



Helmholtz-Institut Mainz

JOHANNES GUTENBERG-UNIVERSITÄT MAINZ

BACHELORARBEIT

**Optimierung und
Vorkalibrierung des $\overline{\text{PANDA}}$ -
Rückwärtskalorimeter-Prototyps
für eine Teststrahlzeit am
Mainzer Mikrotron**

Autor:
Sahra Alrune WOLFF

Betreuer:
Prof. Dr. Frank MAAS

6. Juni 2016

Erklärung

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

Mainz, 06.06.2016

Ort, Datum

Sahra Alrune Wolf

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	\bar{P} ANDA an FAIR	1
1.2	Der \bar{P} ANDA Detektor	2
1.3	Das Elektromagnetische Kalorimeter	3
1.3.1	Die Rückwärtige Endkappe	5
2	Der Prototyp Proto16	7
2.1	Der mechanische Aufbau	7
2.1.1	Kristall, APD und Vorverstärker	7
2.1.2	Zusammensetzen der Kristalle in der 4×4 Alveole	9
2.1.3	Die Endmontage des Prototyps	10
2.1.4	Kühlung und Isolierung	11
2.2	Front-End-Elektronik	12
2.3	Slow Control	13
3	Neuerungen an Proto16	15
3.1	Anbringung der APD an den Kristallen	15
3.2	Planung und Konstruktion einer Abschirmung für die Sender Platinen	17
4	Temperaturmessung im Prototyp	23
4.1	Kalibration der Temperatursensoren	23
4.2	Temperaturmessungen mit dem Proto 16	27
4.2.1	Positionierung der Sensoren	27
4.2.2	Kühlungs- und Aufwärmvorgang	29
4.2.3	Räumliche Temperaturverteilung in Proto16	31
5	Charakterisierung der Avalanche Photodioden	35
5.1	Funktionsweise der Avalanche Photodiode	36
5.2	Bestimmung der APD-Kennlinien	37
5.2.1	Datennahme	37

5.2.2	Bestimmung der Kennlinie mit den voranalysierten Daten	39
6	Fazit	45
	Anhang	49

Kapitel 1

Einleitung

Die vorliegende Bachelorarbeit beschäftigt sich mit dem elektromagnetischen Kalorimeter (EMC) des $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ Detektors an dem Antiprotonen Speicherring HSER an FAIR. Für das rückwärtige EMC existiert zu Testzwecken ein Prototyp, der Proto16 genannt wird. Eben diesen gilt es für eine Teststrahlzeit an MAMI (MAInzer MIkrotron) vorzubereiten.

In diesem Kapitel wird kurz auf das Experiment $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ und insbesondere auf die Rückwärtige Endkappe des EMC eingegangen. Die Informationen hierzu stammen von der $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Website [PAN16] und von dem Technischen Design Report für das EMC [Col08]

1.1 $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ an FAIR

$\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ steht für „antiProton ANnihilation at DARMstadt“ und ist eines der großen Experimente an der zukünftigen Beschleunigeranlage FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research). Das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment beschäftigt sich mit der Erforschung der starken Wechselwirkung. Hierbei wird unter anderem die Struktur von Nukleonen untersucht, Charmonium-Spektroskopie ($c\bar{c}$) betrieben, oder auch exotische Zustände wie Glueballs und Hybride untersucht.

Um dies zu ermöglichen wird Antimaterie in Form von Antiprotonen an dem Speicherring HSER (Hochenergie Speicherring) mit einem Impuls von bis zu $15 \frac{\text{GeV}}{c}$ bereitgestellt. Die beschleunigten Antiprotonen werden auf ein Wasserstofftarget geschossen. Bei der Annihilation werden Schwerpunktsenergien bis zu 5,6 GeV frei. Diese Energie ermöglicht die Erzeugung einer Vielzahl von möglichen physikalischen Zuständen. Durch die Messung der Energie, der Impulse und der Teilchenart der Zerfallsteilchen können dann die Eigenschaften der starken Wechselwirkung untersucht werden.

