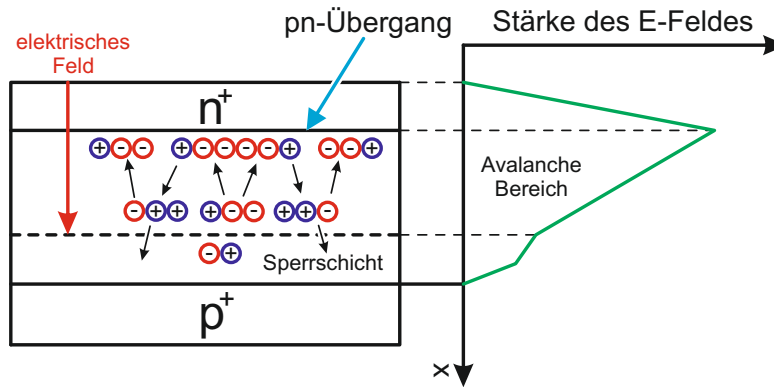


Abbildung 6: Die Grafik zeigt die Funktionsweise einer Aeverlanche-Photodiode. Durch das starke elektrische Feld, werden die Elektronen in Richtung n^+ , die Löcher in Richtung p^+ beschleunigt. Durch das Auslösen gebundener Sekundärelektronen, kommt es zum Lawinen-Effekt.

Um mit dem gemessenen Strom eine quantitative Aussage machen zu können, muss der individuelle Verstärkungsfaktor jeder APD bekannt sein. Dabei gilt, je höher der Verstärkungsfaktor, desto höher ist das Untergrundrauschen des Signals. Dieses Rauschen wird durch thermische Anregung innerhalb der Raumladungszone der APD hervorgerufen. Durch die Kühlung des Experimentes auf $-25\text{ }^\circ\text{C}$, wird dieser Effekt verringert. Von Dr. Andrea Wilms wurden Datenblätter [9] mit den individuellen Verstärkungsfaktoren bei verschiedenen Temperaturen angefertigt und zu Verfügung gestellt.

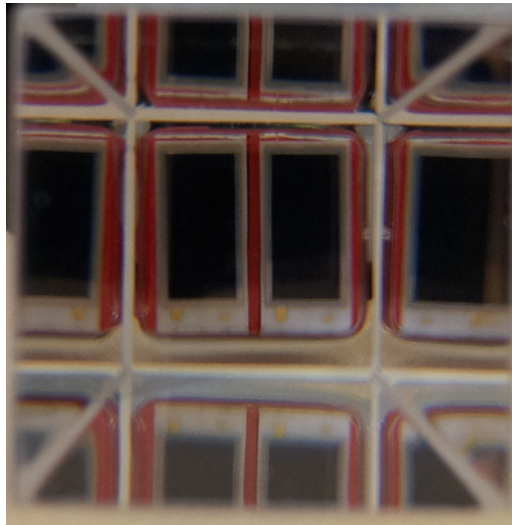


Abbildung 7: Die Grafik zeigt eine Frontalaufnahme durch die Stirnfläche eines Bleiwolframat-Kristalls auf zwei aufgeklebte APD. Dabei wurde der zwei Komponenten Kleber ELASTOSIL[®] verwendet, der die erforderlichen optischen Eigenschaften besitzt.

2.4.4. Vorverstärker der Avalanche-Photodiode

Speziell für das PANDA-Experiment wurde von der Universität Basel ein Verstärker entwickelt [10], der den Anforderungen im Entwicklungsmodus des elektromagnetischen Kalorimeters gerecht wird. Im endgültigen PANDA-Experiment werden gleich mehrere dieser Verstärker durch ein ASIC-Modul ersetzt, das aber nach dem Schaltmuster der erforschten Vorverstärker programmiert wird. Die verwendeten Verstärker nehmen die von der APD gelieferten Ladungsmenge auf und verstärken sie. Dabei zeichnen sie sich durch eine hohe Verstärkung bei gleichzeitig niedrigem Rauschen aus. Eine weitere wichtige Eigenschaft ist das ladungssensible Verstärken. Dies bedeutet, dass das Signal am Ausgang proportional zur erzeugten Ladungsmenge der APD ist. In [Abbildung 8](#) sind die Anschlüsse des Vorverstärkers gezeigt. Die Betriebsspannung beträgt ± 6 V. Die Sperrspannung, auch reversed Bias genannt, liegt zwischen +300 und +350 V. In diesem Bereich liegt der größte Verstärkungsfaktor vor[9]. Bei einer noch höheren Spannung käme es zu einem Durchschlag der APD, der sie zerstören würde. Aus dem Signalausgang kommt das verstärkte Signal, welches in der Größenordnung von einigen Millivolt liegt und von einem Oszilloskop oder FlashADC ([Kapitel 2.4.5](#)) verarbeitet werden kann. Der Verstärkungsprozess läuft folgendermaßen ab: Trifft ein Szintillationsphoton auf die APD fließt ein elektrischer Strom. Im Verstärker wird dieser Strom über einen Kondensator vom reversed Bias getrennt, nur der Wechselstromanteil passiert. In einem weiteren Kondensator werden die Ladungen gesammelt und durch einen Operationsverstärker verstärkt. Parallel zu dem Kondensator kann der Strom über einen Widerstand abfließen. Bei der Wahl des Widerstandes musste besonders darauf geachtet werden, dass er richtig dimensioniert ist. Ist er zu klein, so fließt der Strom nicht vollständig in den Kondensator und es werden zu kleine Spannungen gemessen. Durch einen zu groß gewählten Widerstand provoziert man, dass bei noch nicht abgeflossener Restladung im Kondensator schon das nächste Ereignis passiert.

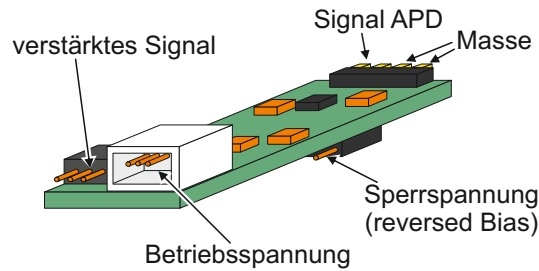


Abbildung 8: Die Grafik zeigt eine Ansicht des Vorverstärkers. Der Vorverstärker kann über verschiedene Methoden, die später diskutiert werden, an die APD angeschlossen werden. Es ist besonders darauf zu achten, dass die APD richtig verbunden wird. Dafür ist neben dem Masse-Pin der APD ein Punkt aufgedruckt.

Ein typisches Event ist in [Abbildung 9](#) dargestellt. Dabei handelt es sich um einen definierten Lichtpuls einer LED. Die Datenaufnahme erfolgte mit PROTO8 bei einer Temperatur von $-22,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ über ein Oszilloskop. Deutlich zu erkennen ist der Verlauf der Entladung des Kondensators nach

$$U(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \quad (1)$$

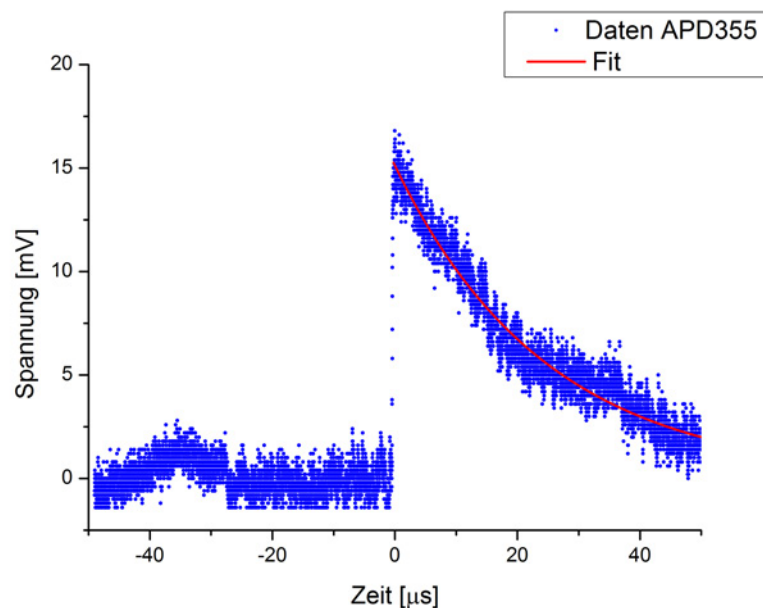


Abbildung 9: Typischer Verlauf eines Entladezyklus. Zur Veranschaulichung wurden die Daten mit dem theoretischen Verlauf nach [Gleichung 1](#) gefittet. Die Zerfallszeit beträgt $50\mu\text{s}$.

2.4.5. FlashADC

Um Einzelmessungen, wie z.B. das Messen des Rauschpegels verschiedener Verbindungen zwischen Vorverstärker und APD durchzuführen, ist die Verwendung eines Oszilloskops zu empfehlen. Das für PROTO8 verwendete Modell verfügt über ein USB-Port womit man die Daten zur Analyse auf einen Datenträger speichern kann. Möchte man jedoch eine automatisierte Datenaufnahme einrichten, welche in Verbindung eines geeigneten Triggersystems nur Daten aufzeichnet, die gewisse Bedingungen erfüllen, dann stellt sich dieses Vorhaben mit dem Oszilloskop als sehr umständlich dar. Für Abhilfe sorgt der schnelle Analog-Digital-Wandler auch FlashADC genannt. Pascal Lautz hat sich im Rahmen seiner Bachelorarbeit[7] ausführlich mit der Arbeitsweise und der Programmierung des FlashADC beschäftigt. Für detaillierte Informationen sei auf seine Arbeit verwiesen. An dieser Stelle wird auf die Grundlagen des FlashADC eingegangen, weil dieser in einem später diskutierten Versuchsaufbau Verwendung findet. Der schnelle Analog-Digital-Wandler vergleicht ein Signal, in diesem Fall das Ausgangssignal des Vorverstärkers, mit einer Kette von Referenzsignalen und gibt ein entsprechendes Bitmuster aus. Es gibt zwei Wege einen ADC zu realisieren. Eine Variante besteht darin das hineinkommende Signal mit einem einzigen Komparator, das ist das interne elektronische Bauteil, das den Vergleich durchführt, mit mehreren Referenzspannungen abzutasten. Dies erfordert aber mehrere Durchgänge pro Signal, was wiederum die Zeit zum Digitalisieren verlängert. Eine bessere Methode ist es jedem Bit einen eigenen Komparator zuzuweisen. Dabei vergleicht jeder Komparator das Signal mit nur einer Referenzspannung. Der Nachteil sind die hohen Kosten für einen solchen FlashADC. Hat man beispielsweise ein 16 Bit Signal folgt, dass $2^{16} - 1 = 65535$ Komparatoren benötigt werden. Für PROTO8 wird ein FlashADC der zweiten Variante der Firma Struck mit der Bezeichnung SIS 3301 benutzt. Neben der schnellen Verarbeitungszeit bietet er auch einen Trigger-Eingang, der später für den Myonen-Detektor in Kapitel 7 benötigt wird. Die Daten werden auf einem, neben dem FlashADC befindlichen, Computer gespeichert und können von dort zur Analyse abgerufen werden.

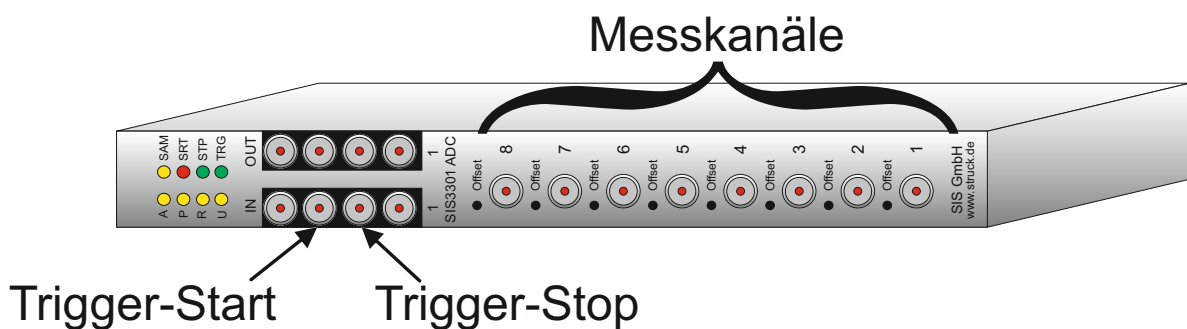


Abbildung 10: Die Grafik zeigt die Anschlussmöglichkeiten des verwendeten SIS 3301 FlashADC. Dabei handelt es sich um ein VME-Bus-System. Der FlashADC kann das Signal mit einer Abtast-Frequenz von 100 MHz, 50 MHz oder 25 MHz auslesen. Eine wichtige Eigenschaft des verwendeten FlashADC ist der Trigger-Eingang, womit er eventselektiv betrieben werden kann.

3. Auswertungsmethoden

Um die erhobenen Daten sinnvoll zu interpretieren ist es wichtig mit dem richtigen mathematischen Rüstzeug zu arbeiten. Dieses Kapitel behandelt die später angewendeten Methoden der Fehlerbetrachtung und Datenanalyse.

3.1. Fehlerfortpflanzung

Hängt eine physikalische Größe $f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ von N unabhängigen, fehlerbehafteten und Gaußverteilten Messwerten x_i ab, dann gilt die Gaußsche Fehlerfortpflanzung

$$\Delta f(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{df}{dx_i} \Delta x_i \right)^2} \quad (2)$$

3.2. Statistisch verteilte Messwerte

Zufällige Fluktuationen einer Messung werden mit der so genannten Normal- oder auch Gauß-Verteilung beschrieben. Die Wahrscheinlichkeitsdichte ist gegeben durch

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3)$$

Dabei ist μ der Erwartungswert und σ^2 die Varianz. Die Normierung ist so gewählt, dass

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx = 1 \quad (4)$$

Für die Rauschpegel-Analyse werden N Spannungsamplituden über einen Zeitintervall aufgenommen. In [Abbildung 11](#) ist ein typischer Spannungsverlauf eines Messintervalls aufgetragen.

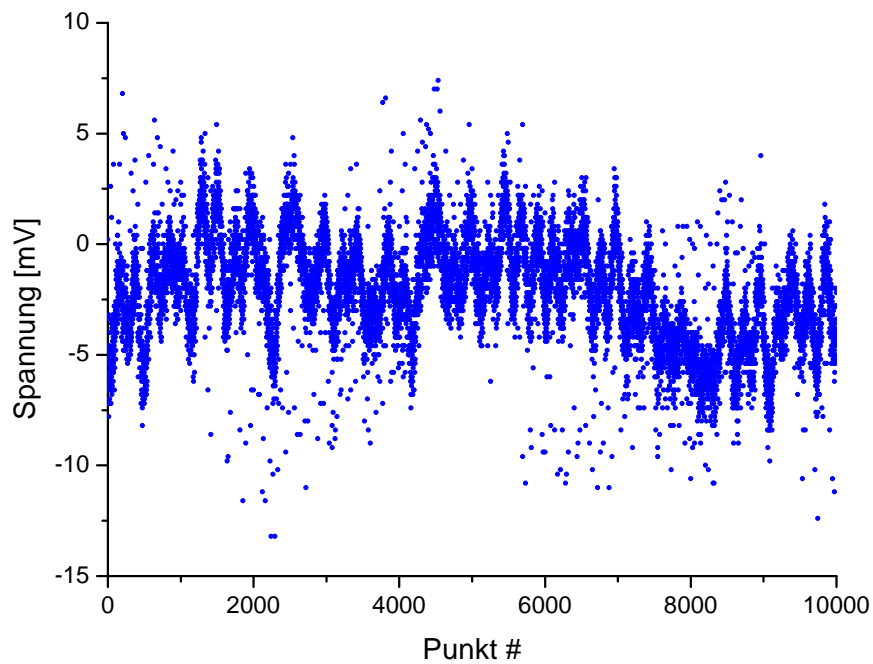


Abbildung 11: Typischer Spannungsverlauf für ein Messintervall von $N=10000$ Datenpunkten. Dabei entspricht ein Punkt 10 ns Aufnahmezeit. Die Abtastrate ist 10 Ms/s.

Man erkennt deutlich die Fluktuation um den Mittelwert der Spannung. Dabei treten bestimmte Spannungen häufiger auf als andere. Trägt man kleine Partialintervalle der Spannung gegen die Häufigkeit nebeneinander auf, erhält man ein Gauß-verteilttes Histogramm. Dieses wird mit [Gleichung 3](#) gefittet.

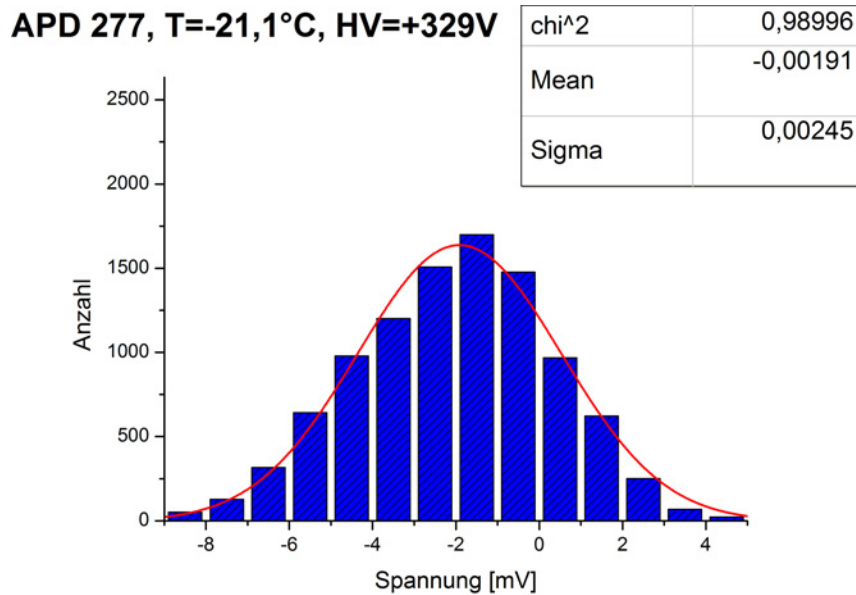


Abbildung 12: Das Histogramm zeigt die Häufigkeit der jeweiligen Spannungen an. Dafür werden dicht beieinander liegende Spannungen in Partialintervallen zusammengefasst. Der Gauß-Fit bestätigt die normalverteilten Spannungsamplituden. Mean entspricht dem Erwartungswert μ und Sigma der Standardabweichung σ . Sie sind in den Fit-Parametern in der Einheit Volt [V] angegeben.

