

Vorarbeiten zum Aufbau eines Prototypen für die Rückwärtsendkappe des elektromagnetischen Kalorimeters des PANDA-Experiments

von

Christina Haberkorn

Bachelorarbeit in Physik

vorgelegt am Fachbereich Physik, Mathematik und Informatik (FB 08)
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
am 27. Juni 2012



JOHANNES GUTENBERG
UNIVERSITÄT MAINZ

1. Gutachter: Prof. Dr. Frank Maas
2. Gutachterin: Prof. Dr. Eva-Maria Kabuß

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

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'C. Haberkorn', with a long horizontal flourish extending to the right.

Mainz, den 27. Juni 2012

Christina Haberkorn
Rheinallee 32
55118 Mainz
`chrishab@students.uni-mainz.de`
Matrikelnummer: 2659978

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Das PANDA-Experiment am zukünftigen FAIR-Beschleunigerkomplex	3
2.1. Der FAIR Beschleunigerkomplex	3
2.2. Das PANDA-Experiment	3
2.2.1. Physikalische Ziele des PANDA-Experiments	4
2.2.2. Der PANDA-Detektor	5
3. Das elektromagnetische Kalorimeter des PANDA-Experiments	9
3.1. Bleiwolframatkristalle als Szintillatoren	10
3.2. Avalanche-Photodioden	11
3.3. PANDA Vorverstärker und Ausleseelektronik	16
3.4. Abschätzung der erwarteten Pulshöhe durch ein kosmisches Myon	17
4. Vorbereitungen und Aufbau des Prototypen für das elektromagnetische Kalorimeter	23
4.1. Gesamtaufbau des Prototyps „SuperProto8“	24
4.2. Funktionale Komponenten für den Prototypen	27
4.3. Zukünftige Erweiterungen des Prototypen-Aufbaus	28
4.4. Vorbereitung der Detektorkomponenten	29
4.4.1. Vorbereitung der Reflektorfolie DF2000MA von 3M	29
4.4.2. Vorbereitung der Bleiwolframatkristalle	31
4.4.3. Verbindung der Avalanche-Photodiode mit dem Vorverstärker	33
5. Messungen und Ergebnisse	37
5.1. Reflektivität der Reflektorfolie DF2000MA von 3M	37
5.2. Temperaturstudien im Prototypen	43
5.2.1. Temperaturverläufe	45
5.2.2. Kontrolle der Kühlschläuche	47
5.3. Kabelverbindung zwischen Avalanche-Photodiode und Vorverstärker	49

Inhaltsverzeichnis

5.4. Rauschen des Kristall-Avalanche-Photodioden-Vorverstärker-Systems	52
5.4.1. Aufbau mit vier Vorverstärkern und der „Kabel-Lösung“	53
5.4.2. Aufbau „SuperProto8“ mit Kühlung und lichtdichter Kiste	57
6. Zusammenfassung und Ausblick	69
A. Anhang	73
A.1. Anleitung für das Formen der Reflektorfolie DF2000MA von 3M	73
A.2. Reflektivität der Reflektorfolie DF2000MA von 3M	76
A.3. Kennlinien der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Avalanche-Photodioden	78
A.4. Temperaturstudien im Prototypen	80

1. Einleitung

*Dass ich erkenne, was die Welt
im Innersten zusammenhält*

(Johann Wolfgang von Goethe: Faust, Erster Teil)

Das Wissen über die klassischen Bereiche der Physik, der Mechanik und Elektrodynamik oder auch der Thermodynamik, ist heute Grundlage unserer fortgeschrittenen und technologisierten Zivilisation. Immer schnellere Entwicklungen und neue Technologien erwecken den Anschein, der Mensch hätte alles verstanden und könne die Welt nach seinem Willen und Wissen lenken. Dabei können wir bis heute noch nicht sicher sagen, wie die uns umgebende Materie im Innersten aufgebaut ist und welchen Wechselwirkungen sie unterliegt.

Das Standardmodell der Teilchenphysik hat zwar einen Rahmen geschaffen, innerhalb dessen drei der vier Grundkräfte, die elektromagnetische, die schwache und die starke Kraft, unser bisher bekanntes Weltbild beschreiben können. Die vierte Kraft, die Gravitation, muss gesondert behandelt werden. Viele Phänomene der fundamentalen Wechselwirkungen stellen die Wissenschaftler aber bis heute noch vor ein Rätsel. Gerade die starke Kraft, die mit der Theorie der Quantenchromodynamik beschrieben wird, ist im Bereich niedriger Energien noch nicht analytisch berechenbar. Zur Erforschung dieses Energiebereichs wurde die PANDA-Kollaboration ins Leben gerufen, die am neu gegründeten FAIR-Beschleunigerkomplex in Darmstadt Experimente zu Antiproton-Proton-Reaktionen mit einem leistungsfähigen Fixed-Target-Detektor durchführen wird.

Das elektromagnetische Kalorimeter (EMC) als ein Teil des Detektors spielt eine Schlüsselrolle, um elektromagnetisch wechselwirkende Teilchen mit höchster Präzision nachzuweisen. Die Rückwärtsendkappe des elektromagnetischen Kalorimeters wird vom Institut für Kernphysik an der Universität Mainz entwickelt.

1. Einleitung

Die vorliegende Bachelorarbeit beschäftigt sich mit dem Aufbau eines ersten Prototypen für die Rückwärtsendkappe des elektromagnetischen Kalorimeters des PANDA-Experiments. Während viele Fragestellungen bezüglich des Detektormaterials wie die Auslese mit Avalanche-Photodioden und die Kühlung bei -25°C gemeinsam mit der sogenannten EMC-Kollaboration bearbeitet werden, erfordert der unter Rückwärtswinkeln herrschende Platzmangel das Studium spezieller Fragen der Isolation und anderer Aspekte. Diese können mit Hilfe eines kleineren Prototypen des Rückwärtsendkappen-EMC erforscht werden.

In Kapitel 2 wird die FAIR-Beschleunigeranlage vorgestellt, die in den nächsten Jahren am GSI Helmholtz-Zentrum in Darmstadt gebaut wird, und im Speziellen das PANDA-Experiment mit dessen Forschungsschwerpunkten beleuchtet.

Das dritte Kapitel soll die Grundlagen für das Verständnis und den Aufbau des Prototypen für das elektromagnetische Kalorimeter setzen und befasst sich mit den drei wichtigsten Hauptbestandteilen des Kalorimeters, den Bleiwolframatkristallen, den Avalanche-Photodioden und den Vorverstärkern.

Im vierten Kapitel wird der Aufbau des Prototypen beschrieben, wie er im Rahmen dieser Arbeit realisiert wurde. Zudem werden diverse Vorarbeiten wie das Vorbereiten der Kristalle und der Reflektorfolie geschildert.

In Kapitel 5 folgt eine Darstellung der zu verschiedenen Aspekten des geplanten Prototypen durchgeführten Messungen und eine Diskussion der Ergebnisse.

Abschließend gibt Kapitel 6 eine Zusammenfassung der zehnwöchigen Bearbeitungsphase und schließt mit einem Ausblick auf nötige und mögliche Entwicklungen und Arbeiten an dem Kalorimeter-Prototypen.

2. Das PANDA-Experiment am zukünftigen FAIR-Beschleunigerkomplex

2.1. Der FAIR Beschleunigerkomplex

Das FAIR (**F**acility for **A**ntiproton and **I**on **R**esearch) Beschleunigerzentrum wird in den kommenden Jahren am Standort des GSI Helmholtzzentrums für Schwerionenforschung in Darmstadt, Hessen, aufgebaut. Die folgende kurze Darstellung der Anlage beruht auf den Informationen der offiziellen Homepage des FAIR-Zentrums [10].

FAIR ist ein gemeinschaftliches Projekt der Bundesrepublik Deutschland und 9 weiteren Partnerländern (Finnland, Frankreich, Indien, Polen, Rumänien, Russland, Schweden, Slowenien, Spanien), an dem bereits jetzt in der Aufbauphase mehr als 3000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 40 Ländern weltweit beteiligt sind. Ziel ist die physikalische Grundlagenforschung mit Hilfe eines neuen, weltweit einzigartigen Antiprotonen- und Ionenbeschleunigers. Abbildung 2.1 zeigt den Grundriss der FAIR Beschleunigeranlage, zu der auch der bereits am GSI bestehende Linearbeschleuniger UNILAC und das Schwerionensynchrotron SIS18 gehören werden.

Vier Kollaborationen, APPA, CBM, NUSTAR und PANDA, werden an der FAIR-Beschleunigeranlage Experimente zu Themen der Atom- und Plasmaphysik, Hadronenphysik sowie Kern- und Astrophysik durchführen.

2.2. Das PANDA-Experiment

Die PANDA-Kollaboration steht für Anti**P**roton **A**Nnihilation at **D**armstadt und wird mit einem hochpräzisen Antiprotonenstrahl Experimente zu aktuellen Themen der starken Wechselwirkung, wie zum Beispiel der Nukleonstruktur und der Hadronenspektroskopie, durchführen. Mehr als 450 Wissenschaftler aus 17 Ländern arbeiten innerhalb der Kollaboration zusammen.

2. Das PANDA-Experiment am zukünftigen FAIR-Beschleunigerkomplex

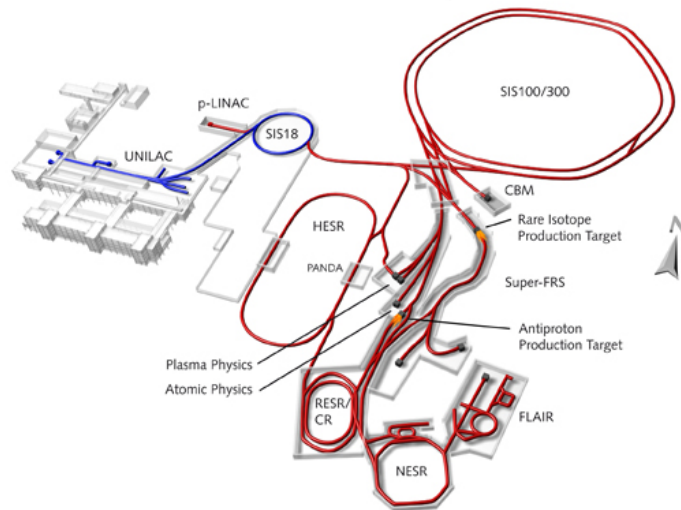


Abbildung 2.1.: Grundriss der FAIR-Beschleunigeranlage [10].

Die folgende Darstellung des PANDA-Experiments und des elektromagnetischen Kalorimeters bezieht sich auf den Technical Progress Report[1], den EMC Technical Design Report [2] sowie das Physics Book[3] der PANDA-Kollaboration.

2.2.1. Physikalische Ziele des PANDA-Experiments

PANDA erforscht fundamentale Fragen der Quantenchromodynamik (QCD), also der Quantenfeldtheorie der starken Wechselwirkung, die Teil des Standardmodells der Teilchenphysik ist. Die Elementarteilchen der QCD sind die Quarks (up, down, charm, strange, top, bottom), die durch ihre Austauschpartikel, die Gluonen, wechselwirken. Die QCD ist für Abstände zwischen Quarks, die wesentlich kleiner als ein Nukleon sind ($< 10^{-15}$ m), recht gut erforscht und verstanden und kann mit Hilfe der Störungstheorie gelöst werden. Im Bereich größerer Abstände, die vergleichbar mit dem Radius eines Nukleons sind, also auch im Bereich niedriger Energien, ist die Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung zu groß, um noch Störungsrechnung anzuwenden. Hier spricht man vom nicht-perturbativen Bereich der QCD. Die Quarks sind dann durch das sogenannte „Confinement“ aneinander gebunden und wechselwirken so stark miteinander, dass man sie nie trennen kann. Deswegen wurden Quarks bisher immer nur in Hadronen in gebundenen Zuständen von 3 Quarks (Baryonen, z.B. Proton $p = uud$) oder einem Quark und einem Antiquark (Mesonen, z.B. $\pi^+ = u\bar{d}$) gefunden. Die QCD im nicht-perturbativen Bereich ist bisher nicht analytisch berechenbar und das Ziel der PANDA-Kollaboration ist es, grundlegende Fragen dieses Bereichs zu erforschen

und zu beantworten.

Zu den vier Hauptsäulen des PANDA-Experimentes gehört zunächst die Hadronenspektroskopie, die sich vor allem mit exotischen, angeregten Zuständen in Hadronen beschäftigt, bei denen Gluonen Hauptbestandteil des Hadrons sind. Dazu gehören Glueballs (gebundene Zustände ausschließlich aus Gluonen) und Hybride (Zustände mit $q\bar{q}$ Paar und angeregten Gluonen) sowie Multiquark-Zustände. Dabei soll vor allem auf die charm-Region, also den Bereich von Hadronen mit c-Quarks, eingegangen und das Charmonium ($c\bar{c}$) genauer spektroskopiert werden.

Als zweite Säule sollen Effekte von Hadronen in nuklearem Material erforscht werden, um zum Beispiel den Mechanismus zu verstehen, woher Hadronen ihre Masse haben. Mit dem hochenergetischen Antiprotonenstrahl des PANDA-Experiments kann der wenig erforschte Bereich von Hadronen mit c-Quarks, die schwerer als up und down sind, abgedeckt werden.

Die dritte Säule bilden Hyperkerne, also Kerne mit Baryonen, bei denen ein up- oder down-Quark durch ein strange-Quark (bzw. strange-Antiquark) ersetzt wurde (z.B. $\Lambda^0 = uds$ statt Proton $p = uud$). Insbesondere sollen Doppel- Λ -Hyperkerne untersucht werden.

Als vierte Säule soll die Nukleonstruktur durch elektromagnetische Prozesse, beispielsweise $p\bar{p} \rightarrow e^+e^-$, erforscht werden und damit die zeitartigen Formfaktoren des Protons, G_E und G_M , genauer bestimmt werden.

2.2.2. Der PANDA-Detektor

Der PANDA-Detektor ist ein Hochenergie-Fixed-Target-Detektor, der mit hoher Auflösung und bei hohen Raten sowohl elektromagnetisch geladene als auch neutrale Teilchen identifizieren, ihren Impuls messen und die Spur erkennen soll. Das Impulsspektrum der nachzuweisenden Teilchen reicht von 100 – 200 MeV/c bis zu Maximalimpulsen von 8 GeV/c.

Um eine 4π -Raumabdeckung zu gewährleisten, besteht der Detektor aus einem Targetspektrometer, das den Interaktionspunkt von Target und Antiprotonenstrahl fassförmig umschließt, und einem Vorwärtsspektrometer, das für kleine Öffnungswinkel ($5^\circ - 10^\circ$) Teilchen hoher Impulse nachweisen wird.

Das Targetspektrometer besteht von innen nach außen aus

- einem Mikrovertex-Detektor (MVD), der aus 5 fassförmigen Schichten rund um den Strahlengang und 5 scheibenförmigen Schichten in Vorwärtsrichtung aufgebaut ist, in denen Silizium-Pixeldetektoren und Microstrip-Detektoren zum Nachweis

2. Das PANDA-Experiment am zukünftigen FAIR-Beschleunigerkomplex

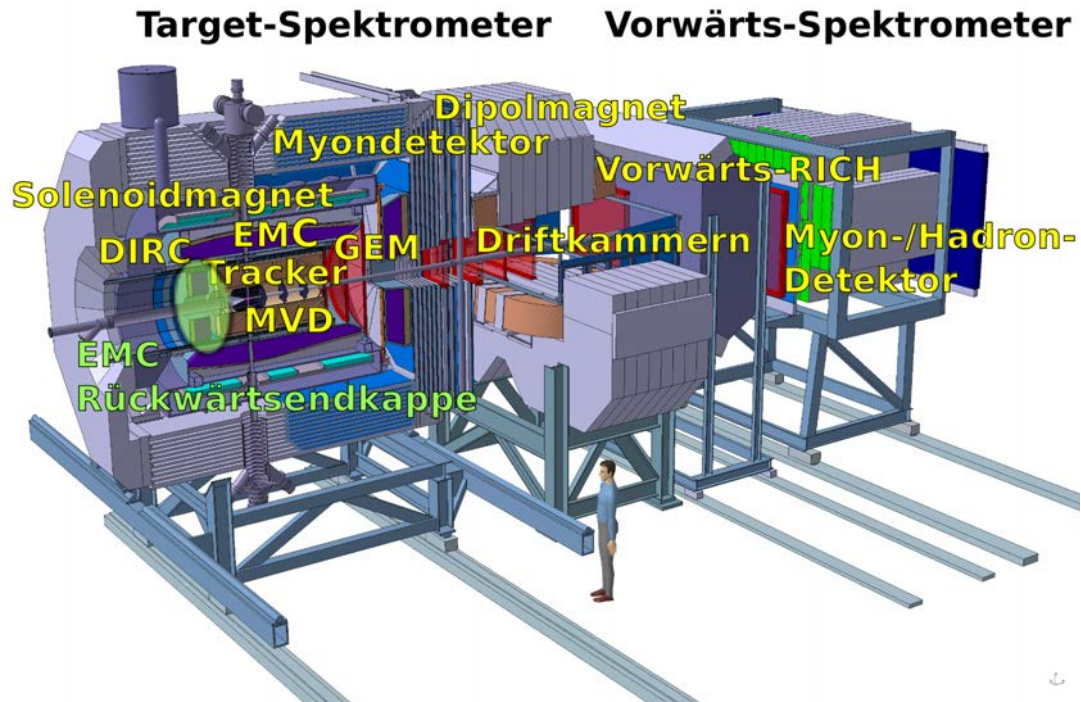


Abbildung 2.2.: Gesamtansicht des PANDA-Detektors mit Mensch zum Größenvergleich. Die EMC-Rückwärtsendkappe ist grün markiert [2].

von Charm-Mesonen dienen.

- einem zylindrischen „Strawtube“-Detektor als Tracker, der die Flugbahn der Teilchen messen wird. Für die Vorwärtsrichtung für Öffnungswinkel $5^\circ < \theta < 22^\circ$ ist ein GEM-Detektor vorgesehen.
- Cherenkovdetektoren nach dem DIRC Prinzip (detection of internally reflected Cherenkov light), die zur Identifizierung von geladenen Hadronen und Leptonen dienen. Sie decken den hochenergetischen Energiebereich ($> 1 \text{ GeV}$) ab, während ein Flugzeit-Detektor die langsameren Teilchen identifizieren kann.
- einem elektromagnetischen Kalorimeter (EMC), bestehend aus insgesamt 15552 Bleifwolframat-Kristallen, aufgeteilt in eine Vorwärtsendkappe, Rückwärtsendkappe und das zylindrische Fasskalorimeter. Die hier vorliegende Arbeit hat sich mit Aspekten des Rückwärtsendkappendetektors beschäftigt. In Kapitel 3 folgt eine nähere Beschreibung des EMC.
- einem supraleitenden Solenoid-Magnet von 2,5 m Länge, 1,9 m Durchmesser und einem axialen Magnetfeld von 2 T.

- Driftkammern zwischen dem Magnet und der Außenseite des Detektors sowie in Vorwärtsrichtung senkrecht zum Strahlengang, die die Detektion von Myonen ermöglichen.

Das Vorwärtsspektrometer soll Teilchen bis zu maximalen Impulsen von 8 GeV/c nachweisen und besteht daher aus einem Dipolmagneten, der mit einem Feldintegral von 2 Tm die nötige Auflösung für solch hohe Impulse bietet. Außerdem befinden sich ein Tracker aus Minidriftkammern vor und hinter dem Magneten, während im Magnetfeld selbst zur Spurerkennung mit Strohhalmdetektoren gearbeitet wird. Ein Plastikszintillationsdetektor hinter dem Dipolmagneten wird die Flugzeit der Teilchen ermitteln und ein Cherenkovdetektor Teilchen identifizieren. Das elektromagnetische Kalorimeter des Vorwärtsspektrometers besteht aus einem Schaschlik-Bleisintillationsdetektor. Hinter dem EMC soll der MIRAC Detektor vom WA80 vom CERN als Hadronendetektor wiederverwendet werden. Ein Myondetektor aus Driftröhren schließt das Vorwärtsspektrometer ab.

Zur Erzeugung des Antiprotonenstrahls werden primäre 30 GeV/c Protonen aus dem Protonen-Linearbeschleuniger (p-LINAC) genutzt. Die erzeugten Antiprotonen werden bei einem Impuls von 3,7 GeV/c gekühlt und in Teilchenbündeln in den HESR (High Energy Storage Ring) eingespeist. Eine hochenergetische Elektronenkühlung im HESR garantiert eine in bisherigen Experimenten noch nicht erreichte Strahlqualität und -präzision. Durch Durchlaufen des Synchrotrons erhalten die Antiprotonen die für das Experiment gewünschte Energie. Der Antiprotonenstrahl wird in einem weiten Energiespektrum von 1 GeV bis zu 15 GeV betrieben werden, um alle Energiebereiche und die jeweiligen Produktionsmechanismen von zu untersuchenden Hadronen abzudecken.

Das Wasserstoff-Target des PANDA-Experiments liegt als internes Target direkt im Strahlengang des HESR und wird in zwei Varianten realisiert werden: Zum einen als Wasserstoff-Cluster-Jet-Target, bei dem gasförmiger, unter Druck stehender Wasserstoff in das Detektorvolumen eingespritzt wird und durch die Expansion im Vakuum zu einem Strom aus Wasserstoff-Clustern kondensiert, der dann durch den Strahlengang fliegt. Zum anderen als Pellet-Target, bei dem gefrorene Wasserstoffpellets mit Hochfrequenz durch den Strahlengang fallen. Beide Entwürfe erfüllen die Anforderung eines kompakten Aufbaus, denn der Wasserstoff wird durch ein dünnes Rohr von der Oberseite des Detektors eingeführt, damit zur Gewährleistung einer optimalen 4π -Raumabdeckung so wenig Detektorvolumen wie möglich beansprucht wird. Beide Targetrealisierungen haben außerdem eine Targetdicke von $4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, sodass mit

2. Das PANDA-Experiment am zukünftigen FAIR-Beschleunigerkomplex

der hohen Intensität des Antiprotonenstrahls die gewünschte Luminosität von bis zu $2 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ erreicht wird.

3. Das elektromagnetische Kalorimeter des PANDA-Experiments

Das elektromagnetische Kalorimeter (EMC) stellt eine Schlüsselrolle für das PANDA-Experiment dar. Es besteht aus insgesamt 15552 Bleiwolframatkristallen, aufgeteilt in 11360 Kristalle im Fassteil, 3600 in der Vorwärtsendkappe und 592 in der Rückwärtsendkappe. Da im PANDA-Experiment "Fixed-TargetKinematik vorliegt, variiert die Energie der zu detektierenden Teilchen zwischen wenigen MeV und mehreren GeV. Das elektromagnetische Kalorimeter sollte einen dynamischen Bereich von etwa 10(20) MeV bis 0,7 GeV in der Rückwärtsendkappe, bis zu 7,3 GeV im Fassdetektorteil und bis zu 14,6 GeV in der Vorwärtsendkappe abdecken. Gleichzeitig wird eine Luminosität von $2 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ und eine Ereignisrate von maximal 10 MHz im gesamten Detektorraum erwartet. Damit ergibt sich eine Ereignisrate pro Kristall im Fassteil zu etwa 100 kHz, pro Rückwärtsendkappenkristall zu etwa 1 kHz und pro Kristall in der Vorwärtsendkappe bis zu 500 kHz. Für diese Zwecke wird ein hochpräziser Szintillationsdetektor benötigt.

Der Detektor basiert auf dem Prinzip, dass durch den Bleiwolframatkristall fliegende elektromagnetisch geladene Teilchen oder hochenergetische Strahlung die Atome des Szintillatormaterials anregen und diese beim Zurückfallen auf den Grundzustand sogenanntes Szintillationslicht aussenden. Dieses wird am Ende des Szintillators von einem Photodetektor aufgenommen und in Photoelektronen umgewandelt, die als elektrische Ladung an einen Vorverstärker weitergeleitet und dort in einen elektrischen Signalpuls konvertiert werden. Dieser Puls wird dann von der Ausleseelektronik aufgenommen und ermöglicht Rückschlüsse auf das durchgeflogene Teilchen.

Das Institut für Kernphysik an der Universität Mainz arbeitet an der Entwicklung und dem Aufbau der Rückwärtsendkappe des elektromagnetischen Kalorimeters, welches symmetrisch um die Strahlachse Strahlwinkel von $151,4^\circ$ bis $169,7^\circ$ abdeckt. Dies ist zum Beispiel wichtig für die Detektion von neutralen Pionen, deren Hauptzerfallskanal zwei Photonen sind, die im Ruhesystem in entgegengesetzte Richtungen fliegen [4]. Wird also bei der Kollision des \bar{p} -Strahls und des Wasserstofftargets ein neutra-

3. Das elektromagnetische Kalorimeter des PANDA-Experiments

les Pion erzeugt, kann es durch Detektion der beiden Zerfallsphotonen nachgewiesen werden.

Im Folgenden sollen die Bleiwolframatkristalle und die elektronischen Bauteile des elektromagnetischen Kalorimeters im Bezug auf die Rückwärtsendkappe näher beleuchtet werden.

3.1. Bleiwolframatkristalle als Szintillatoren

Um bei Einzelkristall-Ereignisraten von 10 kHz bis maximal 100 kHz im Fassteil und bis zu 500 kHz in der Vorwärtsendkappe und der hohen erwarteten Luminosität von bis zu $2 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ eine sehr gute Energieauflösung zu gewährleisten, muss das Szintillationsmaterial für das absorbierende, homogene elektromagnetische Kalorimeter eine schnelle Lichtabklingzeit sowie gute Strahlungshärte vorweisen. Außerdem ist eine hohe Dichte von Vorteil, um einen kompakten Aufbau zu ermöglichen, denn innerhalb des Targetspektrometers sollte das EMC so wenig Platz wie möglich beanspruchen und dabei doch so präzise wie möglich arbeiten. Die hohe Dichte ermöglicht außerdem eine hohe Granularität, also eine hohe Anzahl an einzelnen Kristallen, durch die die Rekonstruktion von elektromagnetischen Schauern bei hohen Raten verbessert und Doppeltreffer-Signale minimiert werden.

Wie auch schon am CMS (Compact Muon Solenoid) und dem ALICE (A Large Ion Collider Experiment) Experiment am CERN werden zu diesem Zwecke Bleiwolframatkristalle eingesetzt. Sie erfüllen alle erforderlichen Aufgaben, haben allerdings im Verhältnis zu anderen anorganischen Szintillatoren, beispielsweise Natriumiod-Kristallen, eine kleinere Lichtausbeute, die nicht ausreichen würde, um Photonen an der unteren Energiegrenze von wenigen MeV zu detektieren. Um die Lichtausbeute zu erhöhen, wurden neue Bleiwolframatkristalle, PWO-II genannt, mit verbesserten Lumineszenzeigenschaften entwickelt. Deren Lichtausbeute liegt doppelt so hoch wie die der CMS-Bleiwolframatkristalle. Außerdem werden die Kristalle im Kalorimeterbetrieb auf -25°C gekühlt, wodurch die Lichtausbeute noch einmal um einen Faktor 4,5 im Vergleich zu $+25^\circ$ steigt.

Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über alle relevanten Eigenschaften der im PANDA-EMC verwendeten Bleiwolframatkristalle. Im Rückwärtsendkappen-Detektor werden 592 rechteckige Bleiwolframatkristalle von 20 cm Länge und einer Grundfläche von $24,4 \times 24,4 \text{ mm}^2$ verwendet werden. Die Länge entspricht etwa 22 Strahlungslängen X_0 , sodass eine Energieauflösung von weniger als 2% bei 1 GeV erreicht werden kann [2]. Durch die schnelle Abklingzeit, die typisch für anorganische Szintillatoren ist,

Dichte	ρ	8,28 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
Breite des Spektrums (aus [2], S. 43)	$FWHM$	100 nm
Energieverlust in Materie für min. ion. Teilchen	dE/dx (MIP)	10,1 MeV/cm
hygroskopisch		nein
Änderung der Lichtausbeute mit Temperatur [2]	dLY/dT	-3,0 %/°C

Tabelle 3.1.: Eigenschaften von Bleiwolframatkristallen ([4], S. 306, Tabelle 28.4). dLY/dT ist eine verbesserte Eigenschaft von PWO-II, mit der sich die Lichtausbeute beim Betrieb des PANDA-EMC bei -25°C statt +25°C ($\Delta T = 50^\circ C$) um einen Faktor 4,5 erhöht [2].

reicht eine Integrationszeit von 300 – 400 ns bei -25°C aus, um 95% des Szintillationslichts zu sammeln [2, 5].

3.2. Avalanche-Photodioden

Die Rückwärtsendkappe und der Fassteil des PANDA elektromagnetischen Kalorimeters nutzen zur Auslese des Szintillationslichts der Bleiwolframatkristalle sogenannte „Large Area Avalanche-Photodioden“ (APD), die in Zusammenarbeit mit der Firma Hamamatsu entwickelt wurden und eine aktive Fläche von $14 \times 6,8 \text{ mm}^2$ haben. Auf jede Kristallstirnseite werden zwei APD aufgebracht, um eine möglichst große Szintillatorfläche abzudecken. Die Photodioden bieten den Vorteil, dass sie in einem starken Magnetfeld, wie es im PANDA-Detektor vorliegt, problemlos arbeiten können, während Photomultiplier bei solch hohen Feldern nicht betrieben werden können. Der Vorgänger der in PANDA verwendeten Avalanche-Photodiode ist die quadratische Hamamatsu Silizium-APD, Typ S8664-1010 [14]. Sie weist die selben Leistungsmerkmale wie die PANDA-APD auf. Die Kennlinien der einzelnen in PANDA verwendeten Avalanche-Photodioden liegen für einen Temperaturbereich über 0°C durch Messungen von Andrea Wilms, GSI, bereits vor und werden zur Zeit für die später angepeilte Betriebstemperatur von -25°C gemessen [9].

3. Das elektromagnetische Kalorimeter des PANDA-Experiments

Die aktive Fläche einer Avalanche-Photodiode ist aufgebaut aus einem Silizium-Trägermaterial mit einer hochdotierten p-Schicht (p^+), einer intrinsischen Lichtabsorptionsschicht (i), einer p-dotierten Multiplikationsschicht (p) und einer hochdotierten n-Schicht (n^+). Die p-dotierten Schichten sind mit Akzeptoren dotiert, also mit Atomen mit einem Valenzelektron weniger als die Siliziumatome, die dann jeweils einen quasifreien positiven Ladungsträger, ein sogenanntes Loch, zur Verfügung stellen. Die n-dotierte Schicht ist mit Donatoren, also Atomen mit einem Valenzelektron mehr, dotiert, die jeweils einen quasifreien negativen Ladungsträger, ein Elektron also, beifügen.

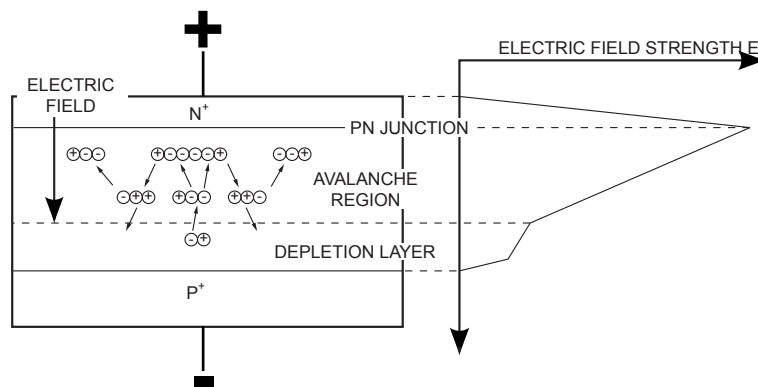


Abbildung 3.1.: Schematischer Aufbau einer Avalanche-Photodiode mit skizzierten Avalanche Effekt und Feldstärkenverteilung (aus [12]).