1.2 Der $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ Detektor

Der $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ Detektor ist in ein Vorwärts- und ein Targetspektrometer unterteilt. Diese zwei Komponenten werden voneinander unterschieden, da in Vorwärtsrichtung größere Impulse und Energien auftreten und diese gesondert vermessen werden.

Das Vorwärtsspektrometer befindet sich in Strahlrichtung und enthält viele verschiedene Detektorsysteme, um Energie, Impuls als auch Teilchenart präzise zu bestimmen. Das Vorwärtsspektrometer detektiert Teilchen, die in einem Winkel von 0° bis 22° zur Strahlachse emittiert werden. Das wichtigste Bauteil ist hier das magnetische Spektrometer. Mit Hilfe eines Dipol-Magneten, in der Mitte des Vorwärtsspektrometers, mit einer Beugungskraft von 2 Tm , sollen Impulse von geladenen Teilchen gemessen werden. Hierbei wird eine Impulsauflösung von $\leq 1\%$ angestrebt. Zur Flugzeitmessung werden vor und hinter dem Dipol-Magnet Wände aus Plastik-Szintillatoren aufgestellt. Dies ist der sogenannte Time of Flight (TOF) Detektor, siehe Abbildung 1.1. Dieser dient zusammen mit dem Cherenkov Detektor zur Identifikation der Teilchenart. Den Abschluss bildet das Hadronische Kalorimeter, auch Schaschlik-Kalorimeter genannt, das abwechselnd aus Plastik-Szintillator- und Blei-Schichten besteht.

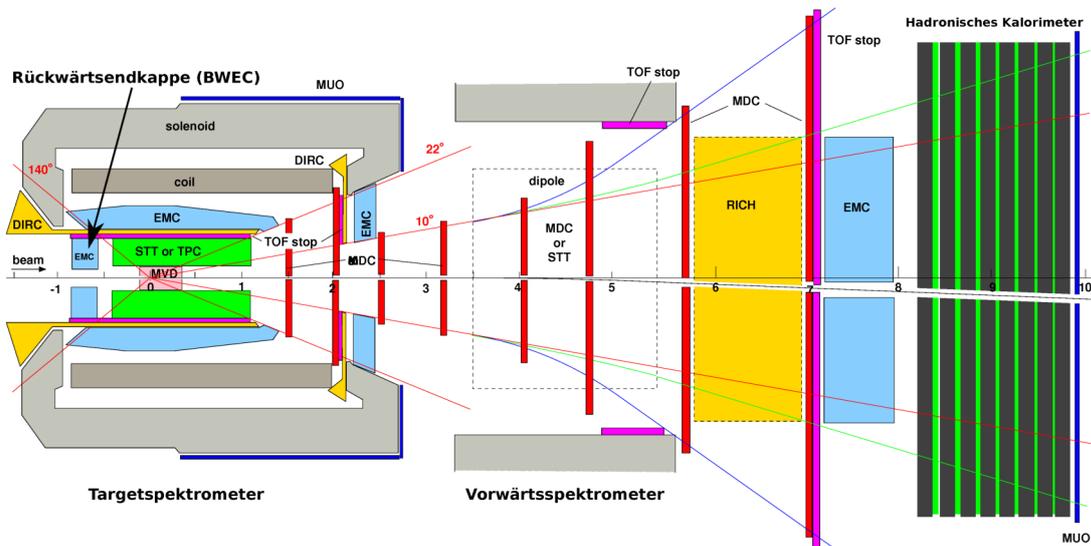


Abbildung 1.1: Aufbau des $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektors, der in Target- und Vorwärtsspektrometer unterteilt wird. [Col08]

Der zweite Teil des $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektors, das Targetspektrometer, deckt Streuwinkel von 22° bis 170° ab. Das Targetspektrometer besteht aus mehreren Detek-

torsystemen, die Zwiebelschalenartig um das Annihilationszentrum angeordnet sind.