Es wird nun ein Maß benötigt um die Qualität verschiedener Signale vergleichen zu können. Allgemein gilt, dass eine breite Verteilung schlechter als eine schmale Verteilung ist. Eine breite Verteilung bedeutet nämlich, dass die Spannungsamplituden stark um den Mittelwert streuen. Die Halbwertsbreite (FWHM) der Verteilung erfüllt genau die Anforderung die an das Maß gestellt wird. Da die Standardabweichung σ direkt proportional zur Halbwertsbreite ist ($\text{FWHM}=2\sqrt{2\ln 2}\sigma$), wird in dieser Auswertung die Standardabweichung als Maß benutzt.

4. Das atmosphärische Myon

Das Myon ist ein Elementarteilchen und gehört zu der Familie der Leptonen. Es trägt den Spin $S = \frac{1}{2}$ und besitzt eine Masse von etwa $M = 105,7\text{MeV}/c^2$ [4]. Es ist somit circa 207 mal schwerer als das Elektron, besitzt jedoch die gleiche Ladung wie dieses. Das Myon wechselwirkt schwach und elektromagnetisch. Es wird in der Atmosphäre durch kosmische Teilchen erzeugt, die in einem Teilchenschauer unter anderem in Pionen π zerfallen. Diese wiederum zerfallen in Myonen.

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

Für die Reaktionsrate an der Erdoberfläche gilt ungefähr, dass ein atmosphärisches Myon die Fläche einer Hand einmal pro Sekunde durchdringt. Beim Durchdringen von Materie durch elektromagnetisch wechselwirkende Teilchen kommt es zu verschiedenen Reaktionen. Die Bethe-Bloch-Formel (Gleichung 5) beschreibt den Energieverlust pro durchdrungener

Strecke von schweren Teilchen und weist ein sehr breites Minimum auf. Teilchen in diesem sehr breiten Impulsbereich werden minimalionisierende Teilchen (MIP) genannt.

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \quad (5)$$

- $K/A = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 / A$
- I : mittlere Anregungsenergie [eV]
- $\delta(\beta\gamma)$: Korrekturfaktor wegen Energieverlust durch Ionisation
- A : Atomare Masse des Absorbers
- Z : Kernladungszahl des Absorbers
- r_e : klassischer Elektronenradius
- z : Ladung des Streuteilchen
- N_A Avogadrozahl
- M : Masse des Streuteilchen

Für T_{max} gilt:

$$T_{max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e / M + (m_e / M)^2} \quad (6)$$

Bei größeren Energien spielt die Teilchenmasse M in T_{max} zunehmend eine Rolle. Im wesentlichen jedoch ist $\langle dE/dx \rangle$ eine Funktion von β .

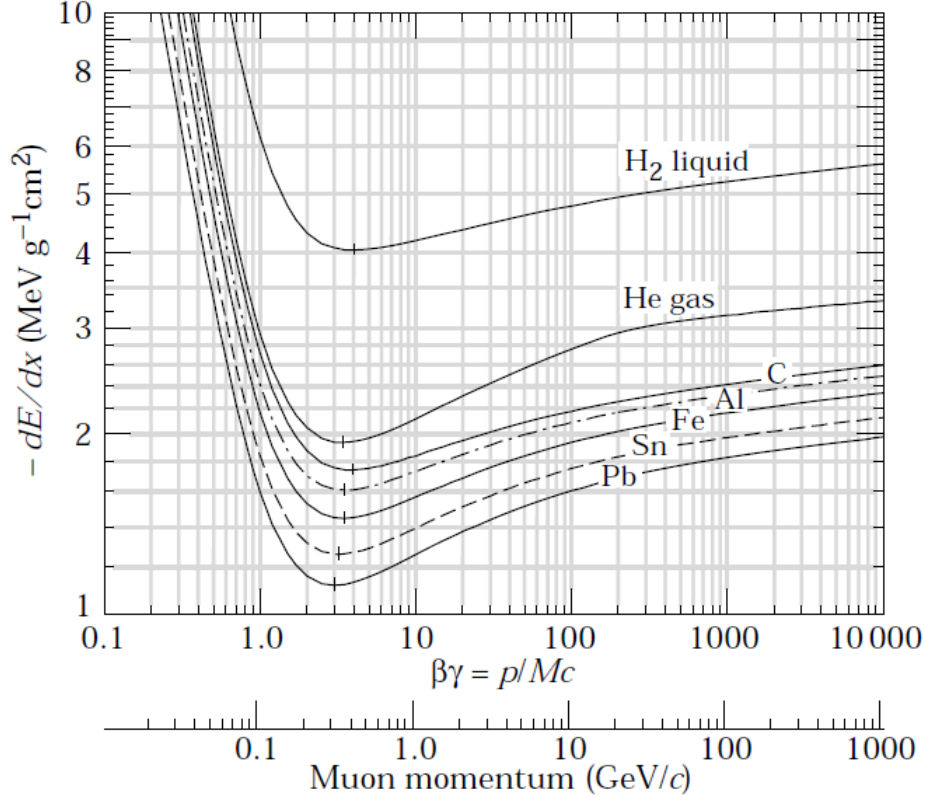


Abbildung 13: Der Plot zeigt die Abhängigkeit des Energieverlustes pro Strecke von β , also indirekt von der Geschwindigkeit des Teilchens, von verschiedenen Medien. Dabei werden Strahlungseffekte nicht berücksichtigt ($\beta\gamma < 1000$). Die Minima repräsentieren die minimal ionisierenden Teilchen. ([4], S.232)

Die Streuteilchen-Energien bei PANDA liegen unter 15 GeV. Insbesondere werden bei der Rückwärts-Endkappe maximal 0,7 GeV (Tabelle 1) Teilchen-Energien erwartet. In diesem Energiebereich beschreibt die Bethe-Bloch-Formel die Wechselwirkung zwischen Myon und den Bleiwolframat-Kristallen hinreichend genau. Bei PROTO8 können atmosphärische Myonen als Testteilchen für den Detektorbetrieb genutzt werden (Kapitel 7). Später wird die theoretisch erwartete Pulshöhe eines atmosphärischen Myons abgeschätzt. Somit können Aussagen darüber gemacht werden wie viel Energie von einem Myon im Kristall deponiert wird. Ferner kann bei der späteren Rauschanalyse ein Äquivalent der Rauschbreiten zur im Kristall deponierten Energie gezogen werden und die Messergebnisse aus einer Langzeitmessung mit dem Myonen-Detektor in Kapitel 7.3 interpretiert werden. Die Lichtausbeute LY des verwendeten PWO-II-Materials wurde von der PANDA-Kollaboration mit Hilfe eines Photomultipliers mit einer Quanteneffizienz von $Q_{eff} = 18\%$ bestimmt. Bei -25°C ergaben die Messung eine Lichtausbeute des Photomultipliers (LY_{PM}) von 90 Photoelektronen P_{e^-} pro MeV ([2], S.87). Dabei ist $P_{e^-} = n_{e^-} \cdot e$ mit n_{e^-} der Anzahl der Elektronen und e der Elementarladung. Das bedeutet für die Lichtausbeute des Kristalles

$$LY_{-25^\circ\text{C}} = \frac{90 \frac{P_{e^-}}{\text{MeV}}}{0,18 \frac{P_{e^-}}{\gamma}} = 500 \frac{\gamma}{\text{MeV}} \quad (7)$$

Bei +25 °C ergab die Messung 20 Photoelektronen pro MeV.

$$LY_{+25^\circ C} = \frac{20 \frac{P_{e^-}}{MeV}}{0,18 \frac{P_{e^-}}{\gamma}} = 111 \frac{\gamma}{MeV} \quad (8)$$

Die Fläche einer APD beträgt $A_{APD} = 14mm \cdot 6,8mm = 95,2mm^2$ [2] und deckt damit nur einen Bruchteil der Stirnfläche des Kristalls ab. Die Stirnfläche des Kristalls beträgt $A_{Kristall} = 24,4mm \cdot 24,4mm = 595,36mm^2$ [2]. Unter der Annahme von homogen verteilten Szintillationsphotonen wird nur der Bruchteil A von einer APD detektiert.

$$A = \frac{A_{APD}}{A_{Kristall}} = 0,16 \quad (9)$$

Eine weitere Größe ist der Verstärkungsfaktor M der in Kapitel 5 gesondert betrachtet wird. Er hängt von der Sperrspannung und der Temperatur ab und ist bei jeder APD unterschiedlich. Die verwendeten APD weisen eine Quanteneffizienz von $Q = 0,7 \frac{P_{e^-}}{\gamma}$ ([2], S. 87) auf. Der Vorverstärker besitzt einen Verstärkungsfaktor $G_c = 0,5 \frac{V}{pC}$ ([10], S. 4). Aus diesen Größen ergibt sich aus der Signalhöhe U_{max} die von einem Myon deponierte Energie E zu

$$E = \frac{U_{max}}{LY_{\pm 25^\circ C} \cdot A \cdot Q \cdot M \cdot G_c} \quad (10)$$

dabei ist die Spannung U_{max} und der Verstärkungsfaktor M fehlerbehaftet. Es folgt

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_{max}}{LY_{\pm 25^\circ C} \cdot A \cdot Q \cdot M \cdot G_c}\right)^2 + \left(\frac{U_{max} \cdot \Delta M}{LY_{\pm 25^\circ C} \cdot A \cdot Q \cdot M^2 \cdot G_c}\right)^2} \quad (11)$$

Wird beispielsweise ein Verstärkungsfaktor von $M = 140 \pm 10$ angenommen, dann entspricht eine Spannung $U = 1,0 \pm 0,1mV$ einer deponierten Energie von $E = 1,1 \pm 0,1MeV$ bei -25 °C.

5. Der Verstärkungsfaktor M der verwendeten APD

Da der Verstärkungsfaktor M von der Sperrspannung U_r und der Temperatur abhängt und zusätzlich noch bei jeder APD anders ist, handelt dieses Kapitel von der Bestimmung der individuellen Verstärkungsfaktoren der genutzten APD. Dies ist notwendig, weil noch keine Daten der Verstärkungsfaktoren vorliegen. Ferner sollen sämtliche APD im Rahmen einer Qualitätskontrolle vermessen werden. Das Verfahren zur Bestimmung der Verstärkungsfaktoren fand schon Anwendung in der Bachelorarbeit von Malte Deiseroth [8] und führte zu guten Ergebnissen. Dafür wird auf die von Dr. Andrea Wilms angefertigten Datenblätter[9] zurückgegriffen. Allgemein wird davon ausgegangen, dass sich der Verstärkungsfaktor linear zur Temperatur verhält, also $\Delta M / \Delta T = const.$ Es stellte sich jedoch heraus, dass ein exponentieller Verlauf besser geeignet ist um die Änderung zu beschreiben. Dies liegt auch daran, dass der Verstärkungsfaktor zusätzlich von der angelegten Sperrspannung abhängt.

5.1. Der Verstärkungsfaktors M bei Raumtemperatur

Die später diskutierte Messung für den relativen Verstärkungsfaktor R wurde bei den Temperaturen $T_h = +24,9^\circ C$ und $T_k = -22,9^\circ C$ durchgeführt. Es ist also wichtig zu wissen wie

groß der individuelle Verstärkungsfaktor bei der Temperatur T_h ist. Ferner führt dieser Wert durch Multiplikation mit dem relativen Verstärkungsfaktor R zum absoluten Verstärkungsfaktor M bei der Tieftemperatur T_k . In den folgenden Tabellen sind alle benötigten Werte aus den Datenblättern[9] der verwendeten APD zusammengetragen. Die Fehler der Temperaturen und der Verstärkungsfaktoren wurden aus der Skalierung der Plots bestimmt. Zum Zeitpunkt der Anfertigung der vorliegenden Bachelorarbeit lag kein Datenblatt der APD 355 vor. Der Verstärkungsfaktor bei T_h der APD 355 wird über das Datenblatt[10] des Herstellers abgeschätzt.

U_r [V]	APD	T [°C]	M	APD	T [°C]	M
330	89	$7,5 \pm 0,2$	70 ± 3	148	$7,5 \pm 0,2$	50 ± 3
		$14,5 \pm 0,2$	50 ± 3		$14,5 \pm 0,2$	40 ± 3
		$17,9 \pm 0,2$	45 ± 3		$17,9 \pm 0,2$	35 ± 3

Tabelle 3: Bekannte Verstärkungsfaktoren bei drei unterschiedlichen Temperaturen für die APD 277 und 355 bei einer Sperrspannung $U_r = +330V$ [9]

U_r [V]	APD	T [°C]	M	APD	T [°C]	M
330	277	$7,8 \pm 0,2$	55 ± 3	355	n.v.	n.v.
		$14,3 \pm 0,2$	45 ± 3		n.v.	n.v.
		$17,3 \pm 0,2$	35 ± 3		n.v.	n.v.

Tabelle 4: Bekannte Verstärkungsfaktoren bei drei unterschiedlichen Temperaturen für die APD 89 und 148 bei einer Sperrspannung $U_r = +330V$ [9]

Diese Werte werden nun aufgetragen und mit einem exponentiellen Fit der Form $M(T) = a \cdot e^{bT}$ approximiert.

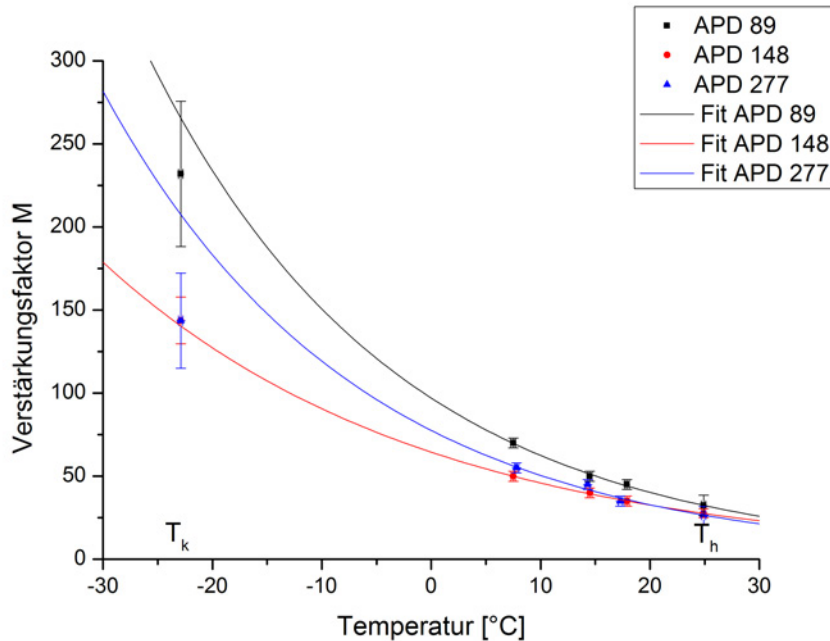


Abbildung 14: In diesem Plot sind die bekannten Verstärkungsfaktoren der APD 89, APD 148 und APD 277 aus den Datenblättern[9] zwischen T_k und T_h eingetragen. Mit diesen wurden auch die jeweiligen Fits erzeugt. Die Datenpunkte der APD bei T_h wurden direkt aus den Fitparametern bestimmt. Die Verstärkungsfaktoren bei T_k wurden über den, im folgenden bestimmten, relativen Verstärkungsfaktor R berechnet. Bei APD 89 und APD 148 liefert diese Methode im Rahmen der Fehler eine gute Übereinstimmung. APD 277 stellt sich als Ausreißer dar. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit der, im Rahmen der PANDA-Qualitätssicherung, geplanten APD-Vermessung um in Zukunft nicht mehr auf Approximationsverfahren zur Bestimmung des Verstärkungsfaktors zurückgreifen zu müssen.

APD	a	b	χ^2
89	$97,046 \pm 4,366$	$-0,044 \pm 0,003$	0,986
148	$64,492 \pm 1,341$	$-0,034 \pm 0,002$	0,995
277	$77,567 \pm 10,788$	$-0,043 \pm 0,011$	0,873
355	-	-	-

Tabelle 5: Die Fit-Parameter der exponentiellen Approximation. Es wurden dafür die bekannten Verstärkungsfaktoren bei drei bekannten Temperaturen aus den Datenblättern[9] der APD genutzt.

Um den Fehler des gewählten Fit-Modelles abzuschätzen wird zusätzlich ein linearer Fit gemacht und die Abweichung zu dem exponentiellen Fit an der zu bestimmenden Stelle als Fehler angenommen. Für die APD 355 gelten laut Herstellerangabe[10] folgende Parameter.

APD	Temperatur [°C]	U_r	M
355	25	336,4	50

Tabelle 6: Dies sind die Herstellerangaben zu APD 355. Damit lässt sich kein Fit wie bei den anderen APD erstellen. Die Temperatur weicht nur 0,1 °C von T_h ab. Darum können die angegebenen Parameter für eine Abschätzung benutzt werden.

Der Verstärkungsfaktor hängt exponentiell von der angelegten Sperrspannung U_r ab. Da aber nur ein Wert bekannt ist kann hier keine quantitative Approximation gemacht werden. Der Verstärkungsfaktor für APD 355 bei T_h und $U_r = 330V$ wird auf $M = 30 \pm 10$ abgeschätzt. Der groß gewählte Fehler repräsentiert die Ungenauigkeit bedingt durch die Abschätzung.

APD	$M(T_h)$	$\Delta M(T_h)$
89	32,4	6,1
148	27,7	2,7
277	26,6	5,3
355	30,0	10,0

Tabelle 7: Die Verstärkungsfaktoren der APD bei der Temperatur T_h wurden mit einem exponentiellen Fit ermittelt. Der Fehler wurde durch einen Vergleich zu einem linearen Fit bestimmt. Dies gilt nicht für APD 355. Bei dieser musste eine Abschätzung gemacht werden, weil kein Datenblatt in der Form der andern APD vorlag.