Zwischen der p^+ und der i-Schicht, der i- und der p-Schicht sowie der p- und der n^+ -Schicht befindet sich jeweils eine Raumladungszone, in der die quasifreien Löcher und Elektronen rekombinieren, sodass sich dort keine freien Ladungsträger mehr befinden. In dieser Zone baut sich dann ein elektrisches Feld von der n- zur p-dotierten Schicht auf. Durch eine angelegte Sperrspannung (Anode zur n^+ -Schicht, Kathode zur p^+ -Schicht) wird die Raumladungszone besonders zwischen der p- und der n^+ -Schicht vergrößert und das elektrische Feld weiter verstärkt. Trifft nun ein Photon durch die p^+ -Schicht auf die Lichtabsorptionsschicht, hebt es Elektronen aus dem Valenzband ins Leitungsband an, sobald die Photonenenergie größer als die Bandlücke von Silizium ($E_{G,Si} = 1,12 \text{ eV}$ [12]) ist. Es entsteht ein Elektron-Loch-Paar, von dem das Loch als quasifreier Ladungsträger in Folge des starken elektrischen Feldes in Richtung der p^+ -Außenschicht abgesaugt wird, das Photoelektron aber in Richtung der n^+ -Schicht stark beschleunigt wird, weil zwischen p- und n^+ -Schicht die höchste Feldstärke vorliegt. Auf diesem Weg kollidieren die beschleunigten, hochenergetischen Photoelektronen aus der Absorptionsschicht mit den Gitteratomen in der p-Schicht

und lösen Elektronen-Loch-Paare aus, sofern der Energieübertrag auf die Gitteratome höher als deren Ionisierungsenergie ist. Die erzeugten sekundären Photoelektronen werden ebenfalls beschleunigt und erzeugen weitere Elektron-Loch-Paare, sodass eine Elektron-Loch-Lawine entsteht. Die aufgrund des starken E-Feldes hohe Beschleunigung der Photoelektronen zur Anode hin führt zu einer sehr schnellen Reaktionszeit einer APD auf ein einkommendes Photon. Die Löcher der Ladungsträgerpaare werden über die Kathode abgeleitet, während die Photoelektronen an der Anode als negative elektrischen Ladung gesammelt werden, die proportional zur Energie des einkommenden Photons ist.

Abbildung 3.1 zeigt den schematischen Aufbau einer Avalanche-Photodiode. Zum Schutz ist auf der außen liegenden p⁺-Schicht ein Epoxy-Fenster aufgebracht und die komplette Photodiode in eine Keramikhülle gefasst.

Die für PANDA verwendete Silizium-APD ist für Photonen einer Wellenlänge ab maximal 1100 nm empfindlich, weil die Bandlücke von Silizium $E_G = 1,12 \text{ eV}$ beträgt. Wellenlängen im UV-Bereich (<320 nm) werden nicht mehr detektiert, weil das Epoxidharz-Fenster der APD UV-Photonen absorbiert [13]. Damit liegt die Empfindlichkeit im Bereich des von Bleiwolframat abgestrahlten Lichts von $\lambda_{max} = 420 \pm 50 \text{ nm}$.

$$\lambda_{max,APD} = \frac{hc}{E_{\gamma max}} = \frac{hc}{E_G} = \frac{1,2405 \cdot 10^{-6} \text{ eV} \cdot \text{m}}{1,12 \text{ eV}} = 1107,56 \text{ nm} \quad (3.1)$$

mit dem Planckschen Wirkungsquantum $h = 4,135 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ und der Lichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Der Avalanche-Effekt ermöglicht die Detektion einzelner Photonen und macht die Avalanche-Photodiode sehr empfindlich für kleinste Lichtmengen. Charakteristisch für eine Avalanche-Photodiode ist ihre hohe Quanteneffizienz, die im Falle der im PANDA-Experiment verwendeten APD bei 70% liegt, und ihr Verstärkungsfaktor von etwa 100. Die Quanteneffizienz QE gibt das Verhältnis zwischen der Anzahl der erzeugten Elektron-Loch-Paare und der Anzahl der eingefallenen Photonen in Prozent an. Sie ist abhängig von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung, denn Photonen unterschiedlicher Wellenlängen dringen unterschiedlich tief in die Photodiodenschichten ein. Nur in einem gewissen Energiebereich deponieren die Photonen genau in der Lichtabsorptionsschicht ihre Energie und lösen durch Ladungsträgerpaarbildung eine Ladungsträgerlawine aus. Abbildung 3.2 zeigt die Quanteneffizienz in Abhängigkeit von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung für die Si-APD S6884-1010 von Hamamatsu, die die selben Leistungsmerkmale wie die in PANDA verwendete Avalanche-Photodiode vorweist. Die in PANDA verwendete APD hat also eine Quanteneffizienz von 70%

3. Das elektromagnetische Kalorimeter des PANDA-Experiments

beim Maximum der emittierten Wellenlänge $\lambda_{max} = 420$ nm des Bleiwolframatkristalls.

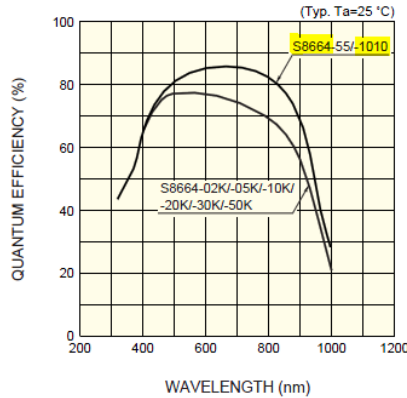


Abbildung 3.2.: Quanteneffizienz für die Hamamatsu SiAPD S8884-1010 in Abhängigkeit von der eingestrahltten Wellenlänge λ bei $T = 25$ °C [14]. Die im elektromagnetischen Kalorimeter von PANDA verwendeten Hamamatsu SiAPD haben die gleiche Quanteneffizienz.

Der Verstärkungsfaktor M beschreibt, wie viele sekundäre Photoelektronen aufgrund des Avalanche-Effekts von einem durch ein einkommendes Photon ausgeschlagenen primären Elektron-Loch-Paar erzeugt werden und liegt bei Avalanche-Photodioden in einer Größenordnung von 100. Er ist abhängig von der Stärke des elektrischen Feldes in der Multiplikationsschicht, die wiederum von der Höhe der angelegten Sperrspannung abhängt. Es gibt einen maximalen Verstärkungsfaktor für jede Photodiode. Liegt eine noch höhere Spannung an, bricht die Photodiode durch und es fließt kurz ein hoher Strom, der die Diode zerstören kann. Diese Spannung bezeichnet man als Durchbruchsspannung und liegt bei den in PANDA verwendeten Hamamatsu SiAPD im Bereich von mehreren 100 Volt (siehe Kennlinien, Abbildungen 3.3 und apd-kennlinien2). Sie sinkt mit sinkender Temperatur. Der Verstärkungsfaktor bei einer bestimmten Sperrspannung sinkt außerdem mit höherer Temperatur, weil die Kristallgittervibrationen dann zunehmen und beschleunigte Elektronen bereits mit den Gitteratomen stoßen, bevor sie die nötige Ionisierungsenergie erreicht haben, wodurch weniger neue Elektron-Loch-Paare erzeugt werden können. Zur Vermeidung einer Verstärkungsschwankung sollten Avalanche-Photodioden bei einer konstanten Temperatur betrieben werden.

Das Rauschverhalten von Avalanche-Photodioden ist im Wesentlichen abhängig von der Betriebstemperatur und der angelegten Sperrspannung.

3.2. Avalanche-Photodioden

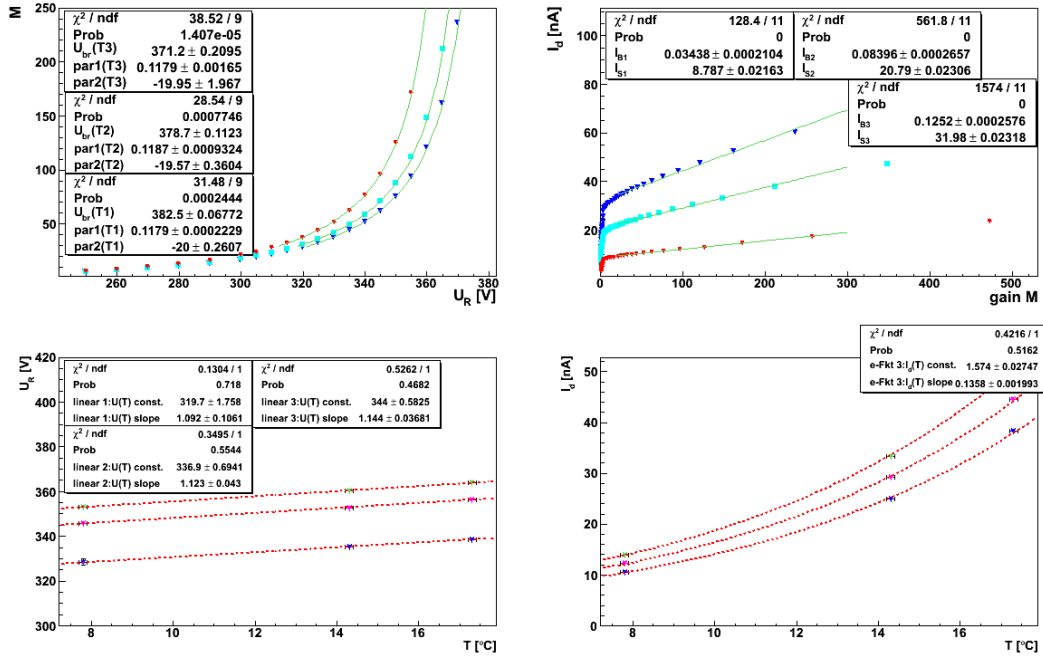


Abbildung 3.3.: Kennlinien der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Hamamtsu Si-APD mit der PANDA-internen Seriennummer 212.

links oben: Verstärkungsfaktor M in Abh. von angelegter Sperrspannung für drei Temperaturen ($T_{rot} = 17,3^\circ\text{C}$, $T_{tuerkis} = 14,3^\circ\text{C}$, $T_{blau} = 7,8^\circ\text{C}$) mit Durchbruchsspannungen U_{br} als Fit-Parameter. rechts oben: Dunkelstrom I_d in Abh. vom Verstärkungsfaktor M für die selben Temperaturen. unten: Sperrspannung U_R und Dunkelstrom I_d in Abh. von der Betriebstemperatur T für $M_{gruen} = 150$, $M_{rosa} = 100$, $M_{blau} = 50$. (Plots gemessen und freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Andrea Wilms, GSI [9])

Dunkelstrom, also Strom, der auch ohne einfallende Photonen fließt, beschreibt den Fluss von Minoritätsladungsträgern (also Löchern in der n-Schicht und Elektronen in der p-Schicht), die zusätzlich zu den durch einfallende Photonen erzeugten Elektronen und Löchern durch die Photodiodenschichten fließen und so den Signalstrom verfälschen. Je höher die angelegte Sperrspannung, desto höher ist auch der Dunkelstrom.

Zusätzlich führt die thermische Bewegung der Gitteratome zur Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren in der Absorptionszone, die dann zur Ladungsträgeransammlung an Kathode und Anode beitragen, obwohl sie nicht durch ein einfallendes Photon erzeugt wurden. Dieser Effekt steigt also mit steigender Temperatur und trägt eben-

3. Das elektromagnetische Kalorimeter des PANDA-Experiments

falls zum Rauschen der APD bei.

Der Betrieb des PANDA-Kalorimeters bei einer konstanten Temperatur von -25°C führt zu einer Vermeidung von Verstärkungsfluktuationen und einer Reduktion des APD-Dunkelstroms um das Zehnfache im Vergleich zu Raumtemperatur [11].

3.3. PANDA Vorverstärker und Ausleseelektronik

Da die an der Anode der Avalanche-Photodiode aus Photoelektronen gesammelte elektrische Ladung zu gering ist, um als elektrischer Puls ausgelesen zu werden, wird zwischen APD und Ausleseelektronik ein ladungsempfindlicher Vorverstärker geschaltet, der die elektrische Ladung, die durch die Kapazität C der APD integriert und zum Vorverstärker geleitet wird, in einen linear verstärkten, positiven Spannungspuls umwandelt. Für die PANDA-Kollaboration werden spezielle ASIC (Application Integrated Specific Circuit) Verstärker mit niedrigem Rauschverhalten und niedriger Leistungsaufnahme an der Universität Basel entwickelt. Die folgende Darstellung basiert auf deren Veröffentlichung zur Vorverstärker-Version SP 8883a02, die während der Aufbauarbeiten für den Prototypen benutzt wurden (siehe [11]).

Die niedrige Leistungsaufnahme ist wichtig, da die Vorverstärker sich später im kalten Volumen des elektromagnetischen Kalorimeters nahe an den Kristallen befinden werden. Die Kristalle müssen über das gesamte Kristallvolumen homogen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ gekühlt werden, damit die temperaturabhängige Lichtausbeute im gesamten Kristall gleich ausfällt ([5]). Sollte der Vorverstärker eine starke Wärmeentwicklung durch hohe Leistungsaufnahme vorweisen, besteht die Gefahr, dass die Kristalle an einer Seite erwärmt werden. Außerdem müsste dann umso mehr Kühlleistung vom Kühlsystem erbracht werden. Die Leistungsaufnahme der im Prototypen verwendeten Vorverstärker beträgt 45 mW und kann bei hohen Ereignisraten und maximaler Photonenenergie ($\tilde{10}$ GeV) kurzzeitig bis zu 90 mW ansteigen.

Das niedrige Rauschverhalten hingegen ist entscheidend, um die niederenergetischen Photonen von wenigen MeV noch detektieren zu können. Das Gesamttrauschen des APD-Vorverstärker-Systems ist die Summe aus dem Dunkelstrom der APD und dem Rauschen des Vorverstärkers. Der Dunkelstrom der APD wird bei der Betriebstemperatur von -25°C um das Zehnfache im Vergleich zu Raumtemperatur reduziert, sodass der Vorverstärker mit einer relativ hohen Eingangskapazität von 270 pF das Rauschen dominiert. Die äquivalente Rauschladung (ENC, equivalent noise charge) beträgt $1250 e^-$ bei -25°C , was einer Spannungspulshöhe von $90 \mu\text{V}$ entspricht.

Die Anstiegszeit beträgt $t_{\text{Anstieg}} = 18 \text{ ns}$. Das Entladen der Verstärkerkapazität folgt

3.4. Abschätzung der erwarteten Pulshöhe durch ein kosmisches Myon

dem exponentiellen Gesetz $U(t) = U_0 \cdot \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right)$ und hat eine Abklingkonstante von $\tau = 25 \mu\text{s}$.

Kommt aufgrund der hohen Ereignisraten schon vor dem vollständigen Entladen der Vorverstärkerkapazität erneut eine Ladungsmenge von der APD, beobachtet man ein „pile-up“, das heißt der neue Spannungspuls steigt schon auf, obwohl die Abklingkurve des vorherigen Pulses noch nicht auf Grundniveau angekommen ist, und ist damit nominell viel höher als der erste Spannungspuls. Dieser Effekt kann später in der Datenauslese korrigiert werden, was unter anderem Gegenstand der Bachelorarbeit von Pascal Lautz an der Universität Mainz ist [6].

Die Ladungsempfindlichkeit gibt an, welche Spannung pro einkommender Ladungsmenge vom Vorverstärker konvertiert werden kann und beträgt $S = 0.5 \text{ V/pC}$. Der Vorverstärker kann damit extrem kleine Ladungsmengen verarbeiten, ist wegen dieser Empfindlichkeit aber auch sehr anfällig für Störfelder von außen und sollte erschütterungsfrei und abgeschirmt betrieben werden. Die Leitungsübertragung erfolgt über Kabel mit einer Impedanz von 50 Ohm. Die Betriebsspannung beträgt $\pm 6 \text{ V}$. Weitere Anschlüsse des Vorverstärkers sind ein Hochspannungsanschluss für die APD sowie ein Signalausgang.

3.4. Abschätzung der erwarteten Pulshöhe durch ein kosmisches Myon

Die Lichtausbeute LY eines Bleiwolframatkristalles wurde von der PANDA-Kollaboration mit Hilfe eines Photomultipliers mit einer Quanteneffizienz $QE_{PMT} = 18\%$ und einer Integrationszeit von 300ns gemessen ([2], S. 51, 54). Demnach wurden 90 Photoelektronen (*phe*) von dem PMT pro 1 MeV im Kristall deponierter Energie bei -25°C und 20 Photoelektronen/MeV bei $+25^\circ\text{C}$ erzeugt. Die Lichtausbeute $LY_{Kristall}$ des Kristalls, d.h. die Anzahl der Photonen, die im Kristall pro deponierter Energiemenge entstehen, lässt sich somit berechnen als

$$LY_{Kristall} = \frac{LY_{PMT}}{QE_{PMT}} \quad (3.2)$$

$$\text{@ } -25^\circ\text{C} \rightarrow LY_{Kristall} = \frac{90 \text{ phe/MeV}}{0,18} = 500 \gamma/\text{MeV} \quad (3.3)$$

$$\text{@ } +25^\circ\text{C} \rightarrow LY_{Kristall} = \frac{20 \text{ phe/MeV}}{0,18} \approx 111 \gamma/\text{MeV} \quad (3.4)$$

Da die Kristalle auf allen Seiten außer der Stirnseite, wo die APD aufgebracht werden, von einer hochreflektiven Folie umwickelt werden, können die Lumineszenz-Photonen

3. Das elektromagnetische Kalorimeter des PANDA-Experiments

nur an der Stirnseite aus dem Kristall entweichen. Die Kristalle haben eine Grundfläche von

$$A_{Kristall} = 24,4 \text{ mm} \times 24,4 \text{ mm} = 595,36 \text{ mm}^2. \quad (3.5)$$

Eine APD hat eine aktive Fläche von

$$A_{aktiv} = 14 \text{ mm} \times 6,8 \text{ mm} = 95,2 \text{ mm}^2. \quad (3.6)$$

und bedeckt damit nur etwa 16% der Kristallgrundfläche. Unter der Annahme, dass die Szintillationsphotonen homogen verteilt durch die Stirnseitenfläche austreten, treffen auf eine APD also bei einer Temperatur von +25°C nur

$$\begin{aligned} LY_{APD} &= \frac{LY_{Kristall}}{\frac{A_{Kristall}}{A_{aktiv}}} \approx \frac{111 \gamma/\text{MeV}}{595,36 \text{ mm}^2} \cdot 95,2 \text{ mm}^2 \approx 17,75 \gamma/\text{MeV} \\ &\approx 17 \gamma/\text{MeV}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Die Quanteneffizienz der APD liegt für die vom Bleiwolframatkristall abgestrahlte Maximumwellenlänge $\lambda_{max} = 420 \text{ nm}$ bei $QE = 70\%$ beziehungsweise $QE = 0,7 \text{ phe}/\gamma$.

$$\begin{aligned} n_{e^-} &= LY_{APD} \cdot QE \approx 17 \gamma/\text{MeV} \cdot 0,7 \text{ phe}/\gamma \approx 11,9 \text{ phe}/\text{MeV} \\ &\approx 11 \text{ phe}/\text{MeV} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Damit konvertiert eine einzelne APD also die eingefallenen 17 Photonen/MeV in 11 Photoelektronen/MeV. Bei einer angelegten Sperrspannung von 340V liegt der Verstärkungsfaktor der APD bei Raumtemperatur bei $M \approx 50$, wodurch an der Anode der APD

$$\begin{aligned} n_{e^- \text{ Anode}} &= n_{e^-} \cdot M \approx 11 \text{ phe}/\text{MeV} \cdot 50 \\ &\approx 550 \text{ phe}/\text{MeV} \end{aligned} \quad (3.9)$$

sekundäre Photoelektronen angesammelt und als negative Ladung an den Vorverstärker weitergegeben werden, wobei die Ladungsmenge Q mit der Elementarladung $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ berechnet werden kann.

$$Q = n_{e^- \text{ Anode}} \cdot e \approx 0,088 \text{ fC}/\text{MeV} \quad (3.10)$$

Die Ladungsempfindlichkeit des Vorverstärkers beträgt $S = 0,5 \text{ V}/\text{pC}$, somit beträgt die Amplitude des Spannungspulses dann

$$U = Q \cdot S \approx 0,088 \text{ fC}/\text{MeV} \cdot 5 \cdot 10^{-4} \text{ V}/\text{fC} \approx 44 \mu\text{V}/\text{MeV}. \quad (3.11)$$

Kosmische Myonen können annähernd als minimal ionisierende Teilchen betrachtet werden und haben somit einen Energieverlust in Bleiwolframat von

3.4. Abschätzung der erwarteten Pulshöhe durch ein kosmisches Myon

$\frac{dE}{dx} = 10,1 \text{ MeV/cm}$ (siehe Tabelle 3.1). Senkrecht zur Kristallachse durch den Kristall fliegende Myonen legen genau $\Delta x = 2,44 \text{ cm}$ zurück. Dies entspricht der minimal deponierten Energie eines kosmischen Myons, denn wenn ein Myon schräg einfällt, durchfliegt es eine längere Strecke im Kristall und kann damit auch mehr Energie deponieren.

$$\frac{dE}{dx_{ver}} = 2,44 \text{ cm} \cdot 10,1 \text{ MeV/cm} = 24,64 \text{ MeV} \quad (3.12)$$

$$\rightarrow Q_{ver} \approx 0,088 \text{ fC/MeV} \cdot 24,64 \text{ MeV} \approx 2,17 \text{ fC} \quad (3.13)$$

$$\rightarrow U_{ver} \approx 44 \mu\text{V/MeV} \cdot 24,64 \text{ MeV} \approx 1,08 \text{ mV} \quad (3.14)$$

Der Einfall horizontal zur Kristallachse, wenn das Myon also den Kristall der Länge nach durchfliegt, entspricht der maximalen Energiedeponierung.

$$\frac{dE}{dx_{hor}} = 20 \text{ cm} \cdot 10,1 \text{ MeV/cm} = 202 \text{ MeV} \quad (3.15)$$

$$\rightarrow Q_{hor} \approx 0,088 \text{ fC/MeV} \cdot 202 \text{ MeV} \approx 17,78 \text{ fC} \quad (3.16)$$

$$\rightarrow U_{hor} \approx 44 \mu\text{V/MeV} \cdot 202 \text{ MeV} \approx 8,89 \text{ mV} \quad (3.17)$$

Bei einer Temperatur von -25°C steigt die Lichtausbeute des Bleiwolframatkristalls wie bereits erwähnt auf $500 \gamma/\text{MeV}$ statt $111 \gamma/\text{MeV}$, d.h. sie ist 4,5 mal so groß wie bei $+25^\circ\text{C}$. Damit steigert sich auch die Anzahl der erzeugten Photoelektronen $n_{e^- \text{ Anode}}$, die Ladungsmenge Q und schließlich die Höhe des Spannungspulses des Vorverstärkers ums 4,5-fache:

$$\rightarrow U_{ver} \approx 1,08 \text{ mV} \cdot 4,5 \approx 4,86 \text{ mV} \quad (3.18)$$

$$\rightarrow U_{hor} \approx 8,89 \text{ mV} \cdot 4,5 \approx 40 \text{ mV} \quad (3.19)$$

Um die Höhe des Spannungspulses eines durch den Bleiwolframatkristall fliegenden Myons bei verschiedenen Verstärkungsfaktoren zu berechnen, benutze man also folgende Formel:

$$U(M, \Delta x, LY_{Kristall}) = \frac{A_{aktiv}}{A_{Kristall}} \cdot QE \cdot e \cdot S \cdot \frac{dE}{dx} \cdot \Delta x \cdot LY_{Kristall} \cdot M \quad (3.20)$$

$$= 9,06 \cdot 10^{-8} \frac{\text{MeV} \cdot \text{V}}{\gamma \cdot \text{cm}} \cdot \Delta x \cdot LY_{Kristall} \cdot M \quad (3.21)$$

Die tatsächlich gemessene Spannungspulshöhe hängt von sehr vielen Faktoren ab, deren Schwankungen im Experiment teilweise noch nicht gut eingeschätzt werden können. M schwankt je nach angelegter Sperrspannung und Temperatur und unterscheidet sich bei jeder Photodiode. Es wird ein Fehler von $\delta M = 10$ durch Interpretation der Hamamatsu SiAPD-Kennlinie (Abbildung 3.3) angenommen. Außerdem ist die

3. Das elektromagnetische Kalorimeter des PANDA-Experiments

Lichtausbeute des Kristalls mit einer Schwankung von 3%/°C stark temperaturabhängig. Der Fehler wird im Messaufbau auf $\pm 5^\circ\text{C}$ und somit $\delta LY = 15\%$, also $\sim 17 \frac{\gamma}{\text{MeV}}$ bei $+25^\circ\text{C}$ und $75 \frac{\gamma}{\text{MeV}}$ eingeschätzt. Weiterhin ist die tatsächlich von den Myonen zurückgelegte Wegstrecke Δx abhängig vom Einfallswinkel. Die Raumrichtungsverteilung kosmischer Myonen ist proportional zum $\cos(\theta)$, wobei θ der Winkel relativ zur Senkrechten zur Erdoberfläche ist, das heißt die meisten Myonen fliegen senkrecht zur Erdoberfläche, die wenigsten parallel dazu. Bei einem Aufbau des elektromagnetischen Kalorimeters mit horizontal gelagerten Kristallen werden also am häufigsten kleinere Pulshöhen im Bereich von U_{ver} erwartet, was einem Einfall senkrecht zur Erdoberfläche und damit senkrecht zur Kristallachse entspricht. Hier wird eine durchschnittliche Durchflugstrecke von 2,44 cm und ein Fehler von $\delta(\Delta x) = 5 \text{ cm}$ angenommen. Die anderen Faktoren werden hier als annähernd fehlerfrei angenommen. Mit gaußscher Fehlerfortpflanzung ergeben sich damit Fehler in der Spannungspulshöhe bei Raumtemperatur und bei -25°C von

$$\delta U = \sqrt{\left(\frac{A_{aktiv}}{A_{Kristall}} \cdot QE \cdot e \cdot S \cdot \frac{dE}{dx}\right)^2 \cdot \sqrt{(\delta\Delta x \cdot M \cdot LY)^2 + (\Delta x \cdot \delta M \cdot LY)^2 + (\Delta x \cdot M \cdot \delta LY)^2}} \quad (3.22)$$

$$\Rightarrow \delta U_{25^\circ\text{C}} \approx 9 \cdot 10^{-8} \frac{\text{MeV} \cdot \text{V}}{\gamma \text{cm}} \cdot 27955 \frac{\gamma \cdot \text{cm}}{\text{MeV}} \approx 3 \text{ mV} \quad (3.23)$$

$$\Rightarrow \delta U_{-25^\circ\text{C}} \approx 9 \cdot 10^{-8} \frac{\text{MeV} \cdot \text{V}}{\gamma \text{cm}} \cdot 9125927 \frac{\gamma \cdot \text{cm}}{\text{MeV}} \approx 11 \text{ mV}. \quad (3.24)$$

Also ergeben sich minimale und maximale erwartete Pulshöhen, ausgelöst durch ein den Kristall vertikal beziehungsweise horizontal durchquerendes kosmisches Myon, mit den Gleichungen (3.17) und (3.14) bei einer Kristalltemperatur von 25°C zu

$$U_{ver,25^\circ\text{C}} \approx 1(3) \text{ mV}, \quad (3.25)$$

$$U_{hor,25^\circ\text{C}} \approx 9(3) \text{ mV}. \quad (3.26)$$

Bei einer Kristalltemperatur von -25°C ergeben sich mit den Gleichungen (3.19) und (3.18) die erwarteten minimalen und maximalen Spannungspulshöhen zu

$$U_{ver,-25^\circ\text{C}} \approx 6(11) \text{ mV}, \quad (3.27)$$

$$U_{hor,-25^\circ\text{C}} \approx 40(11) \text{ mV}. \quad (3.28)$$

Um umgekehrt aus einem gemessenen Signal die deponierte Energie des durchgeflogenen Myons unter der Bedingung zu berechnen, dass der Verstärkungsfaktor $M \approx 50$

3.4. Abschätzung der erwarteten Pulshöhe durch ein kosmisches Myon

beträgt, benutzt man Gleichung (3.11), die den Spannungsanstieg bei Raumtemperatur pro im Kristall deponierter Energie angibt. So kann man bei den später gemessenen Rauschbreiten einen Vergleich anstellen, wieviel deponierter Myonenenergie die Rauschbreite entspricht.

$$U_{+25^{\circ}C} \approx 44 \mu\text{V}/\text{MeV} \cdot E \quad (3.29)$$

$$\Leftrightarrow E_{+25^{\circ}C} \approx \frac{U}{44 \mu\text{V}/\text{MeV}} \quad (3.30)$$

$$\Leftrightarrow E_{-25^{\circ}C} \approx \frac{U}{4,5 \cdot 44 \mu\text{V}/\text{MeV}} \approx \frac{U}{198 \mu\text{V}/\text{MeV}} \quad (3.31)$$

4. Vorbereitungen und Aufbau des Prototypen für das elektromagnetische Kalorimeter

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde am Aufbau eines Prototyp des elektromagnetischen Kalorimeters mit acht Kristallen gearbeitet, dem sogenannten „Proto8“. Dieser soll später acht funktionstüchtige Kristalle mit Elektronik enthalten und kosmischen Myonen messen, um die Elektronik zu kalibrieren. Der Prototyp besteht im Prinzip aus einem abgeschlossenen Detektorvolumen, in dem sich das elektromagnetische Kalorimeter mit acht Kristallen samt angeschlossenen Avalanche-Photodioden und Vorverstärkern befindet und das auf -25°C heruntergekühlt wird. Außerhalb des kalten Detektorvolumens werden funktionale Komponenten wie zum Beispiel die Hochspannungsversorgung für die Avalanche-Photodioden platziert und Schläuche und Kabel führen ins Innere.

Es wurden zunächst Versuche mit unterschiedlichen Aufbauten mit zwei funktionsfähigen Kristall-APD-Modulen gemacht und dabei verschiedene Aspekte des geplanten Aufbaus getestet und adjustiert, so zum Beispiel der mechanische Aufbau selbst, die Kühlung und das Rauschen der Elektronikbauteile. Zudem wurde die Vorbereitung der Kristalle mit den Avalanche-Photodioden sowie die Befestigung der Vorverstärker an den APD und innerhalb des Detektorvolumens behandelt. Zum Einwickeln der Kristalle in Reflektorfolie wurde ein Form-Verfahren für die Reflektorfolie DF2000MA von 3M erarbeitet und später die Folienreflektivität gemessen und kontrolliert. Somit können alle getätigten Aufbauten und Messungen als Vorarbeiten für den endgültigen „Proto8“ angesehen werden. Der hier erarbeitete Testaufbau wird im Folgenden mit „SuperProto8“ bezeichnet. Der vollständige Prototyp mit acht Kristallen konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht abgeschlossen werden.