Der innere Teil des Targetspektrometers bildet der Mikrovertexdetektor (MVD), in Abbildung 1.1 rot eingezeichnet. Oberhalb und unterhalb ist der Straw Tube Tracker (STT) angebracht. Dieser verwendet viele parallel zur Strahlachse angeordnete Straw-Detektoren, um die Spur von geladenen Teilchen zu rekonstruieren. Die Straw-Detektoren basieren auf dem Ionisationseffekt von geladenen Teilchen beim Durchqueren von mit Gas gefüllten Kammern. Um die geladenen Teilchen abzulenken ist ein Solenoid, mit einem 2 T starken Magnetfeld, um das Annihilationszentrum angebracht. Um den STT herum befindet sich das Elektromagnetische Kalorimeter (EMC). Dieses ist eines der wichtigsten Elemente des \bar{P} ANDA-Detektors und wird in Kapitel 1.3 näher beschrieben. Anschließend befindet sich der DIRC-Detektor (Detection of Internally Reflected Cherenkov light), der zur Teilchenidentifikation dient. Das Flugzeitspektrometer (TOF) dient zur Ergänzung der Geschwindigkeitsinformation des DIRC-Detektors. Ganz außen befindet sich der Myonen Detektor (MUO), welcher auf dem Driftkammerprinzip basiert.

Durch die vielen verschiedenen Komponenten von Target- und Vorwärtsspektrometer, wird nahezu der gesamte Raumwinkel abgedeckt. Zusätzlich können Detektor-Komponenten modular ausgetauscht werden. Dies bezieht sich insbesondere auf die rückwärtige Endkappe des EMC, welche für die Durchführung der Messungen zur Studie der Hyperkerne durch einen Germanium Detektor ersetzt werden soll.

1.3 Das Elektromagnetische Kalorimeter

Das Elektromagnetische Kalorimeter (EMC) besteht aus einem Barrel sowie einer Vorwärts- und einer Rückwärtsendkappe, siehe Abbildung 1.2. Es dient dazu, die Teilchen abzubremesen beziehungsweise zu stoppen und die im Kalorimeter deponierte Energie zu messen. Dabei kann mit Elektronen, Positronen und Photonen die beste Energieauflösung erreicht werden. Denn bei diesen Teilchensorten kommt es zu einer elektromagnetischen Schauerbildung, welche im EMC gemessen werden kann.

Der Nachweis der elektromagnetisch wechselwirkende Teilchen geschieht über einen Szintillationsprozess. Durch die Dotierung der Kristalle mit Ittriumoxid entstehen sogenannte Aktivatorzentren. Wenn ionisierende Strahlung in den Kristall gelangt, werden Elektron-Loch-Paare erzeugt. Diese wiederum regen die Aktivatorzentren an, welche dann durch Emission von sichtbarem Licht zurück in den Grundzustand fallen.

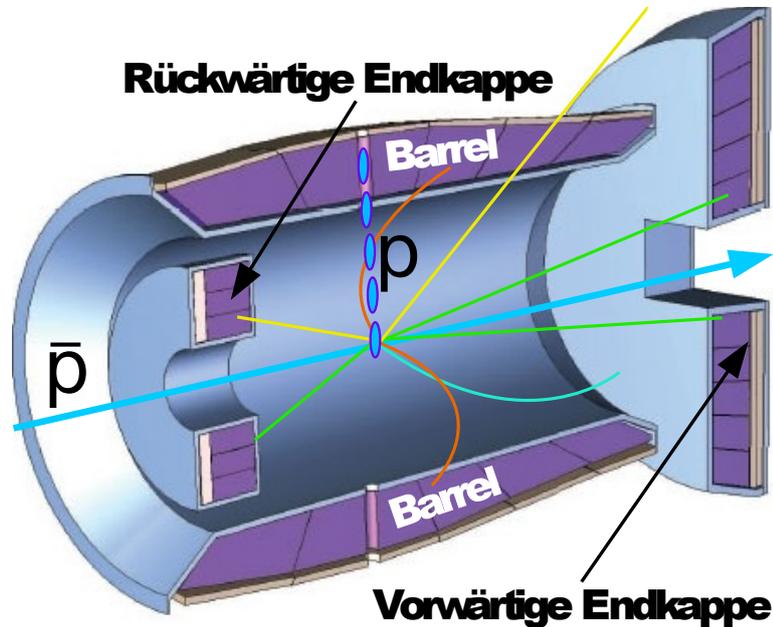


Abbildung 1.2: Das Elektromagnetische Kalorimeter wird in Barrel, Vorwärts- und Rückwärtsendkappe unterteilt. Insgesamt umgeben 15500 Bleiwolframat-Kristalle das Kollisionszentrum. [Nol14]