5.2. Der relative Verstärkungsfaktor R

Zur Bestimmung des relativen Verstärkungsfaktors R wird ein spezieller Versuchsaufbau gewählt. PROTO8 ist mit zwei Kristallen mit jeweils zwei APD bestückt. Die restlichen Kristalle dienen als Dummies. Der verwendete Anschlusstyp zwischen Vorverstärker und APD ist das Patchpanel mit Alurahmen, das in [Kapitel 6.5](#) genauer beschrieben wird. Zu bemerken ist, dass es sich im Folgenden um eine Relativmessung handelt und die Rauschcharakteristik der verschiedenen Anschlusstypen nicht relevant ist. Es soll der Quotient aus der Pulshöhe bei der Tieftemperatur T_k und T_h gebildet werden. Dafür muss ein definierter Lichtpuls eingebracht werden. Ein Frequenzgenerator generiert Rechteckimpulse von einer Periode $t_{periode} = 1ms$ und einer Breite $w = 80,00ns$. Die Spannungen betragen $U_{high} = 0V$ und $U_{low} = -4,346V$. Mit diesen Rechtecksignalen wird ein so genanntes LED-Driver-Board angetrieben. Dieses Driver-Board ist an ein Netzteil angeschlossen und verstärkt den Rechteckimpuls auf die Betriebsspannung der LED. Die LED wird in ein Glasfaser-Kupplungsstück mit einem zwei Komponenten Epoxidharz eingeklebt. Dies soll einem Verrutschen in der Halterung und damit eine Änderung der Intensität beim Umstecken vorbeugen. An das Kopplungsstück können nun Glasfaserkabel, die jeweils in einem Kristall zwischen der Reflektorfolie und dem Kristall enden, angeschlossen werden. Die Enden der Glasfaserkabel, die an den Kristallen enden, wurden mit einem Skalpell angespitzt und mit Sandpapier geschliffen. Damit soll erreicht werden, dass der Lichtpuls diffus in den Kristall eingestreuert wird. Beim präparieren von PROTO8 muss darauf geachtet werden, dass die Glasfaserkabel einen festen Sitz haben und nicht verrutschen können. Nur so ist zu garantieren dass sich die Intensität des Lichtpulses nicht ändert. Die Sperrspannung entspricht der später genutzten Spannung für die Rauschanalyse und dem Myonen-Detektor. Es muss darauf geachtet werden, dass sie in einem sinnvollen Verstärkungsbereich der APD liegt jedoch nicht so hoch ist, dass die APD im Tieftemperaturbetrieb durch den LED-Lichtpuls gefährdet wird. Die Sperrspannung $U_r = +329V$ erwies sich als geeignet. Mit einem Oszilloskop kann nun die Pulshöhe an jeder APD einzeln gemessen werden. Die Messung wird bei Raumtemperatur $T_h = 24,9\text{ °C}$ und bei Tieftemperatur $T_k = -22,9\text{ °C}$ durchgeführt. Der Quotient aus der Pulshöhe bei Tieftemperatur und Raumtemperatur führt auf den individuellen relativen Verstärkungsfaktor R der jeweiligen APD.

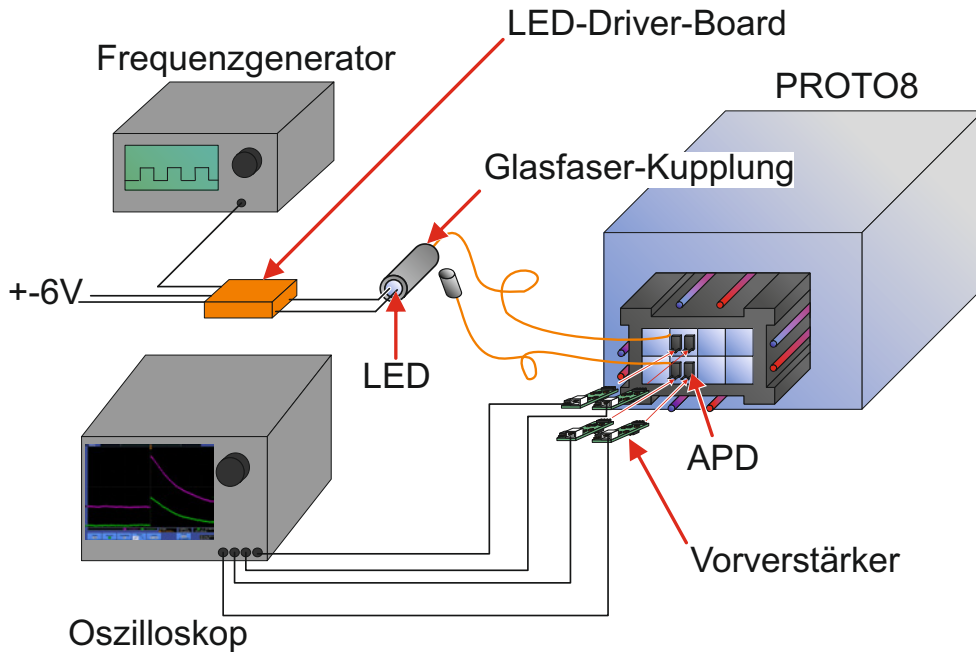
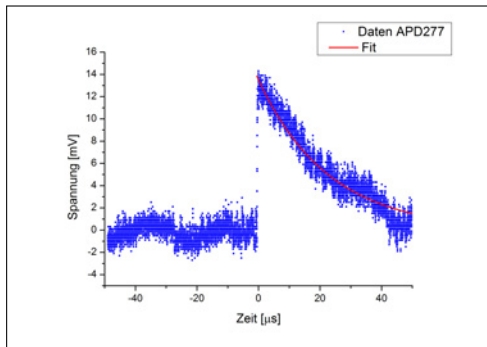
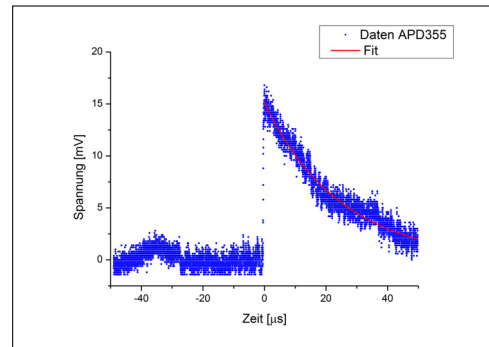
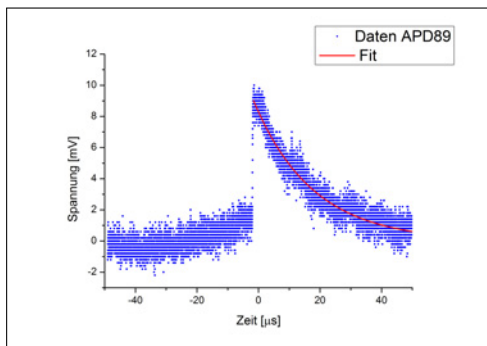
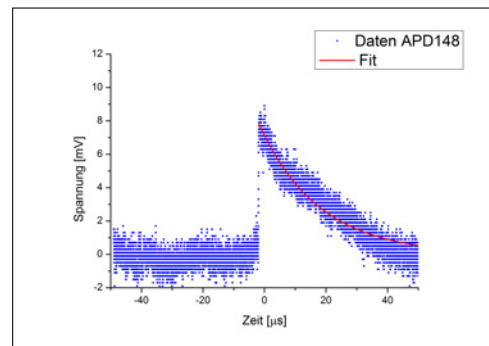


Abbildung 15: Die Illustration zeigt den Versuchsaufbau zur Bestimmung des relativen Verstärkungsfaktors R . Ein Frequenzgenerator treibt mit einem Rechteckpuls ein LED-Driver-Board an. Dieses verstärkt den Puls auf die Betriebsspannung der LED. Zu jedem Kristall führt ein Glasfaserkabel, welches an das Kuppelungsstück angeschlossen werden kann. Mit einem Oszilloskop wird dann das Signal aus den Vorverstärkern ausgelesen. Diese Messung wird bei der hohen Temperatur T_h und bei der tiefen Temperatur T_k durchgeführt.

Oszilloskop-Channel	APD	Vorverstärker	Hochspannung-Channel
1	277	62	A
2	355	63	B
3	89	32	A
4	148	58	B

Tabelle 8: Die verwendeten APD und Vorverstärker mit der jeweiligen Anschlussbelegung am Oszilloskop und dem Power Supply für die Hochspannung

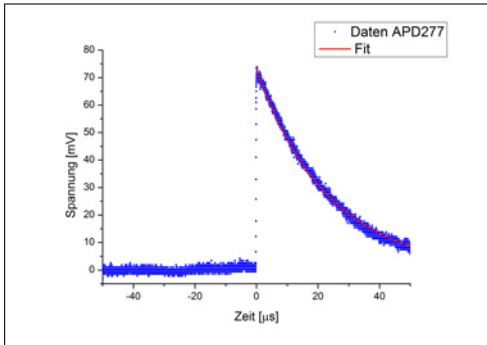
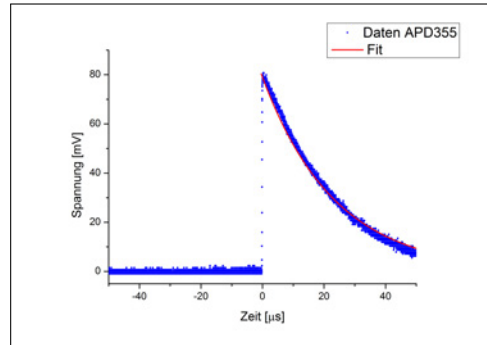
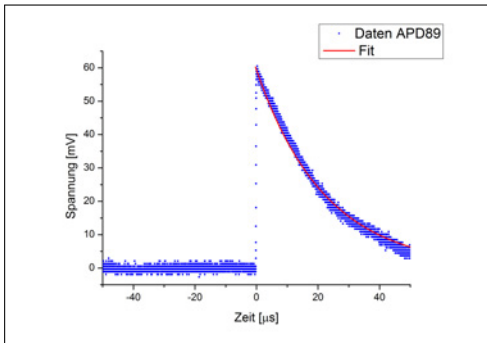
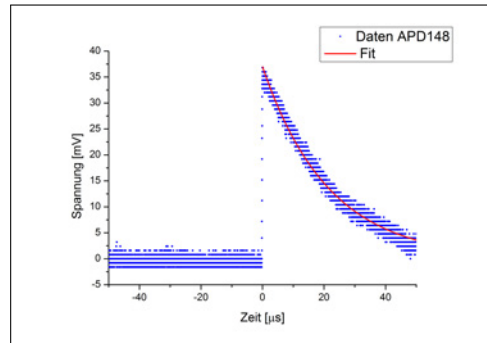
Die mit dem Oszilloskop aufgenommenen Daten der jeweiligen APD werden mit einer Baseline-Korrektur auf die Nulllinie der Spannungsachse gebracht. Dafür wird optisch der Bereich vor dem Puls ausgewählt und die Nulllinie auf den Mittelwert der statistischen Fluktuationen gelegt. Anschließend wird ein exponentieller Fit der Form $U(t) = U_0 \cdot e^{b(t-t_0)}$ vom Nullpunkt bis zum Ende der Abklingkurve durchgeführt. Der Fitparameter U_0 entspricht dann genau der Höhe des Peaks. Für die Warmmessung bei T_h ergeben sich folgende Plots.

Abbildung 16: APD 277 bei T_h Abbildung 17: APD 355 bei T_h Abbildung 18: APD 89 bei T_h Abbildung 19: APD 148 bei T_h

APD	Fit-Parameter U_0 [mV]	Fit-Parameter b [1/s]	χ^2
277	$13,52 \pm 0,05$	$-44020,15 \pm 259,89$	0,899
355	$15,13 \pm 0,03$	$-40427,12 \pm 148,48$	0,953
89	$8,29 \pm 0,02$	$-52185,07 \pm 232,75$	0,939
148	$7,13 \pm 0,03$	$-51694,82 \pm 302,15$	0,910

Tabelle 9: Dies sind die Fit-Parameter der Maximum-Bestimmung der jeweiligen Pulsen bei Raumtemperatur T_h . Relevant ist der Parameter U_0 , der das Maximum charakterisiert. Der Parameter b ist aus Vollständigkeitsgründen aufgeführt.

Analog wird nun dieses Verfahren für die tiefe Temperatur T_k durchgeführt. Dies führt auf folgende Plots

Abbildung 20: APD 277 bei T_k Abbildung 21: APD 355 bei T_k Abbildung 22: APD 89 bei T_k Abbildung 23: APD 148 bei T_k

APD	Fit-Parameter U_0 [mV]	Fit-Parameter b [1/s]	χ^2
277	$73,07 \pm 0,13$	$-42682,60 \pm 120,35$	0,973
355	$78,95 \pm 0,25$	$-42596,97 \pm 215,92$	0,920
89	$59,32 \pm 0,16$	$-44827,70 \pm 195,04$	0,941
148	$36,99 \pm 0,05$	$-46528,14 \pm 88,41$	0,988

Tabelle 10: Dies sind die Fit-Parameter der Maximum-Bestimmung der jeweiligen Pulse bei der tiefen Temperatur T_k . Relevant ist der Parameter U_0 , der das Maximum charakterisiert. Der Parameter b ist aus Vollständigkeitsgründen aufgeführt.

Für den relativen Verstärkungsfaktor gilt nun

$$R = \frac{U_0(T_k)}{U_0(T_h)} \quad (12)$$

mit dem Fehler nach Gaußscher-Fehlerfortpflanzung

$$\Delta R = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_0(T_k)}{U_0(T_h)}\right)^2 + \left(\frac{U_0(T_k)\Delta U_0(T_h)}{U_0(T_h)^2}\right)^2} \quad (13)$$

APD	R	ΔR
277	5,40	0,02
355	5,22	0,02
89	7,16	0,03
148	5,19	0,02

Tabelle 11: In der Tabelle sind die relativen Verstärkungsfaktoren der APD aufgetragen. Sie liegen alle in derselben Größenordnung. Lediglich der Faktor von APD 89 ist etwa 35% größer als die anderen. Der Fehler ergibt sich durch die Fit-Parameter.

5.3. Der Verstärkungsfaktor M bei tiefer Temperatur

Um nun den absoluten Verstärkungsfaktor M bei der Temperatur T_k anzugeben muss der approximierte Wert $M(T_h)$ aus Tabelle 7 mit dem relativen Verstärkungsfaktor multipliziert werden. Es gilt

$$M(T_k) = M(T_h) \cdot R \quad (14)$$

mit den Fehler nach Gaußscher-Fehlerfortpflanzung

$$\Delta M(T_k) = \sqrt{(R \cdot \Delta M(T_h))^2 + (M(T_h) \cdot \Delta R)^2} \quad (15)$$

APD	$M(T_k)$	$\Delta M(T_k)$
277	143,64	28,62
355	156,60	52,20
89	231,98	43,70
148	143,76	14,02

Tabelle 12: Dies sind die Verstärkungsfaktoren der jeweiligen APD bei der tiefen Temperatur T_k . Bedingt durch die Abschätzung bei APD 355, weist der Verstärkungsfaktor dieser APD einen größeren Fehler auf.

Die Verstärkungsfaktoren von APD 277, APD 355 und APD 148 liegen dicht beieinander. Lediglich APD 89 liegt ca. 57% über den anderen. Dies verdeutlicht aber wie wichtig die individuelle Bestimmung des Verstärkungsfaktors für jede bei PANDA genutzten APD ist.

6. Rauschanalyse verschiedener Anschlusstypen

Das folgende Kapitel behandelt die Rauschanalyse verschiedener Anschlusstypen zwischen Vorverstärker und APD. Die Ergebnisse dieser Analyse sind für die Weiterentwicklung von PROTO8 relevant. Ferner können die gewonnen Erkenntnisse in die laufenden Entwicklungen von zukünftigen Prototypen der Rückwärts-Endkappe, wie zum Beispiel PROTO18, einfließen. Die experimentelle Durchführung zeichnet sich dadurch aus, dass die Randbedingungen gleich gehalten werden und lediglich die Verbindungsart gewechselt wird. Bei allen Messungen wurde jeweils die Temperatur T_k angestrebt. Zum Wechseln der Verbindungstypen wurde aufgewärmt und danach wieder abgekühlt. Somit können direkt aus dem Vergleich der

Rauschbreiten Rückschlüsse auf die Qualität der Verbindungstypen getroffen werden. Die hier untersuchten Verbindungen sind *die Kapsel-Lösung*, *Twisted-Pair*, *Patchpanel (PCB)*, *Patchpanel mit Alurahmen* und *Patchpanel mit Twisted-Pair*. Sie werden im Folgenden nacheinander beschrieben und analysiert. Das Experiment wird mit PROTO8 durchgeführt. Die allgemeine Vorgehensweise ist in [Kapitel 2.4.1](#) beschrieben. Es wird ein Kristall mit zwei APD für die Messung genutzt. Sieben weitere Kristalle dienen als Dummy. Zum Auslesen der Signale wird ein Oszilloskop benutzt.

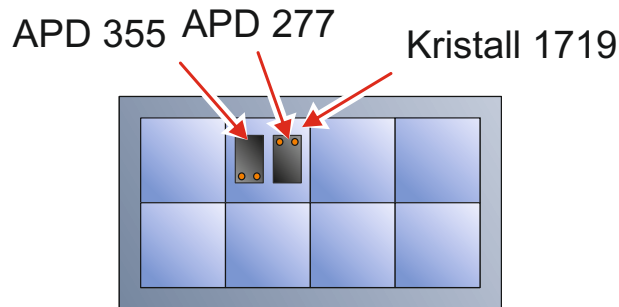


Abbildung 24: Die Grundkonfiguration für die Messung der Rauschbreiten. Der Kristall 1719 ist mit APD 355 und APD 277 bestückt. Sieben weitere Kristalle dienen als Dummy. Die Vorverstärker werden mit den APD nacheinander mit den verschiedenen Anschlussstypen verbunden und das Signal der Verstärkern mit dem Oszilloskop aufgenommen

Oszilloskop-Channel	APD	Vorverstärker	Hochspannung-Channel
1	277	62	A
2	355	63	B

Tabelle 13: Für alle Analysen in diesem Kapitel gilt diese Channel-Belegung.

Für die Auswertung der Rauschbreiten werden die Daten aus der Messung bei tiefer Temperatur mit eingeschalteter Hochspannung genommen, da ähnliche Bedingungen auch später in der Rückwärts-Endkappe vorliegen. Um die Einschränkung auf die Daten der Messung bei tiefer Temperatur quantitativ zu rechtfertigen werden zuerst die Rauschbreiten der Messung bei Raumtemperatur mit der Messung bei tiefer Temperatur für einen Anschlussstyp bei eingeschalteter Hochspannung exemplarisch verglichen.