4. Vorbereitungen und Aufbau des Prototypen für das elektromagnetische Kalorimeter

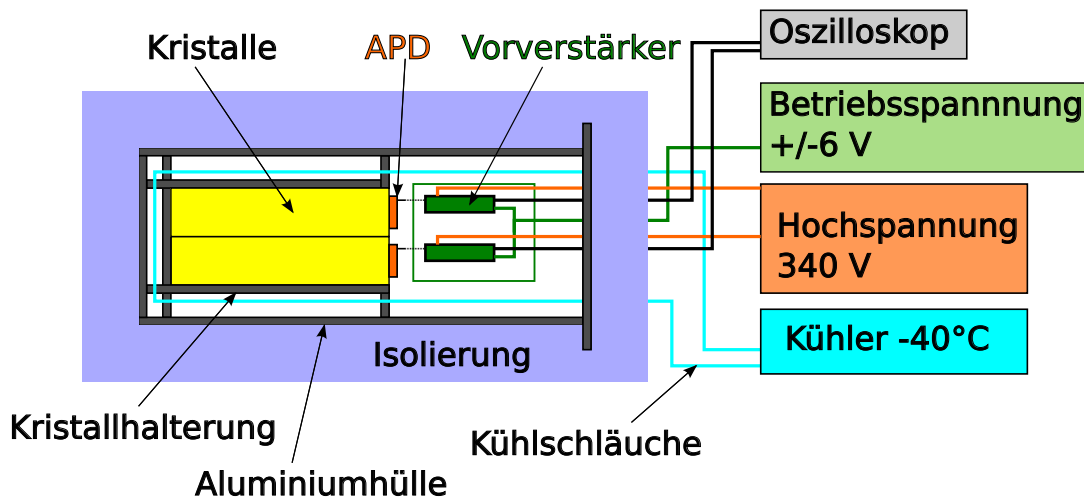


Abbildung 4.1.: Funktionsdiagramm für den EMC-Prototypen.

4.1. Gesamtaufbau des Prototyps „SuperProto8“

Eine Aluminiumbox von 35 cm Länge, 14 cm Breite und 7,7 cm Höhe und eine anschraubbare Verschlussplatte mit O-Ring bilden die gas- und lichtdichte Hülle des elektromagnetischen Kalorimeters. Die Verschlussplatte hat mehrere Bohrungen, durch die Kabel und Schläuche ins Innere geführt werden können. Als Isolationsschicht um die Aluminiumbox herum dient eine weitere Box, gefertigt aus 5 bis 10 cm dickem Polystyrol-Schaum.

In die Aluminiumbox hinein führen Kühlschläuche und Signal-, Hochspannungs- und Versorgungsspannungskabel für Vorverstärker und Avalanche-Photodioden. Mit dem Versorgungsspannungsanschluss des Vorverstärkers wurden drei flexible Kabel für +6 Volt, -6 Volt und die Erdung mithilfe eines Steckers fest verbunden. Die Signalkabel für die Übertragung des Vorverstärkersignals zur Ausleseelektronik sind zur Zeit durch 50 Ohm Lemo-Koaxialkabel mit einer Steckverbindung für die Signalpins des Vorverstärkers an einer Seite realisiert. Die Hochspannungskabel sind ebenfalls Lemo-Kabel mit einer Steckverbindung für den Vorverstärker-Hochspannungseingang.

Innerhalb der Aluminiumbox befindet sich im hinteren Teil eine 20,5 cm lange Aluminium-Innenbox, die acht Kristalle in zwei Reihen zu je vier Kristallen zentral in der Aluminiumbox fixiert. Sie ist auf Maß gefertigt, sodass einerseits kein Zwischenraum zwischen Innenbox-Füßen und Aluminiumbox, andererseits auch zwischen den acht Kristallen und der Innenbox weniger als 1 mm Zwischenraum bleibt. Abbildung 4.2 zeigt die Innenbox mit dem derzeitigen Kühlschlauch-Aufbau. Die übrigen 14 cm bis zur Verschlussplatte bieten Platz für Vorverstärker mit Halterung, eingehende Ka-

4.1. Gesamtaufbau des Prototyps „SuperProto8“

bel und Kühlschläuche. Mit der Innenbox ist es auch möglich, das Kalorimeter um 90° gedreht zu betreiben, sodass die Kristalle sich in aufrechter Position befinden und es wahrscheinlicher ist, dass ein Myon den Kristall der Länge nach durchfliegt. Damit bekäme man einen wesentlich höheren Signalpuls (siehe 3.4). Im derzeitigen Aufbau in der lichtdichten Aluminium-Kiste befinden sich die Kristalle in horizontaler Lage, weil die Detektorbox nicht hochkant in die Kiste passt.

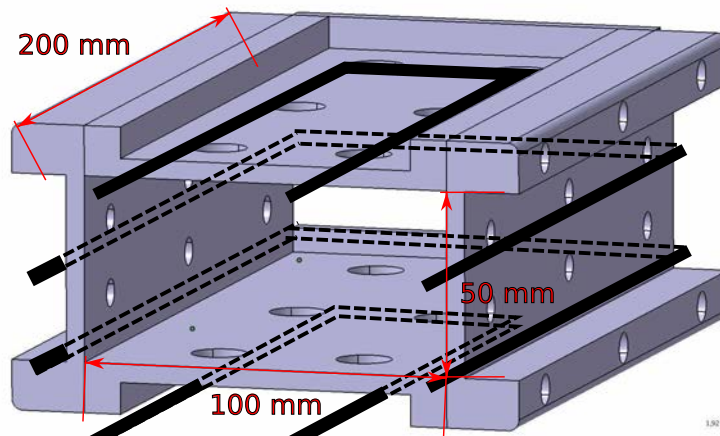


Abbildung 4.2.: Schematische 3D-Ansicht der Kristall-Innenbox [8] mit ange deutetem Kühlschlau ch-System in schwarz.

Der Kühlschlau ch, der mit dem Ausgang des externen Kue hlers verbunden ist, wird mit Hilfe von drei Y-Verbindungsstue cken auf vier Kue hlschlae uche mit einem Innendurchmesser von 6 mm aufgeteilt, die in das Detektorinnere fue hren und dort an jeder Seite der Innenbox entlanglaufen wie in Abbildung 4.2 in Schwarz ange deutet. Die Ecken der Kue hlschleifen sind mit L-Verbindungsstue cken realisiert. Die vier ausgehenden Schlae uche werden au e rhalb der Aluminiumbox mit weiteren drei Y-Verbindungsstue cken wieder auf einen Schlauch reduziert, der zurue ck zum Kue hler fue hrt. Alle Kue hlschlae uche bis zum Eintritt in die Aluminiumbox sind mit Isolations schaum isoliert und die lichtdichte Box mit Isolationsmaterial und Styropor gefue llt.

Fue r den „SuperProto8“-Aufbau standen nur zwei Hochspannungskanae le zur Verfu e gung, weswegen immer nur zwei Avalanche-Photodioden gleichzeitig betrieben werden konnten. Um wenigstens zwei Kristall-Module zu vergleichen, wurden die Kristalle 1713 und 1712 (PANDA-interne Seriennummer) mit jeweils zwei APD geklebt und mit der Reflektorfolie vorbereitet.

Beide im noch folgenden Kapitel 4.4.3 vorgestellten Mo e glichkeiten, den Vorverstae rker mit der Avalanche-Photodiode zu verbinden, wurden in diesem Aufbau getestet. Kris-

4. Vorbereitungen und Aufbau des Prototypen für das elektromagnetische Kalorimeter

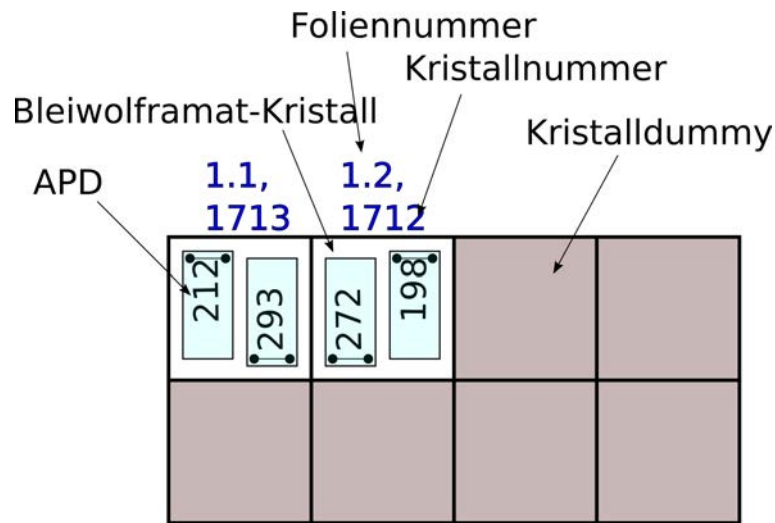


Abbildung 4.3.: Position der Kristalle 1712 und 1713 mit aufgeklebten Avalanche-Photodioden (mit den PANDA-internen Seriennummern) in der Innenbox (nicht maßstabsgetreu).

tall 1712 wurde mit der weißen Kapsel bestückt, in die ein Vorverstärker eingeschraubt wurde und direkt mit APD 198 zusammengesteckt war. Kristall 1713 wurde ohne Kapsel eingebaut und die zugehörige APD 212 über ein Twisted-Pair-Kabel mit dem Vorverstärker verbunden. Dieser lag lose in der Aluminiumbox, war aber zum Schutz vollständig mit Isolationsband verkleidet. Sollte die Kabellösung sich durchsetzen, werden die Vorverstärker später in dem U-Profil befestigt wie in Kapitel 4.4.3 beschrieben. Sechs weitere Kristalle wurden in bereits geformte Reflexionsfolie verpackt, aber nicht mit Elektronik ausgestattet und dienen im Aufbau als Kristalldummies, um bei den späteren Temperaturstudien und Rauschmessungen den Zusammenschluss von acht Bleiwolframatkristallen zu simulieren. Die Schutzfolie auf der Reflektorfolieninnenseite wurde für diese Kristalle nicht abgezogen, um die Reflexionsschicht für spätere Aufbauten für Kristalle mit Elektronik zu schützen. Alle acht Kristalle sind in der Innenbox platziert wie in Abbildung 4.3 zu sehen. Abbildung 4.4 zeigt den Aufbau des Prototypen-Kalorimeters mit Kapsel- und Kabel-Kristallmodul, Kühlschläuchen und eingebauten Temperatursensoren zur Temperaturüberwachung vor dem Einschieben in die Aluminiumbox.

Um den Prototypen für das Herunterkühlen so weit abzudichten, dass keine Luftzirkulation ins Innere möglich ist, wurden die fünf Verschlussplatten-Bohrungen mit Isolationsmaterial ausgestopft und mit Isolationsband verklebt. Dadurch wird verhindert, dass Luft von außen in das kalte Volumen strömt, wo dann Feuchtigkeit

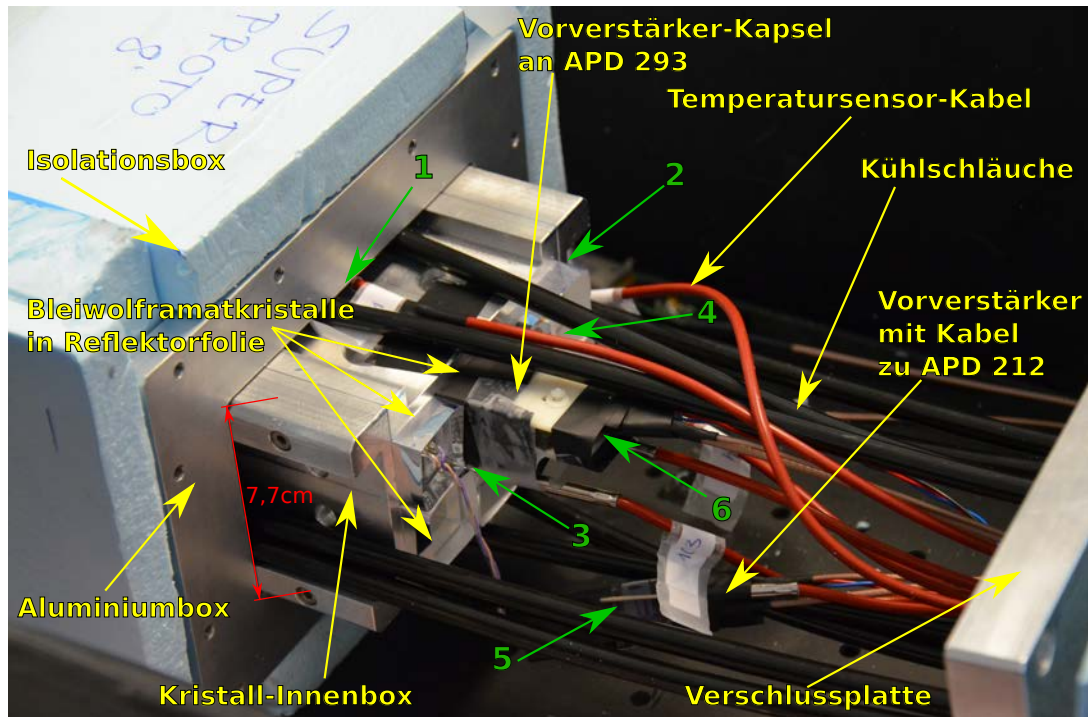


Abbildung 4.4.: „SuperProto8“ Aufbau vor dem Einschieben in die Aluminiumbox. Die mit Avalanche-Photodioden ausgestatteten Kristalle liegen links in der oberen Reihe innerhalb der Kristall-Innenbox, einmal durch ein Twisted-Pair-Kabel und einmal mit der APD-Kapsel mit dem Vorverstärker verbunden. Position der Temperatursensoren in grün gekennzeichnet.

auskondensieren und sich auf den empfindlichen Vorverstärkern absetzen könnte.

4.2. Funktionale Komponenten für den Prototypen

Um die Lichtdichtigkeit des Detektorvolumens sicherzustellen, soll der Prototypendetektor in einer lichtdichten Aluminiumbox betrieben werden. Diese hat mehrere kleine Ausgänge für Kabel und Kühlschläuche, ist aber sonst lichtdicht isoliert.

Für die Kühlung des elektromagnetischen Kalorimeters auf -25°C wird im Rahmen dieser Arbeit ein externer Kühlapparat der Firma Fryka-Kältetechnik, Modell Fryka-Therm FT-800, mit einem Kühlbadvolumen von 6 Litern und einer Kühlleistung von etwa 125 Watt bei -25°C verwendet [17]. Als Kühlflüssigkeit wird reines Ethanol genutzt, da dieses bei den verwendeten tiefen Temperaturen im Vergleich zu herkömmlichen Kühlflüssigkeiten wie Glycol noch sehr flüssig bleibt. Aufgrund der Brennbar-

4. Vorbereitungen und Aufbau des Prototypen für das elektromagnetische Kalorimeter

keit des Ethanol und der hohen Verdampfungsrate bei Temperaturen über $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ muss der Versuchsraum gut belüftet werden. Zusätzlich wurde das Ethanol-Kühlbad mit Klebeband notdürftig verschlossen. Die Kühlflüssigkeit wird durch Polyethylen-Schläuche mit 10 mm und später 6 mm Innenradius ins Innere der Detektor-Box geleitet. Es wurden hohe Wärmeverluste im Schlauchsystem aufgrund der Verzweigungen und provisorischen Isolation erwartet, weswegen der Kühler auf maximale Kühlung eingestellt wird und die Kühlflüssigkeit bis auf $-31(8)\text{ }^{\circ}\text{C}$ abkühlt. In diesem Bereich hat der Kühler nur noch eine Kühlleistung von 40 Watt. Da im „SuperProto8“ Aufbau nur maximal 2 Vorverstärker laufen, von denen ein Wärmeeintrag von maximal 10 Watt erwartet wird [8], reicht diese Kühlleistung theoretisch aus.

Ein lineares Labornetzgerät (Modell Philips PE 1532 DC) stellt die ± 6 Volt Versorgungsspannung für die Vorverstärker sicher und wird mit deren Stromkabeln verbunden. Zur Unterbringung der Hochspannungsversorgung dient ein Rack mit einem Überrahmen nach dem NIM-Standard (Nuclear Instrumentation Module), in den ein Hochspannungsgenerator-Modul mit zwei Kanälen A und B eingeschoben wurde. Diese können für je eine Avalanche-Photodiode unabhängig voneinander zwei Hochspannungen zur Verfügung stellen.

Zur Signalauslese wird hier ein digitales Oszilloskop von Tektronics (Modell MSO4000B, Serie DPO4000B) benutzt, das den elektrischen Puls vom Vorverstärker darstellen kann. Es ist auf 50 Ohm Eingangsimpedanz eingestellt, da die Signalkabel und der Vorverstärkerausgang 50 Ohm Impedanz besitzen.

4.3. Zukünftige Erweiterungen des Prototypen-Aufbaus

Für den späteren kompletten Aufbau des Prototypen „Proto8“ werden acht funktionsfähige Kristall-APD-Vorverstärkermodule in der Innenbox platziert, insgesamt also acht Kristalle, 16 Avalanche-Photodioden und 16 Vorverstärker. Das Netzgerät wird alle 16 Vorverstärker mit Strom versorgen. Wenn alle APD bei dem gleichen Verstärkungsfaktor betrieben werden sollen, kann die dafür benötigte Hochspannung von APD zu APD um mehrere Volt variieren. Darum werden für jeden Kristall mit zwei Avalanche-Photodioden und den dazugehörigen zwei Vorverstärkern zwei separate Hochspannungskanäle benötigt, insgesamt also 16 separate Hochspannungskanäle. Die Vorverstärkersignale sollen in Zukunft kontinuierlich von einem schnellen Analog-Digital-Wandler (Flash-ADC) durch ein VME-Bus-System (Versa Module Eurocard Bus-System) eingelesen werden, der alle Daten speichern und weiterverarbeiten wird. Ein Flash-ADC und ein Einschub-PC wurden bereits im VME-Überrahmen im Rack

4.4. Vorbereitung der Detektorkomponenten

montiert und im Rahmen einer weiteren Bachelorarbeit über die Erstellung eines Datenalgorithmus für einen Prototypen der Rückwärtsendkappe des PANDA-EMC von Pascal Lautz genutzt [6].

Zudem wird eine Stickstoffspülung im Detektorvolumen installiert, um die Umgebungsluft aus dem Detektorvolumen zu verdrängen. Dafür muss die Aluminium-Detektorbox durch Abdichtung der Verschlussplatte und der Bohrungen mitsamt Kabeln und Schläuchen gasdicht verschlossen werden. Dieser Aspekt wird wichtig, wenn der Prototyp über lange Zeiten hinweg bei -25°C arbeitet und dadurch die Gefahr besteht, dass Feuchtigkeit aus der Luft im Inneren der Aluminiumbox an den Vorverstärkern auskondensiert und der empfindlichen Elektronik schaden sowie zu Kurzschlüssen führen kann.

4.4. Vorbereitung der Detektorkomponenten

4.4.1. Vorbereitung der Reflektorfolie DF2000MA von 3M

Um Szintillationslicht, das nicht durch Totalreflexion an der Kristalloberfläche zurück ins Kristallinnere geworfen wurde, zurück in den Kristall zu reflektieren und somit so wenig Information wie möglich zu verlieren, werden die Kristalle in Reflektorfolie eingewickelt. Außerdem schirmt die Reflektorfolie die einzelnen Kristalle voneinander ab und verhindert, dass hochenergetische Teilchen doppelt gezählt werden. Für diesen Zweck wurde von der EMC-Kollaboration die hochreflektive, spekulare, nicht-metallische, nicht-leitende, nicht-korrosive dielektrische Reflektorfolie DF2000MA von 3M ausgewählt. Sie weist laut Herstellerangaben eine Reflektivität von über 99% über den für Bleiwolframatzintillationslicht relevanten Bereich von $\lambda_{max} = (420 \pm 50)$ nm auf [16]. Speziell für das PANDA-Projekt wurde die Folie ohne die standardmäßig aufgebrachte selbstklebende Außenseite gefertigt. Wegen einer Foliendicke von nur $66 \mu\text{m}$ [16] sind die von der Folie beanspruchten Zwischenräume zwischen zwei Kristallen sehr klein und es gibt keine toten Bereiche, in denen Strahlung oder Teilchen nicht detektiert werden können.

Die Folie ist trotz ihrer geringen Dicke sehr unflexibel und schlecht formbar. Damit sie trotzdem die Form der Kristalle annimmt, wurden im Rahmen dieser Arbeit eine Kristall-Stahlform und zwei Kristalldummys aus Stahl konstruiert und in der mechanischen Werkstatt des Instituts für Kernphysik Mainz angefertigt (siehe Abbildung 4.5(a)). Die Folie wird mit einer Schnittvorlage passend zu den Kristallen zurecht geschnitten und um die Kristalldummys gelegt, in der Stahlform fixiert und

4. Vorbereitungen und Aufbau des Prototypen für das elektromagnetische Kalorimeter

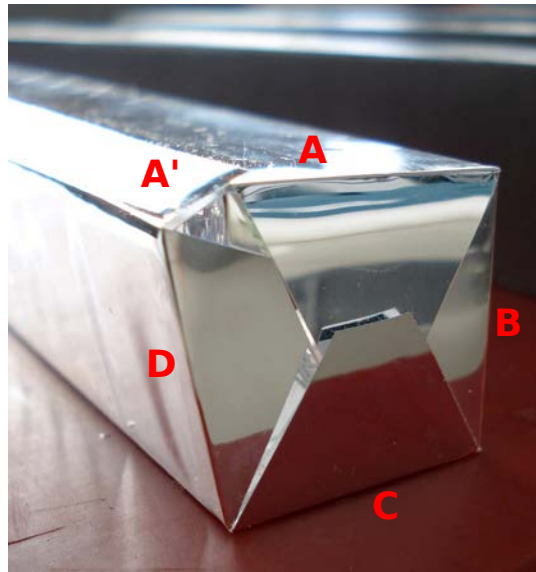
zwei Stunden bei 100°C ausgeheizt.

Die Schutzfolie bleibt dabei auf der Folieninnenseite, damit diese nicht von den Dummys verkratzt wird und später unbeschadet für die echten Kristalle verwendet werden kann. Wie in Abbildung 4.5(b) zu sehen ist, ist die Folie nach dem Ausheizen deutlich der Kristallform angepasst. Insgesamt wurden im Rahmen dieser Arbeit einige Probedurchgänge durchgeführt und dann zehn Folien in fünf Backvorgängen geformt. Jede Folie wurde mit der Position, in der sie gebacken wurde, und der Nummer des Backvorgangs markiert. Im Anhang A.1 werden die einzelnen Arbeitsschritte näher erläutert.

Die Idee zu dieser Folienvorbereitung wurde der Diplomarbeit von Jan Schulze aus der Arbeitsgruppe von Rainer Novotny an der Ruhr Universität Bochum entnommen[7].



(a) Stahlform für den Folien-Formvorgang mit bereits fixierten Dummys und Reflektorfolie DF2000MA vor dem Ausheizen.



(b) Form der Reflektorfolie DF2000MA von 3M nach zweistündigem Ausheizen bei 100°C in der Stahlform, mit eingezeichneten Folienseiten.

Abbildung 4.5.: Anpassung der Reflektorfolie DF2000MA von 3M an die Kristallform durch zweistündiges Ausheizen bei 100°C mit Stahl-Kristalldummys in einer speziell angefertigten Stahl-Kristallform.

4.4.2. Vorbereitung der Bleiwolframatkristalle

Zur Befestigung der Avalanche-Photodioden auf den Kristallstirnflächen hat sich Elastosil (RT 601 A und B) als gutes Klebematerial bewährt, ein Zweikomponenten-Kleber auf Silikonbasis, der transparent, ungiftig, strahlungshart und gut zu verarbeiten ist. Er hat zudem den Vorteil, dass er leicht und ohne Spuren zu entfernen ist. So wird weder der Kristall noch eine Avalanche-Photodiode beschädigt, falls etwas ausgewechselt werden muss. Deswegen dürfen die geklebten Module allerdings im Aufbau nicht mechanisch belastet werden. Komponente A und B werden im Verhältnis 9:1 gemischt und in einer Vakuumkammer durch Abpumpen von Luftblasen befreit. Der Kleber kann dann innerhalb von etwa 1,5 Stunden verarbeitet werden, bis er zu zäh wird.

Damit die aktiven Flächen der Avalanche-Photodioden zentral auf der Kristallstirnseite positioniert sind und mehr oder weniger parallel zueinander liegen, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Kapsel entwickelt, die die APD in ihrer Position halten soll. Zudem soll die Kapsel bei einer Direktverbindung des Vorverstärkers mit den APD-Pins den Vorverstärker halten, Näheres dazu in Kapitel 4.4.3. Die Kapsel hat ebenso wie der Kristall eine Grundfläche von $(24,4 \times 24,4) \text{ mm}^2$. Mit der ersten, kurzen Version der Kapseln wurden die in dieser Arbeit verwendeten Kristalle 1712 und 1713 geklebt. Die Kristalle sollten noch im altverpackten Zustand geklebt werden,



Abbildung 4.6.: Zwei Avalanche-Photodioden im erstem Modell der APD-Kapsel. In dieser Position werden APD und Kapsel auf die Kristallstirnseite geklebt, sodass sich die aktiven Flächen zentral auf der Stirnseite befinden.

sodass die neue Folie nicht mit dem Elastosil verunreinigt wird. Die überschüssigen Tropfen werden später mitsamt der alten Verpackung entfernt. Das Elastosil wird auf die mit Ethanol gereinigte Kristall-Stirnseite aufgetropft, bis sie großflächig bedeckt

4. Vorbereitungen und Aufbau des Prototypen für das elektromagnetische Kalorimeter

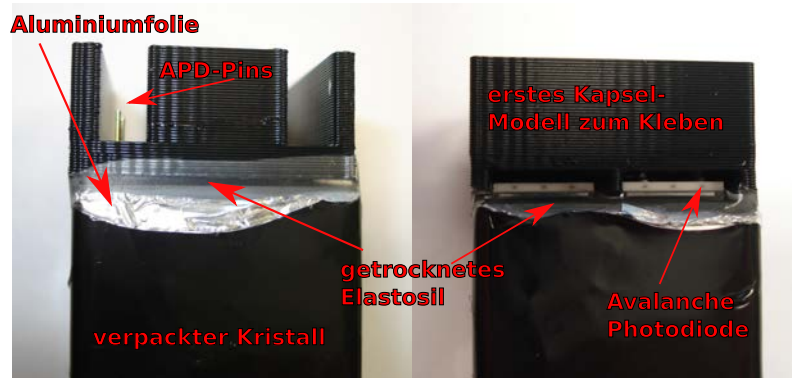


Abbildung 4.7.: Seiten- und Vorderansicht der auf den Kristall mit Elastosil geklebten schwarzen Kapsel mit zwei Avalanche-Photodioden. Kristall noch in der alten Verpackung aus weißer Reflektorfolie, Aluminiumfolie als Abdeckung, schwarzer Plastikfolie.

ist. Es sollte nicht verstrichen werden, da sich dann Luftbläschen bilden könnte, die später Licht ablenken und brechen könnten. Die schwarze Kapsel mit zwei wie in Abbildung 4.6 eingesetzten Avalanche-Photodioden wird vorsichtig auf die Stirnseite gekippt und die Kapselseitenflächen parallel zu den Kristallseitenflächen ausgerichtet. Die Kapsel wird zusätzlich noch mit Klebeband am Kristall fixiert und der Kristall in aufrechter Position gelagert, sodass während des Trocknens kein Verschieben mehr möglich ist. Spätestens nach einem Tag ist das Elastosil fest und das Klebeband und gegebenenfalls auch die Kapsel können entfernt werden.

Vor Einhüllen der Kristalle in Reflektorfolie müssen die drei Folienschichten der alten Kristallverpackung (von außen nach innen: schwarze Plastikfolie, Aluminiumfolie als Abdeckung, weiße Reflektorfolie) entfernt werden. Während des gesamten Vorgangs sollten Vinylhandschuhe getragen werden, um Verunreinigungen wie Fingerabdrücke auf den Kristallen zu vermeiden. Baumwollhandschuhe sind nicht zu empfehlen, da sie stark fusseln. Die Arbeitsunterlage sollte weich sein, um ein Anstoßen und Zersplittern des Kristalls zu verhindern. Der Kristall wird mit Ethanol und fusselfreien Labortüchern vorsichtig gereinigt, wobei unbedingt starkes Reiben zu vermeiden ist, da dadurch Staubkörner, die sich auf dem Kristall oder dem Tuch befinden, die Kristalloberfläche verkratzen könnten. Fusselrückstände werden mit einem Druckluftspray für optische Aufbauten entfernt. Nach Abziehen der Schutzfolie von der Innenseite der wie in Kapitel 4.4.1 vorgeformten Reflektorfolie DF2000MA von 3M wird der Kristall mit der Folie umschlossen, wobei die vier Hauptseiten (A, B, C, D, siehe Abbildung 4.5) sowie die große Vorderlasche den Kristall berühren sollen. Die kürzeren Laschen

4.4. Vorbereitung der Detektorkomponenten

(A' sowie die vier kleinen Vorderlaschen) liegen außen und werden zum Schließen der Folie mit Klebeband fixiert. So befinden sich nur glatte, schnittfreie Flächen um den Kristall herum. Jeder Kristall hat eine Nummer, die klein an einer Seite direkt auf den Kristall aufgetragen ist. Diese Nummer wird auch auf die neue Reflektorfolie aufgebracht, um alle Kristalle identifizieren zu können.

4.4.3. Verbindung der Avalanche-Photodiode mit dem Vorverstärker

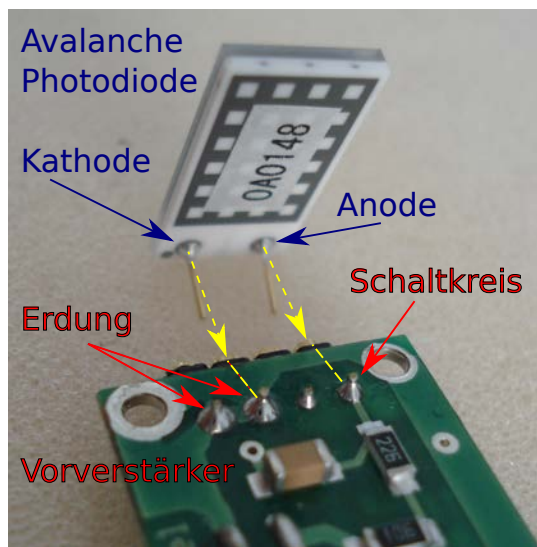


Abbildung 4.8.: Rückseitenansicht der Avalanche-Photodiode. Der Pin mit dem silbernen Punkt entspricht der Photodioden-Kathode an der p^+ -Schicht und muss mit der Erdung des Vorverstärkers verbunden werden. Der andere Pin entspricht der Anode an der n^+ -Schicht und muss mit der positiven Hochspannung verbunden werden, die über den Vorverstärkerschaltkreis übertragen wird.

Bei der Verbindung der Avalanche-Photodiode mit dem Vorverstärker muss auf die richtige Polarität geachtet werden. Die Verbindung überträgt einerseits die angesammelte negative Ladung von der Photodioden-Anode zum Vorverstärker, andererseits die positive Hochspannung von dem Vorverstärker zur Photodioden-Anode. Die Photodioden-Kathode liegt auf negativem beziehungsweise auf Nullpotential. Da die verwendete Avalanche-Photodiode nach dem Prinzip aufgebaut ist, dass durch die p^+ -Schicht das Licht einfällt, entspricht die obere, sichtbare Schicht der p^+ -Schicht. Der Pin, der über eine dünne Leitung mit der p^+ -Schicht verbunden ist, ist mit einem silbernen Punkt markiert. Der Vorverstärkereingang rechts außen ist mit dem

4. Vorbereitungen und Aufbau des Prototypen für das elektromagnetische Kalorimeter

Schaltkreis verlötet, die beiden Eingänge links außen mit der hellgrünen Erdung des Schaltkreises. Der zweite Eingang von rechts ist funktionslos. Die APD wird also verbunden wie in Abbildung 4.8 gezeigt.