Auf Grund der hohen Zählraten und des begrenzten Raumes benötigt das Elektromagnetische Kalorimeter schnelle Szintillatoren mit kleiner Ausdehnung. Also muss das verwendete Material eine kurze Abklingzeit und eine geringe Strahlungslänge besitzen. Das heißt es wird ein dichtes Material benötigt, damit die Teilchen möglichst viel Energie pro Strecke deponieren. Außerdem soll es eine hohe Energieauflösung haben und möglichst strahlenhart sein. Es hat sich herausgestellt, dass Bleiwolframat (PbWO_4) hierfür am besten geeignet ist [Col08]. Bleiwolframatkristalle zeichnen sich durch eine hohe Strahlenhärte und eine schnelle Abklingzeit von weniger als 6,5 ns aus. Des Weiteren haben sie eine hohe Energieauflösung bei Photonen- und Elektronendetektion und können einen enormen dynamischen Bereich von 10 MeV bis 14,6 GeV abdecken. Da die Lichtdurchlässigkeit der Kristalle mit sinkender Temperatur steigt, wird das Elektromagnetische Kalorimeter auf -25°C heruntergekühlt.

Die Messung des erzeugten Lichtes erfolgt durch Large Area Avalanche Photodioden (LAAPD), kurz APD. Ihre genaue Funktionsweise wird in Kapitel 5 erklärt.

1.3.1 Die Rückwärtige Endkappe

Der Bau der rückwärtigen Endkappe (BWEC) wird durch das Helmholtz-Institut Mainz (HIM) und das Institut für Kernphysik (KPH) realisiert. Im Rahmen dieser Entwicklung findet die vorliegende Bachelorarbeit statt. Die BWEC soll einen Streuwinkel von 140° bis 170° abdecken und Teilchen mit Energien von 10 MeV bis zu 0,7 GeV erfassen.

Die Rückwärtige Endkappe besteht aus 524 PbWO_4 -Kristalle, mit den Maßen $24,7 \text{ mm} \times 24,7 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$. Diese werden in Form eines Hohlzylinders angeordnet, da in dessen Mitte die Strahlführung verläuft. Die Anordnung ist in Abbildung 1.3 zu sehen. Der Hohlzylinder hat einen Innendurchmesser von 37,8cm und einen Außendurchmesser von 82,8cm.

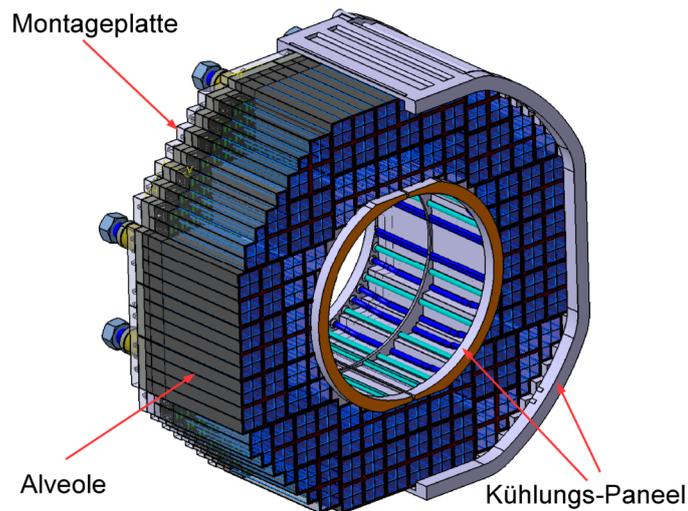


Abbildung 1.3: Die Rückwärtige Endkappe mit 524 Bleiwolframatkristallen, welche in Form eines Hohlzylinders angeordnet sind. Die Kristalle werden von Kohlefaser-Alveolen gehalten. [Nol14]

Die Kohlefaser-Alveolen werden in hauseigener Produktion hergestellt und dienen als Halterung für die Kristalle. Die rückwärtige Endkappe wird wie das gesamte EMC auf -25°C heruntergekühlt. Hierzu sind an der Innen- und Außenseite der BWEC Kühlungs-Paneele, wie in Abbildung 1.3 zu sehen, angebracht. Es werden zwei Montageplatten verwendet, um den kalten von dem warmen Be-

reich zu trennen.