6.1. Der Einfluss der Temperatur auf die Rauschbreite

Die thermisch bedingte Vergrößerung der Rauschbreiten hängt im Wesentlichen vom Vorverstärker und der Avalanche-Photodiode ab. Bei der Avalanche-Photodiode können neben der von Photonen hervorgerufenen Anhebung von Elektronen aus dem Valenz- in das Leitungsband auch thermisch bedingte Gitterschwingungen diesen Effekt hervorrufen. Die Folge ist, dass ein Strom fließt obwohl gar kein Photon in die APD eingefallen ist. Beim Vorverstärker verkleinert sich das Rauschen bei -25 °C um 15% im Gegensatz zu $+25\text{ °C}$ [3][5]. Exemplarisch wird nun die Rauschbreite mit dem Anschlussstyp *Kapsel-Lösung* ([Kapitel 6.2](#))

bei Raumtemperatur und herunter gekühltem Aufbau verglichen. Der Temperaturfühler befindet sich direkt neben dem Messkristall. Die Messung bei Raumtemperatur wurde bei $T=31,5$ °C und die Messung bei herunter gekühltem Aufbau bei $T=-20,9$ °C durchgeführt. Es liegt also eine Differenztemperatur von $\Delta T=52,4$ °C vor. Im Folgenden sind die Frequenzverteilungen beider Kanäle bei den jeweiligen Temperaturen dargestellt. Man erkennt deutlich die schmalere Verteilung bei der tiefen Temperatur. Dies drückt sich auch durch die kleinere Standardabweichung aus.

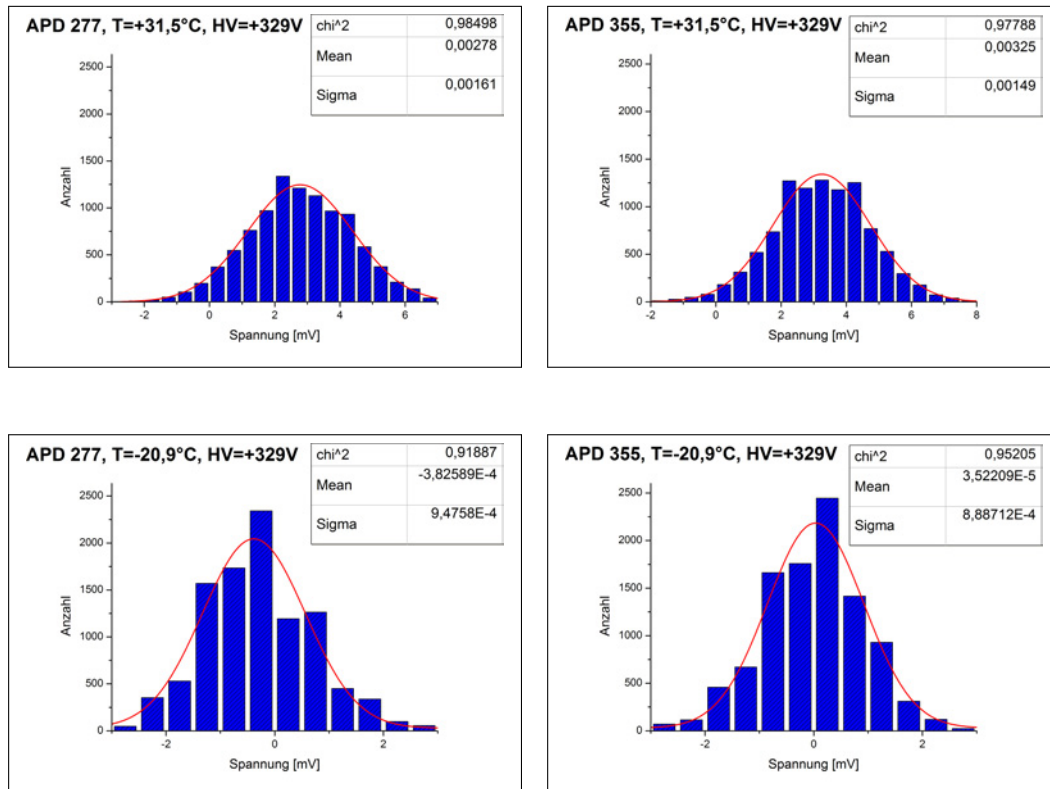


Abbildung 25: Dies sind die Verteilungen der Rauschmessungen für unterschiedliche Temperaturen. Dafür wurde die so genannte Kapsel-Lösung verwendet, die in Kapitel 6.2 ausführlich erklärt wird. Die beiden oberen Histogramme stellen die Signalmessungen der jeweiligen APD bei Raumtemperatur ($T=31,5$ °C) dar. Die beiden unteren Histogramme sind die Messungen bei tiefer Temperatur ($T=-20,9$ °C). Deutlich zu erkennen ist, dass die Verteilungsbreiten bei der tiefen Temperatur wesentlich schmalere sind als bei Raumtemperatur.

Die Standardabweichungen sind in Tabelle 14 in mV als auch in MeV deponierter Äquivalenzenergie angegeben. Zur Umrechnung wurde Gleichung 10 benutzt. Dabei ist zu beachten, dass sich diese Formel auf +25 °C bzw. -25 °C bezieht und dadurch gerade bei der Warmmessung mit einer Abweichung zu rechnen ist. Es wurde der in Kapitel 5 bestimmte Verstärkungsfaktor für T_h bzw. T_k der jeweiligen APD benutzt. Spätere Analysen werde bei annähernd -25 °C durchgeführt womit die Umrechnung dort genauer ist. Für den relativen Vergleich spielt diese Abweichung an dieser Stelle eine untergeordnete Rolle. Vergleicht man die gemittelten Rauschbreiten in mV der Messung bei Raumtemperatur und der Messung bei tiefer

	APD 277	APD 355	Mittelwert
σ bei T=+31,5 °C [mV]	1,610	1,490	1,550
σ bei T=-20,9 °C [mV]	0,948	0,889	0,919
σ bei T=+31,5 °C [MeV]	9,724	7,979	8,852
σ bei T=-20,9 °C [MeV]	1,060	0,912	0,986

Tabelle 14: Dies sind die Standardabweichungen der Verteilungen in mV (erste beiden Zeilen) als auch in MeV (letzte beiden Zeilen) deponierter Äquivalenzenergie. Die Messungen wurde mit der Kapsel-Lösung durchgeführt, die in [Kapitel 6.2](#) ausführlich erklärt wird.

Temperatur so ist die Breite bei T=+31,5 °C im Gegensatz zu T=-20,9 °C um 69% erhöht. Vergleicht man die Rauschbreiten in MeV verbessert sich die Situation überproportional, da sich durch die temperaturabhängige Änderung der Verstärkungsfaktoren das Verhältnis zwischen deponierter Energie und Signalspannung am Ausgang ändert. Bedingt durch den geringen Verstärkungsfaktor bei Raumtemperatur ist die Rauschbreite in äquivalenten MeV dort um den Faktor 9 größer als bei tiefer Temperatur. Also ist die Kühlung der Rückwärts-Endkappe nicht nur für die Lichtausbeute der Bleiwolframat-Kristalle wichtig, sondern auch wegen des temperaturabhängigen Rauschverhaltens der Avalanche-Photodioden und der Vorverstärker unabdingbar. Im Folgenden werden nur noch die Messungen bei tiefer Temperatur der Anschlusstypen betrachtet, weil nur diese, aus den schon genannten Gründen, relevant sind.

6.2. Die Kapsel-Lösung

Die Idee der Kapsel-Lösung ist es, den Vorverstärker mittels Kunststofflamellen zu fixieren. Dabei ist es möglich den Vorverstärker direkt an die Kapsel mit Kunststoffschrauben zu verschrauben. Da die Kapsel per 3D-Druck aus Kunststoff gefertigt ist und dieser ein geringen Wärmeleitkoeffizienten aufweist, ist der Kristall gut vor der Wärmeentwicklung der Vorverstärker geschützt. Der Nachteil dieser Lösung ist, dass die Vorverstärker aus der Kapsel herausragen und in den Anschlussbereich des Nachbarkristalls hineinragen. Darum scheidet diese Lösung von vornherein für den endgültigen Betrieb der Rückwärts-Endkappe aus. Der prinzipielle Aufbau wird in [Abbildung 26](#) dargestellt.

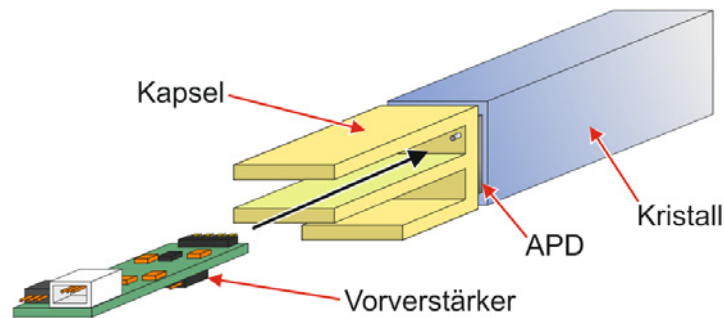


Abbildung 26: Die Grafik zeigt einen Bleiwolframat-Kristall mit der Kapsel-Lösung. Der Vorverstärker wird in die Kapsel geschoben und mit der APD verbunden. Optional kann der Vorverstärker zur Verbesserung der mechanischen Stabilität mit Kunststoffschrauben an die Kapsel geschraubt werden.

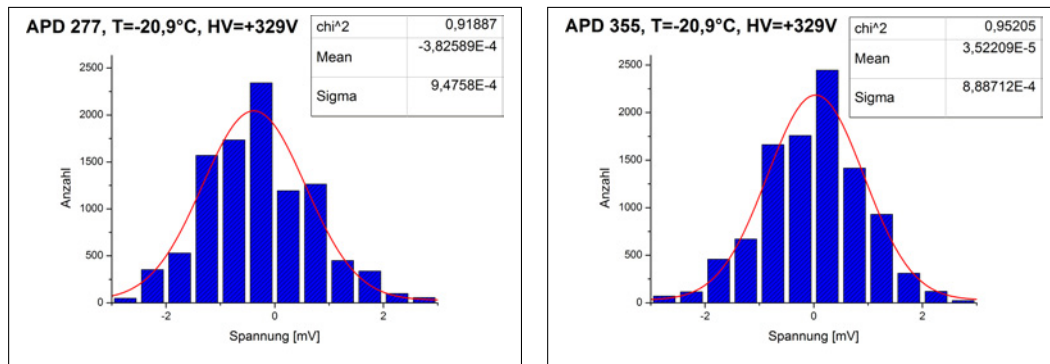


Abbildung 27: Dies sind die Verteilungen der Rauschanalyse für die Kapsel-Lösung. Links ist die Verteilung für APD 277 und rechts die für APD 355. Die Messung wurde bei einer Temperatur von $T=-20,9\text{ °C}$ durchgeführt.

T=-20,9 °C	APD 277	APD 355	Mittelwert
σ [mV]	0,948	0,889	0,919
σ [MeV]	1,060	0,912	0,986

Tabelle 15: Dies sind die Standardabweichungen der Verteilungen in mV als auch in MeV deponierter Äquivalenzenergie. Die Daten wurden mit der Kapsel-Lösung bei T=-20,9 °C aufgenommen. Die Vorverstärker befinden sich dabei zwischen Kunststofflamellen.

6.3. Twisted-Pair

Bei der Twisted-Pair Methode werden 5-6 cm lange Kupferkabel miteinander verdreht und an Steckverbindungen gelötet. Durch das Verdrehen soll eine Abschirmung erzielt werden. Die APD und der Vorverstärker werden dann mit dieser Kabeleinheit verbunden. Der Vorteil dieser Methode ist, dass der Vorverstärker relativ weit von APD und dem Kristall entfernt ist. So soll einer thermische Interaktion dieser Bauelemente so gut es geht vorgebeugt werden. Der Nachteil ist, dass die Kabel als Antennen wirken und es durch elektromagnetische Strahlung zu Störungen kommen kann. Zudem ist diese Methode nicht besonders kompakt, was den Aufbau, gerade bei vielen angeschlossenen APD, unübersichtlich macht. Die Methode ist in [Abbildung 28](#) illustriert.

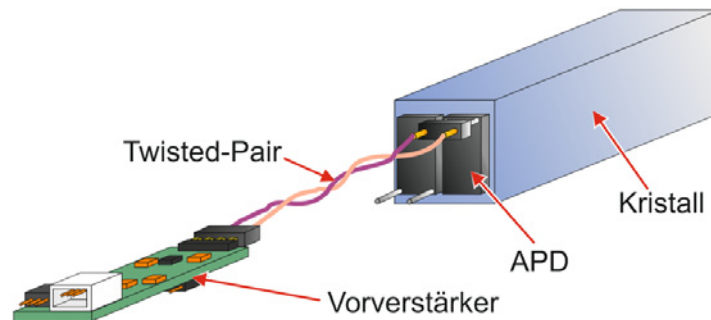


Abbildung 28: Die Grafik zeigt die Twisted-Pair Verkabelung. Verstärker und APD werden mit einem verdrehten Stück Kabel verbunden. Der damit erreichte Abstand zwischen Vorverstärker und APD soll den thermischen Einfluss des Vorverstärkers auf APD und Kristall minimieren.

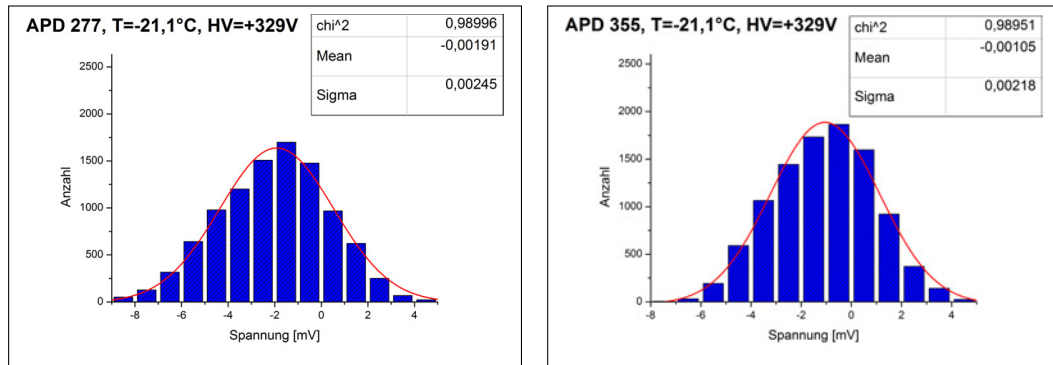


Abbildung 29: Dies sind die Verteilungen der Rauschanalyse für die Twisted-Pair Verkabelung. Links ist die Verteilung für APD 277 und rechts die für APD 355. Die Messung wurde bei einer Temperatur von $T=-21,1\text{ °C}$ durchgeführt.

$T=-21,1\text{ °C}$	APD 277	APD 355	Mittelwert
$\sigma[\text{mV}]$	2,450	2,180	2,315
$\sigma[\text{MeV}]$	2,740	2,236	2,448

Tabelle 16: Dies sind die Standardabweichungen der Verteilungen in mV als auch in MeV deponierter Äquivalenzenergie. Die Daten wurden mit der Twisted-Pair Verkabelung aufgenommen. Die APD werden dafür mit einem Stück verdrehtem Kabel an die Vorverstärker angeschlossen. Die Messung wurde bei einer Temperatur $T=-21,1\text{ °C}$ durchgeführt.

6.4. Patchpanel

Das Patchpanel ist ein kleine Platine, die APD und Vorverstärker verbindet. Dafür wird eine Trägerplatte auf die APD geklebt. Die Trägerplatte verfügt über Bohrungen für die Pins der Photodioden. Das Patchpanel ist so konstruiert, dass man es in die Bohrungen der Trägerplatte schieben kann (Abbildung 30). Der Vorverstärker wird wiederum auf die Pins des Patchpanel geschoben. Diese Methode zeichnet sich dadurch aus, dass die Vorverstärker einen festen Halt haben. Außerdem können zwei Vorverstärker geschickt mit Isolierband zu einer Art Stecker zusammen gefügt werden. Die Verbindung ist somit kompakt und kann schnell an- und abgeschlossen werden. Der Nachteil ist, dass sich der Vorverstärker relativ nahe an der APD und dem Kristall befindet, wodurch es zu einer thermischen Ankopplung kommt.

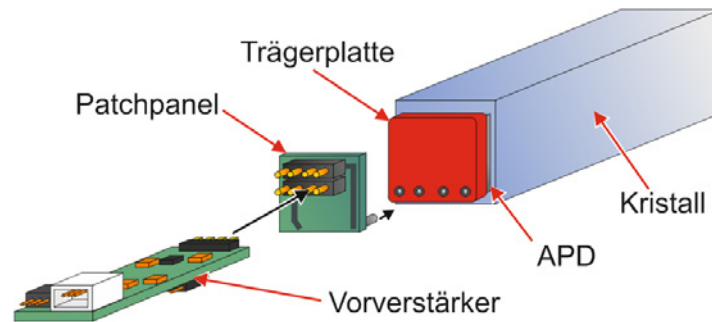


Abbildung 30: Die Illustration zeigt die Verwendung des Patchpanels. Dieses wird auf die angeklebte Trägerplatte geschoben. Der Vorverstärker wird wiederum auf das Patchpanel gesteckt.