Für die Verbindung von der Avalanche-Photodiode zum Vorverstärker gibt es zur Zeit zwei Möglichkeiten, die beide in dieser Arbeit genauer getestet wurden.

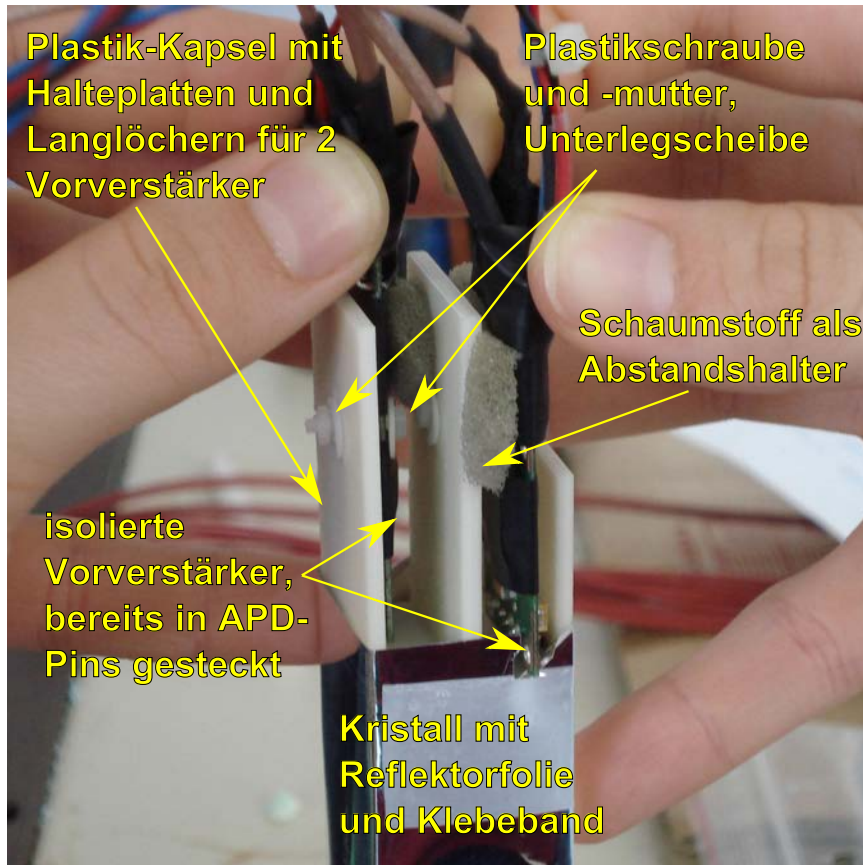


Abbildung 4.9.: Kristallkapsel auf Kristallstirnfläche mit eingeschraubten, direkt in die Pins der Avalanche-Photodiode eingesteckten Vorverstärkern. Befestigung mit Plastikschrauben, Schaumstoff und Isolierband.

Die sogenannte „Kapsel-Lösung“ sieht vor, die Avalanche-Photodiode direkt mit dem Vorverstärker zu verbinden. Die Herausforderung besteht darin, die empfindlichen APD-Pins keiner mechanischen Belastung auszusetzen. Dazu wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Plastik-Kapsel entworfen und mit einem 3D-Drucker gefertigt, die einerseits die zwei APD beim Kleben in Position hält, andererseits den Vorverstärker fixieren soll, der direkt an die APD-Pins gesteckt wird.

Der erste Kapselentwurf (schwarz) hat keine geeignete Haltefunktion, kann aber als

4.4. Vorbereitung der Detektorkomponenten

Vorlage und zum Kleben der APD dienen, wie in Kapitel 4.4.2 und Abbildung 4.7 dargestellt.

Der zweite Kapselentwurf (weiß) wurde so gestaltet, dass die Vorverstärker an den langen Kapsel-Platten angeschraubt werden. Die Montage erfordert viel Zeit und Geschicklichkeit, um die Vorverstärker auf engstem Raum mit den Plastikschrauben (Maße: 10mm lang, 3 mm Durchmesser) und Muttern zu fixieren. Dafür ist der Aufbau dann sehr stabil. Abbildung 4.9 zeigt eine Kapsel mit zwei eingeschraubten Vorverstärkern während der Montage. Die Kapsel hat ebenso wie der Kristall eine $(24,4 \times 24,4)$ mm² Grundfläche und ist so konstruiert, dass später alle acht Kristalle mit je einer aufgeklebten Kapsel direkt nebeneinander in der Innenbox liegen können. Nachteil der Kapsel ist, dass die Steckverbindung von APD-Pin und Vorverstärker instabiler wird, weil der Pin erst durch den 1 mm dicken Kapselboden durchgeht und der Stecker so einen kürzeren Pin zur Verfügung hat. Durch Befestigung des Vorverstärkers an der Kapsel und der Kapsel an der Kristallfolie mit Klebeband wird die Gefahr einer Loslösung der Verbindung aber gemindert. Außerdem besteht durch die Nähe des Vorverstärkers zum Kristall die Gefahr, die Kristallstirnseite aufzuheizen und einen Temperaturgradienten über die Kristalllänge aufzubauen. Gleichzeitig wirkt die Plastikkapsel aber thermisch isolierend. Ein Temperatureinfluss sollte durch zukünftige Messungen überprüft werden.

Die „Kabel-Lösung“ basiert auf der Verbindung von Vorverstärker und APD mit einem kurzen Twisted-Pair-Kabel. Der Vorverstärker wird auf einer dünnen PVC-Platte aufgeschraubt, die Platz für acht Vorverstärker bietet, und in ein Aluminium-U-Profil geschoben wie in Abbildung 4.10 gezeigt. Für die späteren 16 Vorverstärker würden dann zwei solche Vorverstärkerplatten in das U-Profil geschoben. Ein Twisted-Pair-Kabel wird am einen Ende in den APD-Eingang des Vorverstärkers und am anderen Ende auf die Pins der Avalanche-Photodiode gesteckt. Das U-Profil wird in der Aluminiumbox zwischen Verschlussplatte und Kristall-Innenbox platziert. Diese Lösung ist platzsparend, mechanisch sehr stabil, flexibel und einfach zu montieren, trennt Vorverstärker als Wärmequelle von den Kristallen und belastet die Photodioden-Pins nicht. Sie birgt allerdings die Gefahr, dass durch das Kabel und die zwei zusätzlichen Steckverbindungen Einstreuungen passieren und das Rauschen vergrößert wird. Die Twisted-Pair-Kabel wurden mit einer Länge von 8 cm einerseits so kurz wie möglich gefertigt, um das Rauschrisiko zu minimieren, andererseits so lang wie möglich, um Flexibilität in der Montage der Vorverstärker zu behalten und außerdem den Vorverstärker thermisch von den Kristallen zu trennen. Um den Kabelstecker an den APD-Pins zu befestigen, empfiehlt es sich, die zuvor beim Kleben der APD ange-

4. Vorbereitungen und Aufbau des Prototypen für das elektromagnetische Kalorimeter

klebte Kapsel wieder zu entfernen. Die Kabel könnten zwar auch zusammen mit der schwarzen, kürzeren Kapsel genutzt werden, dann hält die Steckverbindung zwischen Kabelstecker und APD-Pin jedoch schlechter, weil der Pin erst durch den 1 mm dicken Boden der Kapsel geht und somit weniger gut im Kabelstecker stecken bleibt. Zum Lösen der Kapsel sollte das Elastosil vorsichtig außen von der Kapsel gelockert werden und die Kapsel durch leichtes Hin- und Herbewegen nach oben weggezogen werden. Geht man zu schnell vor, besteht die Gefahr, das Elastosil nicht nur zwischen Kapsel und APD, sondern auch zwischen APD und Kristall zu lösen.

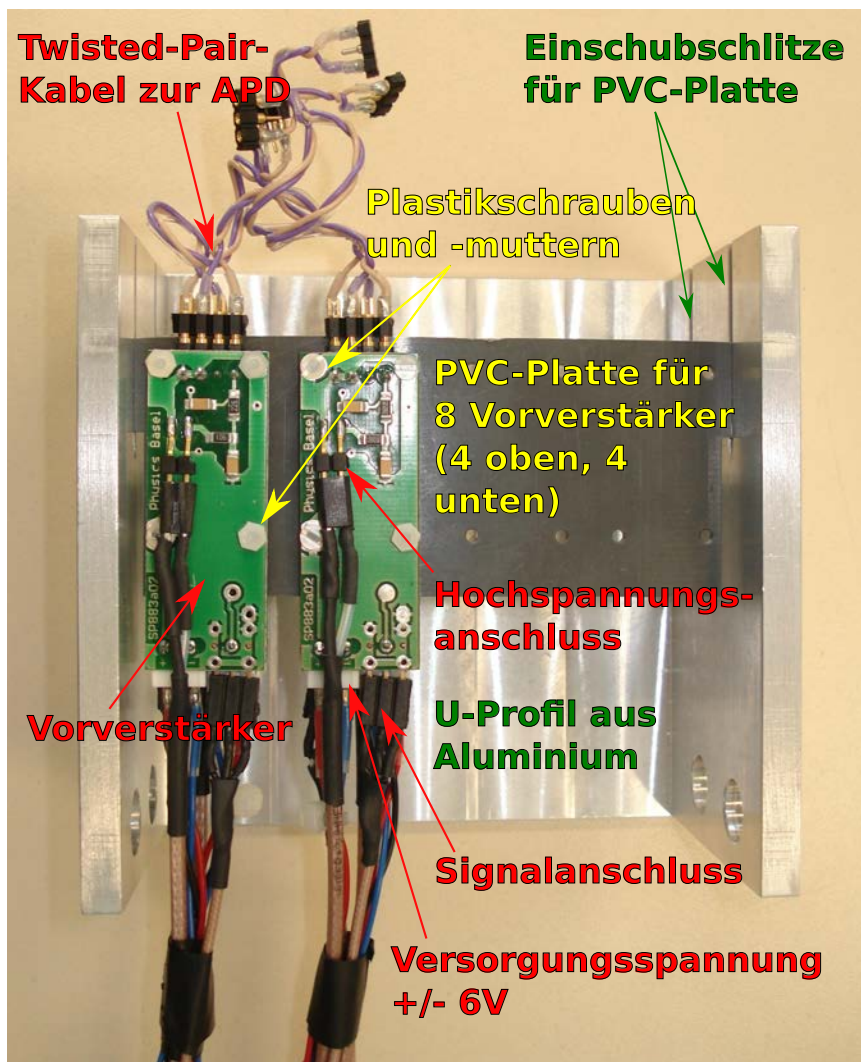


Abbildung 4.10.: Ansicht von oben auf zwei Vorverstärker, die oberhalb (komplett sichtbar) und zwei, die unterhalb (nur Spannungsversorgungs- und Twisted-Pair-Kabel sichtbar) auf PVC-Platte geschraubt und in U-Halterungs-Profil aus Aluminium eingeschoben sind.

5. Messungen und Ergebnisse

Das folgende Kapitel geht auf die Messungen ein, die im Rahmen des Aufbaus des Prototypen zur Reflektivität der in PANDA verwendeten Reflektorfolie DF2000MA von 3M, zu Temperaturstudien im Prototypen und zum Rauschverhalten von APD und Vorverstärker getätigt wurden, und bespricht die Ergebnisse.

Die Berechnung von Fehlern erfolgt mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung

$$\delta f(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{df}{dx_i} \delta x_i \right)^2}. \quad (5.1)$$

Bei Vergleichen von zwei Werten hat die Differenz $\Delta f(x_i) = f_1(x_i) - f_2(x_i)$ den Fehler

$$\delta(\Delta f(x_i)) = \sqrt{\delta f_1(x_i)^2 + \delta f_2(x_i)^2} \quad (5.2)$$

und gilt dann als signifikant, wenn

$$\Delta f(x_i) \gg 3\delta(\Delta f(x_i)). \quad (5.3)$$

5.1. Reflektivität der Reflektorfolie DF2000MA von 3M

Um die Reflektivität der verwendeten Reflektorfolie DF2000MA von 3M zu bestimmen und außerdem zu untersuchen, ob der Form-Vorgang durch das zweistündige Ausheizen bei 100°C die Reflexionseigenschaften der Folie verändert, wurde die Reflexion der Folie vor und nach dem Ausheizen mit dem Spektrophotometer Shimadzu UV-2101PC mit einem Erweiterungsraum für große Proben (MPC-3100 large sample compartment) am Institut für Kernphysik in Mainz gemessen.

Das Spektrophotometer misst über einen Bereich von $\lambda_{max} = 800$ nm bis $\lambda_{min} = 200$ nm in 1 nm Schritten. Es verfügt über eine Ulbrichtkugel (Integrationskugel), die innen komplett mit diffus reflektierendem Bariumsulfat-Pulver verkleidet ist und vier Öffnungen hat. An die linke Öffnung, auf die später der Referenzstrahl trifft, wird ein Bariumsulfat-Pulver-Halter angebracht, an die vordere Öffnung die Probe. Die rechte und die hintere Öffnung dienen als Eingang für den Referenz- beziehungsweise Probestrahl. Während der Messung trifft abwechselnd der Referenzstrahl auf das

5. Messungen und Ergebnisse

Bariumsulfat-Pulver und der Probestrahl auf die Probe. Die reflektierte Lichtintensität wird jeweils über zwei Photodetektoren in der Ulbrichtkugel gemessen und der Reflexionswert der Probe mit dem Referenzstrahlwert verglichen und normiert. So werden Lampenfluktuationen ausgeschlossen.

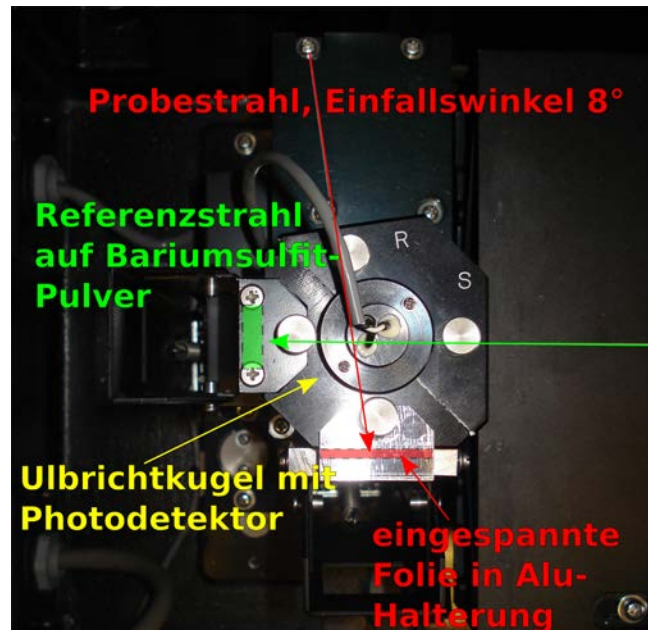


Abbildung 5.1.: Ulbrichtkugel des Shimadzu Spektrophotometers UV-2101PC von oben mit eingezeichnetem Strahlengang von Referenz- und Probestrahl sowie Position der Reflektorfolie für die Messung der Reflektivität der Folie DF2000MA von 3M.

Vor der ersten Messung muss eine Basislinie genommen werden, die sowohl für den Referenzstrahl als auch für den Probestrahl als Reflexion von 100% registriert wird. Als Referenzmaterial mit einer bekannten Reflektivität wird dafür der dielektrische Breitband-Spiegel BB1-E02P2 von ThorLabs mit 25,4 mm Durchmesser genutzt [15]. Dieser wird an der Ulbrichtkugel eingesetzt, um die Basislinie zu nehmen, und dann durch die Folie ersetzt. Somit wird die Reflexion der Folie relativ zur Reflexion des Spiegels gemessen. Um die Reflexionsmessung zu starten, muss im Messmodus der Spektrophotometer-Software Referenz- und Probestrahl vertauscht werden (Einstellung „Invers“), sodass der Probestrahl durch die hintere Ulbrichtkugel-Öffnung bei 8° zum Lot eintritt und der Referenzstrahl durch die rechte Öffnung. Dadurch ist der Messaufbau dahingehend beschränkt, dass der Probestrahl bei 8° zum Lot der Folie einfällt. Also sind alle Messungen nur für eine Reflexion bei 8° gültig.

5.1. Reflektivität der Reflektorfolie DF2000MA von 3M

Die Reflektorfolie wird zugeschnitten und zwischen Seite B und C geknickt wie die später verwendeten Folien. Dann wird sie in sieben Abschnitte à 2,5 cm Länge zerteilt und jeder Abschnitt einzeln gemessen. Dazu wird der Folienabschnitt in eine im Rahmen der Arbeit konstruierte und von der mechanischen Werkstatt des Instituts für Kernphysik Mainz speziell angefertigte Folienhalterung gespannt und die Halterung vorne an die Ulbrichtkugel des Erweiterungsraums des Spektrophotometers eingebaut wie in Abbildung 5.1 dargestellt. Zuvor wurde von dem Teil, auf den im Spektrophotometer der Lichtstrahl treffen würde, die Schutzfolie entfernt. Nach der Messung wird die Folie aus der Halterung ausgebaut und die Schutzfolie wieder aufgebracht. Während der gesamten Vorbereitung und Messung werden Vinylhandschuhe getragen, um die Folie nicht durch Fingerabdrücke oder Fasern zu verunreinigen. Zusätzlich wird die Folie durch ein Druckluftspray für optische Aufbauten von jeglichem Staub befreit. Beim Einbauen an die Ulbrichtkugel muss darauf geachtet werden, die Folie ebenso wie den Spiegel nicht zu zerkratzen. Nach den Messungen werden die sieben Folienteile

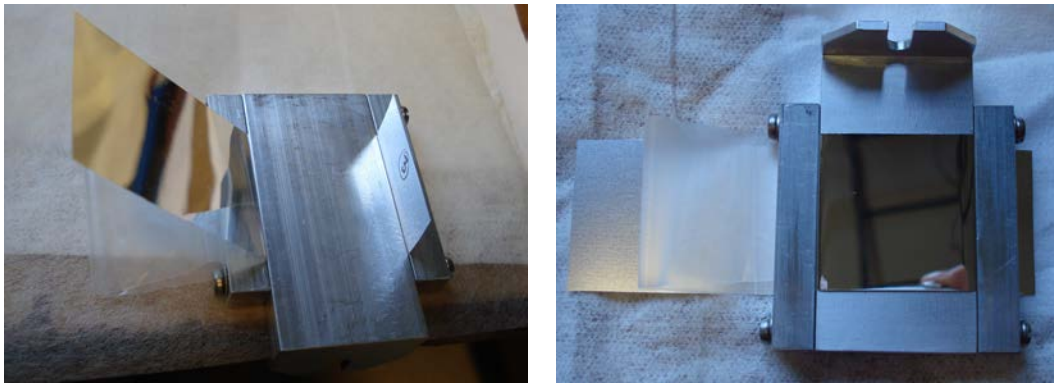


Abbildung 5.2.: Vorder- und Rückansicht des gefertigten Folienhalters mit eingespanntem Folienabschnitt.

nebeneinander an einem Stahldummy in die Stahlform eingepasst wie in Abbildung 5.3 gezeigt, sodass sie wieder eine vollständige Folie ergeben, die Stahlform mit Deckeln und Stopper geschlossen und bei 100°C zwei Stunden im Ofen der Vakuumwerkstatt ausgeheizt. Die ausgeheizten Folienteile werden auf die gleiche Art und Weise in die Folienhalterung eingespannt und die Reflektivität der selben Folienflächen wie vor dem Ausheizen gemessen.

Um die Reflexion des Spiegels selbst bei 8° Lichteinfall zu bestimmen, wird die Transmission T_{Spiegel} des Spiegels bei 8° gemessen. Dafür wird der Spiegel in eine zweite speziell angefertigte Halterung gelegt, die ihn in 8° zum Lot hält. Die Halterung

5. Messungen und Ergebnisse

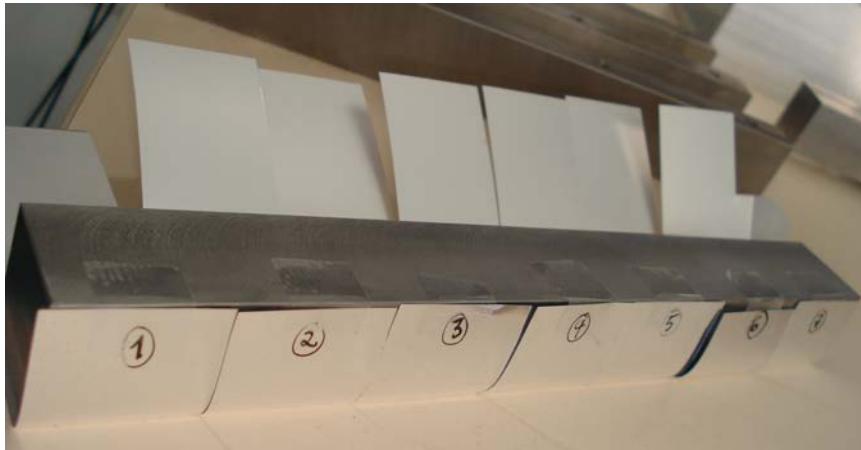


Abbildung 5.3.: Die sieben Folienabschnitte an einem Stahl-Kristalldummy ausgerichtet für das Einlegen in die Stahlform und zweistündige Ausheizen bei 100°C.

wird in den rechten Eingang der Ulbrichtkugel geschraubt und ein Bariumsulfat-Halter in die vordere Öffnung, wo vorher die Folien eingebaut waren (siehe Abbildung 5.1). Zur Transmissionsmessung müssen im Messmodus des Spektrophotometers Referenz- und Probestrahl auf die Grundeinstellung zurückgestellt werden, sodass der Probestrahl senkrecht durch die rechte Öffnung und damit bei 8° durch den Spiegel, der Referenzstrahl aber durch die hintere Öffnung auf das Bariumsulfat einfällt.



Abbildung 5.4.: links: gefertigte Spiegelhalterung mit Spiegel ThorLabs BB1-E02P2 für die Referenz-Basislinienmessung, rechts: Spiegelhalterung für die Transmissionsmessung bei 8° Lichteinfall.

Die Reflexion des Spiegels liegt laut Datenblatt bei über 99% [15]. Jegliches Licht, das die Spiegelschicht trotzdem durchdringt, trifft danach auf die polierte Spiegel-

5.1. Reflektivität der Reflektorfolie DF2000MA von 3M

substratrückseite, die einen Teil des Lichts zurück zur Spiegelseite reflektiert, wo über 99% des Lichts wieder zurückreflektiert werden, sodass der einmal transmittierte Lichtstrahl zu einem großen Teil zwischen der Spiegelschicht und der polierten Rückseite hin und hergeworfen wird. So wird angenommen, dass für die Reflexion des Spiegels $R_{Spiegel} = 100\% - T_{Spiegel}$ gilt. Verluste durch Substratabsorption und rückgestreutes Licht durch die polierte Spiegelrückseite werden wegen sehr geringem Effekt vernachlässigt. Die Reflexion der Reflektorfolie kann dann mit der relativ zum Spiegel gemessenen Reflexion und der ermittelten Reflexion des Spiegels auf die Reflexion des Spiegels korrigiert werden.

$$R_{Folie,rel} = \frac{R_{Folie,abs}}{R_{Spiegel,abs}} \cdot 100\% \quad (5.4)$$

$$\Leftrightarrow R_{Folie,abs} = \frac{1}{100\%} R_{Folie,rel} \cdot R_{Spiegel,abs} \quad (5.5)$$

In Abbildung 5.5 ist die auf die Reflexion des Spiegels korrigierte Reflexion der Reflektorfolie bei 8° Lichteinfall gegen die Wellenlänge über den kompletten gemessenen Wellenlängenbereich aufgetragen, in Abbildung 5.6 gegen den für die Bleiwolframatkristalle relevanten Wellenlängenbereich von $\lambda_{max} = (420 \pm 50)$ nm, jeweils exemplarisch für Folienabschnitt 1. Die Graphen für die anderen 6 Folienabschnitte sowie die Graphen der Transmission und der Reflexion des Referenzspiegels bei 8° finden sich in Anhang A.2. Alle Graphen wurden mit root erstellt.

Die Folienreflektivität ist vor dem Ausheizen jeweils etwas höher als nach dem Ausheizen. Besonders im UV-Bereich gibt es Unterschiede.

Der größte Unterschied im Bereich des Bleiwolframatpektrums liegt bei $\lambda = 400$ nm, dort ist $R_{vor} = 99,6(2)\%$ und $R_{nach} = 99,0(2)\%$, abgelesen aus Abbildung 5.6 und mit einem Ablesefehler von $\delta R = 0,2\%$ belegt. Aus der Differenz und dem mit gaußscher Fehlerfortpflanzung (siehe Gleichung (5.1)) berechneten Fehler der Differenz lässt sich abschätzen, ob der Unterschied signifikant ist.

$$\Delta R = R_{vor} - R_{nach} = 0,6\% \quad (5.6)$$

$$\delta(\Delta R) = \sqrt{(\delta R_{vor})^2 + (\delta R_{nach})^2} \approx 0,3\% \quad (5.7)$$

$$\Rightarrow \Delta R < 3\delta(\Delta R) \quad (5.8)$$

Insgesamt gibt es also wie mit Gleichung (5.8) gezeigt keinen signifikanten Unterschied in der Reflexion vor und nach dem Ausheizen, vor allem im relevanten Bereich für das Bleiwolframat-Szintillationslicht. Es fand sich auch kein signifikanter Unterschied zwischen der Reflexion der einzelnen Folienabschnitte, was für die Homogenität der Folie spricht.

5. Messungen und Ergebnisse

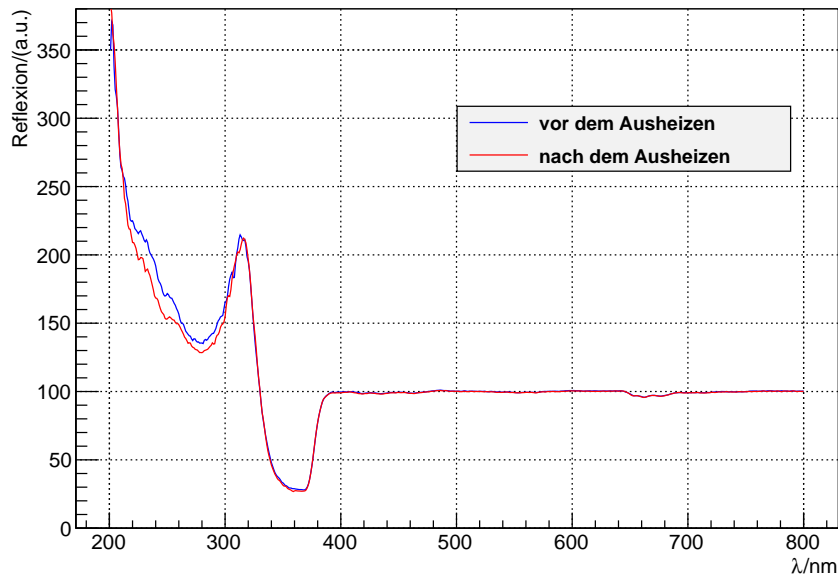


Abbildung 5.5.: Auf die Reflexion des Spiegels Thorlabs BB1-E02P2 korrigierte Reflexion der Reflektorfolie DF2000MA von 3M bei 8° , Abschnitt 1, vor und nach dem Ausheiz-Vorgang über den gesamten Spektrophotometer-Messbereich von 200 nm bis 800 nm.

Damit ist verifiziert, dass das Ausheizen der Folie dem Reflexionsvermögen der Folien DF2000MA nicht wesentlich schadet und das Ausheizen als Formungs-Methode auch in Zukunft genutzt werden kann. Zudem bestätigen die Messungen, dass die Reflexion der für PANDA gewählten Reflektorfolie etwa $99\% \pm 1\%$ im Bleiwolframat-Szintillationsspektrum beträgt und die Folie damit sehr gut für die Reflexion des Szintillationslichts zurück in den Kristall geeignet ist.

Systematische Fehler der Messungen stammen vor allem von Lichtintensitäts- und Wellenlängenfluktuationen der Spektrophotometerlampe. Eine weitere Fehlerquelle ist die Abweichung des Probestrahl-Einfallswinkels von 8° , einerseits durch eine Abweichung im Aufbau des Spektrophotometers, andererseits durch die Folienhalterung, die den Spiegel nicht ideal glatt spannt, wodurch leichte Wellungen in der Folie zu minimalen Einfallswinkel-Abweichungen führen können. Auch die Position des Spiegels bei der Transmissionsmessung kann durch Montage leicht von 8° abweichen. Diese Winkel-Fehler sind allerdings sehr gering und vernachlässigbar.

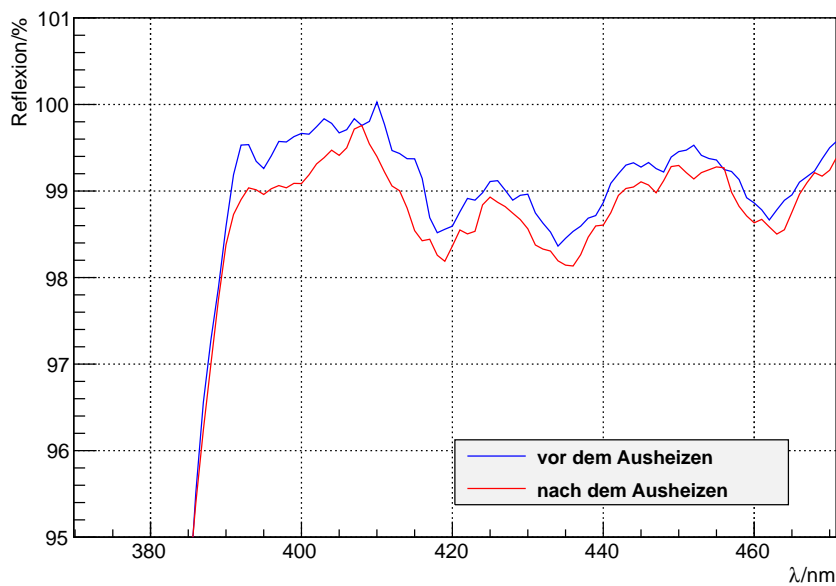


Abbildung 5.6.: Vergrößerter Ausschnitt der auf die Reflexion des Spiegels Thorlabs BB1-E02P2 korrigierten Reflexion der Reflektorfolie DF2000MA von 3M bei 8° , Abschnitt 1, über den Bleiwolframat-Szintillationsspektrum-Bereich (420 ± 50) nm vor und nach dem Ausheiz-Vorgang.

5.2. Temperaturstudien im Prototypen

Zur Aufnahme des Temperaturverlaufs beim Abkühlen und Aufwärmen sowie beim Betrieb von Vorverstärkern und APD im fertiggestellten „SuperProto8“-Aufbau wurde das Datenaufnahmegerät Agilent Data Logger 3470A mit eingebautem Temperaturmodul mit zehn PT100-Temperatursensoren genutzt. Die Sensoren bestehen aus Platin, das seinen Widerstand wie alle Metalle mit der Temperatur verändert. Richtwert ist der Widerstand bei $T = 0^\circ\text{C}$, der bei Platin $R_0 = 100\text{ Ohm}$ beträgt. Wird mit dem Sensor gemessen, fließt ein kurzer Probestrom und der gemessene Widerstand wird vom Modul in die entsprechende Temperatur umgerechnet. Die zehn Temperatursensoren wurden an verschiedenen Stellen des Messaufbaus platziert wie in Tabelle 5.1 und Abbildung 4.4 gezeigt. Die mitgelieferte Software „Agilent Bench Link Data Logger“ ermöglicht das Aufzeichnen des Temperaturverlaufs über einen langen Zeitraum. Dazu muss der Data-Logger über eine RS232-Schnittstelle mit einem Windows-PC verbunden werden. Als Zeitintervall zwischen zwei Temperaturmessungen wurde $\Delta t = 1\text{ min}$

5. Messungen und Ergebnisse

ausgewählt und der Temperaturverlauf des gesamten Aufbaus vom Anschalten des Kühlers bis zum Erreichen einer relativ konstanten tiefen Temperatur aufgezeichnet, ebenso wie der Temperaturverlauf nach Anschalten der Vorverstärker und APD und der Aufwärmverlauf.