An der Stirnseite eines jeden Kristalles sind zwei Avalanche-Photodioden (APD) zur Detektion des Szintillationslichtes angebracht. Jede Diode hat eine aktive Fläche von $7 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$. Auf dem Lichtbild in Abbildung 1.4 ist ein PbWO_4 -Kristall mit APD samt ASIC-Vorverstärker zu sehen.

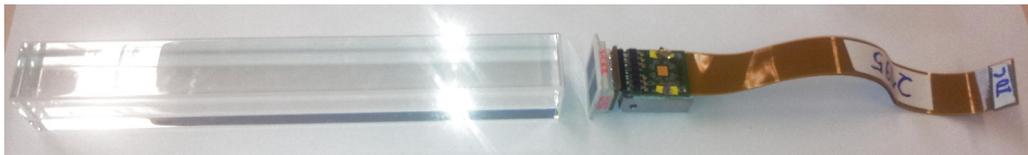


Abbildung 1.4: Der Bleiwolframat Kristall, APD und ASIC.

Kapitel 2

Der Prototyp Proto16

Der Prototyp Proto16 dient dazu verschiedene Komponenten der rückwärtigen Endkappe zu testen und zu verbessern. Er enthält alle Komponenten, die später auch bei der rückwärtigen Endkappe zum Einsatz kommen sollen.

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Aufbau des Prototyps. Hierbei wird zuerst auf den mechanischen Aufbau und anschließend auf die Front-End-Elektronik und die Slow Control eingegangen.

2.1 Der mechanische Aufbau

2.1.1 Kristall, APD und Vorverstärker

Die Zahl 16 in Proto16 steht für die Anzahl der Bleiwolframat-Kristalle die in dem Prototyp verwendet werden. Diese sind in einer 4×4 -Matrix angeordnet. Damit die Kristalle eine maximale Lichtausbeute haben, werden diese in Reflexionsfolie (DF2000MA, Firma 3M) gepackt. Diese ist mit einem Laser vorgekantet, sodass nach dem umwickeln zwischen Folie und Kristall möglichst wenig Luft ist.

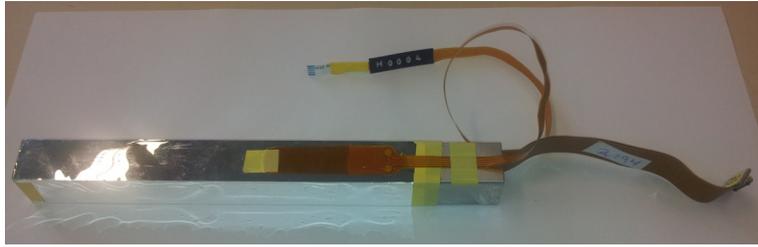


Abbildung 2.1: Man sieht eine eingepackte Kristalleinheit, an der die Alu-Kapsel befestigt ist. In der Kapsel befinden sich APD und Vorverstärker (ASIC).

Nach dem Einpacken kommen an der Stirnseite, an der die Folie noch offen ist, die APD an den Kristall. Außen an den Kristallen werden Temperatursensoren befestigt, auf die in Kapitel 4 nochmal speziell eingegangen wird. Der fertig eingepackte Kristall ist in Abbildung 2.1 zu sehen.

Pro Kristall werden zwei Avalanche-Photodioden (APD) mit ähnlichen Kennlinien angebracht. Falls sich die APD eines Kristalls doch noch unterscheiden, kann für jede APD die Bias-Spannung individuell eingestellt werden. Dadurch wird ermöglicht, dass die APD eine gleiche Verstärkung haben. Die APD werden von einer Kunststoffhalterung gehalten, in der eine Bohrung für einen Lichtwellenleiter (LWL) angebracht ist, siehe Abbildung 2.2. Durch diese Lichtwellenleiter können Lichtpulse eingekoppelt werden.