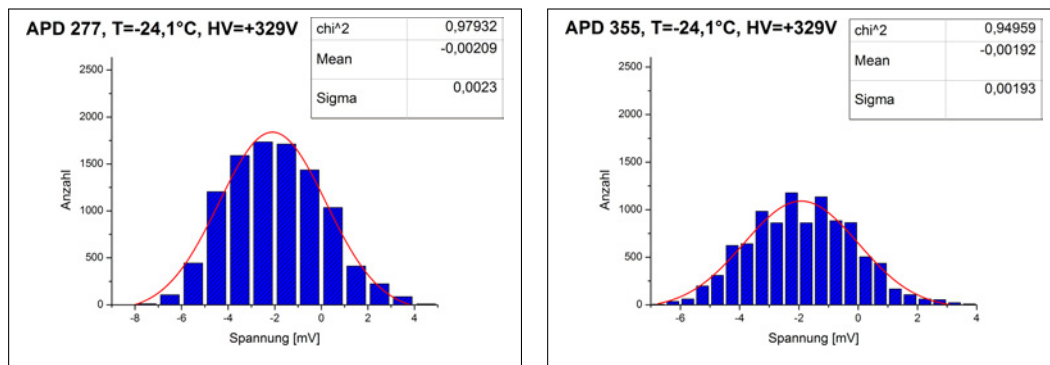


Abbildung 31: Dies sind die Verteilungen der Rauschanalyse für das Patchpanel. Links ist die Verteilung für APD 277 und rechts die für APD 355. Die Messung wurde bei einer Temperatur von $T = -24,1^\circ\text{C}$ durchgeführt.

$T = -24,1^\circ\text{C}$	APD 277	APD 355	Mittelwert
σ [mV]	2,300	1,930	2,115
σ [MeV]	2,572	1,980	2,276

Tabelle 17: Dies sind die Standardabweichungen der Verteilungen in mV als auch in MeV deponierter Äquivalenzenergie. Die Daten wurden mit dem Patchpanel bei $T = -24,1^\circ\text{C}$ aufgenommen. Dafür werden die APD über eine kleine Platine mit den Vorverstärkern verbunden.

6.5. Patchpanel mit Aluminiumrahmen

Die Patchpanel Methode mit Aluminiumrahmen ist die Weiterentwicklung der Patchpanel Methode. Dabei ist der Grundaufbau der gleiche. Der Unterschied liegt darin, dass ein Aluminiumrahmen über die Trägerplatte geschoben wird. Der Aluminiumrahmen schließt bündig mit den Seiten des Kristalls und den Spitzen der Pins des Patchpanels ab. Da Aluminium einen hohen Wärmeleitkoeffizienten besitzt, erhofft man sich eine gute thermische Ankopplung.

lung an die Kühlung von PROTO8. Der Alurahmen umfasst gerade die Kontaktstelle zwischen Vorverstärker, APD und Kristall, an der es wichtig ist Wärme abfließen zu lassen.

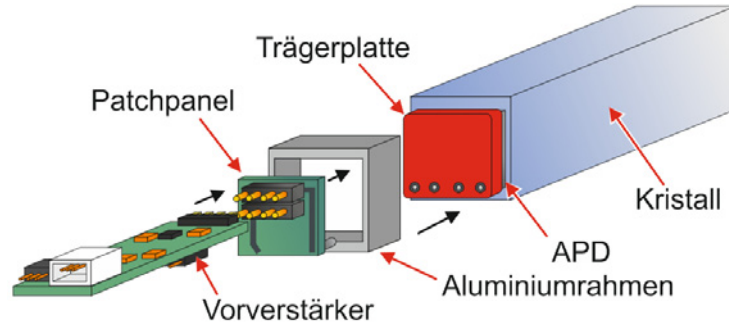


Abbildung 32: Die Grafik zeigt das Patchpanel mit dem Aluminiumrahmen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Patchpanel Methode, wird mit der Verwendung eines Aluminiumrahmens eine bessere thermische Ankopplung an die Kühlung erzielt.

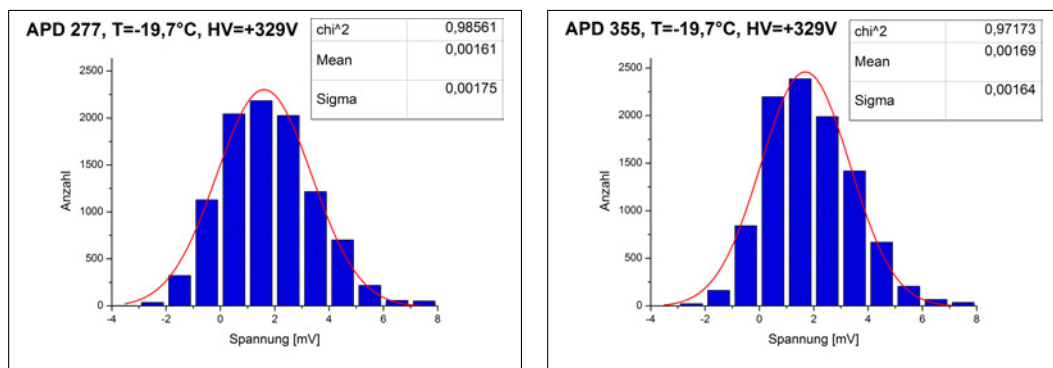


Abbildung 33: Dies sind die Verteilungen der Rauschanalyse für das Patchpanel mit dem Aluminiumrahmen. Links ist die Verteilung für APD 277 und rechts die für APD 355. Die Messung wurde bei einer Temperatur von $T=-19,7\text{ °C}$ durchgeführt.

T=-19,7 °C	APD 277	APD 355	Mittelwert
σ [mV]	1,750	1,640	1,695
σ [MeV]	1,957	1,682	1,820

Tabelle 18: Dies sind die Standardabweichungen der Verteilungen in mV als auch in MeV deponierter Äquivalenzenergie. Die Daten wurden mit der Patchpanel-Methode mit Aluminiumrahmen bei $T=-19,7\text{ °C}$ aufgenommen. Dafür werden die APD über eine kleine Platine mit den Vorverstärkern verbunden. Zusätzlich sorgt ein aufgeschobener Aluminiumrahmen für eine bessere thermische Ankopplung an das Kühlsystem.

6.6. Patchpanel mit Twisted-Pair

Bei der Verwendung eines Patchpanels mit Twisted-Pair Kabeln wird ein Twisted-Pair-Kabel mit den Pins des Patchpanels verlötet. Die Kontaktstellen werden mit Schrumpfschläuchen isoliert. Wie schon bei der herkömmlichen Twisted-Pair-Methode wird durch den Abstand zwischen Vorverstärker und Patchpanel eine thermische Abschirmung erzielt. Es liegen jedoch ebenfalls die Nachteile der Twisted-Pair Verkabelung vor.

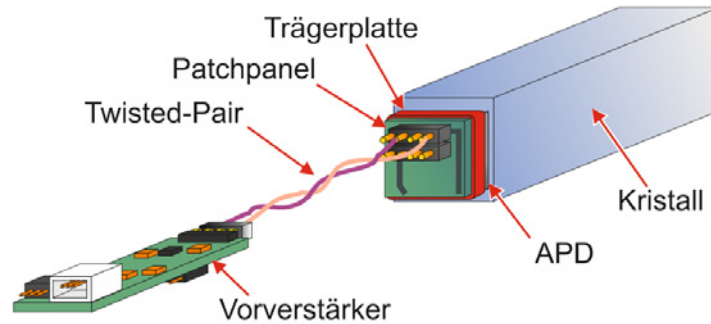


Abbildung 34: Die Illustration zeigt die Patchpanel mit Twisted-Pair Methode. Dafür wird ein Twisted-Pair-Kabel direkt an das Patchpanel gelötet und mit dem Vorverstärker verbunden.

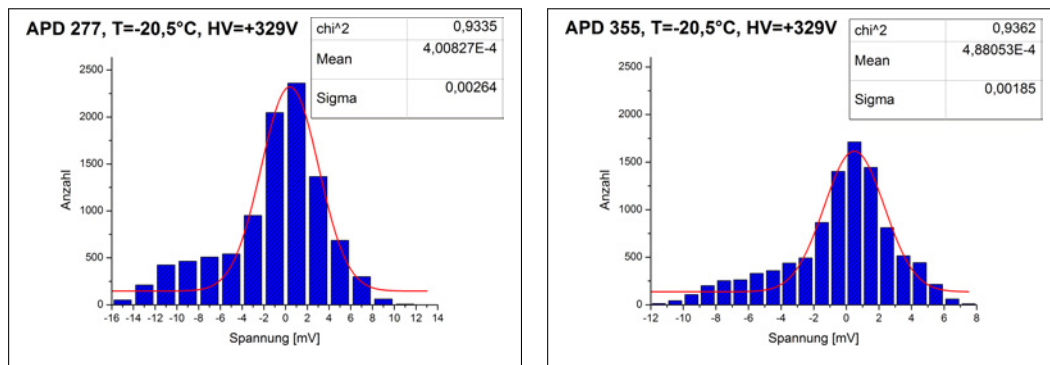


Abbildung 35: Dies sind die Verteilungen der Rauschanalyse für die Patchpanel mit Twisted-Pair Methode. Links ist die Verteilung für APD 277 und rechts die für APD 355. Die Messung wurde bei einer Temperatur von $T=-20,5$ °C durchgeführt.

T=-20,5 °C	APD 277	APD 355	Mittelwert
σ [mV]	2,640	1,850	2,245
σ [MeV]	2,953	1,898	2,426

Tabelle 19: Dies sind die Standardabweichungen der Verteilungen in mV als auch in MeV deponierter Äquivalenzenergie. Die Daten wurden mit der Patchpanel mit Twisted-Pair Methode bei -20,5 °C aufgenommen. Dabei wird der APD mit einem Patchpanel verbunden, an dem eine Twisted-Pair Verkabelung fest gelötet ist. Diese wird dann mit den Vorverstärker verbunden.

6.7. Vergleich der verschiedenen Methoden

Vergleicht man jeweils die Rauschbreiten der beiden Channels, also APD 277 mit APD 355 fällt auf, dass diese Breiten dicht beieinander liegen. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Rauschbreiten im wesentlichen von dem Anschlusstyp abhängen und die individuellen Charakteristika der APD und des Vorverstärkers eine untergeordnete Rolle spielen. Dies legitimiert, für den Vergleich der Anschlussarten untereinander, die jeweiligen Mittelwerte der Rauschbreiten zu betrachten.

Anschlussart	Mittelwert σ [mV]	Mittelwert σ [MeV]
Die Kapsel-Lösung	0,919	0,986
Twisted-Pair	2,315	2,448
Patchpanel	2,115	2,276
Patchpanel mit Alurahmen	1,695	1,820
Patchpanel mit Twisted-Pair	2,245	2,426

Tabelle 20: Zur besseren Übersicht sind hier die Mittelwerte der Rauschbreiten aller Anschlussarten in mV und MeV deponierte Äquivalenzenergie aufgetragen.

Der Anschlusstyp mit der geringsten Rauschbreite ist die Kapsel-Lösung. Aus dem in [Kapitel 6.2](#) schon genannten Grund kann diese Realisierung aber nicht für den Betrieb mit mehreren Kristallen in PROTO8 genutzt werden. Diese Methode stellt jedoch das bestmöglich erreichbare Ergebnis dar und wird für den Vergleich als Referenzmethode benutzt. Dabei gilt

$$\eta_{\text{mV/MeV}} = \frac{\sigma_{\text{Methode X}}}{\sigma_{\text{Kapsel-Lösung}}} \quad (16)$$

Anschlussart	η_{mV}	η_{MeV}
Twisted-Pair	2,519	2,483
Patchpanel	2,301	2,308
Patchpanel mit Alurahmen	1,844	1,846
Patchpanel mit Twisted-Pair	2,443	2,461

Tabelle 21: Diese Tabelle gibt an um welchen Faktor η die Verteilungen der Anschlussarten breiter sind als die Verteilungsbreite der Kapsel-Lösung, die als Referenzmethode gewählt wurde.

Die beste zu realisierende Anschlussart ist nach [Tabelle 21](#) das Patchpanel mit Aluminiumrahmen. Es kann jedoch gesagt werden, dass alle Anschlussarten in der selben Größenordnung liegen und aus Konstruktionsgründen die bequemste Realisierung gewählt werden kann. Bei diesem Experiment wurde besonders darauf geachtet, dass die Randbedingungen gleich gehalten wurden. Jedoch ließ sich nicht vermeiden, dass die Temperatur bei jedem Messvorgang nicht exakt die selbe war. Dies lag an dem benutzten Kühler dessen Leistung nicht ausreichte um mit den sommerlichen Temperaturen fertig zu werden. Da diese Schwankungen aber nur in einem Bereich von ca. 4 °C sind bleibt die Relevanz der Daten und die Interpretation erhalten. Für den Myonen-Detektor im nächsten Kapitel wurde ein leistungsstärkerer Kühler benutzt, der in der Lage ist PROTO8 auf -25 °C zu halten. Aus den Messdaten dieses Kapitels lässt

sich zusätzlich noch eine Faustformel ableiten. Demnach entspricht bei Betriebstemperatur von PROTO8 von -25 °C 1 mV ungefähr 1 MeV deponierter Äquivalenzenergie.

7. PROTO8 als Myonen-Detektor

Bei diesem Experiment wird PROTO8 für den Detektor-Betrieb gerüstet. Es soll die von atmosphärischen Myonen in den Kristallen deponierte Energie mit einem automatischen Aufnahmesystem gemessen werden. Dieser Versuch zeichnet sich dadurch aus, dass er viele Elemente vorangegangener Bachelorarbeiten vereinigt und PROTO8 erstmals als funktionstüchtiger Detektor genutzt werden kann. Der Detektor-Betrieb von PROTO8 in der gewünschten Form steht im wesentlichen auf drei Säulen. Die erste Säule ist die sinnvolle Bestückung von PROTO8 mit Messkristallen, APD und Vorverstärker. Dafür sind aktuelle Erkenntnisse dieser Bachelorarbeit in die Wahl des Anschlusstypen eingeflossen. Es wurde auf die Patchpanel mit Aluminiumrahmen Methode zurückgegriffen, die sich durch einen geringen Rauschpegel und bequemer Installation auszeichnet. Die zweite Säule ist die Konstruktion eines Trigger-Systems, dass beim passieren von Myonen die Datenaufnahme startet. Die dritte und letzte Säule ist die automatische Datenaufnahme über einen FlashADC. Im Folgenden werden diese Punkte einzeln diskutiert. Zm Schluss werden die mit diesem System aufgenommene Daten ausgewertet und interpretiert.

7.1. Die Konfiguration von PROTO8

Auch für diesen Versuch gilt der in [Kapitel 2.4.1](#) diskutierte Grundaufbau von PROTO8. Für die Kühlung wird ein neuer leistungsstarker Kühler mit der Bezeichnung HAAKE DC50 der Firma Thermo SCIENTIFIC benutzt. Mit diesem Kühler ist es wegen seiner höheren Kühlleistung möglich PROTO8 auf konstant -25 °C zu halten. Die Kristall- und APD-Konfiguration ist in [Abbildung 36](#) zu betrachten. Als Anschlusstyp wird das in [Kapitel 6.5](#) behandelte Patchpanel mit Aluminiumrahmen gewählt. Zwei Vorverstärker werden jeweils mit Schaumstoff und Isolierband zu einem Stecker zusammengefügt. Dies macht die Einrichtung von PROTO8 wesentlich bequemer. Ein Temperaturfühler wird direkt neben die Messkristalle in Höhe der Verbindungsstellen zwischen Vorverstärker, Patchpanel und APD fixiert. Da für das in [Kapitel 7.2](#) benutzte Trigger-System negative Hochspannung benötigt wird und nur das für die vorherigen Experimente benutzte Netzgerät NHQ 214M der Firma iseg dazu in der Lage ist, muss für die Hochspannungsversorgung der Vorverstärker auf das Netzgerät EHS 8 210p-F, ebenfalls von der Firma iseg, zurückgegriffen werden. Dieses Netzteil verfügt zwar über mehr Kanäle jedoch ist die Rauschcharakteristik schlechter als bei dem Netzgerät NHQ 214M. Für die Hochspannung werden wieder die üblichen $U_r = +329V$ eingestellt.

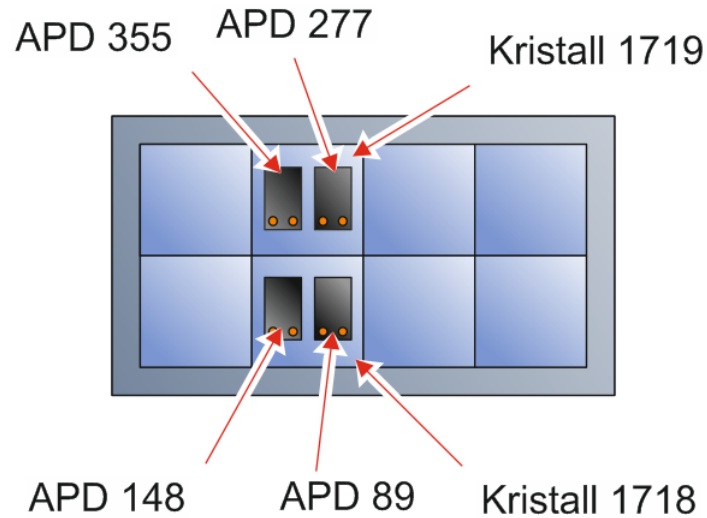


Abbildung 36: Dies ist die für den Myonen-Detektor benutzte Konfiguration von PROTO8. Dabei werden zwei Messkristalle übereinander angeordnet. Die restlichen sechs Kristalle dienen als Dummy. Für den Versuch werden vier APD benutzt deren Verstärkungsfaktoren in Kapitel 5 bestimmt wurden.

Eine ausführliche Analyse über das Rauschverhalten des Netzgerätes EHS 8 210p-F findet sich in der Bachelorarbeit von Malte Deiseroth[8]. Die Belegung der der Anschlüsse für die APD und die Vorverstärker findet sich in Tabelle 22.

APD	Vorverstärker	Hochspannung-Channel	Signal-Channel
277	62	U100	1
355	63	U101	2
89	32	U102	3
148	58	U103	4

Tabelle 22: Die Anschlussbelegung für PROTO8 im Detektor-Betrieb. APD 277 und APD 355 teilen sich Kristall 1719 und APD 89 und APD 148 Kristall 1718.