Sensor	Position
1	zentral auf Innenbox-Oberseite zwischen Kühlschlauch-U
2	zentral an rechter Innenbox-Seite zwischen zwei Kühlschläuchen
3	links an APD-Kristallen (zwischen den vier Kristallfolien)
4	rechts an Dummy-Kristallen (zwischen den vier Kristallfolien)
5	am Vorverstärker des linken Kristalls (auf dem Isolationsband)
6	am Vorverstärker des rechten Kristalls (unterer Einschub der Kapsel)
7	zwischen zwei in die Alubox laufenden Kühlschläuchen (Position A, Abb. 5.11)
8	rechts außen an der Isolationsbox
9	Kühlschlauch vom Kühler links
10	Kühlschlauch vom Kühler rechts

Tabelle 5.1.: Positionen der Temperatursensoren im Messaufbau „SuperProto8“, siehe auch Abbildung 4.4 in Kapitel 4.1.

Der Fehler der Temperaturmessung selbst ist relativ gering, weil die Sensoren alle fest fixiert sind und während der Messungen immer genau an der selben Stelle liegen. Will man eine gemessenen Temperatur allerdings als Temperatur eines bestimmten Bauteils interpretieren, kann der Fehler sehr groß sein. Alle Sensoren haben eine 2 cm lange Sensorspitze, die wahrscheinlich über die komplette Länge misst und somit beispielsweise im Falle der Kristall-Sensoren nicht nur den Kristall an der Spitze misst, sondern auch die Umgebungsluft. Auch die Sensoren in der Nähe der Vorverstärker geben nicht die genaue Temperatur des Vorverstärkers, sondern die seiner unmittelbaren Umgebung an, und die Temperatur der Kühlschläuche entspricht nicht der Temperatur der Kühlflüssigkeit. Also können alle gemessenen Temperaturen nur als Umgebungsrichtwerte gesehen werden, mit denen man die Größenordnung des Temperaturverhaltens und die Temperaturunterschiede an unterschiedlichen Stellen im Aufbau sehen kann. Die im Folgenden angegebenen Fehlerwerte beziehen sich auf den Ablesefehler der Temperaturplots.

Die Temperatur im Kühlbad betrug, gemessen mit einem Tauch-Thermometer (Gulton TastoTherm D7005) an mehreren Stellen im Kühlbad, etwa $-30(1)^\circ\text{C}$ (Fehler

durch Temperaturschwankungen innerhalb des Kühlerbads). Das kühlernerne Thermometer zeigte gleichzeitig $-39,1\text{ °C}$ an, sodass der Fehler der Kühlflüssigkeitstemperaturangabe bei $\Delta T = 8,0\text{ °C}$ liegt.

5.2.1. Temperaturverläufe

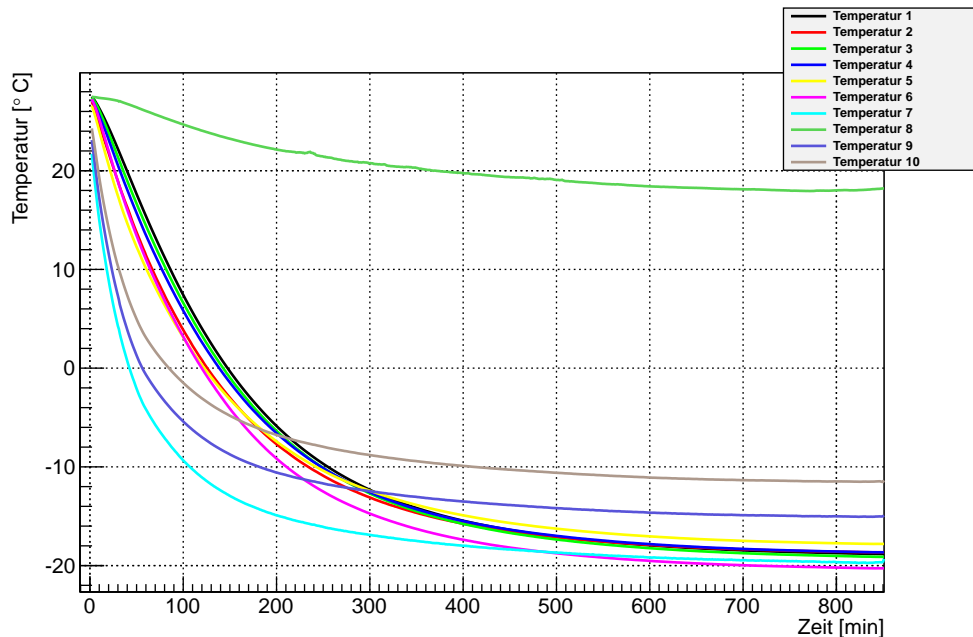


Abbildung 5.7.: Abkühlverlauf des „SuperProto8“-Aufbaus ab dem Einschalten des externen Kühllapparats bis zum Erreichen einer konstanten Temperatur. Temperatursensoren 1 - 6 befinden sich in der Aluminiumbox, 7, 9 und 10 an Kühlschläuchen und 8 außen an der Isolationsbox.

Der Abkühlvorgang zeigt einen deutlichen exponentiellen Abfall der Temperatur. Die Temperatur im Inneren der Aluminiumbox erreicht nach etwa 14 Stunden ein konstantes Temperaturniveau im Intervall von $-18(1)\text{ °C}$ bis $-20(1)\text{ °C}$. Anfangs sind noch nicht alle Rohre bis zum Eintritt in die Aluminiumbox vollständig isoliert. Weitere Isolation mit Isolationsschaum und das Befüllen der lichtdichte Box mit Isolationsmaterial wie Styropor senkt die Temperatur im Aluminiumboxinneren noch einmal um $2,5(5)\text{ °C}$, an den äußeren Schläuchen sogar um etwa $4(1)\text{ °C}$ an (siehe Abbildung A.6 im Anhang A.4). Gute Isolation des kompletten Kalorimeter-Aufbaus vom Kühler und den Schläuchen bis zum Detektorvolumen selbst ist also entscheidend für möglichst verlustfreie Kühlung.

5. Messungen und Ergebnisse

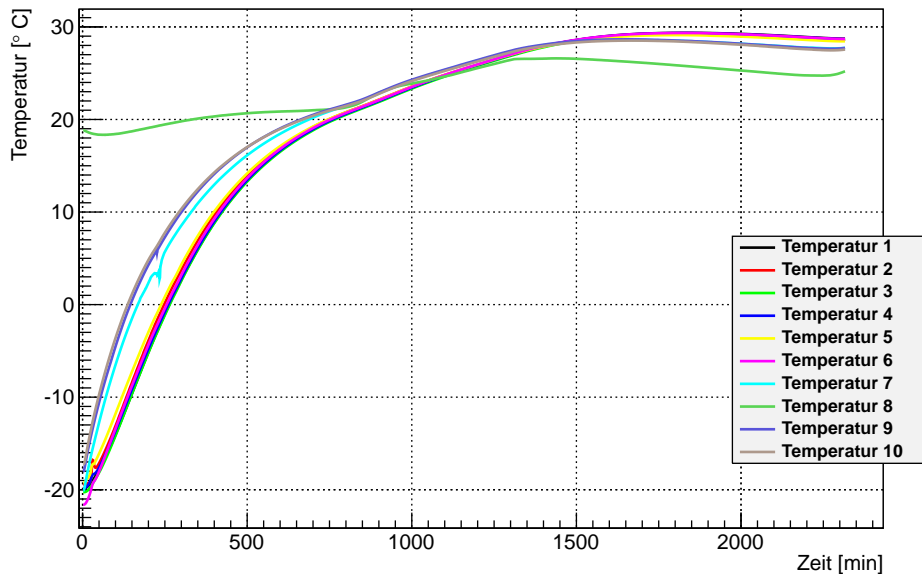


Abbildung 5.8.: Aufwärmverlauf des „SuperProto8“-Aufbaus ab dem Ausschalten des externen Kühlapparats bis zum Erreichen einer konstanten Temperatur.

Die Aufwärmkurve verläuft ebenfalls exponentiell. Die Temperaturen steigen sogar bis auf $29(1)^\circ\text{C}$ im Detektorvolumen, was daran liegt, dass der Kühler zwar ausgeschaltet, die Umwälzpumpe des Kühlers aber immer noch in Betrieb war und sich das Ethanol durch ständiges Durchpumpen durch die engen Rohrdurchschnitte erwärmte.

Interessant ist der Temperaturverlauf bei betriebenen Vorverstärkern und eingeschalteter Avalanche-Photodioden-Hochspannung, dargestellt in Abbildung 5.9. Die Temperatur steigt nach dem Anschalten der Versorgungsspannung und der Hochspannung in der Nähe des Kapsel-Vorverstärker deutlich von $T_6 = -21,4(1)^\circ\text{C}$ auf $T_6 = -20,5(1)^\circ\text{C}$ an, der Temperatursensor auf dem lose in der Box liegenden Vorverstärker sogar von $T_5 = -19,1(1)^\circ\text{C}$ auf $T_5 = -17,5(1)^\circ\text{C}$, wobei die größere Temperaturdifferenz wahrscheinlich daher kommt, dass der Sensor auf dem Isolierband direkt auf dem Vorverstärker liegt, während der Kapsel-Sensor im unteren Einschub der Kapsel durch die 1 mm dicke Plastik-Kapsel-Platte zwischen Vorverstärker und Sensor thermisch isolierter liegt. Die Temperatur an den nicht mit Elektronik bestückten Kristallen geht mit $\Delta T_4 = +0,1(1)^\circ\text{C}$ nach oben. Stärker zeigt sich der Temperaturanstieg bei den Kristallen, an denen auch die Avalanche-Photodioden angebracht sind und in deren Nähe sich die beiden betriebenen Vorverstärker befinden, er beträgt

$$\Delta T_3 = +0,3(1)^\circ\text{C}.$$

Das bestätigt, dass die Vorverstärker einen nicht unerheblichen Wärmeeintrag ins Detektorvolumen tragen, und dass außerdem die Gefahr besteht, die der Elektronik zugewandte Kristallseite bei Betrieb der Vorverstärker aufzuwärmen. Im späteren elektronischen Kalorimeter darf die Temperaturschwankung nur maximal $\pm 0,1^\circ\text{C}/\text{cm}$ betragen, um eine homogene Lichtausbeute über die komplette Kristalllänge zu garantieren [7, 5]. Hiermit ist gezeigt, dass eine gute thermische Trennung zwischen Vorverstärkern und Kristallen hergestellt werden muss, um größere Schwankungen zu verhindern.

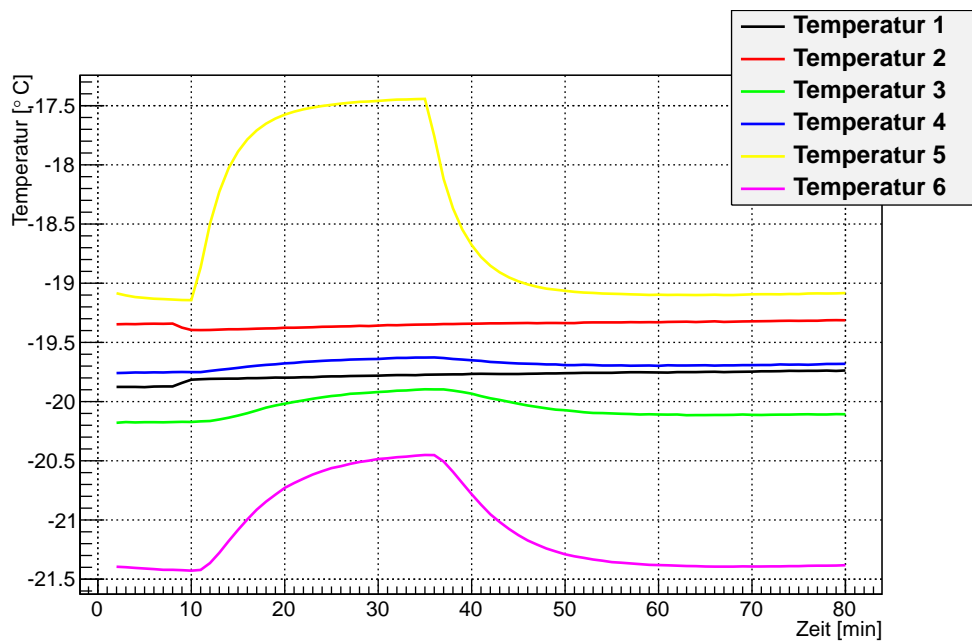


Abbildung 5.9.: Temperaturverlauf im kalten Detektorvolumen bei Anschalten der $\pm 6\text{V}$ Versorgungsspannung der beiden Vorverstärker und $HV_2 = HV_3 = 341\text{V}$ nach 10 Minuten und Ausschalten nach 34 Minuten. Temperatursensoren 1 und 2 an der Innenbox, 3 und 4 an den Kristallen und 5 und 6 auf den Vorverstärkern.

Einen kompletten Kühlkreislauf mit An- und Abschalten des Kühlers und Betrieb der Elektronik bei tiefen Temperaturen zeigt Abbildung 5.10.

5.2.2. Kontrolle der Kühlschläuche

Vorm Abschalten des externen Kühlers und dem Aufwärmen des Aufbaus wurde die lichtdichte Box geöffnet und die Kühlschläuche kontrolliert. An den Y-

5. Messungen und Ergebnisse

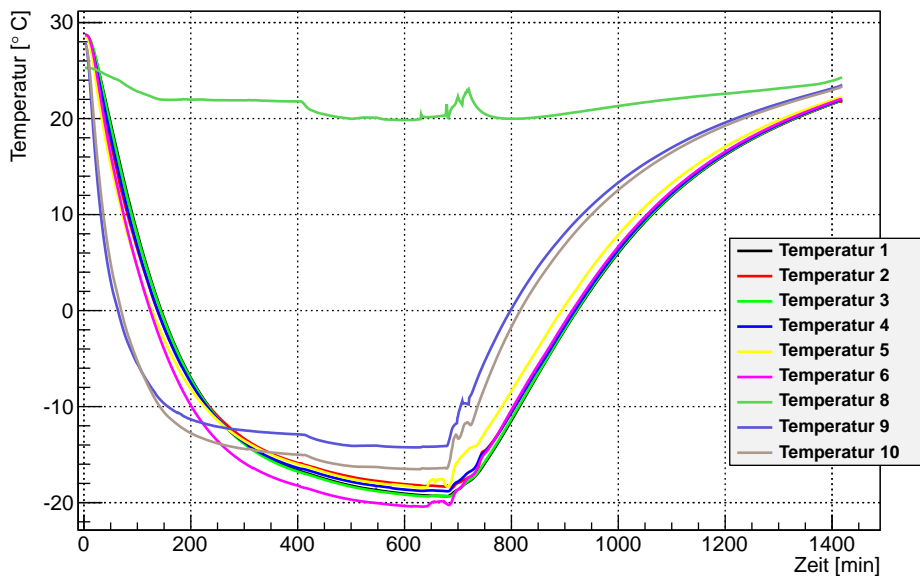


Abbildung 5.10.: Kompletter Kühlkreislauf im „SuperProto8“-Aufbau mit An- und Abschalten des externen Kühlers und Betrieb der Elektronik bei tiefen Temperaturen:

- 406 min: Öffnen des Fensters (Abkühlen der Raumtemperatur),
- 641 min: Anschalten von Betriebs- und Hochspannung,
- 670 min: Ausschalten von Betriebs- und Hochspannung,
- 676 min: Öffnen der lichtdichten Box, Abisolieren der Schläuche,
- 697 min: Schließen der lichtdichten Box, Abschalten der Kühlung, notdürftiges Isolieren.

Verbindungsstücken, an denen die vom Kühler kommende Kühlflüssigkeit auf vier Schläuche verteilt wurde, zeigte sich immer nur ein Schlauch vereist, was darauf schließen ließ, dass in dem anderen Schlauch der Durchfluss gehemmt war und dieser sich dadurch aufwärmte. Mit einem Tast-Thermometer (Gulton TastoTherm D7005) wurde die Temperatur der Schläuche an den vier Eingängen in die Aluminiumbox gemessen, indem der Temperaturfühler etwa zwei Minuten zwischen den zwei Schläuchen positioniert wurde. Die Temperatur schwankte stark, sobald man den Fühler an eine andere Stelle bewegte, sodass ein Messfehler von $\delta T = 2^\circ\text{C}$ aufgrund der schlechten Positionierungsmöglichkeit zwischen den Schläuchen angenommen wurde. Das Ergebnis zeigt ist in Abbildung 5.11 dargestellt und zeigt, dass die Temperaturverteilung äußerst inhomogen war und Schlauch B sogar eine positive Temperatur von etwa

5.3. Kabelverbindung zwischen Avalanche-Photodiode und Vorverstärker

+9(2) °C zeigte. Das erklärt neben den Verlusten durch schlechte Isolierung, warum

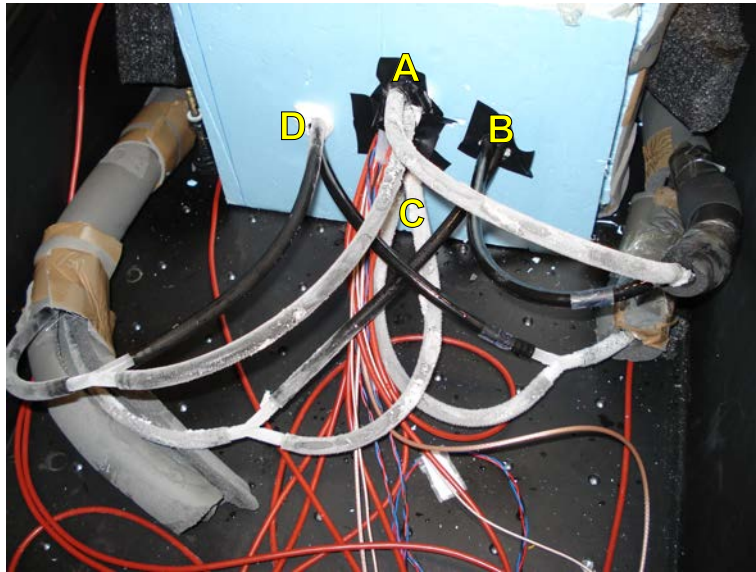


Abbildung 5.11.: Zustand der Kühlschläuche bei Durchfluss von Kühlwasser mit einer Temperatur von $-31(8)^{\circ}\text{C}$ im Aufbau „SuperProto8“. gemessene Temperaturen:

$$T_A = -18(2)^{\circ}\text{C}, T_B = +9(2)^{\circ}\text{C},$$
$$T_C = -17(2)^{\circ}\text{C}, T_D = -4(2)^{\circ}\text{C}.$$

die Temperatur im Inneren der Aluminiumbox nicht unter $-20(1)^{\circ}\text{C}$ fiel, obwohl die Kühlflüssigkeitstemperatur bei etwa $-31(8)^{\circ}\text{C}$ lag. In folgenden Aufbauten sollte der Kühlschlauch-Aufbau optimiert werden, um in allen Schläuchen die gleiche, minimale Temperatur zu erreichen und so auf eine noch niedrigere Temperatur im Inneren der Aluminiumbox zu kommen.

5.3. Kabelverbindung zwischen Avalanche-Photodiode und Vorverstärker

In der Entwicklungsphase der in Kapitel 4.4.3 beschriebenen „Kabellösung“ wurden 4 Kabeltypen von 4 cm Länge ausprobiert: Ein Koaxialkabel mit Teflonmantel, eines ohne Teflonmantel, ein Twisted-Pair-Kabel und ein einfaches Flachbandkabel. Das ummantelte Koaxialkabel wurde gleich ausgeschlossen, da es zu starr für den engen Aufbau in der späteren Aluminium-Box war. Die anderen drei Kabel wurden jeweils in einer kleinen lichtdichten Aluminium-Testbox mit einem Vorverstärker und einer Avalanche-Photodiode verbunden, der Vorverstärker mit $\pm 6\text{ V}$ Betriebsspannung und

5. Messungen und Ergebnisse

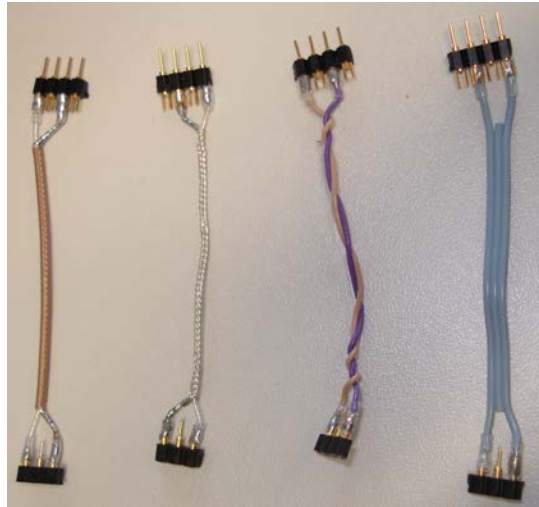


Abbildung 5.12.: Unterschiedliche Kabel für APD-Vorverstärker-Verbindung
v.l.: Koaxialkabel mit Teflonmantel, Koaxialkabel ohne Mantel,
Twisted-Pair-Kabel, Flachbandkabel.

die APD mit 298 Volt Sperrspannung versorgt und das Signalkabel ans Oszilloskop angeschlossen. Die Testbox enthielt eine LED, die einen schwachen Lichtpuls abgab, sodass die APD und der Vorverstärker ein Signal aufzeigten. Die drei Signale bei gleichen Bedingungen wurden anhand des Signalbildes am Oszilloskop verglichen. Es traten keine sichtbaren Unterschiede in der Höhe des Rauschpegels auf. Daher wurde entschieden, das Twisted-Pair-Kabel zu nutzen, da es von allen vier Lösungen am flexibelsten zu handhaben war.

Durch spätere Histogrammierung und Analyse der Rauschsignale bei angelegter Hochspannung vor dem Empfangen eines LED-Pulses erhielt man anhand der Standardabweichung σ der an die Verteilung gefitteten Gaußkurve einen Wert für die Rauschbreite. Das RMS der Verteilung entspricht hier in guter Näherung der Standardabweichung σ der gefitteten Gaußkurve.

Kabel	$\sigma [10^{-6} \text{ V}]$	$\delta\sigma[10^{-6} \text{ V}]$
Flachbandkabel	416,2	4,7
abgeschirmtes Koaxialkabel	497,8	6,3
Twisted-Pair-Kabel	424,2	4,5

Tabelle 5.2.: σ der Histogramme des Rauschens von unterschiedlichen Kabelverbindungen als Angabe über die Rauschbreite.

5.3. Kabelverbindung zwischen Avalanche-Photodiode und Vorverstärker

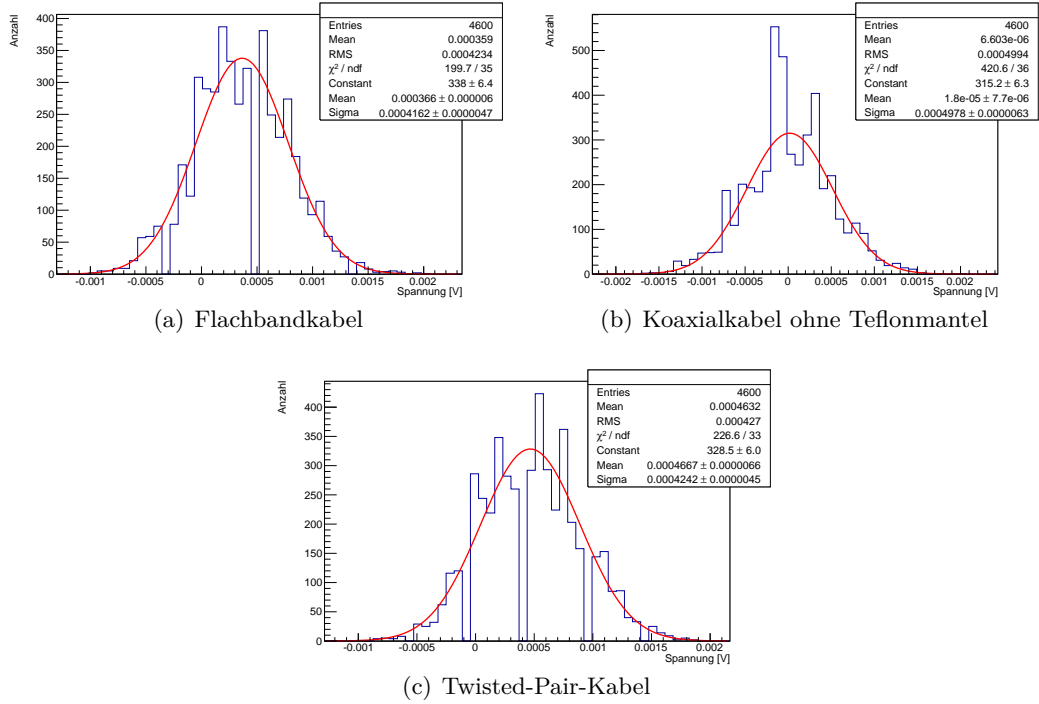


Abbildung 5.13.: Histogramme des Rauschsignals für unterschiedliche Kabelverbindungen zwischen Avalanche-Photodiode und Vorverstärker. Vorverstärkerversorgung mit ± 6 Volt, $HV_{APD} = 298$ V ohne LED-Puls. Die Fehlanpassung des Histogramm-Binnings auf den Wertebereich des Oszilloskops wurde erst unmittelbar vor Abgabe der Arbeit bemerkt. Durch diese Fehlanpassung werden die quantitativen Aussagen dieses Kapitels allerdings nicht verfälscht.

$$\Delta\sigma = |\sigma_{twisted} - \sigma_{koax}| = 73,6 \cdot 10^{-6} \text{ V} \quad (5.9)$$

$$\delta(\Delta\sigma) = \sqrt{\delta\sigma_{twisted}^2 + \delta\sigma_{koax}^2} = 7,7 \cdot 10^{-6} \text{ V} \quad (5.10)$$

$$\rightarrow 3\delta(\Delta\sigma) = 23,1 \cdot 10^{-6} \text{ V} < \Delta\sigma \quad (5.11)$$

Somit ist das Rauschen von Koaxialkabel im Vergleich zu Twisted-Pair-Kabel oder zum Flachbandkabel signifikant breiter, liegt aber immer noch in der selben Größenordnung von etwa 0,5 mV. Flachbandkabel und Twisted-Pair-Kabel unterscheiden sich nicht signifikant, da $\Delta\sigma = 8,0 \cdot 10^{-6} \text{ V} < 3\delta\Delta\sigma = 19,5 \cdot 10^{-6} \text{ V}$.

Allerdings konnte man bei diesem Test nicht den Einfluss mehrerer betriebener Vorverstärker und Kabel aufeinander beurteilen, da in die Test-Box nur eine APD mit Vorverstärker hineinpasste und diese Box selbst als gute Abschirmung diente. Dadurch sind auch die hier gemessenen absoluten Zahlenwerte nicht repräsentativ für

5. Messungen und Ergebnisse

den Prototypen-Aufbau, weil die Vorverstärker hier einzeln und abgeschirmt betrieben wurden. Es ist durchaus möglich, dass ein abgeschirmtes Kabel beim gleichzeitigen Betrieb von 16 Vorverstärkern wesentlich rauschärmer ist als ein Twisted-Pair-Kabel. Das herauszufinden wäre ein interessanter Aspekt für zukünftige Prototypen-Testmessungen.

5.4. Rauschen des Kristall-Avalanche-Photodioden-Vorverstärker-Systems

Um sich ein erstes umfassendes Bild von der Funktion der Kristall-APD-Vorverstärker-Module zu machen, wurde das Rauschen der Elektronik bei unterschiedlichen Aufbauten und Bedingungen aufgenommen und interpretiert. Langfristiges Ziel ist es, das Rauschen so weit zu minimieren, dass man ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis erreicht und Signale durch kosmische Myonen registrieren kann. Diese liegen bei einer Avalanche-Photodioden Verstärkung $M \approx 50$ zwischen etwa 6(11)mV und maximal 40(3)mV bei -25°C Betriebstemperatur, aber nur bei etwa 1(3) mV bis maximal 10(3) mV bei Raumtemperatur (siehe Kapitel 3.4). Die Positionierung der Kristalle und der dazugehörigen Avalanche-Photodioden innerhalb der Innenbox ist in Abbildung 4.3 skizziert und für alle Messaufbauten gültig.

Der Vorverstärker ist dafür ausgelegt, dass sowohl die ± 6 Volt Betriebsspannung als auch die Hochspannung für die Avalanche-Photodiode angeschlossen sind. Erst dann ist das Elektroniksystem optimal austariert und das Rauschen minimal. Dies wurde bereits in der Bachelorarbeit zur Entwicklung des Datenauslese-Systems von Pascal Lautz festgestellt ([6]). Daher haben die Test-Messungen am meisten Aussagekraft für das spätere elektromagnetische Kalorimeter, wenn sowohl Vorverstärker als auch Hochspannung betrieben wurden.

Alle Oszilloskopaufnahmen wurden mit root histogrammiert und mit einer Gaußkurve gefittet, da das Rauschen statistischen Fluktuationen unterliegt und eine Messung mit vielen Messwerten gut durch eine Gaußkurve angenähert werden kann. Das RMS der Verteilung stimmt in guter Näherung mit der Breite der Gaußkurve σ überein. Bei den Histogrammen muss beachtet werden, dass beobachtbare Strukturen wie zum Beispiel leere Bins von einer Fehlanpassung des Binnings auf den Wertebereich des Oszilloskops herrühren. Dies wurde erst unmittelbar vor Abgabe der Arbeit bemerkt. Durch diese Fehlanpassung werden die quantitativen Aussagen dieses Kapitels allerdings nicht verfälscht.

5.4. Rauschen des Kristall-Avalanche-Photodioden-Vorverstärker-Systems

Die Standardabweichung σ des Gaußfits wird hier als Angabe für die Rauschbreite genutzt. Alle Standardabweichungswerte sind in den Tabellen 5.4 und 5.7 am Ende des Kapitels zusammengefasst und verglichen. Als signifikant wird eine Differenz $\Delta\sigma$ zwischen zwei σ Werten eingestuft, wenn $\Delta\sigma \gg 3\delta(\Delta\sigma)$, wie bereits in Gleichung (5.3) und (5.1) beschrieben. Die Rauschbreiten sind mit Gleichung (3.30) und (3.31) in die entsprechende von einem Myon im Kristall deponierte Energie umgerechnet worden und die Ergebnisse in Tabelle 5.8 und 5.5 zusammengefasst.

Bei Angabe von Spannungswerten, die vom Oszilloskopbild abgelesen werden, entsprechen die Fehlerangaben dem Ablesefehler auf dem Oszilloskop-Bild. Für eine Angabe der Höhe des Rauschbands werden etwa 90% von Spitze zu Spitze gemessen und dabei immer 0,5 Skalenteile als Ablesefehler angenommen. Angaben der Hochspannungsversorgung werden wegen Schwankungen der Hochspannungsmodul-Anzeige mit einem Fehler von $\delta HV = 1 \text{ V}$ belegt.

5.4.1. Aufbau mit vier Vorverstärkern und der „Kabel-Lösung“

Um zu sehen, inwiefern sich mehrere gleichzeitig betriebene Vorverstärker auf das Rauschen auswirken, wurden die beiden mit schwarzen Kapseln präparierten Kristalle 1712 und 1713 zusammen mit sechs Messing-Dummies in die Innenbox eingeschoben, die vier Vorverstärker auf der Vorverstärker-PVC-Platte angeschraubt und in die obere Reihe des U-Profiles geschoben wie in Abbildung 4.10 gezeigt über Twisted-Pair-Kabel mit den vier Avalanche-Photodioden verbunden. Drei Temperatursensoren wurden im Detektorvolumen positioniert. Innenbox und U-Profil wurden in die Aluminium-Box geschoben, Versorgungsspannungs-, Hochspannungs- und Signalkabel von den Vorverstärkern durch die Verschlussplatte geführt und die Aluminiumbox mit der Verschlussplatte verschraubt. Die Aluminiumbox befand sich in der Polystyrol-Isolationsbox. Eine schwarze lichtdichte Folie wurde in mehreren Schichten um die Box gehüllt und auf der Unterlage mit Klebeband fixiert, um keine Lichteintritte ins Detektorvolumen zu ermöglichen. Die Stromversorgungskabel wurden an das Netzgerät, die Signalkabel an die vier Eingänge des Oszilloskops angeschlossen wie in Tabelle 5.3 zugeordnet.

Da nur zwei Hochspannungskanäle zur Verfügung standen, konnten immer maximal zwei Avalanche-Photodioden gleichzeitig mit Hochspannung betrieben werden. Also wurden die Hochspannungskabel A und B jeweils mit einer Avalanche-Photodiode auf einem Kristall verbunden und zwischen einzelnen Messungen zur Versorgung einer anderen Avalanche-Photodiode umgesteckt. Die Hochspannung wurde mit etwa $(340 \pm 2) \text{ Volt}$ so gewählt, dass sie bei allen Avalanche-Photodioden bei Raumtempera-

5. Messungen und Ergebnisse

Signalkanal	Farbe	APD	Vorverstärker	HV-Kanal	Kristall
1	gelb	293	84	A	1713
3	lila	212	72	A	1713
2	blau	272	74	B	1712
4	grün	198	32	B	1712

Tabelle 5.3.: Zuteilung der Signalkanäle zu den entsprechenden Vorverstärkern und Avalanche-Photodioden

tur einen Verstärkungsfaktor von etwa 50 bewirkt (siehe APD-Kennlinien, Abbildung 3.3 und A.5). Die Messungen geschah bei Raumtemperatur und die Kristalle waren horizontal positioniert, sodass Signale von kosmischen Muonen nur mit Pulshöhen von 1(3)mV (bei horizontalem Durchflug bis maximal 9(3)mV) zu erwarten waren.

Beim Vergleich des Rauschens bei ausgeschaltetem Hochspannungsmodul oder angeschaltetem, aber auf 0 Volt gedrehtem Hochspannungsmodul zeigt sich keine sichtbare Veränderung im Rauschbild. Jedoch ist der Unterschied der Rauschbreiten $\Delta\sigma = 219 \mu V > 3\delta\Delta\sigma = 106,1 \mu V$ leicht signifikant. Also scheint eine Spannungsfuktuation abhängig vom Hochspannungsmodul ins Rauschen einzugehen.

Das Rauschen ist nicht breiter, wenn das Datenaufnahmegerät mit den Temperatursensoren angeschaltet ist. Sobald jedoch ein Temperatursensor angesteuert wird und zur Temperaturmessung kurzzeitig ein Probestrom fließt, zeigt sich eine Einstreuung in allen Kanälen, sowohl beim Ansteuern der Temperatursensoren in der Aluminiumbox als auch beim Ansteuern eines Sensors mehrere Meter vom Aufbau entfernt. Auch An- und Ausschalten des Lichtschalters beeinflusst das Vorverstärkersignal (Abbildung 5.15). Es gibt aber keine Reaktion, wenn die Betriebsspannung ausgeschaltet ist. Diese Beobachtung zeigt, wie empfindlich der angeschaltete Vorverstärker auf Einstreuungen durch Ströme und resultierende Magnetfelder im Umfeld reagiert. Das ist vor allem in der jetzigen Aufbauphase ein Problem, wo noch kein externer Trigger für die Datenaufnahme vorhanden ist und nur direkt am Oszilloskop auf eine erwartete Pulshöhe von mehreren mV für ein kosmisches Myon getriggert werden kann. Die Einstreuungen sind mehrere 100 mV hoch, würden also als Signal gewertet werden, obwohl kein Myon durch den Kristall geflogen ist. Später sollen zwei Plastiksintillatoren ober- und unterhalb des elektromagnetischen Kalorimeters als externe Trigger dienen und die Messung erst gestartet werden, wenn beide Szintillatoren ein Signal durch ein Myon detektieren. Damit werden falsche Signale durch Einstreuungen elektrischer

5.4. Rauschen des Kristall-Avalanche-Photodioden-Vorverstärker-Systems

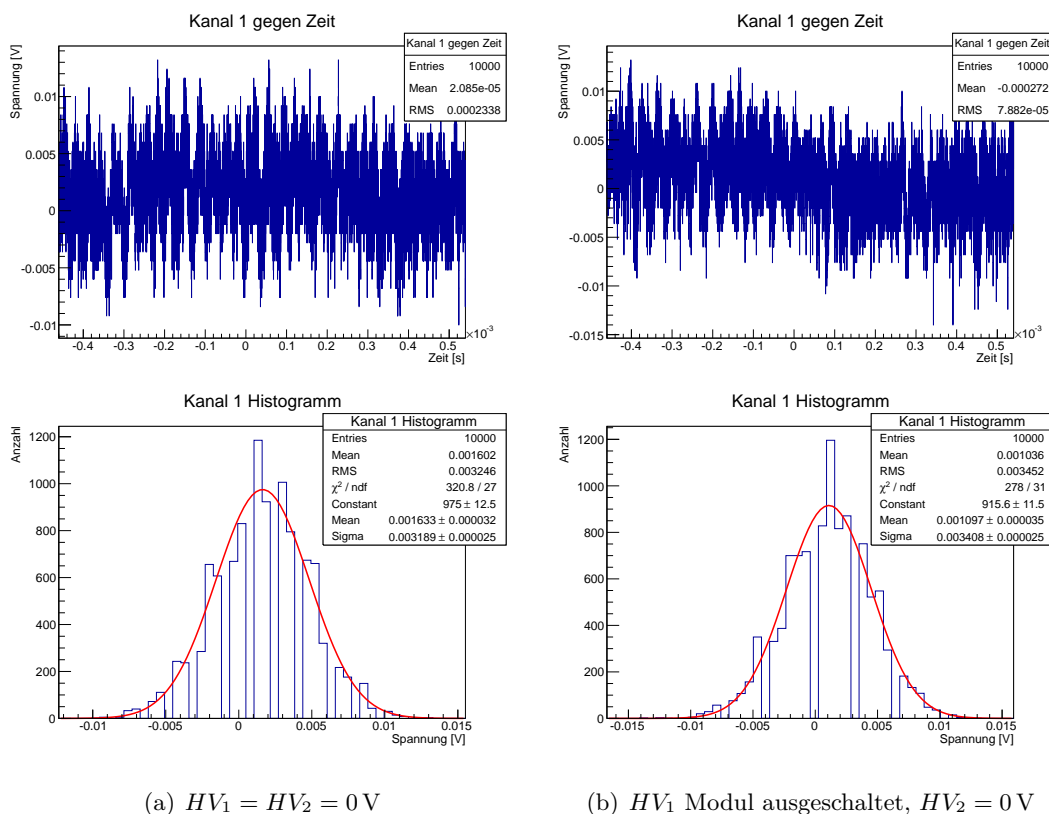
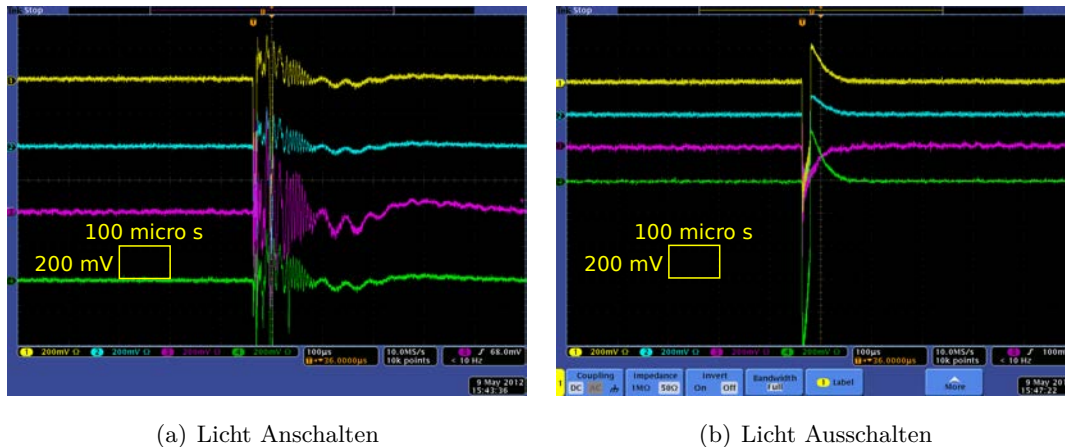


Abbildung 5.14.: Rauschen von Kanal 1 bei ausgeschaltetem im Vergleich zu eingeschaltetem, aber auf 0V gedrehtem Hochspannungsmodul. Alle Vorverstärker waren mit $\pm 6 \text{ V}$ versorgt. Die Fehlanpassung des Binnings auf den Wertebereich des Oszilloskops wurde erst unmittelbar vor Abgabe der Arbeit bemerkt. Durch diese Fehlanpassung werden die quantitativen Aussagen dieses Kapitels allerdings nicht verfälscht.

Geräte umgangen.

Der Vergleich des Rauschens bei eingeschalteter Hochspannung $HV_4 = 343(1) \text{ V}$ und Betrieb von allen vier Vorverstärkern oder nur einem einzigen Vorverstärker mit $\pm 6 \text{ V}$ (Abbildung 5.16) zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen den Standardabweichungen σ der Gaußfits beider Histogramme (Abbildung 5.17). Das Rauschen ist beim Betrieb von vier Vorverstärkern etwa $1/7$ breiter (siehe Tabelle 5.4). Dies deutet erneut auf die Empfindlichkeit der Vorverstärker auf Einstreuungen hin und wirft die Frage auf, ob ein Betreiben von vielen Vorverstärkern auf engstem Raum ohne Abschirmung zu Problemen führen kann. Dies sollte in zukünftigen Testmessungen überprüft werden.

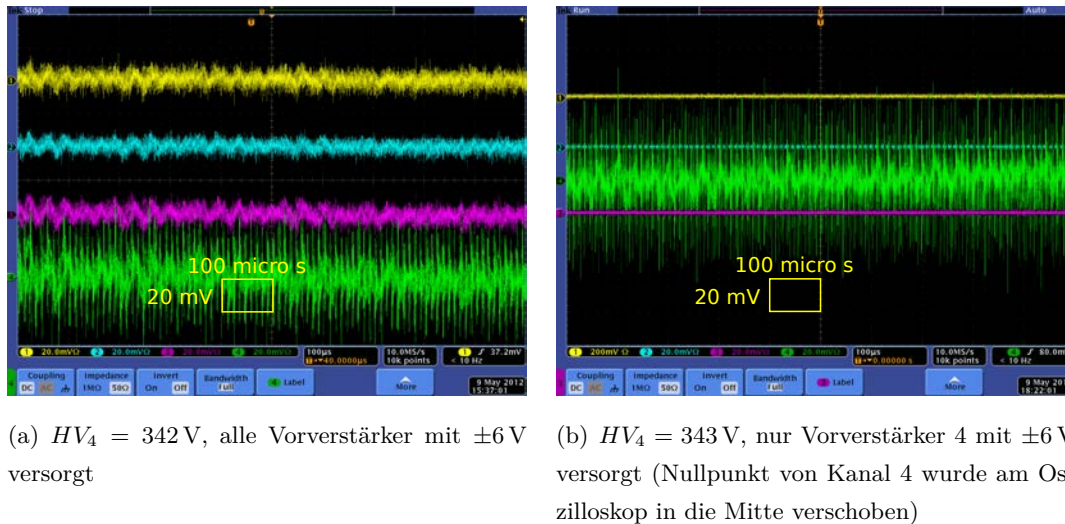
5. Messungen und Ergebnisse



(a) Licht Anschalten

(b) Licht Ausschalten

Abbildung 5.15.: Einstreuungen ins Vorverstärkersignal bei vier eingeschalteten Vorverstärkern und $HV_3 = 340$ V.



(a) $HV_4 = 342$ V, alle Vorverstärker mit ± 6 V versorgt

(b) $HV_4 = 343$ V, nur Vorverstärker 4 mit ± 6 V versorgt (Nullpunkt von Kanal 4 wurde am Oszilloskop in die Mitte verschoben)

Abbildung 5.16.: Rauschen bei Betrieb von allen vier Vorverstärkern mit ± 6 V im Vergleich zum Betrieb von nur einem Vorverstärker (Kanal 4) bei jeweils eingeschalteter Hochspannung über Vorverstärker 4 (grün).

In Tabelle 5.5 sind die gemessenen Rauschbreiten der besprochenen Aufbauten und die entsprechenden äquivalenten deponierte Energien eines Myons zusammengefasst. Die Rauschbreite liegt bei mehreren mV, während die Myon-Pulshöhe bei Raumtemperatur nur mit 1(3)mV erwartet wird. Ein Myon müsste fast die komplette Kristalllänge von 20 cm durchfliegen ($\frac{dE}{dx}_{MIP} \Delta x = 10,1 \frac{\text{MeV}}{\text{cm}} \cdot 20 \text{ cm} = 202 \text{ MeV}$) und damit einen sehr großen Einfallswinkel haben, um Energie zu deponieren, die höher als die äquivalente Rausch-Energie ist. Das Rauschen in diesem Aufbau, vor allem beim Betrieb von

5.4. Rauschen des Kristall-Avalanche-Photodioden-Vorverstärker-Systems

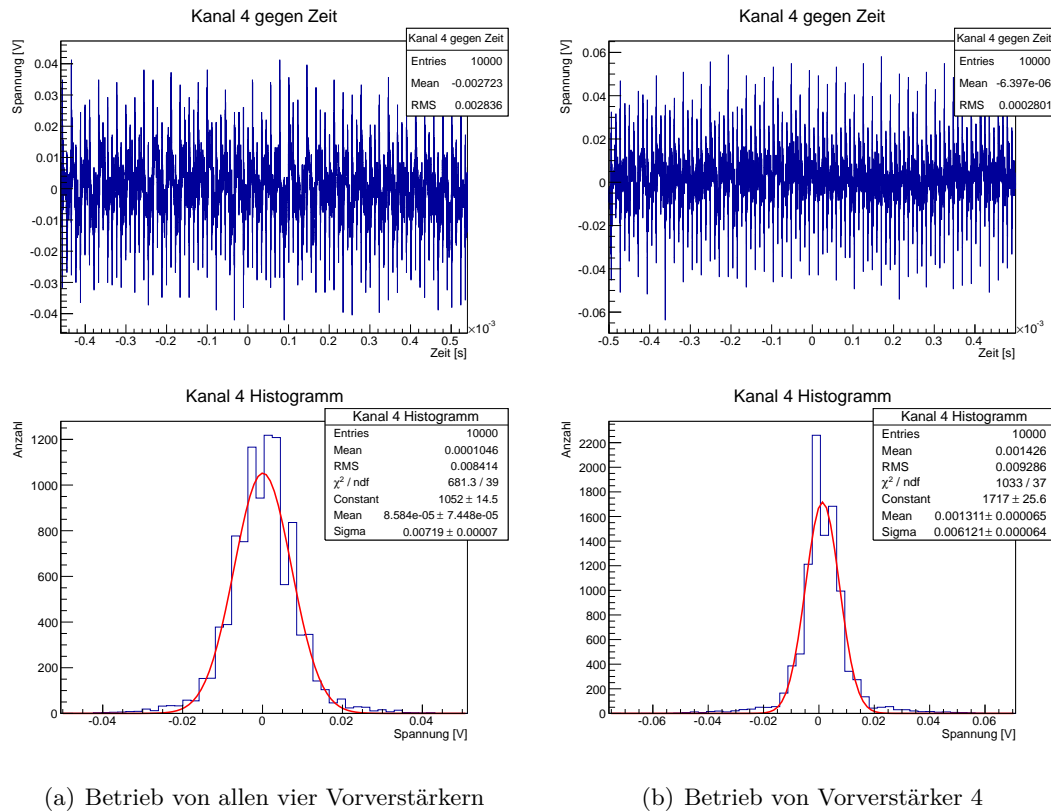


Abbildung 5.17.: Aufnahme des Rauschsignals und Histogramm für Vorverstärker 4 und $HV_4 = 343 \text{ V}$ bei Betrieb aller vier Vorverstärker im Vergleich zum Betrieb nur von Vorverstärker 4. Die Fehlanpassung des Binings auf den Wertebereich des Oszilloskops wurde erst unmittelbar vor Abgabe der Arbeit bemerkt. Durch diese Fehlanpassung werden die quantitativen Aussagen dieses Kapitels allerdings nicht verfälscht.

den vier Kabel-Vorverstärkern, ist also viel zu hoch, um Myonen bei Raumtemperatur zu detektieren.

5.4.2. Aufbau „SuperProto8“ mit Kühlung und lichtdichter Kiste

Als Reaktion auf die ungünstig hohe Rauschschwelle beim Aufbau mit der lichtdichten schwarzen Folie wurde ein neuer Aufbau in einer großen, lichtdichten Aluminiumkiste realisiert, der sogenannte „SuperProto8“, beschrieben in Kapitel 4.1. Da das elektromagnetische Kalorimeter am PANDA-Experiment später bei -25°C arbeiten wird, wurde der Aufbau mit Hilfe des externen Kühlapparats heruntergekühlt, um das Rau-

5. Messungen und Ergebnisse

#	Spannung [V]	σ [μ V]	$\delta\sigma$ [μ V]	$\Delta\sigma$ [μ V]	$\delta\Delta\sigma$ [μ V]	$3\delta\Delta\sigma$ [μ V]
1	$HV_1 = 0(1)$	3189,0	25,0	219,0	35,4	106,1
	HV_1 OFF	3408,0	25,0			
4	$4 \times \pm 6$ V, $HV_4 = 342(1)$	7190,0	70,0	1069,0	94,8	284,5
	$1 \times \pm 6$ V, $HV_4 = 343(1)$	6121,0	64,0			

Tabelle 5.4.: Vergleich der Standardabweichungen verschiedener Einstellungen im Aufbau mit vier Vorverstärkern und Kabel-Verbindung zu allen vier Avalanche-Photodioden bei Raumtemperatur.

#	Spannung [V]	σ [μ V]	$\delta\sigma$ [μ V]	E [MeV]	δE [MeV]
1	$HV_1 = 0(1)$	3189,0	25,0	72,48	0,57
	HV_1 OFF	3408,0	25,0	77,45	0,57
4	$4 \times \pm 6$ V, $HV_4 = 342(1)$	7190,0	70,0	163,41	1,59
	$1 \times \pm 6$ V, $HV_4 = 343(1)$	6121,0	64,0	139,11	1,45

Tabelle 5.5.: Zusammenfassung der Standardabweichungen σ der Gaußfits an die Rausch-Histogramme als Wert für die Rauschbreite und entsprechende äquivalente im Kristall von einem kosmischen Myon deponierte Energie E bei Raumtemperatur und Aufbau mit vier Vorverstärkern und Kabel-Verbindung zu allen vier Avalanche-Photodioden.

schen bei niedrigen Temperaturen beurteilen zu können.

Während vorangegangener Test-Messungen wurde APD 293 auf Kristall 1713 vermutlich durch eine über der Durchbruchspannung liegende angelegte Sperrspannung beschädigt und funktionierte nicht mehr. APD 272 löste sich beim Umbauen von Kristall 1712. Somit standen für die finalen Versuche nur jeweils eine Avalanche-Photodiode auf einem Kristall zur Verfügung. Tabelle 5.6 gibt einen Überblick über die zwei Kristallmodule, die zum Test der zwei möglichen Vorverstärker-Verbindungen mit Kabel oder mit Kapsel ausgestattet waren.

Sechs weitere in Folie verpackte Kristalle ohne Elektronik dienen im Aufbau als Kristalldummys und sind wie in Abbildung 4.3 mit den zwei Kristall-APD-Modulen in der Innenbox platziert. Damit wird simuliert, wie sich der Zusammenschluss von acht echten Bleiwolframatkristallen beim Abkühlen verhält. Zudem befindet sich so kein Fremd-Metall mehr im Aufbau wie die Messing-Dummys während der ersten Rauschmessungen. Es wurden Temperatursensoren in der Innenbox verteilt wie in

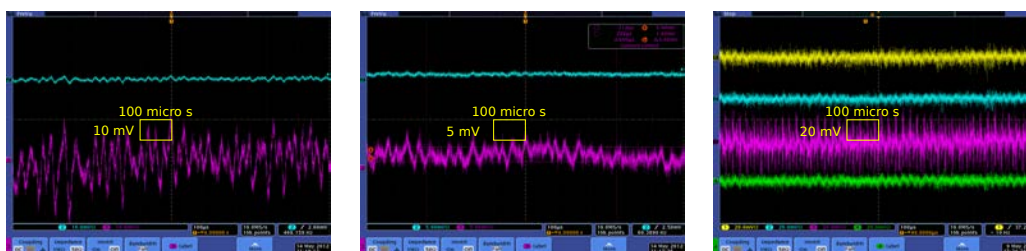
5.4. Rauschen des Kristall-Avalanche-Photodioden-Vorverstärker-Systems

HV	APD	Kristall	Befestigung des Vorverstärkers	Kanal
A	212	1713	Kabel, Vorverstärker liegt lose am Boden	2 (lila)
B	192	1712	Kapsel, Vorverstärker in Kapsel eingeschraubt	3 (blau)

Tabelle 5.6.: Zusammenstellung von Kristallen, Avalanche-Photodioden und Vorverstärkern im Testaufbau „SuperProto8“.

Kapitel 5.2 erläutert. Dies hat aber, wie bei vorangegangenen Messungen untersucht, keinen Einfluss auf das Rauschen, solange der Temperatursensor keinen Messpunkt aufnimmt. Abbildung 4.4 zeigt den Aufbau mit den Bleiwolframatkristallen, Kapsel und Twisted-Pair-Kabel, Temperatursensoren und Kühlschläuchen vor dem Einschleiben in die Aluminiumbox.

Bei geschlossener Aluminiumkiste und Raumtemperatur zeigt sich das Rauschen bei eingeschalteter Versorgungs- und Hochspannung für APD 212 und 193 viel kleinskaliger als beim vorherigen Aufbau mit der lichtdichten Folie (Abbildung 5.18). Es beträgt für das Kabel-Modul (Kanal 3) nur $U_{mitErdung} = 5(2)$ mV beziehungsweise $U_{ohneErdung} = 20(5)$ mV, bei dem Folienaufbau aber 40(10) mV. Vermutlich sind also Lichtlecks der schwarzen Folie ein großes Störungspotential für die Avalanche-Photodioden und Vorverstärker gewesen und haben den hohen Rauschpegel verursacht, weil einzelne Photonen von außerhalb durch die hochempfindlichen Avalanche-Photodioden detektiert wurden.



(a) ohne Erdung, $HV_3 = 339(1)$ V, $HV_4 = 342(1)$ V (b) mit Erdung, $HV_3 = 339(1)$ V, $HV_4 = 342(1)$ V (c) $HV_3 = 342(1)$ V, lichtdichte Folie, alle 4 Vorverstärker an

Abbildung 5.18.: Rauschen ohne und mit Erdung des Netzgeräts an der Aluminiumkiste bei Betrieb von beiden Vorverstärkern mit ± 6 V und mit Hochspannung ($HV_3 = 339(1)$ V, $HV_4 = 342(1)$ V) im Aufbau „SuperProto8“ bei Raumtemperatur im Vergleich zum Aufbau mit lichtdichter Folie (Kanal 3 zeigt das APD-Kabel-Modul).

5. Messungen und Ergebnisse

Es zeigt sich, dass das Rauschsignal erheblich verbessert wird, wenn das Netzgerät zusätzlich zur internen Erdung noch extern geerdet wird. Dazu wird ein zusätzliches Kabel von der Erde des Netzgeräts an einer der Verschlussklemmen des Kistendeckels einklemmt und hat so guten Kontakt zur Aluminiumkiste. Dies kann nur dadurch erklärt werden, dass die Erde des Netzgeräts nicht ganz auf Nullpotential liegt und kleine Ladungsmengen über eine große Kapazität, wie sie die Aluminiumkiste darstellt, abfließen können.

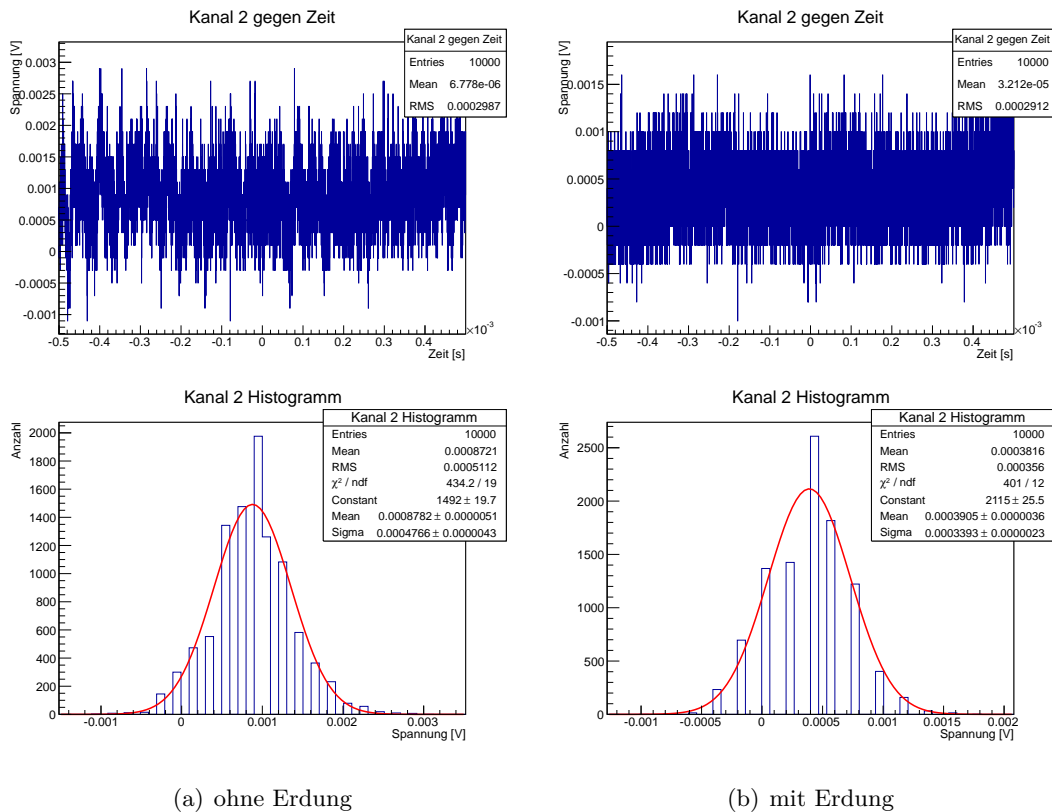


Abbildung 5.19.: Aufnahme des Rauschsignals und Histogramm mit und ohne Erdung für das Kapsel-Modul (Kanal 2) bei heruntergekühlten Messaufbau und Betrieb beider Vorverstärker sowie $HV_2 = HV_3 = 340(1)$ V. Die Fehlanpassung des Binnings auf den Wertebereich des Oszilloskops wurde erst unmittelbar vor Abgabe der Arbeit bemerkt. Durch diese Fehlanpassung werden die quantitativen Aussagen dieses Kapitels allerdings nicht verfälscht.

Während der im Folgenden besprochenen Messungen im heruntergekühlten „Super-Proto8“-Aufbau betragen die Temperaturen im isolierten Detektorvolumen zwischen

5.4. Rauschen des Kristall-Avalanche-Photodioden-Vorverstärker-Systems

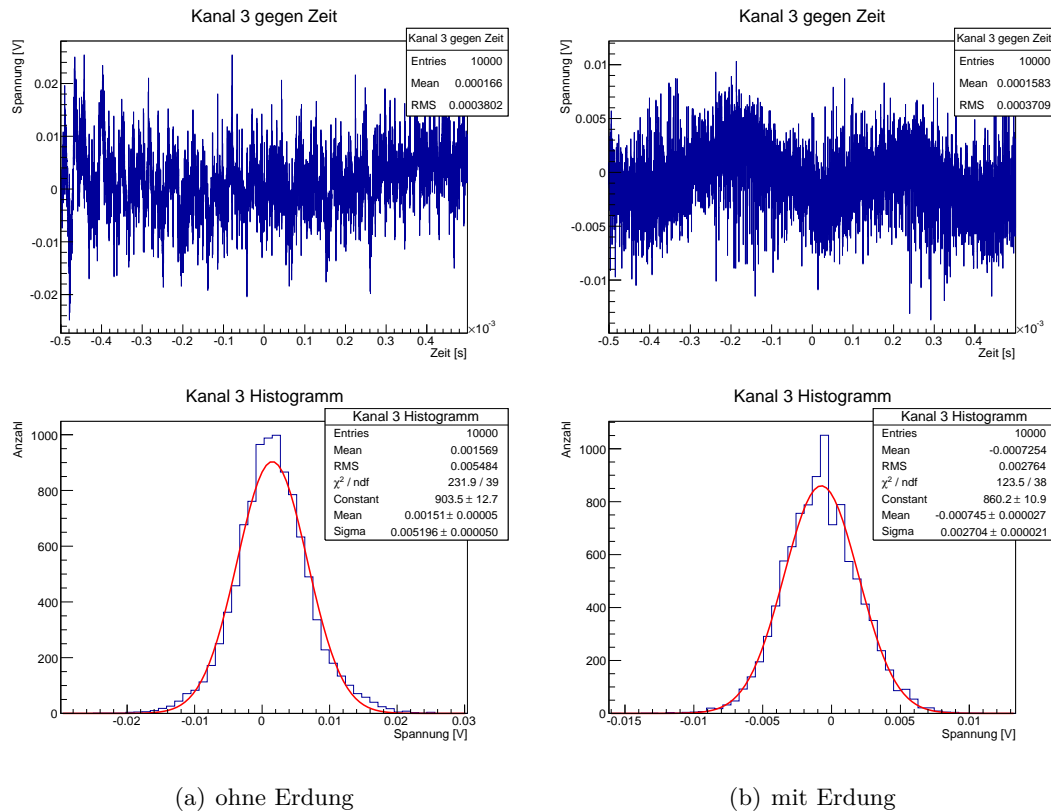


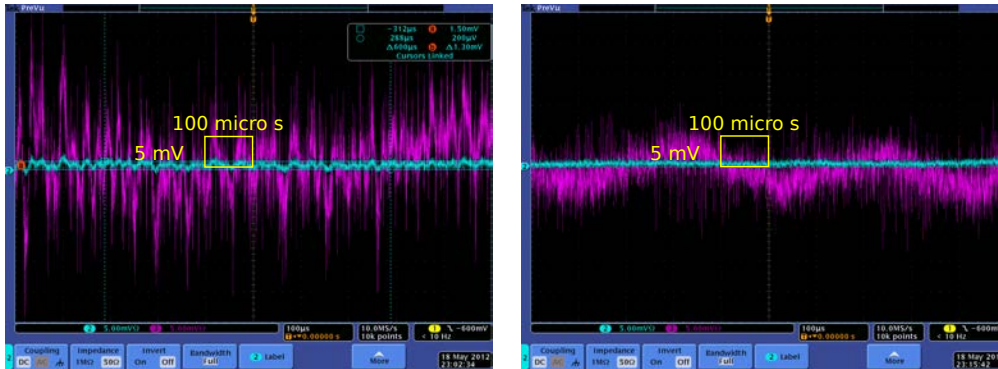
Abbildung 5.20.: Aufnahme des Rauschsignals und Histogramm mit und ohne Erdung für das Kabel-Modul (Kanal 3) bei heruntergekühlten Messaufbau und Betrieb beider Vorverstärker sowie $HV_2 = HV_3 = 340(1)$ V. Die Fehlanpassung des Binnings auf den Wertebereich des Oszilloskops wurde erst unmittelbar vor Abgabe der Arbeit bemerkt. Durch diese Fehlanpassung werden die quantitativen Aussagen dieses Kapitels allerdings nicht verfälscht.