7.2. Das Trigger-System

Um die in den Kristallen deponierten Energien der atmosphärischen Myonen sinnvoll zu messen muss auf ein Trigger-System zurückgegriffen werden. Dieses System ermöglicht, dass nur dann, wenn ein Myon die Messkristalle durchdringt eine Aufnahme gestartet wird. Würde man stattdessen eine kontinuierliche Messung durchführen, wäre die Datenmenge enorm und man müsste zusätzlich diese Daten nach relevanten Ereignissen, auch Events genannt, durchsuchen. Ein weiterer Vorteil ist, dass durch eine Koinzidenz-Schaltung des Trigger-Systems eine Einschränkung des Winkelbereiches der eintreffenden Myonen erreicht werden kann. Für den Aufbau des Trigger-Systems werden vier Plastik-Szintillatoren der Firma Photonis (VD108, SN: 5145) genutzt, die von Photomultiplerröhren ausgelesen werden. Das verwendete Szintillator-Material besteht aus einem schnellen Szintillator mit Abklingzeiten von der Größenordnung 1-2 ns und kann deshalb hervorragend als Trigger verwendet werden. Das physikalische Prinzip ist das gleiche wie bei den Bleiwolframat-Kristallen in Verbindung der APD und Verstärkungselektronik. Der Unterschied liegt aber darin, dass die Signale der Plastik-Szintillatoren nur, mit der Hilfe eines Diskriminators, dazu verwendet werden um zu registrieren, dass ein Teilchen das System passiert ist. Die deponierte Energie wird nicht gemessen. Im Gegensatz zu den PROTO8-Szintillatoren können die Plastik-Szintillatoren auch bei Raumtemperatur effektiv arbeiten und sind daher für den Einsatz eines externen Trigger-Systems gut geeignet. Die Betriebsspannung der Plastik-Szintillatoren liegt bei $U_r = -1200V$. Für die negative Hochspannung wird das Netzteil NHQ 214M benutzt. Dieses Netzgerät besitzt zwei Ausgänge (2x 4kV/3mA) es werden jedoch vier benötigt. Dies macht die Anfertigung eines Stromteilers erforderlich. Dafür wird eine Aluminiumbox mit fünf Bohrungen versehen. In diese Bohrungen werden jeweils Koaxial-Kupplungsstücke eingeschraubt. In der Box werden die vier Anschlüsse HV1 bis HV4 parallel verlötet. Der Anschluss HV0 mündet am Teilungsknoten der Parallelschaltung. Frei liegende Kontaktstellen werden mit Schrumpfschläuchen isoliert. An dem Gehäuse liegt die Masse des Stromteilers an.



Abbildung 37: Die Grafik zeigt den für das Trigger-System angefertigten Stromteiler. Die Anschlüsse HV1 bis HV4 sind parallel verlötet. An HV0 liegt die negative Hochspannung an und wird auf die vier Kanäle verteilt. Die vier Plastik-Szintillatoren ziehen einen so geringen Strom, dass ein Ausgang (4kV/3mA) des Netzgerätes ausreicht um alle vier Szintillatoren zu betreiben.

Die Plastik-Szintillatoren müssen nun so platziert werden, dass sie sich genau über bzw. unter den Messkristallen befinden. Dafür muss die Position der Bleiwolframat-Kristalle exakt vermessen werden. Die Maße werden auf den Deckel der lichtdichten Aluminiumbox, in der sich PROTO8 befindet, und auf die Unterseite des Tisches, auf dem PROTO8 steht, übertragen. Zwei Plastik-Szintillatoren werden nun auf dem Deckel der lichtdichten Aluminiumbox ausgerichtet und mit Klebeband befestigt. Die zwei anderen Szintillatoren werden auf der Unterseite des Tisches mit Klebeband und einer Aluminiumstangenkonstruktion fixiert. Die vier Signalausgänge der Plastik-Szintillatoren werden in ein Diskriminator-Modul im Standard NIM Format der Firma LeCroy (Model 4608C) gesteckt. Dieses Modul erzeugt beim Überschreiten einer einzustellenden Spannungshöhe (Threshold) ein Rechtecksignal, das zur Verarbeitung in einem Logik-Modul geeignet ist. Die erzeugten Rechtecksignale münden nun in einem solchen Logik-Modul der Firma CAEN (Model N405), das ebenfalls im Standard NIM Format gebaut ist. Die beiden oberen und die beiden unteren Szintillatoren werden jeweils untereinander mit einer logischen OR-Verbindung verknüpft. Dies hat letztendlich den selben Effekt wie eine größere Szintillatorfläche. Die entscheidende Verknüpfung für die Koinzidenz-Schaltung ist die logische AND-Verknüpfung zwischen den oberen beiden Szintillatoren und den unteren beiden Szintillatoren. Dafür müssen die Rechtecksignale aus den OR-Verknüpfungen am Oszilloskop synchronisiert werden. Dabei wird auf ein atmosphärisches Myon gewartet, das einen der oberen Szintillatoren und einen der unteren Szintillatoren passiert. Dieses Ereignis trifft ca. alle 1,1 Minuten ein. Am Diskriminator können die Breiten der Rechtecksignale so eingestellt werden, dass sie sich überlappen. Die Länge der Überlappung entspricht der Zeit in der die Signale gleichzeitig an der AND-Verknüpfung anliegen, es liegt also eine Koinzidenz vor. Das Logik-Modul gibt in diesem Fall ein Rechtecksignal aus, welches als Trigger-Start-Signal genutzt wird. Da die Länge zweier Plastik-Szintillatoren kleiner als die Länge der PWO-Messkristalle ist und die Breite nur geringfügig größer als die Breite der PWO-Messkristalle ist, kann beim Auslösen des Trigger-Start-Signals davon ausgegangen werden, dass das Myon mit einer hohen Wahrscheinlichkeit durch die Bleiwolframat-Kristalle geflogen ist.

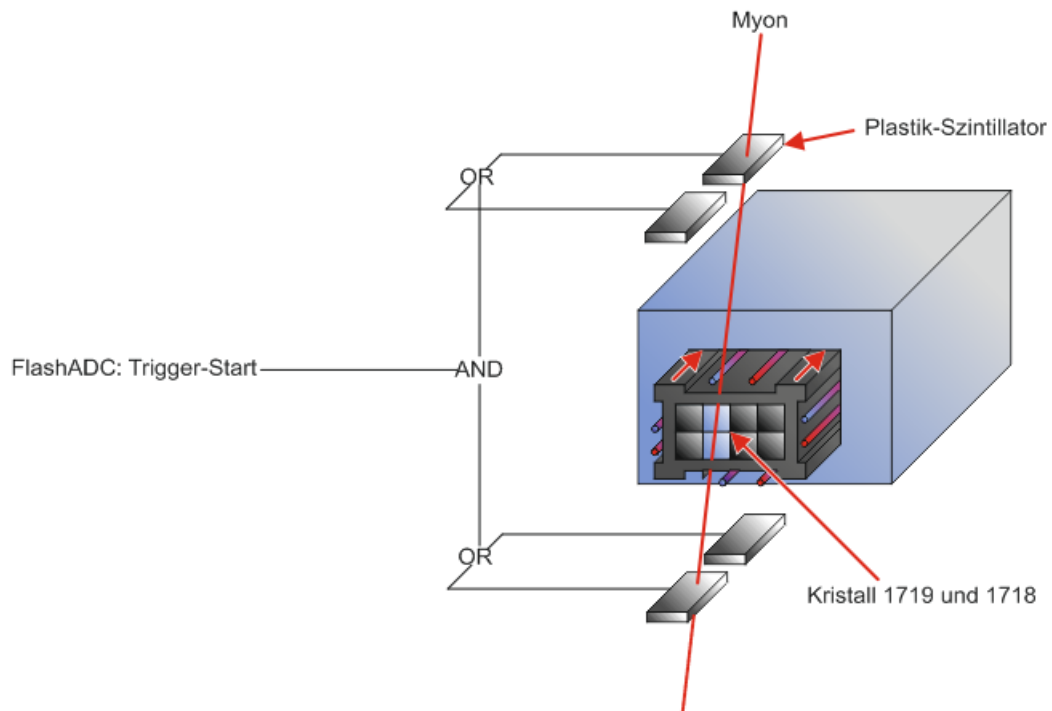


Abbildung 38: Die Illustration zeigt das Prinzip des Trigger-Systems. Über und unter PROTO8 werden jeweils zwei Plastik-Szintillatoren mit einer OR-Verknüpfung verbunden. Diese Szintillator-Pakete werden wiederum mit einer AND-Verknüpfung zu einer Koinzidenz-Schaltung zusammengefügt.

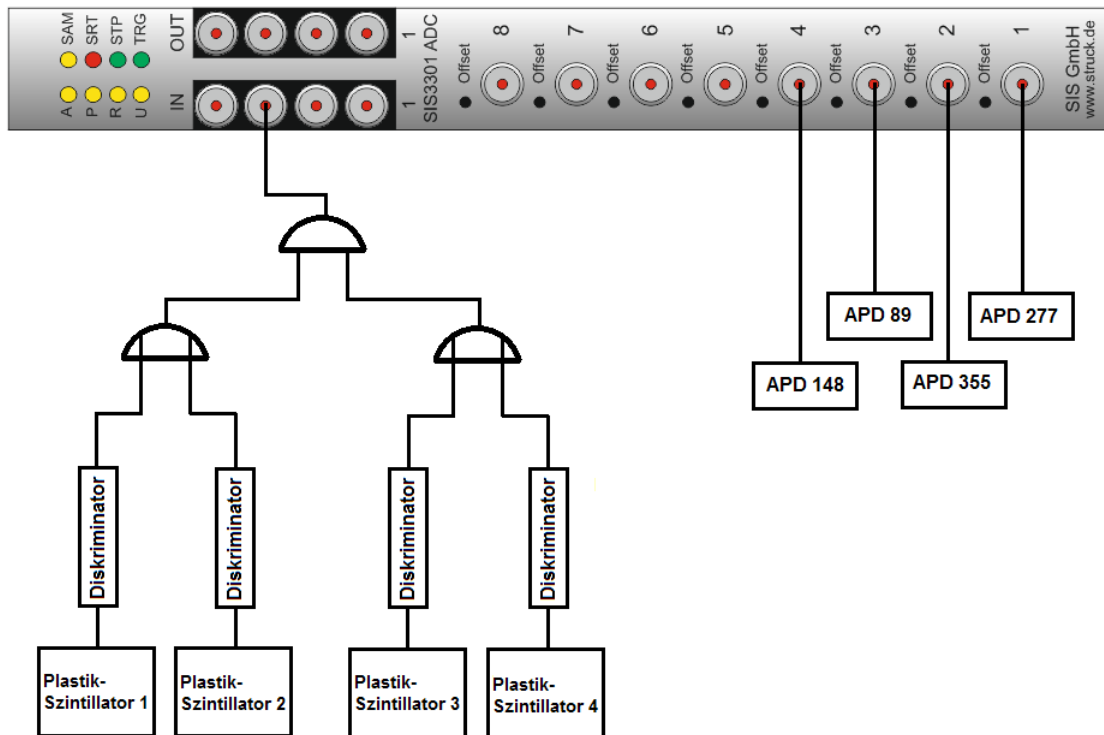


Abbildung 39: Dies ist das Logikgatter des Trigger-Systems. Die Rechtecksignale aus der OR-Verbindung sind 140 ns breit. Für die AND-Verknüpfung überlappen sie sich auf einer Länge von 100 ns. Die Anschlussbezeichnungen des FlashADC sind in [Abbildung 10](#) zu sehen.

7.3. Datenaufnahme von 200 Myon-Ereignissen mit dem FlashADC

In [Kapitel 2.4.5](#) ist die Funktionsweise des FlashADC erklärt. Insbesondere ist in [Abbildung 39](#) die für diese Messung verwendete Anschlussbelegungen gezeigt. Das Trigger-Signal wird mit dem Trigger-Start-Anschluss des FlashADC verbunden. Die Signalkabel der Vorverstärker werden in die FlashADC-Kanäle 1 bis 4 gesteckt. Löst nun ein Myon die Koinzidenz-Schaltung aus, wird die Datenaufnahme gestartet. Das Problem ist nur, dass das Myon die Messkristalle schon passiert hat, wenn die AND-Bedingung erfüllt ist. Die Datenaufnahme startet also nach dem Passieren des Myons. Abhilfe verschafft eine Signal-Verzögerungsleitung (delay) die durch zusätzliche 20 m Kabel zwischen Vorverstärker und FlashADC pro Kanal realisiert wird. Dabei gilt 1 ns Verzögerung pro 20 cm Kabel. Bei den gewählten 20 m ergibt das eine Verzögerung von 100 ns, die ausreichen um das Signal aufzunehmen. Das Datenaufnahme-Programm für den FlashADC aus der Bachelorarbeit von Pascal Lautz[7] wurde speziell für den Detektor-Betrieb von PROTO8 angepasst. So ist es nun möglich bis zu acht Kanäle, also vier Messkristalle mit jeweils zwei APD gleichzeitig zu messen. Für den aktuellen Myonen-Detektor werden jedoch nur vier Kanäle benötigt. In [Abbildung 40](#) ist eine mit dem Myonen-Detektor aufgenommene Einzelmessung dargestellt.

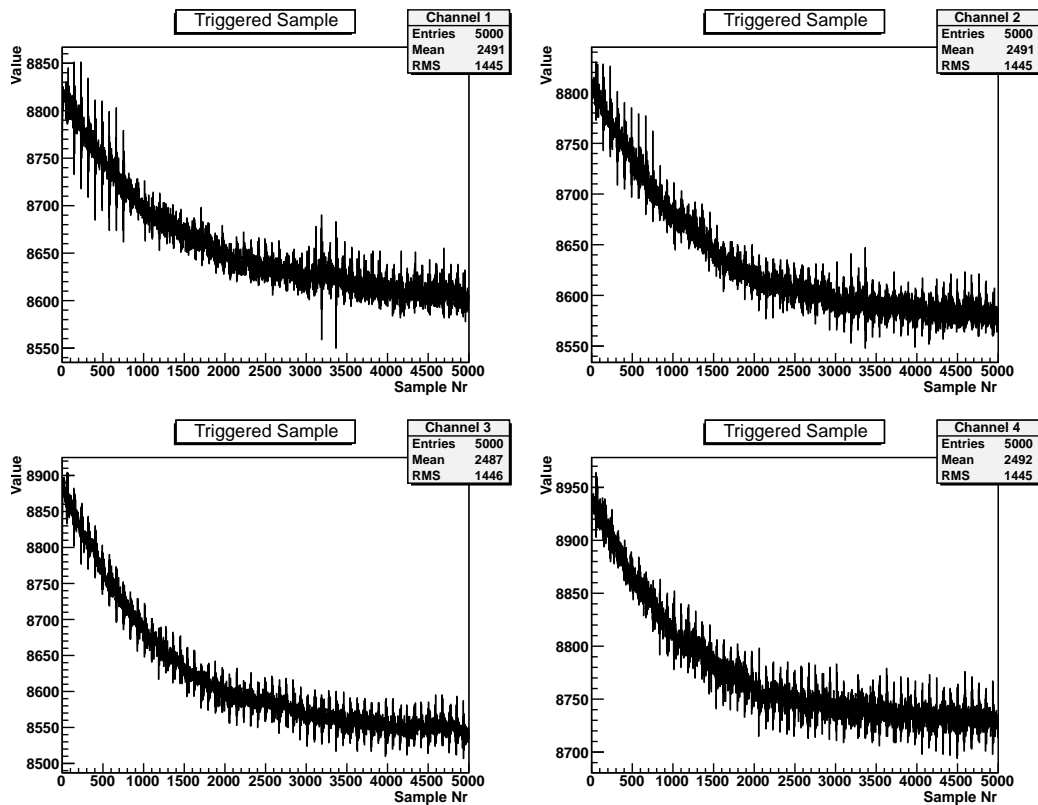


Abbildung 40: Die Grafik zeigt eine mit dem Myonen-Detektor aufgenommene Einzelmessung bei $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ein atmosphärisches Myon löst beim Durchgang durch die Plastik-Szintillatoren die Datenaufnahme aus und startet den FlashADC. Die vier Kanäle gehören zu den jeweiligen PWO-Kristallen und Vorverstärker. Man erkennt deutlich die Signalform der Kondensator-Entladung.

Für die Langzeitmessung mit dem Myonen-Detektor wird PROTO8 auf $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ abgekühlt. Im Gegensatz zu der Rauschanalyse kann mit dem neuen Kühler die Konstanz der tiefen Temperatur gewährleistet werden. Dies hat den Vorteil, dass die in [Kapitel 5](#) bestimmten Verstärkungsfaktoren sehr gut bei dieser Messung angewendet werden können. Als erstes wird nun eine Abschätzung gemacht in welchen Grenzen die im Kristall deponierten Energien zu erwarten sind. Die Plastik-Szintillatoren haben eine aktive Fläche von $60\text{ mm} \times 25\text{ mm}$. Jeweils zwei davon werden in das Zentrum der Projektionsfläche der Messkristalle gelegt und ergeben damit eine Längenüberdeckung von $(120 \pm 5)\text{ mm}$. Der Abstand zwischen den oberen beiden Plastik-Szintillatoren und den unteren beiden beträgt $(250 \pm 25)\text{ mm}$. Die Fehler wurden aufgrund schwieriger Messbedingungen relativ groß abgeschätzt. Für die Abschätzung wird nur der Schnitt durch die Kristalle betrachtet. Streng genommen könnte ein Teilchen auch diagonal durch den Aufbau fliegen, jedoch sind die Plastik-Szintillatoren so schmal, dass an dieser Stelle eine zweidimensionale Abschätzung ausreicht. In [Abbildung 41](#) ist die minimale und die maximale Strecke, die ein Teilchen zurücklegen könnte, eingezeichnet.

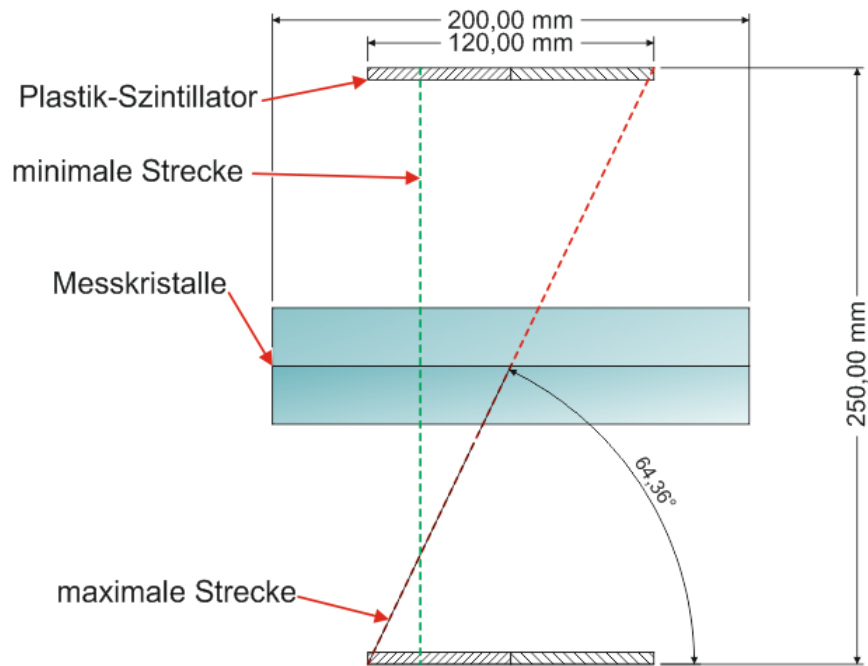


Abbildung 41: Die Grafik zeigt einen Schnitt durch das Trigger-System und die in PROTO8 liegenden Messkristalle. Die rote Linie zeigt die maximal mögliche Wegstrecke eines Teilchen, das gerade noch den Detektor ausgelöst hat. Die grüne Linie zeigt die minimale Wegstrecke an.