$-18(1)$ und $-20(1)$ °C (Temperaturverlauf siehe Abbildung 5.10).

Abbildung 5.21 zeigt das Rauschen im heruntergekühlten Zustand mit und ohne Erdung bei angelegter Hochspannung an beiden Avalanche-Photodioden. Die Erdung wirkt sich vor allem auf den Rauschpegel des mit einem Twisted-Pair-Kabel verbundenen APD-Vorverstärker-Moduls aus (Kanal 3), dieser sinkt von $15(2)$ mV auf etwa $5(2)$ mV. Wie in Block 3 und 4 von Tabelle 5.7 dargestellt, beträgt die Reduktion des Rauschens mit Erdung beim Kapsel-Modul nur etwa $1/4$, während sich das Rauschen des Kabelmoduls um etwa die Hälfte reduziert.

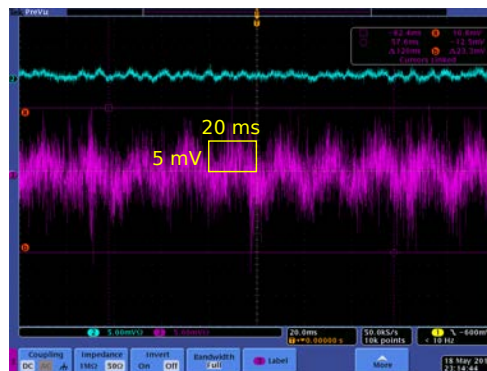
In Abbildung 5.21(b) fällt auf, dass das Kabel-Modul deutliche einhüllende hochfre-

5. Messungen und Ergebnisse



(a) ohne Erdung

(b) mit Erdung



(c) mit Erdung, größere Zeitskala. Deutlich zu sehen ist die 50 Hz Erdschleife in Kanal 3. (Kabel-Modul).

Abbildung 5.21.: Rauschen bei heruntergekühltem Messaufbau mit und ohne Erdung über die Aluminiumkiste bei Versorgung von beiden APD mit 340(1) V Hochspannung und Betrieb von beiden Vorverstärkern mit ± 6 V.

quente Schwingungen von etwa $T = 400(50) \mu\text{s}$ aufweist, die man beim Kapsel-Modul, auch wegen der kleinen Rauschbreite, nicht sehen kann. In größeren Zeitskalen (Abbildung 5.21(c)) zeigt sich eine weitere einhüllende Schwingung mit $T = 20(5) \text{ms}$ (Ablesefehler hier ein Viertel Skalenteil).

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,02 \text{ s}} = 50,0 \text{ Hz} \quad (5.12)$$

$$\delta f = \frac{\delta T}{T^2} = 12,5 \text{ Hz} \quad (5.13)$$

Die Schwingung hat also eine Frequenz von $f = (50,0 \pm 12,5) \text{ Hz}$, welche durch Erdschleifen, also durch induzierte Ströme von im Raum verteilten sich ändernden Magnetfeldern, zum Beispiel von elektrischen Geräten, ausgelöst wird.

5.4. Rauschen des Kristall-Avalanche-Photodioden-Vorverstärker-Systems

Das Kabel-Modul hat anscheinend eine viel höhere Empfindlichkeit gegenüber äußeren Einstreuungen als das Kapsel-Modul. Zudem beträgt die Rauschbreite des Kabelmoduls in allen gemessenen Einstellungen etwa das Zehnfache der Rauschbreite des Kapsel-Moduls und unterscheidet sich somit signifikant vom Kapsel-Modul (siehe Tabelle 5.7, Block 5 - 8).

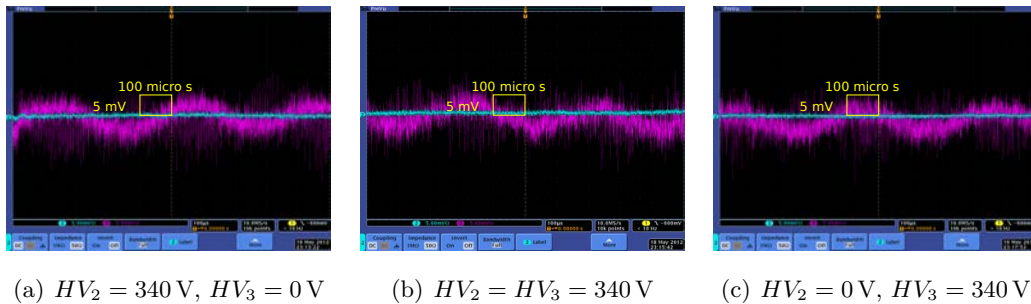


Abbildung 5.22.: Rauschen bei Versorgung von nur je einer APD mit Hochspannung im Vergleich zum Anlegen beider Hochspannungen bei Betrieb von beiden Vorverstärkern mit $\pm 6\text{ V}$ und Erdung des Netzgerätes über die Aluminiumkiste bei $(-19 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Abbildung 5.22 zeigt keine sichtbaren Unterschiede im Signal, wenn nur HV_2 oder HV_3 anliegt oder beide Avalanche-Photodioden gleichzeitig mit Hochspannung versorgt werden. Die Histogramme (Abbildungen 5.19, 5.20, 5.23 und 5.24) und die durch den Gaußfit ermittelten Standardabweichungen zeigen jedoch sowohl fürs Kabel- als auch fürs Kapsel-Modul leicht signifikante Rauschbreitenfluktuationen $\Delta\sigma$ bei Änderung der Hochspannungsverteilung (siehe Tabelle 5.7, erster und zweiter Block). Der Unterschied in der Rauschbreite zwischen keiner angelegten Hochspannung $HV_2 = 0(1)\text{ V}$ (Abbildung 5.25(a)) zu angelegter Hochspannung $HV_2 = 340(1)\text{ V}$ (Abbildung 5.23(b)) an der Avalanche-Photodiode des Kapsel-Moduls ist minimal signifikant (Tabelle 5.7, Block 9), das Rauschen wird etwas schmaler bei angeschalteter Hochspannung. Beim Signal des Kabel-Moduls ist der Unterschied zwischen an- oder ausgeschalteter HV_3 nicht signifikant (Abbildungen 5.25(b) und 5.24(a) und Tabelle 5.7, Block 10).

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass die Fluktuationen durch unterschiedliche Hochspannungsversorgungskonstellationen nur unwesentlich zur Rauschpegelveränderung beitragen. Die wichtigsten Einflüsse auf eine Rauschreduzierung haben der lichtdichte Betrieb des Prototypen in der Aluminium-Kiste und die gleichzeitige Erdung der Betriebsspannungsgeräts an der Aluminium-Kiste. Außerdem ist das Signal-

5. Messungen und Ergebnisse

#	Erdung	Hochspannung [V]	$\sigma[\mu\text{V}]$	$\delta\sigma[\mu\text{V}]$	$\Delta\sigma[\mu\text{V}]$	$\delta\Delta\sigma[\mu\text{V}]$	$3\delta\Delta\sigma[\mu\text{V}]$
2	mit	$HV_2 = 340(1)$	316,8	4,7	22,5	5,2	15,7
		$HV_2 = HV_3 = 340(1)$	339,3	2,3			
		$HV_3 = 340(1)$	272,3	3,9	67,0	4,5	13,6
		$HV_2 = 340(1)$	316,8	4,7	44,5	6,1	18,3
3	mit	$HV_2 = 340(1)$	2674,0	20,0	30,0	29,0	87,0
		$HV_2 = HV_3 = 340(1)$	2704,0	21,0			
		$HV_3 = 340(1)$	2457,0	18,0	247,0	27,7	83,0
		$HV_2 = 340(1)$	2674,0	20,0	217,0	26,9	80,7
2	mit	$HV_2 = HV_3 = 340(1)$	339,3	2,3	137,3	4,9	14,6
	ohne		476,6	4,3			
3	mit	$HV_2 = HV_3 = 340(1)$	2704,0	21,0	2492,0	54,2	162,7
	ohne		5196,0	50,0			
2	mit	$HV_2 = 340(1)$	316,8	4,7	2357,2	20,5	61,6
3			2674,0	20,0			
2	mit	$HV_3 = 340(1)$	272,3	3,9	2184,7	18,4	55,3
3			2457,0	18,0			
2	mit	$HV_2 = HV_3 = 340(1)$	339,3	2,3	2364,7	21,1	63,4
3			2704,0	21,0			
2	ohne	$HV_2 = HV_3 = 340(1)$	476,6	4,3	4719,4	50,2	150,6
3			5196,0	50,0			
2	mit	$HV_2 = HV_3 = 0(1)$	349,2	2,4	32,4	5,3	15,8
		$HV_2 = 340(1)$	316,8	4,7			
3	mit	$HV_2 = HV_3 = 0(1)$	2390,0	20,0	67,0	26,9	80,7
		$HV_3 = 340(1)$	2457,0	18,0			

Tabelle 5.7.: Vergleich der Standardabweichungen verschiedener Aufbauten mit und ohne Erdung bei $-19(1)^\circ\text{C}$ im Detektorvolumen des „SuperProto8“ (#2 =Kapsel-Modul, #3 =Kabel-Modul).

5.4. Rauschen des Kristall-Avalanche-Photodiode-Vorverstärker-Systems

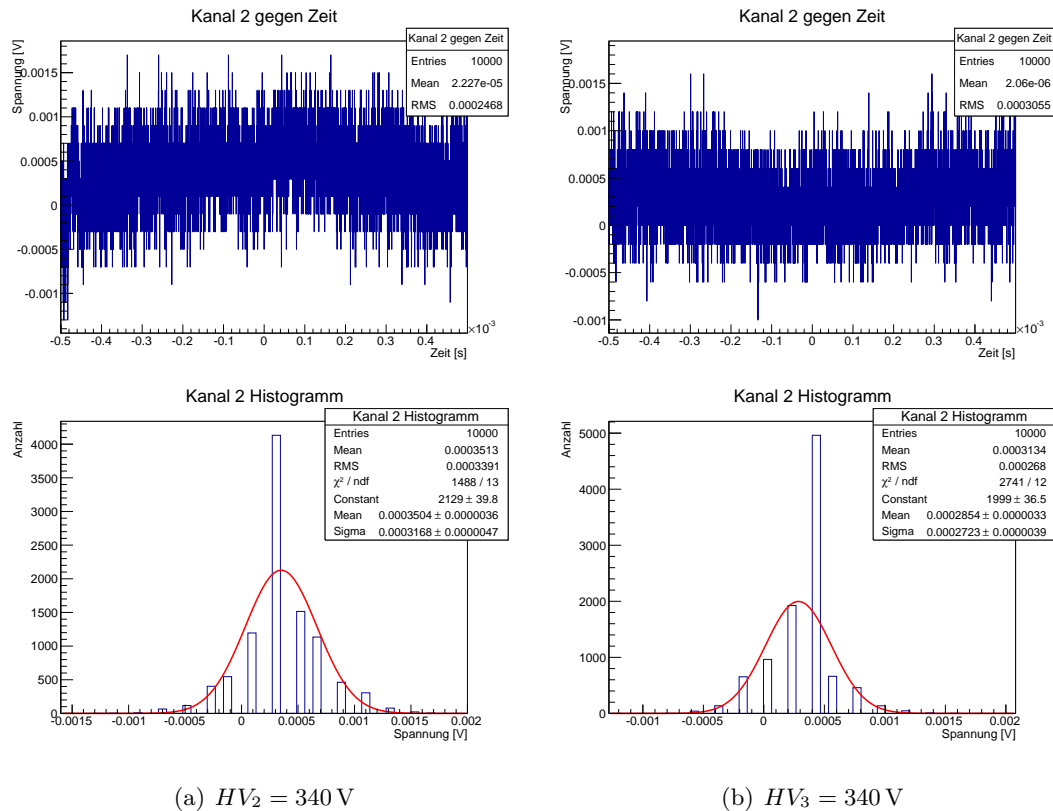


Abbildung 5.23.: Aufnahme des Rauschsignals und Histogramm für das Kapsel-Modul (Kanal 2) bei heruntergekühlten Messaufbau mit Erdung, Betrieb beider Vorverstärker und wechselnder Hochspannung $HV_2 = 340\text{ V}$ oder $HV_3 = 340\text{ V}$. Die Fehlanpassung des Binnings auf den Wertebereich des Oszilloskops wurde erst unmittelbar vor Abgabe der Arbeit bemerkt. Durch diese Fehlanpassung werden die quantitativen Aussagen dieses Kapitels allerdings nicht verfälscht.

Untergrund-Verhältnis bei heruntergekühltem Aufbau wesentlich besser als bei Raumtemperatur, da das Rauschen bei niedrigen Betriebstemperaturen reduziert wird und gleichzeitig die erwartete Pulshöhe durch ein kosmisches Myon steigt.

Bei horizontaler Lage der Kristalle wie im „SuperProto8“ und -25°C Kristalltemperatur werden Pulshöhen durch kosmische Myonen von etwa $6(11)\text{mV}$ erwartet. Die äquivalenten Rausch-Energien, die der von einem Myon deponierten Energie entsprechen, die den gleichen Spannungspuls auslöst wie die Rauschbreite, wurden in Tabelle 5.8 zusammengefasst. Es wird deutlich, dass das Kabel-Modul eine Rauschbreite vorweist, die ungefähr das Zehnfache der Rauschbreite des Kapsel-Moduls beträgt. Diese

5. Messungen und Ergebnisse

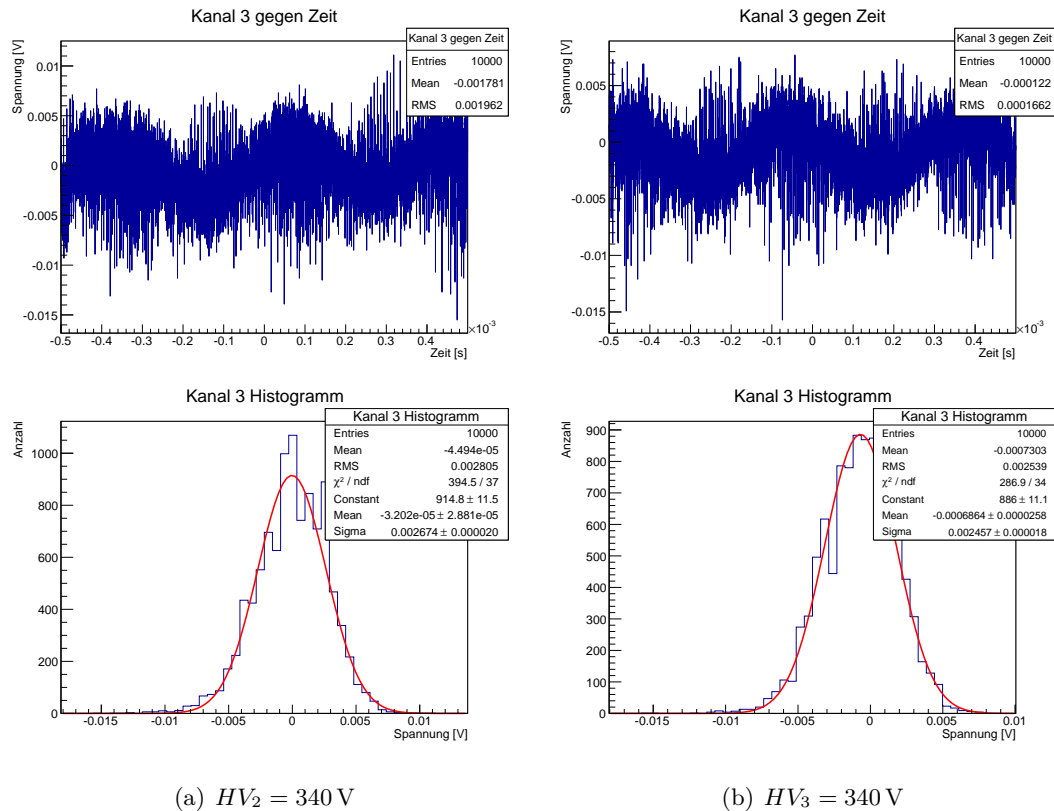


Abbildung 5.24.: Aufnahme des Rauschsignals und Histogramm für das Kabel-Modul (Kanal 3) bei heruntergekühlten Messaufbau mit Erdung, Betrieb beider Vorverstärker und wechselnder Hochspannung $HV_2 = 340(1)\text{ V}$ oder $HV_3 = 340(1)\text{ V}$. Die Fehlanpassung des Binnings auf den Wertebereich des Oszilloskops wurde erst unmittelbar vor Abgabe der Arbeit bemerkt. Durch diese Fehlanpassung werden die quantitativen Aussagen dieses Kapitels allerdings nicht verfälscht.

Rauschbreite entspricht Energien, die ein Myon nur deponieren kann, wenn es 5-6 cm des Kristalls durchfliegt ($dE/dx_{MIP} = 10,1 \frac{\text{MeV}}{\text{cm}}$ für Myonen in Bleiwolframat, siehe Tabelle 3.1). Um ein deutlich vom Rauschen abgehobenes Myon-Signal zu erhalten, müsste das Myon sehr schräg einfallen, was unwahrscheinlich ist. Senkrecht einfallende Myonen mit einer erwarteten Pulshöhe von 6(11)mV können im Rauschen des Kabel-Moduls untergehen. Die Rauschbreiten des Kapsel-Moduls dagegen sind so niedrig, dass selbst das Signal eines Myons, das den Kristall nur streift und damit minimale Energie deponiert, zu sehen sein sollte. Zudem haben die Messungen gezeigt, dass das Kabel-Modul viel empfindlicher auf Einstreuungen reagiert als das Kapsel-Modul. Al-

5.4. Rauschen des Kristall-Avalanche-Photodioden-Vorverstärker-Systems

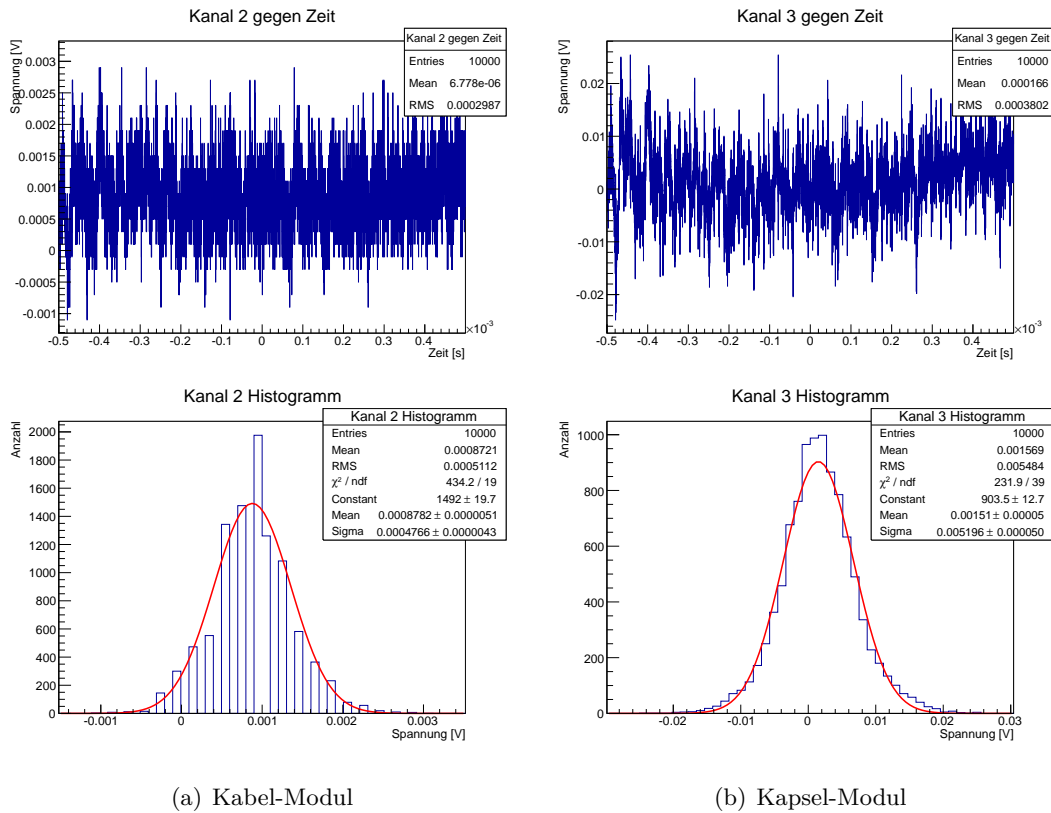


Abbildung 5.25.: Aufnahme des Rauschsignals und Histogramm für das Kapsel- und das Kabel-Modul bei heruntergekühlten Messaufbau mit Erdung, Betrieb beider Vorverstärker und $HV_2 = HV_3 = 0(1)$ V. Die Fehlanpassung des Binnings auf den Wertebereich des Oszilloskops wurde erst unmittelbar vor Abgabe der Arbeit bemerkt. Durch diese Fehlanpassung werden die quantitativen Aussagen dieses Kapitels allerdings nicht verfälscht.

so sollte für zukünftige Aufbauten die „Kapsel-Lösung“ im Hinblick auf das Rauschen als erste Wahl gelten.

5. Messungen und Ergebnisse

#	Erdung	Hochspannung [V]	$\sigma[\mu\text{V}]$	$\delta\sigma[\mu\text{V}]$	$E [\text{MeV}]$	$\delta E [\text{MeV}]$
2	mit	$HV_2 = HV_3 = 0(1)$	349,2	2,4	7,94	0,05
	mit	$HV_2 = 340(1)$	316,8	4,7	7,20	0,11
	mit	$HV_3 = 340(1)$	272,3	3,9	6,19	0,09
	mit	$HV_2 = HV_3 = 340(1)$	339,3	2,3	7,71	0,05
	ohne	$HV_2 = HV_3 = 340(1)$	476,6	2,3	10,83	0,05
3	mit	$HV_2 = HV_3 = 0(1)$	2390,0	20,0	54,32	0,45
	mit	$HV_2 = 340(1)$	2674,0	20,0	60,77	0,45
	mit	$HV_3 = 340(1)$	2457,0	18,0	55,84	0,41
	mit	$HV_2 = HV_3 = 340(1)$	2704,0	21,0	61,45	0,48
	ohne	$HV_2 = HV_3 = 340(1)$	5196,0	50,0	118,09	1,14

Tabelle 5.8.: Zusammenfassung der Standardabweichungen σ der Gaußfits an die Rausch-Histogramme als Wert für die Rauschbreite und entsprechende äquivalente im Kristall von einem kosmischen Myon deponierte Energie E bei heruntergekühltem „SuperProto8“ Aufbau.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde am Aufbau eines Prototypen für die Rückwärtsendkappe des elektromagnetischen Kalorimeters des PANDA-Experiments gearbeitet. Der entwickelte Prototypen-Aufbau „SuperProto8“ besteht aus einem isolierten Detektorvolumen in einer Aluminiumbox, in der sich acht Kristalle, zwei davon bereits mit jeweils zwei aufgeklebten Avalanche-Photodioden, in einer hier entwickelten Kristall-Innenbox sowie die Vorverstärker für die Avalanche-Photodioden befanden. Kühlschläuche aus Polyethylen führen direkt ins Innere und um die Innenbox herum. Die funktionalen Komponenten wie die Betriebsspannungsversorgung für die Vorverstärker, Hochspannungskanäle für die Avalanche-Photodioden und ein Kühlapparat befinden sich außerhalb des kalten Detektorvolumens.

Durch Betrieb eines externen Kühlapparats mit reinem Ethanol als Kühlflüssigkeit kann der Aufbau innerhalb von etwa 14 Stunden bis auf eine Temperatur von $-21(1)^{\circ}\text{C}$ im Detektorvolumen abgekühlt werden. Bei Betrieb von zwei Vorverstärkern und Avalanche-Photodioden im Detektorvolumen zeigt sich eine signifikante Erwärmung der Vorverstärkerumgebung zwischen $+0,9(1)^{\circ}\text{C}$ und $+1,6(1)^{\circ}\text{C}$ und eine Erwärmung der den Vorverstärkern zugewandten Kristallseiten von $+0,3(1)^{\circ}\text{C}$.

Die Vorbereitung der Bleiwolframatkristalle für den Detektor besteht darin, an der Stirnseite der Kristalle zwei Avalanche-Photodioden mit Elastosil aufzukleben und die Kristalle mit Reflektorfolie zu umschließen. Um die APD während des Klebens in Position zu halten, wurde im Rahmen der Arbeit eine Plastikkapsel entworfen. Es wurde außerdem ein Form-Verfahren für die in PANDA verwendete Reflektorfolie DF2000MA von 3M entwickelt. Dieses sieht vor, zwei Folienteile in einer Stahlform mit zwei Stahl-Kristalldummys bei 100°C zwei Stunden in einem Ofen auszuheizen, wonach die Folie die Form der Kristalle angenommen hat.

Die Messung der Reflektivität der Reflektorfolie DF2000MA vor und nach dem Ausheizen der Folie zeigt eine minimal reduzierte Folienreflektivität nach dem Ausheizen, die sich aber nicht signifikant von der Reflektivität der unbehandelten Folie unterscheidet.

Zur Verbindung der Avalanche-Photodiode mit dem Vorverstärker wurden in

6. Zusammenfassung und Ausblick

dieser Arbeit zwei Möglichkeiten erprobt. Die „Kabel-Lösung“ bietet mit der Verbindung der APD durch 8 cm lange Twisted-Pair-Kabel mit den auf einer PVC-Platte aufgeschraubten und in einem U-Profil gehaltenen Vorverstärkern einen sehr flexiblen Aufbau. Eine stabile, aber schwierig zu montierende Alternative ist die „Kapsel-Lösung“, bei der zwei Vorverstärker in eine auf dem Kristall aufgeklebten Plastik kapsel geschraubt und direkt auf die APD-Pins gesteckt werden.

Eine Abschätzung der erwarteten Pulshöhe von einem durch Bleiwolframatkristall fliegenden kosmischen Myon ergibt 1(3)mV bis maximal 9(1)mV bei Raumtemperatur und 6(11)mV bis maximal 40(11)mV bei -25°C Kristalltemperatur, je nachdem, ob das Myon den Kristall senkrecht oder der Länge nach durchfliegt. Bei heruntergekühltem Aufbau in einer lichtdichten Aluminiumkiste, Erdung des Netzgeräts an der Aluminiumkiste und Betrieb von zwei Kristall-APD-Vorverstärker-Modulen zeigt sich die Rauschbreite des durch die Kapsel-Moduls nur bei $\sigma_{Kapsel} = 0,34(2)$ mV und damit kleinskalig genug, um in Zukunft kosmische Myonen zu messen. Das Kabel-Modul dagegen weist neben einer hohen Empfindlichkeit für äußere Einstreuungen eine etwa neunfache Breite von $\sigma_{Kabel} 2,70(2)$ mV vor und ist damit zur Messung kosmischer Myonen schlechter geeignet.

Im Hinblick auf zukünftige Arbeiten am Prototypenaufbau lässt sich feststellen, dass das Form-Verfahren der Reflektorfolie durch Ausheizen bei 100°C weiterhin genutzt werden kann, weil das Ausheizen der Reflektivität nicht wesentlich schadet. Jedoch ist das Verfahren für eine Massenproduktion von 592 Folien für die EMC-Rückwärtsendkappe zu kompliziert und sollte im Hinblick auf Effizienz weiterentwickelt werden.

Um ein einseitiges Erwärmen der Kristalle im Detektorbetrieb zu verhindern, muss an der thermischen Isolation zwischen Vorverstärkern und Kristallen gearbeitet und ein zuverlässiges Kühl- und Isolationssystem entwickelt werden, um den Aufbau homogen abzukühlen und bei konstanten -25°C im Inneren zu halten. Zur exakten Überwachung der Kristalltemperaturen können flache Temperatursensoren zwischen den Kristalle installiert werden. Eine bessere Kühlleistung könnte zum Beispiel durch direkten Kontakt von Kühlschleifen mit der Aluminiumhülle des Detektorvolumen erreicht werden. Um einen längeren Betrieb des Kalorimeter-Prototypen bei kalten Temperaturen zu ermöglichen, muss zudem eine Stickstoff-Spülung installiert werden, um feuchte Luft aus dem Detektorvolumen zu verdrängen und ein Auskondensieren auf den empfindlichen Vorverstärkern zu verhindern.

Eine Vergrößerung des Rauschpegels aufgrund von mehreren nebeneinander betrie-

benen Vorverstärkern wurde in dieser Arbeit bereits gemessen. Aufgrund fehlender Hochspannungsmodule konnten aber immer nur zwei APD gleichzeitig betrieben werden. In zukünftigen Aufbauten sollte das Rauschen beim gleichzeitigen Betrieb von acht funktionsfähige Kristall-APD-Vorverstärker-Module untersucht werden. Als Verbindung zwischen Avalanche-Photodioden und Vorverstärkern sollte aufgrund der niedrigen Rauschbreite die „Kapsel-Lösung“ mit einer direkten Verbindung des Vorverstärkers mit den APD-Pins für alle weiteren Aufbauten gewählt werden. Aber auch die „Kabel-Lösung“ kann verbessert werden, indem man zum Beispiel genauer untersucht, ob bei gleichzeitigem Betrieb vieler Vorverstärker die Verwendung von abgeschirmten Kabeln besser ist als die Benutzung von Twisted-Pair-Kabeln, und auch, ob die Abschirmung der Vorverstärker selbst das Rauschen reduziert.

Im Hinblick auf in Zukunft geplante Detektierung von kosmischen Myonen muss ein externer Trigger aus zwei ober- und unterhalb des Kalorimeters platzierten Plastikszintillatoren realisiert werden, um eine sinnvolle Signalaufnahme zu starten. Die Signalauslese soll zudem in Zukunft mit Hilfe eines schnellen ADC-Wandlers über ein VME-Bus-Moduls getätigt werden, was eine Datenaufnahme erleichtert und professionalisiert. Daran wurde bereits im Rahmen einer weiteren Bachelorarbeit gearbeitet [6].

Abschließend lässt sich sagen, dass im Rahmen dieser Arbeit viele erste Schritte für den Aufbau eines Prototypen für die Rückwärtsendkappe des elektromagnetischen Kalorimeters am PANDA-Experiment getan wurden. Im ersten Prototypen-Aufbau „SuperProto8“ konnten viele Aspekte mechanischer und elektronischer Art überprüft und verbessert werden. Diese Arbeit sollte damit als gute Basis für den weiteren Entwicklungs- und Aufbauprozess der Rückwärtsendkappe des elektromagnetischen Kalorimeters dienen.