Wenn ein Teilchen exakt senkrecht in den Kristall eintritt wird somit die minimale Wegstrecke von 24,4 mm erreicht. Nach [Tabelle 2](#) entspricht das 24,6 MeV minimal deponierter Energie eines minimal ionisierenden Partikels in einem Kristall. Da es sich bei dem Energieverlust pro Strecke um einen theoretischen Wert handelt und die Fertigungstoleranz der Kristalle sehr genau ist, wird für diesen Wert auf eine Fehlerangabe verzichtet. Für den Winkel α der maximalen Wegstrecke folgt mit einfachen trigonometrischen Überlegungen und der Gaußschen-Fehlerfortpflanzung

$$\alpha = (64,4 \pm 0,5)^\circ$$

Bei der Kristallhöhe von 24,4 mm folgt für die unter dem Winkel α zurückgelegte Wegstrecke s

$$s = (27,1 \pm 0,1) \text{ mm}$$

daraus folgt eine maximal deponierte Energie von

$$E = (27,4 \pm 1,0) \text{ MeV}$$

Für das Experiment werden also Energien im Bereich von 24,6 MeV bis $(27,4 \pm 1) \text{ MeV}$ für minimal ionisierende Partikel erwartet. Bevor mit der Langzeitmessung begonnen wird, muss eine Nullmessung durchgeführt werden um später eine Baseline-Korrektur vorzunehmen. Bei eingeschalteter Sperr- und Versorgungsspannung der Vorverstärkern wird das Grundsignal aufgenommen.

Channel	Mittelwert (MEAN)[Skt.]	RMS [Skt.]
1	8635	15
2	8592	12
3	8559	14
4	8740	11

Tabelle 23: Dies sind die Ergebnisse der Nullmessung für die Baseline-Korrektur. Die Werte sind in Skalenteilen angegeben. Dabei entspricht ein Skalenteil $130\mu V$ [7]. Die bestimmten Werte müssen später von den Peak-Höhen der einzelnen Messungen der jeweiligen Channels abgezogen werden um die effektiven Höhen zu erhalten

Die Langzeitmessung wird nun für 200 Events durchgeführt. Da bei dieser Messung nur die maximale Höhe der Peaks von Interesse ist, wird eine Abtastrate des Signals von 50 MHz gewählt. Die Aufnahmezeit nach dem Trigger-Start-Signal beträgt $100\mu s$. Für 200 Events betrug die Messdauer 218 Minuten, das entspricht einer Ereignisrate von ca. $0,9 \text{ min}^{-1}$. Für die Auswertung werden die 200 Ereignisse pro Kanal nach dem jeweiligen Maximum durchsucht und in einem Histogramm aufgetragen. Dabei wird gleichzeitig die Nulllinie mit den Werten aus [Tabelle 23](#) korrigiert.

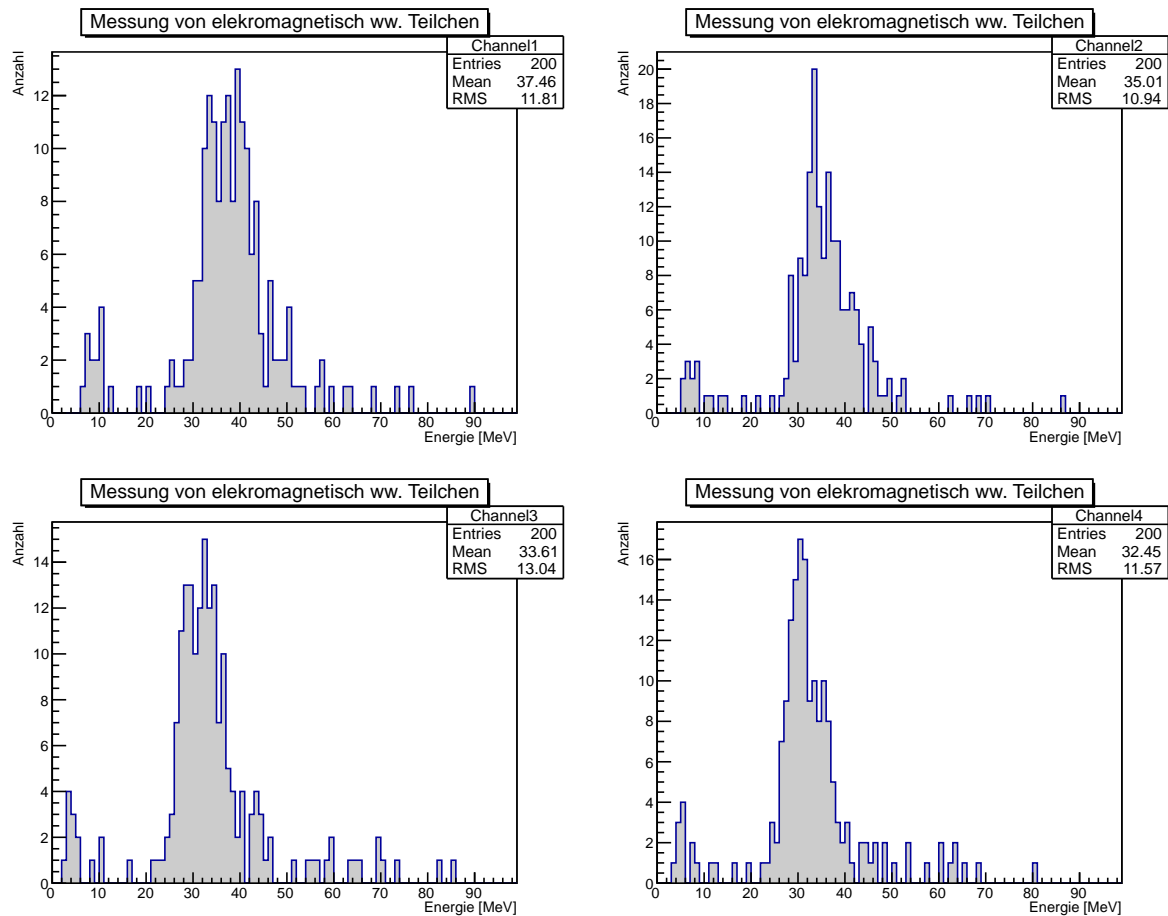


Abbildung 42: Dies sind die Histogramme der Langzeitmessung. Dabei sind die einzelnen Peak-Höhen der 200 Messungen pro Kanal jeweils in ein Histogramm eingetragen. Die Nulllinien sind vor dem Eintrag in diese Histogramme korrigiert worden. Die x-Achsen wurden auf die äquivalente deponierte Energie nach Gleichung 10 skaliert. Dabei konnte keine Rücksicht auf den Fehler der Energie genommen werden. Für die anschließende Berechnung wird der Plot mit der Skalierung der FlashADC-Channels benutzt. Dieser befindet sich im Anhang unter Abbildung 43.

Der Betrachtungsausschnitt wurde bei Abbildung 42 jeweils um die Gauß-verteilten Werte bis etwa 100 MeV deponierter Energie eingeschränkt. Im Anhang befinden sich die Histogramme noch einmal ohne Einschränkung. Da nicht nur minimalionisierende Partikel, im speziellen Myonen, gemessen wurden sondern auch andere elektromagnetisch wechselwirkende Teilchen, gibt es Ausreißer. Diese Ausreißer übersteigen die in dieser Versuchskonstellation durch minimal ionisierende Partikel erreichbare deponierte Energie enorm. Es könnte sich beispielsweise um energiereiche Elektronen handeln die einen elektromagnetischen Schauer ausgelöst haben. Da diese Ausreißer aber relativ selten aufgetreten sind, kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei den Messungen im wesentlichen um Myonen handelt. Für die folgende Berechnung der mittleren deponierten Energie werden die Histogramme mit der FlashADC-Channel-Skalierung aus dem Anhang (Abbildung 43) genutzt. Aufgrund von

Rundungsfehlern, bedingt durch die Änderung der Skalierung, weichen die Mittelwerte aus [Abbildung 42](#) von den im Folgenden berechneten leicht ab. Daher werden nur die berechneten Mittelwerte als aussagekräftig gewertet. Es wird nun der Mittelwert der Skaleneinheiten und das RMS aus [Abbildung 43](#) in Spannung umgerechnet. Hier wird statt der Standardabweichung σ das RMS benutzt, weil die Stichprobenmenge N zu klein ist. Dabei entspricht eine Skaleneinheit $130\mu\text{V}/\text{FlashADC-Bin}$ [7]. Die mittleren Maximalspannungen werden dann mit [Gleichung 10](#) und [Gleichung 11](#) in die durchschnittlichen deponierten Energien pro Channel umgerechnet. Dabei werden die individuellen Verstärkungsfaktoren der APD aus [Tabelle 12](#) verwendet.

Channel	Mean[Skt.]	$\frac{RMS}{\sqrt{N}}$ [Skt.]	\overline{U}_{max} [mV]	$\Delta\overline{U}_{max}$ [mV]	\overline{E} [MeV]	$\Delta\overline{E}$ [MeV]
1	258,3	5,7	33,6	0,7	37,6	7,5
2	262,8	5,8	34,2	0,8	35,1	11,7
3	353,1	7,9	45,9	1,0	31,8	6,0
4	223,8	5,6	29,1	0,7	32,5	3,3

Tabelle 24: In dieser Tabelle sind die Mittelwerte der Langzeitmessung eingetragen. Der Fehler auf den Mittelwert von wird mit $\frac{RMS}{\sqrt{N}}$ für $N = 200$ bestimmt. Diese Ergebnisse sind in die mittlere Maximalspannung umgerechnet und zusätzlich in deponierter Energie angegeben. Beim Fehler für die Energie geht noch die Unsicherheit bei der Bestimmung des Verstärkungsfaktors mit ein.

Die mittleren deponierten Energien liegen alle im Rahmen ihrer Fehler sehr gut beieinander. Dies ist ein Zeichen dafür, dass die individuellen Verstärkungsfaktoren gut bestimmt wurden. Des Weiteren sorgt die konstante Temperatur dafür, dass die Verstärkungsfaktoren bei dieser Messung besonders genau gelten.

Channel	\overline{s} [cm]	$\Delta\overline{s}$ [cm]
1	3,7	0,7
2	3,5	1,1
3	3,1	0,5
4	3,2	0,3

Tabelle 25: Die Myonen legen durchschnittlich diese Strecken in den Messkristallen zurück. Die Werte liegen alle über den erwarteten 2,4 cm des Kristalls. Dies liegt an der Bestimmung des Maximums aus der Signalform. Dabei wurde jeweils immer nur der maximale Wert der Messung betrachtet.

In [Tabelle 25](#) sind die in den Kristallen durchschnittlich zurückgelegten Wegstrecken der Myonen eingetragen. Die mittleren Wegstrecken liegen alle über dem zuvor berechneten Intervall der Minimal- und Maximalstrecke, die ein Teilchen bei dem vorhandenen Versuchsaufbau durchfliegen kann. Zudem weichen die Werte von der Erwartung ab, dass die meisten Myonen senkrecht auf die Erdoberfläche treffen. Dies würde einer minimalen Strecke von 2,4 cm entsprechen. Die Aufgenommenen Werte liegen alle über diesem Wert. Der Hauptgrund für diese Abweichung liegt in der Bestimmung des Maximums der einzelnen Aufnahmen. Es wird nämlich der absolute Maximalwert des Signals pro Messung betrachtet ohne das Signalrauschen mit einzubeziehen. Momentan wird an einem Integrationsverfahren gearbeitet, welches

das wahre Maximum bestimmen kann, das aber aus Zeitmangel nicht mehr in diese Bachelorarbeit mit einfließen kann. Zudem ist es möglich, dass die Ausreißer-Events den Mittelwert stärker verschoben haben als erwartet. Dies müsste mit einer weiteren Langzeitmessung mit deutlich mehr als 200 Events überprüft werden. Letztendlich kann das Experiment als Erfolg gewertet werden, weil es unter Beweis stellt, dass PROTO8 schon heute als funktionstüchtiger Detektor arbeiten kann.

8. Fazit und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeiten wurden Entwicklungsarbeiten durchgeführt, die für die Weiterentwicklung der Prototypen für die Rückwärts-Endkappe des elektromagnetischen Kalorimeter des PANDA-Experiments eine Rolle spielen. In Kapitel 2 wurde die Rolle dieser Arbeit innerhalb des PANDA-Experimentes dargelegt. Demnach deckt sie einen winzigen Teil eines gigantischen Projekts ab. In Kapitel 5 wurde der individuellen Verstärkungsfaktor der APD bestimmt. Weil noch keine vollständige Vermessung jeder APD vorgenommen wurde, musste für die Bestimmung des Verstärkungsfaktors ein relativ aufwändiges Approximationsverfahren angewendet werden. Fast alle Verstärkungsfaktoren liegen, bei annähernd -25 °C , zwischen 140 und 150 (Tabelle 12). Eine APD reißt jedoch mit einem Verstärkungsfaktor von über 230 aus und liegt damit ca. 60 % über den Verstärkungsfaktoren der anderen APD. Dies verdeutlicht wie wichtig die Kenntnis der individuellen Verstärkungsfaktoren der APD ist. In Zukunft soll im Rahmen einer Qualitätssicherung jede APD vollständig vermessen werden, was für den Betrieb des elektromagnetischen Kalorimeters des PANDA-Experimentes unabdingbar ist. In Kapitel 6 wurden verschiedene Rauschanalysen durchgeführt. Dabei wurde zuerst der Einfluss der Temperatur auf die Rauschbreite betrachtet. Es stellte sich raus, dass sich die Rauschbreite beim abkühlen des Aufbaus von $+31,5\text{ °C}$ auf $-20,9\text{ °C}$ um 69% verkleinert. Dieses Experiment demonstrierte wie wichtig die Kühlung der Bauteile von PROTO8 bzw. der Rückwärts-Endkappe für die Qualität der Signale ist. Anschließend wurden verschiedene Anschlussarten für die Verbindung zwischen APD und Vorverstärker auf ihr Rauschverhalten getestet. Die Messungen ergaben, dass die so genannte Kapsel-Lösung (Kapitel 6.2) die geringste Rauschbreite von 0,919 mV bzw. 0,986 MeV deponierter Äquivalenzenergie aufweist. Diese Lösung ist jedoch aus Platzgründen nicht für die Verwendung an mehreren Kristallen in PROTO8 bzw. der Rückwärts-Endkappe geeignet. Die Rauschbreiten der anderen Anschlusstypen lagen fast alle einen Faktor von etwa 2,5 (Tabelle 21) über der Rauschbreite der Kapsel-Lösung. Nur der so genannte Patchpanel mit Aluminiumrahmen sticht mit einem Faktor von 1,8 hervor und stellt damit die beste zu realisierende Lösung dar. Die Erkenntnisse dieser Messungen fließen direkt in die Weiterentwicklung von PROTO8 mit ein. Mittelfristig helfen sie bei der Konzeption von weiteren Prototypen wie PROTO18. Das finale Kapitel 7 ist das Aushängeschild dieser Bachelorarbeit. PROTO8 wurde so erweitert, dass man ihn als Myonen-Detektor nutzen kann. Diese Projekt zeichnet sich dadurch aus, dass die Vorarbeiten vorangegangener Bachelorarbeiten in einem einzigen Experiment münden. So wurde zum Beispiel das Netzgerät EHS 8 210p-F genutzt, dass ein Forschungsobjekt in der Bachelorarbeit von Malte Deiseroth[8] ist. Des Weiteren wurde auf die Erkenntnisse bezüglich Kühlung und Konfiguration von PROTO8 aus der Bachelorarbeit von Christina Haberkorn[6] zurückgegriffen. Die Bachelorarbeit von Pascal Lautz[7] spielte eine besondere Rolle, weil der von ihm entwickelte Aufnahmealgorithmus für den Detektor-Betrieb von PROTO8 genutzt wurde. Dabei ist die Programmierung des FlashADC speziell für diesen Versuch erweitert

worden um mit vier Messkanälen aufnehmen zu können. Es wurden im Rahmen einer Langzeitmessung über 200 Events auf vier Kanälen (vier APD mit Vorverstärker) mit jeweils 5000 Datenpunkten mit dem FlashADC aufgenommen. Die anschließende Auswertung ergab, dass die Myonen durchschnittlich eine Strecke zwischen 3,1 cm und 3,7 cm (Tabelle 25) im Bleiwolframat-Kristall zurücklegt haben. Die Abweichung zu der Erwartung, dass die Myonen im Durchschnitt senkrecht auf die Erde fallen, was einer Strecke von 2,4 cm im Kristall entsprechen würde, lässt sich durch das Verfahren zur Bestimmung der Puls-Höhe erklären. So wurden jeweils immer nur die Maximalwerte der Messungen ohne Berücksichtigung der Rauschbreite des Signals betrachtet. Dies impliziert, dass die bestimmten Maxima alle zu hoch liegen. Die Erkenntnisse dieses Experiments werden Anwendung in der nächsten Evolutionsstufe der Prototypen finden. So soll PROTO18 in den Strahlengang des Mainzer Mikrotron (MAMI) gestellt werden. Dafür ist ein schnelles Trigger- und Aufnahmesystem notwendig, weil die Ereignisraten um ein vielfaches größer sind als bei der aktuellen Konfiguration von PROTO8. Das heißt, dass der in dieser Bachelorarbeit entwickelte Myonen-Detektor nur den ersten Schritt in diese Richtung darstellt. Es wurde jedoch die prinzipielle Machbarkeit mit den vorhanden Komponenten unter Beweis gestellt.