A. Anhang

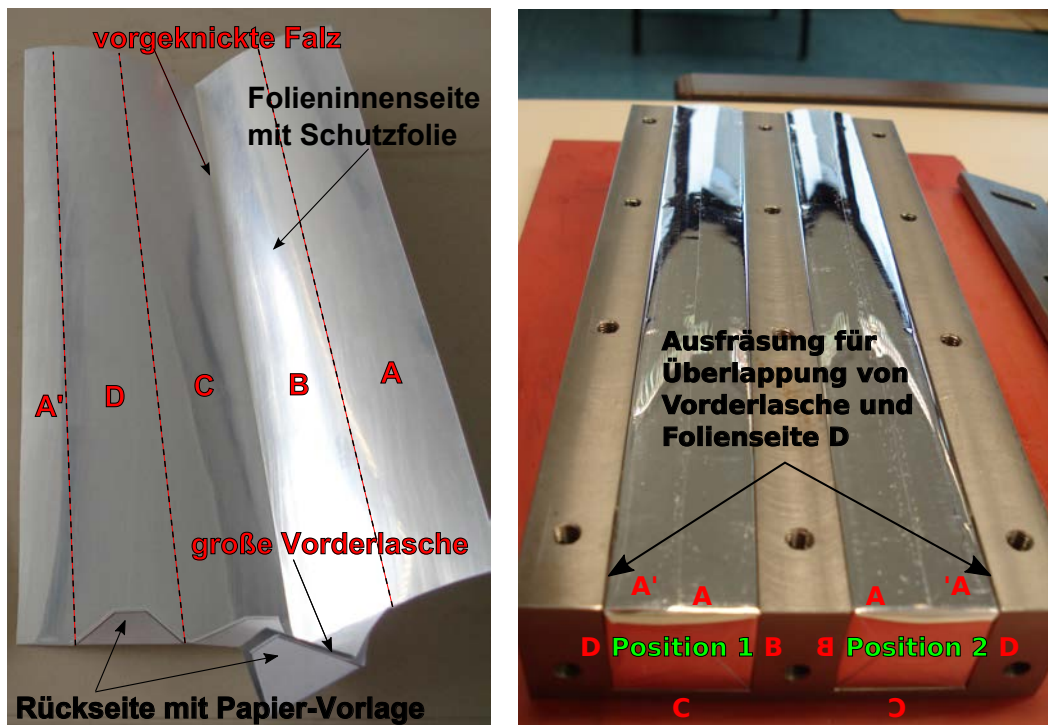
A.1. Anleitung für das Formen der Reflektorfolie DF2000MA von 3M

Die Folienschnittmuster Position 1 und Position 2 (siehe Abbildung A.2) werden ausgedruckt. Da die Reflexionsschicht der Folie DF2000MA von 3M nur auf einer Seite durch eine Schutzfolie geschützt ist, wird die andere Seite als Außenseite ausgewählt. Diese Außenseite sollte mit einer alten Schutzfolie (hier mit alten Abschnitten von vorangegangenen Folienversuchen) bedeckt werden, die an ihr haftet, sodass man mit handelsüblichem Klebestift die Papier-Vorlage auf sie kleben kann. Dabei sollte das Papier an allen Stellen mit Kleber bestrichen werden, um besseren Halt zu garantieren. Die Falz zwischen Folienteil B und C wird zunächst mit den Händen vorgeknickt, danach mit einem schweren, geraden Teil (z.B. dem Mitteldeckel des Folien-Formungsteils) geradegestrichen. Ebenso werden die vorderen Seitenlaschen gefaltet. Danach sollte die Folie für Position 1 aussehen wie in Abbildung A.1(a), die Folie für Position zwei entsprechend spiegelverkehrt. Jetzt wird die Papiervorlage mit der angeklebten Schutzfolie abgezogen. Der Stahldummy wird nun an der langen Falz und den Vorderlaschen entlang ausgerichtet und die große Vorderlasche über den Dummy und unter Seite D eingeklappt. Die Stahlform hat vorne links und vorne rechts außen eine leichte Einfräsung für die große Vorderlasche, die mit der Folienseite D überlappt. Die Folie wird nun mit dem Dummy und Folienseite C nach unten vorsichtig in die Stahlform eingedrückt. Die Seitenflächen sollten dabei so parallel wie möglich sein, um Knicke oder Beschädigungen in der Folie zu verhindern. Die Folienseiten in Position 1 und 2 müssen dann angeordnet sein wie in Abbildung A.1(b), wo man die Folien bereits geformt nach dem Ausheizen sieht.

Der Mitteldeckel wird zuerst aufgeschraubt und dabei Folienteil A straff fixiert. Danach werden die äußeren Deckel aufgeschraubt und dabei Seite A' über Seite A geschoben. Die Vorderseiten werden mit dem Stopper fixiert.

Der Ofen (Vakuumwerkstatt des Instituts für Kernphysik Mainz) braucht etwa 2 Stunden, um auf 100°C aufzuheizen. Hat er eine konstante Temperatur erreicht, wird die

A. Anhang



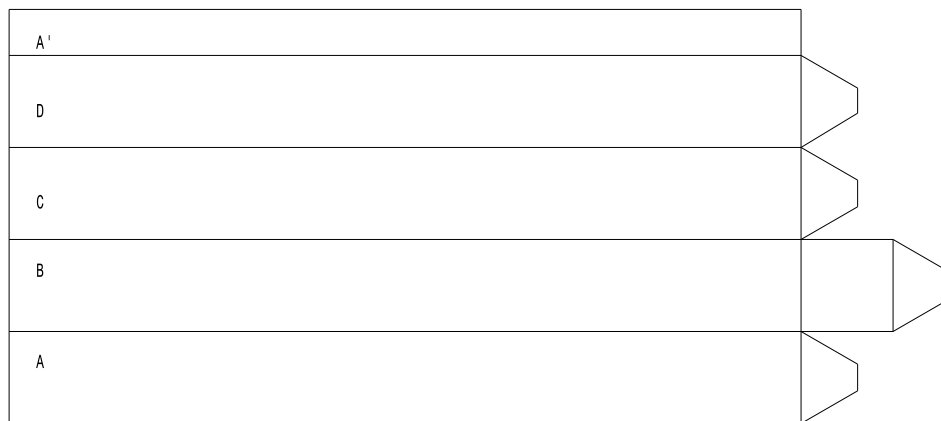
(a) Folie vor dem Einbringen in Position 1 der Stahlform. Folie für Position 2 ist entsprechend spiegelverkehrt.

(b) Stahldummys mit Folie in Position 1 und 2 nach dem Ausheizen in der Stahlform. Die entsprechenden Folien-Seitenflächen sind eingezeichnet

Abbildung A.1.: Form-Verfahren für die Reflektorfolie DF2000MA von 3M

Form in den Ofen gestellt und nach 2 Stunden Ausheizen wieder herausgenommen. Nach 1 - 2 Stunden Abkühlzeit an der Luft können die Dummys mit der Folie aus der Stahlform herausgenommen werden.

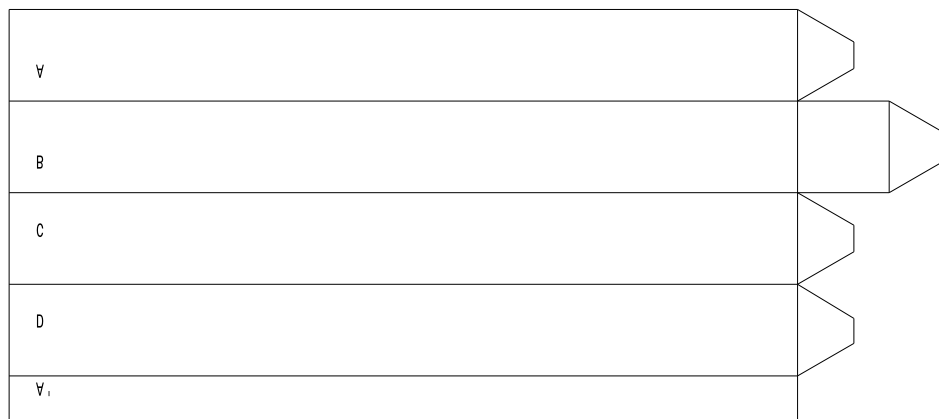
A.1. Anleitung für das Formen der Reflektorfolie DF2000MA von 3M



Front view

(a) Position 1

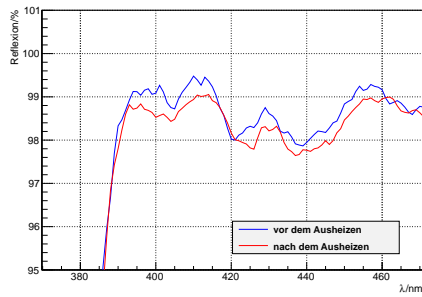
ΕΛΟΥΦ ΑΓΕΜ



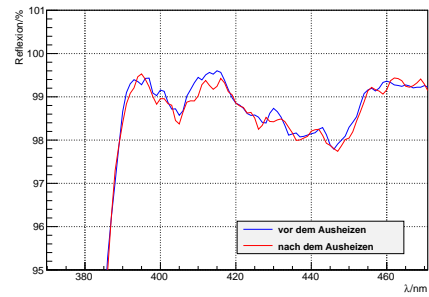
(b) Position 2

Abbildung A.2.: Folienschnittmuster für Kristalldummy-Position 1 und 2 in der für das Form-Verfahren gefertigten Stahlform (im Maßstab 2:1)

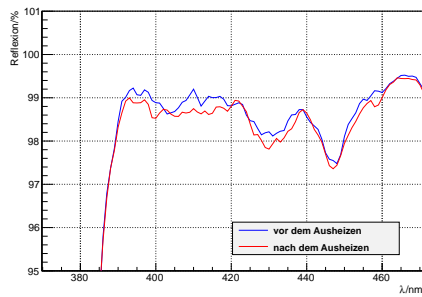
A.2. Reflektivität der Reflektorfolie DF2000MA von 3M



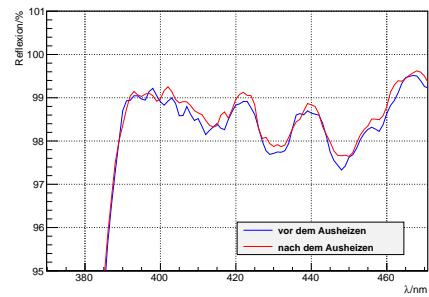
(a) Abschnitt 2



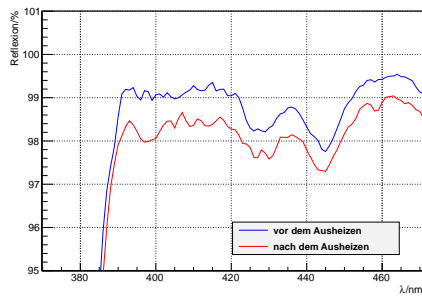
(b) Abschnitt 3



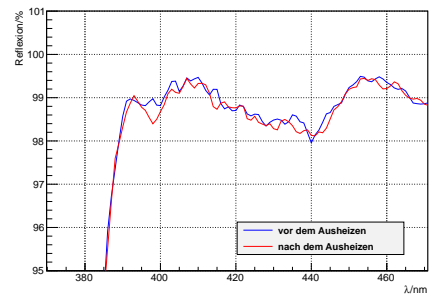
(c) Abschnitt 4



(d) Abschnitt 5

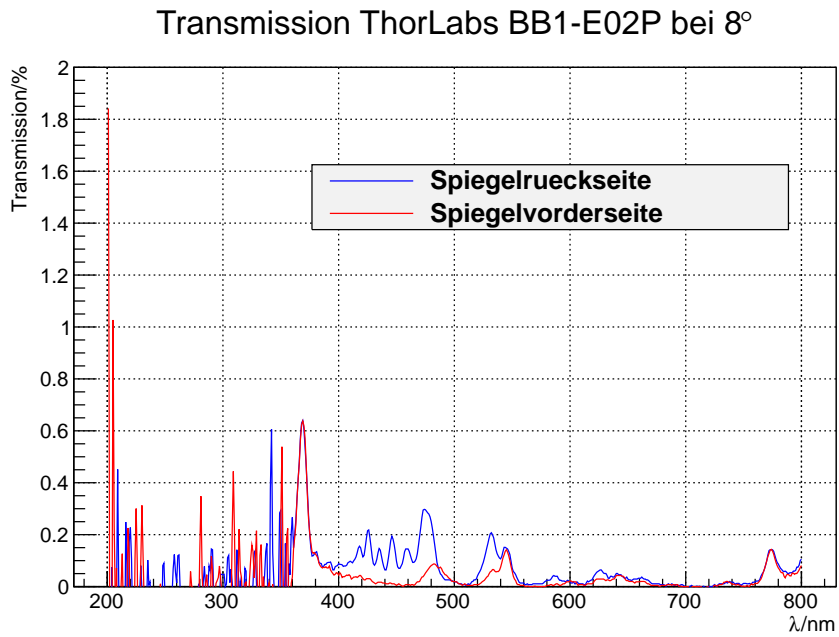


(e) Abschnitt 6

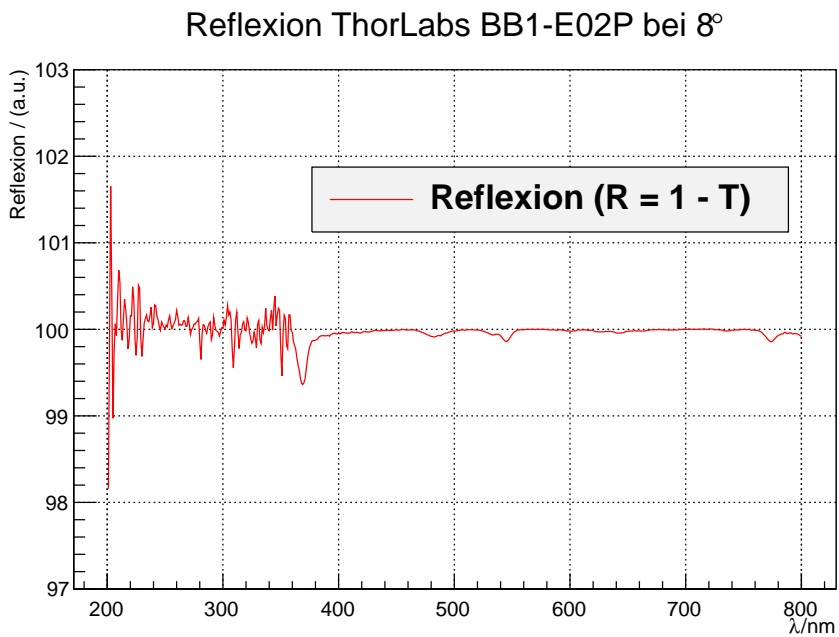


(f) Abschnitt 7

Abbildung A.3.: Auf die Reflexion des Spiegels Thorlabs BB1-E02P2 korrigierten Reflexion der Reflektorfolie DF2000MA von 3M bei 8° , Abschnitt 1, über den Bleiwolframat-Szintillationsspektrum-Bereich (420 ± 50) nm vor und nach dem Ausheiz-Vorgang.



(a) Transmission



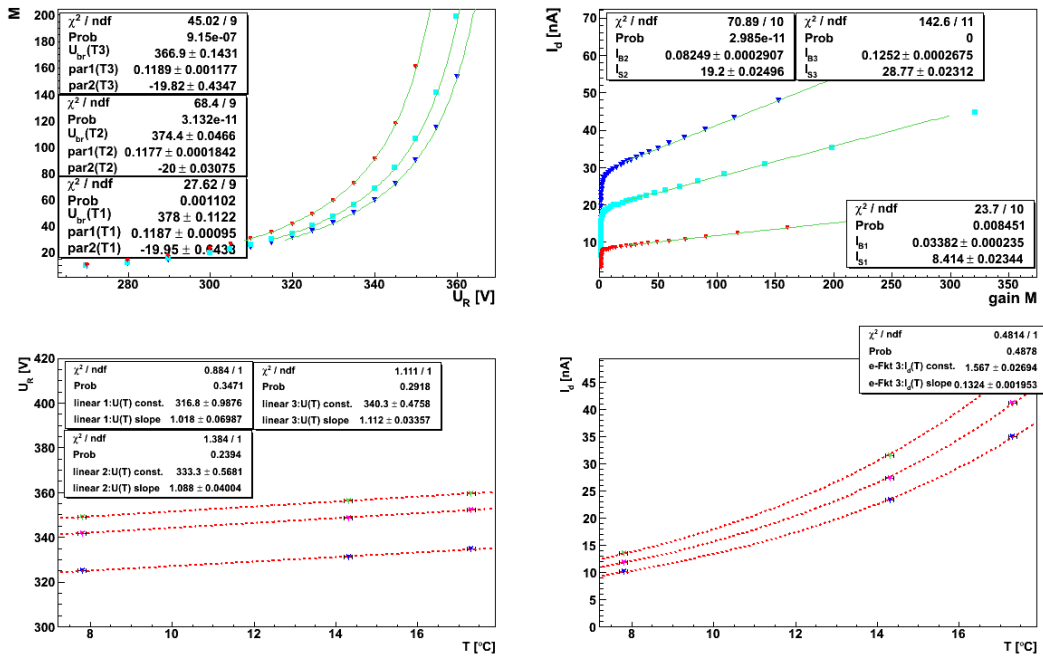
(b) Reflexion

Abbildung A.4.: gemessene Transmission und berechnete Reflexion des Referenz-Spiegels Thorlabs BB1-E02P2 für die Reflexionsmessungen der Reflektorfolie DF2000MA von 3M.

A.3. Kennlinien der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Avalanche-Photodioden

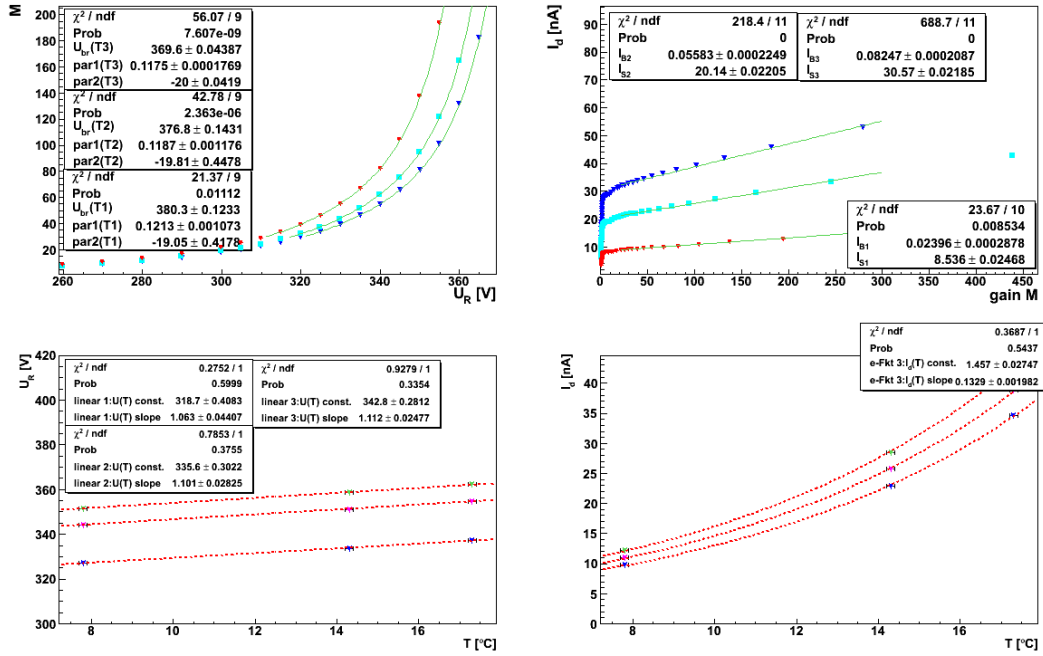
Alle Kennlinien der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten SiAPD von Hamamatsu wurden erstellt und freundlicherweise zur Verfügung gestellt von Andrea Wilms, GSI [9]. Die Kennlinien der vierten hier verwendeten APD ist bereits in Abbildung 3.3 dargestellt.

Abbildung A.5.: Kennlinien der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Avalanche-Photodioden. Links oben: Verstärkungsfaktor M in Abh. von angelegter Sperrspannung für drei Temperaturen ($T_{rot} = 17,3^\circ\text{C}$, $T_{tuerkis} = 14,3^\circ\text{C}$, $T_{blau} = 7,8^\circ\text{C}$) mit Durchbruchspannungen U_{br} als Fit-Parameter. Rechts oben: Dunkelstrom I_d in Abh. vom Verstärkungsfaktor M für die selben Temperaturen. Unten: Sperrspannung U_R und Dunkelstrom I_d in Abh. von der Betriebstemperatur T für $M_{gruen} = 150$, $M_{rosa} = 100$, $M_{blau} = 50$.

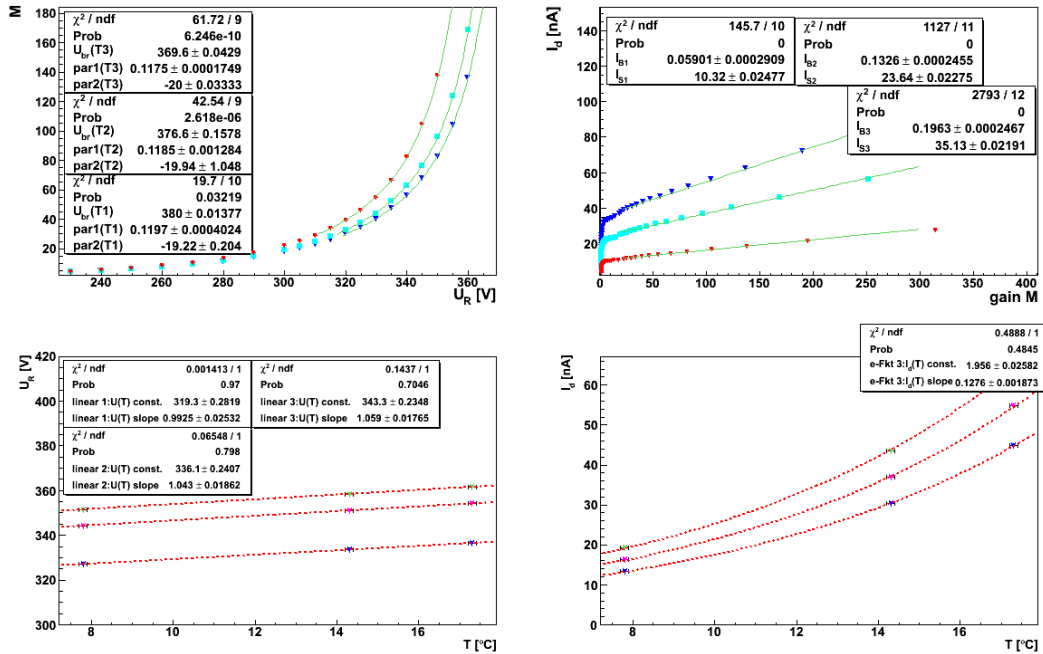


(a) Kennlinien der Hamamatsu Si-APD mit der PANDA-internen Seriennummer 293

A.3. Kennlinien der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Avalanche-Photodioden



(b) Kennlinien der Hamamatsu Si-APD mit der PANDA-internen Seriennummer 272



(c) Kennlinien der Hamamatsu Si-APD mit der PANDA-internen Seriennummer 198

A.4. Temperaturstudien im Prototypen

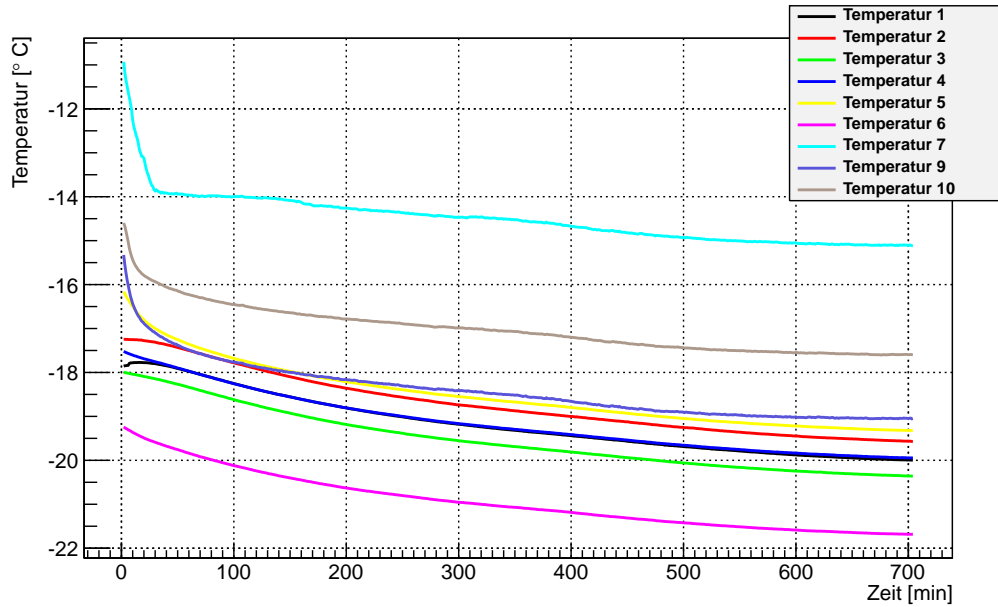


Abbildung A.6.: Temperaturverlauf des heruntergekühlten „SuperProto8“-Aufbaus nach zusätzlichem Isolieren aller Kühlschläuche und Auffüllen der lichtdichten Kiste mit Isolationsmaterial. 1 - 6 befanden sich in der Aluminiumbox, 7, 9 und 10 an Kühlschläuchen.

Literaturverzeichnis

- [1] PANDA Collaboration: Technical Progress Report for: PANDA Experiment, http://www-panda.gsi.de/archive/public/panda_tpr.pdf (2005)
- [2] PANDA Collaboration: Technical Design Report for PANDA Electromagnetic Calorimeter (EMC), [arXiv:0810.1216v1](https://arxiv.org/abs/0810.1216v1) [[physics.ins-det](https://arxiv.org/archive/physics)] (2008)
- [3] PANDA Collaboration: Physics Performance Report for PANDA: Strong Interaction Studies with Antiprotons, [arXiv:0903.3905v1](https://arxiv.org/abs/0903.3905v1) [[hep-ex](https://arxiv.org/archive/hep)] (2009)
- [4] K. Nakamura *et al.* (*Particle Data Group*), *J. Phys. G* **37**, 075021 (2010)
- [5] M. Kavatsyuk, D. Bremer, V. Dormenev, P. Drexler, T. Eissner, W. Erni, E. Guliyev, T. Hennino, B. Krusche, B. Lewandowski, H. Löhner, M. Moritz, R.W. Novotny, K. Peters, J. Pouthas, P. Rosier, M. Steinacher, G. Tambave, A. Wilms: Performance of the prototype of the electromagnetic calorimeter for PANDA, *Nucl. Instrum. Meth. A* **648** 77-91 (2011)
- [6] P. Lautz: Vorarbeiten zur Entwicklung eines Datenaufnahmealgorithmus' für einen Prototypen der Rückwärtsendkappe des PANDA-Experiments, Bachelorarbeit, Mainz (2012)
- [7] J. Schulze: Prototypenentwicklung für das elektromagnetische Kalorimeter des PANDA-Experiments, Diplomarbeit, Bochum (2009)
- [8] D. Rodriguez Pineiro, J. Ceballos Velasco, R. Valente, GSI: private Kommunikation (2012)
- [9] A. Wilms, GSI: private Kommunikation (2012)
- [10] www.fair-center.de
- [11] Universität Basel: Technical Design Report for: Discrete Preamplifier for APD Readout, LNP-Preamplifier Version SP 883A02, Version 2.8, (2008)
- [12] Hamamatsu Photonics K.K.: Technical Information SD-28: Characteristics and use of Si APD (Avalanche-Photodiode) (2004), http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/Characteristics_and_use_of_SI_APD.pdf

Literaturverzeichnis

- [13] Hamamatsu Photonics K.K.: Photodiode Technical Information,
[http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/photodiode_
technical_information.pdf](http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/photodiode_technical_information.pdf)
- [14] Hamamatsu Photonics K.K.: Si APD S8664 Series, Short Wavelength Type APD (2005), [http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_S/S8664_
series.pdf](http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_S/S8664_series.pdf)
- [15] Thorlabs: Ø1 Inch Backside Polished Mirrors PF10-03-P01P, Katalog S. 781 (2012),
<http://www.thorlabs.com/thorProduct.cfm?partNumber=BB1-E02P>
- [16] 3M: Product Bulletin Daylighting Film DF2000MA, Release B (2007),
[multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=
bbbbbdE37nQCWg1DZH148HqRPFE0PnE36FcbPFcbPbbbbbb--](http://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=bbbbbdE37nQCWg1DZH148HqRPFE0PnE36FcbPFcbPbbbbbb--)
- [17] Fryka-Kältetechnik GmbH: Fryka-Therm Universalthermostat FT400/FT800 Datenblatt, Esslingen am Neckar

Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Frank Maas für die sehr gute Betreuung und Unterstützung während meiner Arbeit, die vielen hilfreichen Anmerkungen und die Geduld mit meinen vielen Fragen bedanken.

Außerdem danke ich Herrn Dr. Yue Ma für die kompetente und interessante Einarbeitung und Pascal Lautz als Kommilitonen und Freund für die gute und unterhaltsame Zusammenarbeit und Hilfe während des Aufbaus des Prototypen und während unserer gemeinsamen Studienzeit. Ein großes Dankeschön an David Rodriguez Pineiro, Jorge Ceballos Velasco und Roserio Valente, mit deren Ingenieurwissen wir gemeinsam den Prototypen aufbauen konnten und mit denen die Arbeit immer Spaß gemacht hat.

Ich danke allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Kernphysik Mainz und des Helmholtz Instituts Mainz, die mir in irgendeiner Art und Weise während dieser Arbeit geholfen haben, besonders der Elektronikwerkstatt für die Vorbereitung der Vorverstärker-Kabel, der Mechanikwerkstatt und Herrn Luzius für die schnellen Anfertigungen der vielen Stahl- und Aluminiumteile, der Vakuumwerkstatt für Kühler und Vakuumofen, und der Beschleunigerwerkstatt und Herrn Maul für alles, was man bei einem Prototypenaufbau sonst noch so brauchen kann - auch noch freitags kurz vor Feierabend.

Schließlich danke ich der ganzen AG Maas für jegliche Hilfe, interessante Gespräche und Gruppenseminare und eine gute Arbeitsatmosphäre, insbesondere Roberto Francisco Pérez Benito, Keith Griffioen und Bertalan Feher für die unterhaltsame Büroatmosphäre, Boris Gläser für diverse Materialbeschaffungen und das Elastosil, Sebastian Baumack für die Hilfe mit root, Yoshio Imai für die große Unterstützung bei den Reflektivitätsmessungen, und Sabine Klotter und den Mitarbeiterinnen im HIM-Sekretariat für die nette Hilfe bei allerlei Papierkram.

Zuletzt gilt mein ganz besonders Dank meiner Mutter, die mir das Studium überhaupt erst ermöglicht und mich auf meinem Weg immer ermutigt hat, meinen Freunden und Mitbewohnern Tineke und Martin für die tollen letzten Jahre, egal ob zusammen im Hörsaal oder zusammen zuhause, und Jonas für seinen Rückhalt und seine fast unendliche Geduld während meines Studiums und dieser Arbeit.