Aus Zeitgründen konnte auf folgende Punkte in dieser Bachelorarbeit nicht mehr eingegangen werden. So muss in Zukunft ein Integrationsverfahren für die Bestimmung der Puls-Höhe verwendet werden, statt nur das Maximum einer Messung zu verwenden. So können die durch statistische Fluktuationen verschmierten Messwerte geglättet werden und so die wahren Maxima bestimmt werden. Der für den Myonen-Detektor verwendete Kühler der Firma Thermo Scientific zeichnet sich durch eine hohe Temperaturtreue aus. Leider stand dieser Kühler nicht von Anfang an zu Verfügung wodurch es schwierig war die Temperatur bei den Rauschanalysen mit dem alten System konstant zu halten. Zukünftige Rauschanalysen können also bei besseren Bedingungen durchgeführt werden. Dazu gehört auch ein Aufnahme der Kühlkurven, wie es von Christina Haberkorn in ihrer Bachelorarbeit[6] für das alte Kühlsystem gemacht wurde. Die Idee ist es, in Zukunft eine Echtzeitkorrektur der Messdaten vorzunehmen. Dabei muss die Temperaturcharakteristik der APD genau bekannt sein. Ist nämlich der temperaturabhängige Verstärkungsfaktor bekannt, ist es gar nicht so wichtig die Temperatur bei größeren Prototypen konstant zu halten. Wenn zusätzlich noch die Abhängigkeit der Rauschbreite von einer kontinuierlichen Temperaturänderung bekannt ist, können die Messdaten in Echtzeit korrigiert werden. So könnte man den Schwierigkeiten entgegenzutreten, die mit der Kühlung von wesentlich größeren Systemen als PROTO8 einhergehen. Es ist also noch viel zu tun bis die ersten Messungen mit PANDA aufgenommen werden können. Aber durch den Einsatz von qualifizierten Physikern, Ingenieuren und Technikern, die weltweit an dem PANDA-Projekt arbeiten, rückt dieses Ziel in greifbare Nähe.

Literaturverzeichnis

- [1] Einführung in die Geschichte der Philosophie, Reiner Ruffing, 2. Aufl., 2006
- [2] Gesellschaft für Schwerionenforschung Darmstadt: Technical Design Report for: PANDA Electromagnetic Calorimeter (EMC), 2008
- [3] Gesellschaft für Schwerionenforschung Darmstadt: Technical Progress Report for: PANDA, Strong Interaction Studies with Antiprotons
- [4] K. Nakamura et al. (Particle Data Group), J. Phys. G 37, 075021 (2010)
- [5] Universität Basel: Discrete Preamplifier for APD readout, LNP Preamplifier Version SP 883A02, Version 2.8, 31.8.2008.
- [6] Christina Haberkorn, Bachelorarbeit: Vorarbeiten zum Aufbau eines Prototypen für die Rückwärtsendkappe des elektromagnetischen Kalorimeters am PANDA-Experiment, Institut für Kernphysik der Universität Mainz, 2012
- [7] Pascal Lautz, Bachelorarbeit: Vorarbeiten zur Entwicklung eines Datenaufnahmealgorithmus' für einen Prototypen der Rückwärtsendkappe des PANDA-Experiments, Institut für Kernphysik der Universität Mainz, 2012
- [8] Malte Deiseroth, Bachelorarbeit: Vorarbeiten zum Aufbau eines Prototypkalorimeters für die Endkappe des PANDA-Experiments, Institut für Kernphysik der Universität Mainz, 2012
- [9] Datenblätter der einzelnen Avalanche-Photodioden. Auf Anfrage bei Dr. Andrea Wilms, A.Wilms@gsi.de
- [10] Hersteller Datenblatt der Avalanche-Photodiode 355. Auf Anfrage bei Dr. Andrea Wilms, A.Wilms@gsi.de
- [11] Allgemeines Hersteller Datenblatt der Avalanche-Photodiode: Characteristic and use of Si APD (Avalanche Photodiode), Technical Information SD-28, HAMAMATSU, Mai 2004

Abbildungsverzeichnis

1.	Lageplan des FAIR-Beschleuniger auf dem Gelände der GSI, Quelle: Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung Darmstadt	4
2.	Aufbau des PANDA-Detektors, Quelle:[2]	5
3.	Aufbau des elektromagnetischen Kalorimeters, http://www-panda.gsi.de	6
4.	Der Grundaufbau von PROTO8, selbst erstellte Grafik	8
5.	Aufnahme von einem Bleiwolframat-Kristall, selbst erstellte Fotografie	9
6.	Funktionsweise einer Avalanche-Photodiode, selbst erstellte Grafik in Anlehnung an Hamamatsu, Characteristics and use of Si APD (Avalanche Photodiode)	10
7.	Frontalaufnahme eines Bleiwolframat-Kristalls, selbst erstellte Fotografie	11
8.	Illustration eines Vorverstärkers, selbst erstellte Grafik	12
9.	Abklingkurve eines Events	12
10.	Illustration von dem genutzten FlashADC, selbst erstellte Grafik	13
11.	Typischer Spannungsverlauf einer Rauschpegel-Messung	15
12.	Normalverteilte Spannungsamplituden	16
13.	Energieverlust pro Strecke von Myonen in Materie, Quelle:[4]	18
14.	Fit für die Approximation der Raumtemperatur	21
15.	Illustration des Versuchsaufbau für den relativen Verstärkungsfaktor, selbst erstellte Grafik	24
16.	APD 277 bei T_h	25
17.	APD 355 bei T_h	25
18.	APD 89 bei T_h	25
19.	APD 148 bei T_h	25
20.	APD 277 bei T_k	26
21.	APD 355 bei T_k	26
22.	APD 89 bei T_k	26
23.	APD 148 bei T_k	26
24.	Grundkonfiguration für die Messung der Rauschbreiten, selbst erstellte Grafik	28
25.	Rauschanalyse für verschiedene Temperaturen	29
26.	Die Kapsel-Lösung, selbst erstellte Grafik	31
27.	Rauschanalyse für die Kapsel-Lösung	31
28.	Twisted-Pair, selbst erstellte Grafik	32
29.	Rauschanalyse für die Twisted-Pair Verkabelung	33
30.	Patchpanel, selbst erstellte Grafik	34
31.	Rauschanalyse für das Patchpanel	34
32.	Patchpanel mit Aluminiumrahmen, selbst erstellte Grafik	35
33.	Rauschanalyse für das Patchpanel mit dem Aluminiumrahmen	35
34.	Patchpanel mit Twisted-Pair, selbst erstellte Grafik	36
35.	Rauschanalyse für Twisted-Pair mit Patchpanel	36
36.	Grundkonfiguration von PROTO8 im Myonen-Detektor-Betrieb, selbst erstellte Grafik	39
37.	Der Stromteiler für die Hochspannung der Plastik-Szintillatoren, selbst erstellte Fotografie	40
38.	Funktionsweise des Trigger-Systems, selbst erstellte Grafik	42
39.	Logikgatter des Trigger-Systems, selbst erstellte Grafik	43
40.	Einzelmessung mit dem Myonen-Detektor	44

41.	Minimale und maximale Wegstrecke eines Teilchen, selbst erstellte Grafik . . .	45
42.	Histogramme der Langzeitmessung mit Energieskalierung	47
43.	Histogramme der Langzeitmessung, FlashADC-Channels	56
44.	Histogramme der Langzeitmessung,gesamte Verteilung	57

A. Root-Programm zur Bestimmung der Puls-Höhen

Es handelt sich um eine angepasste Version des, schon in der Bachelorarbeit von Pascal Lautz[7] verwendeten, Peakfinding-Code.

```
#include "sstream"
#include "TH1.h"
#include "TMath.h"
#include "TF1.h"
#include "TLegend.h"
#include "TCanvas.h"
#include "TGraph.h"
#include <TFile>
#include "TAttLine.h"

void getpeaks(){

int channels=4;
int amountSamples=200;
int zeroValues[8]={8635,8592,8559,8740,0,0,0,0};
TFile *myfile= new TFile
("Measurement2012-09-25_05-54-42.root", "READ", "Root-Daten");

TCanvas *c1= new TCanvas
("c1", "Graph_Canvas", 10, 10, 1000, 800);

c1->Divide(2, ceil(channels/2));

gStyle->SetTitleBorderSize(2);

for (int y=1; y <= channels; y++) {
    TTree *tree=(TTree*) myfile->Get("Tree;1");
    stringstream ss;
    TString counter;
    ss<< (y);
    counter=ss.str();

    c1->cd(y);

    TH1F *histo = new TH1F("Channel"+counter,
    "Messung_von_elekromagnetisch_ww._Teilchen; Wert; Anzahl",
    16384, 0, 16384);
    histo->SetFillColor(kGray);

    for (int sample=1; sample<= amountSamples; sample++) {
```

```
TBranch *mybranchy;
stringstream ss2;
TString sampleNo;
ss2<< (sample);
sampleNo=ss2.str();

vector<float> *ywert;
mybranchy=tree->GetBranch
("Sample"+sampleNo+".YWert"+counter);
mybranchy->SetAddress(&ywert);
tree->GetEntry();
int value= *max_element(ywert->begin(),
ywert->end())-zeroValues[y-1];
cout<<"Sample_"<<sampleNo+"YWert"
<<counter<<" : "<<value<<endl;
histo->Fill(value);
ywert->clear();

}

histo->Draw();
histo->GetXaxis()->SetRangeUser(0,700);

}

}
```

B. Die Verteilung der Myonenmessung in der Skalierung der FlashADC-Channels

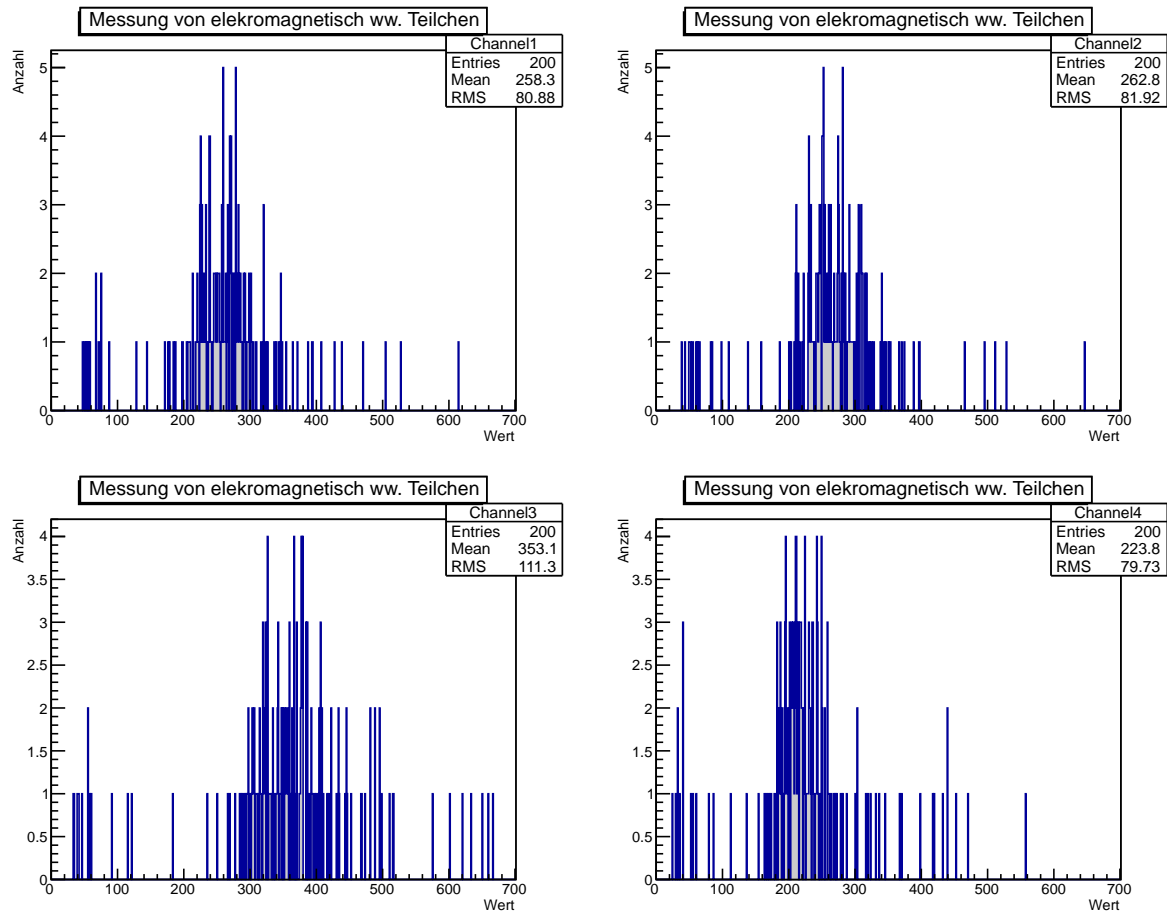


Abbildung 43: Dies sind die Histogramme der Langzeitmessung. Dabei sind die einzelnen Peak-Höhen der 200 Messungen pro Kanal jeweils in ein Histogramm eingetragen. Die Nulllinien sind vor dem Eintrag in diese Histogramme korrigiert worden. Auf der x-Achse sind die so genannten FlashADC-Channels aufgetragen. Diese sind proportional zur gemessenen Spannung. Dabei entspricht eine Skaleneinheit $130\mu\text{V}/\text{FlashADC-Bin}$.

C. Gesamte Verteilung der Puls-Höhen der Langzeitaufnahme

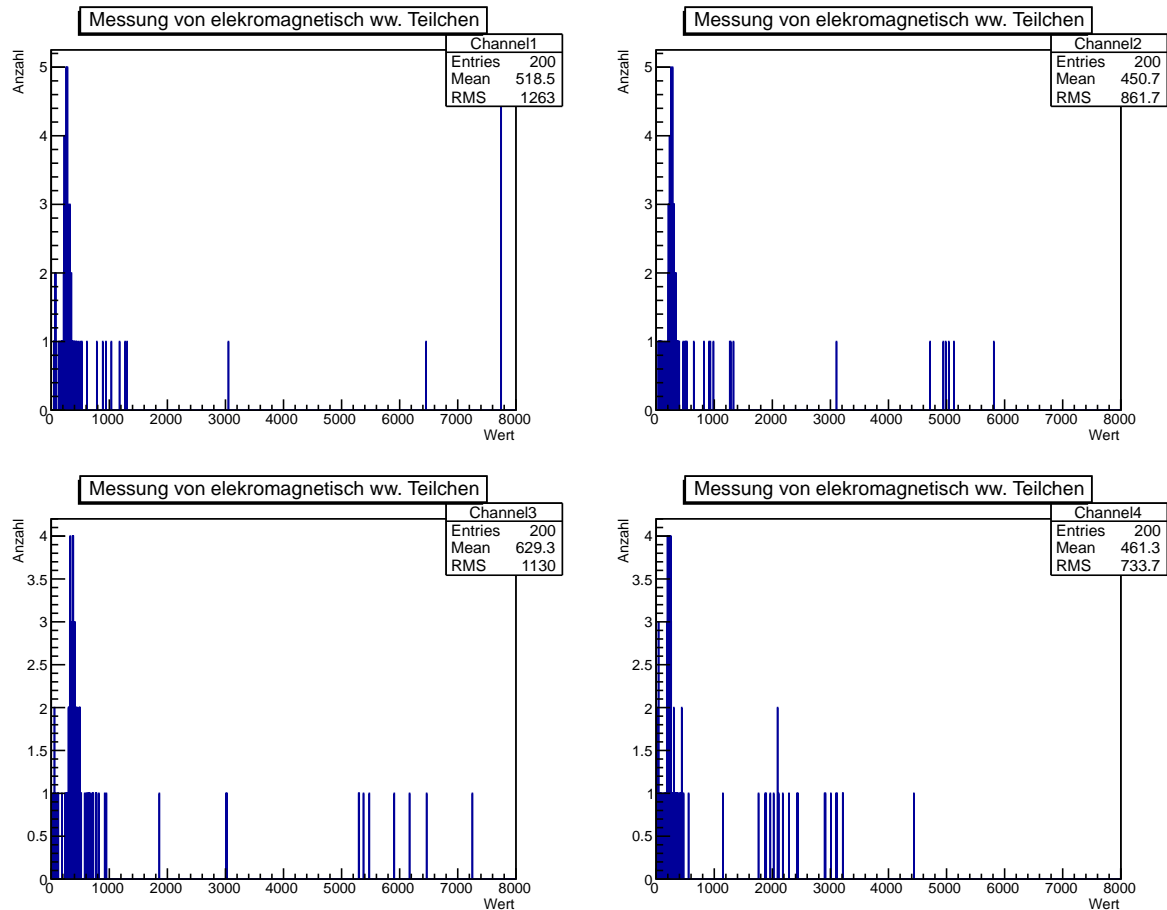


Abbildung 44: Dies ist die gesamte Verteilung der Langzeitmessung. Es existieren Einträge von über 7000 Bins. Dies würde einer deponierten Energie von über 1000 MeV entsprechen. Diese hohen Energien können nicht von minimalionisierenden Teilchen stammen. Die Interpretation dieser hochenergetischen Ereignisse übersteigt jedoch den Rahmen dieser Bachelorarbeit.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei folgenden Menschen bedanken:

Prof. Dr. Frank Maas, der mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit sehr gut betreut hat und mir immer mit hilfreichen Anregungen und Tipps zur Seite stand.

Prof. Dr. Josef Pochodzalla, der sich als 2. Gutachter dieser Arbeit zu Verfügung gestellt hat.

Christina Haberkorn, die mir während meiner Bearbeitungszeit mit Rat und Tat zur Seite stand und mir in den ersten Wochen einen fließenden Einstieg in die Thematik ermöglicht hat.

Pascal Lautz, der mich bei der Konstruktion und der Umsetzung des Myonen-Detektors unterstützt hat.

Dank gilt auch meinen, mir nahe stehenden, Kommilitonen, die mich über das Studium begleitet und unterstützt haben.

Besonders möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, ohne deren Unterstützung dieses Studium gar nicht erst möglich gewesen wäre.