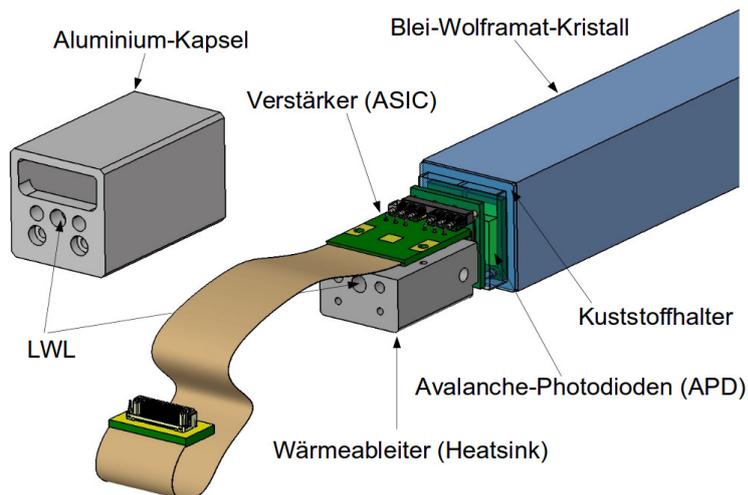


Abbildung 2.2: PbWO_4 -Kristall mit angebrachten APD. Die Signale werden über den ASIC verstärkt. Gegen die Überhitzung ist an dem ASIC ein Wärmeableiter befestigt. Die Aluminium-Kapsel dient zur elektrischen Abschirmung. [Nol14]

An den APD ist direkt der Vorverstärker (ASIC) angebracht. Genaueres hierzu steht in Kapitel 2.2. Durch einen Wärmeableiter am ASIC wird die Wärme nach außen geführt, sodass die Kristalle nicht von den ASIC erwärmt werden. Zusätzlich wird der ASIC durch die Aluminium-Kapsel gegen elektrische Störeinflüsse abgeschirmt.

2.1.2 Zusammensetzen der Kristalle in der 4×4 Alveole

Die Kristalle werden von einer 4×4 Alveole gehalten. Diese ist aus einem dünnem Kohlefaser Verbundwerkstoff gefertigt, um eine hohe Steifigkeit bei geringem Platzbedarf zu gewährleisten. Die Dimensionen sind so gewählt, dass genug Platz für Kristall und Reflexionsfolie vorhanden ist, die Kristalle aber trotzdem möglichst dicht aneinander liegen.

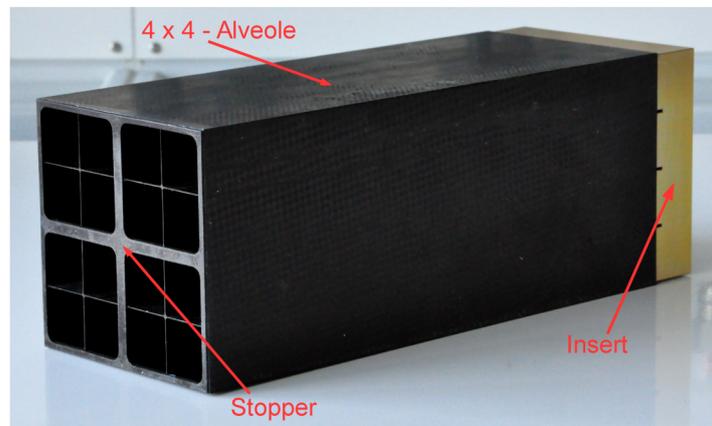


Abbildung 2.3: Man sieht die 4×4 Alveole von Proto16. Der Stopper und das Insert sind dazu da, um die Kristalle in Position zu halten.

Der Stopper und das Insert (Abbildung 2.3) verhindern, dass die Kristalle in der Horizontale verrutschen können. Die zu detektierenden Teilchen treffen auf der Seite des Stoppers ein. Die Auslese ist auf der Seite des Inserts.

Das Insert wird in die Alveole gesteckt und seitlich verschraubt. Wie in Abbildung 2.4 zu sehen ist, hat es mittig noch Freiraum um die Kabel von ASIC, Lichtpulser und Temperatursensoren nach außen zu führen.

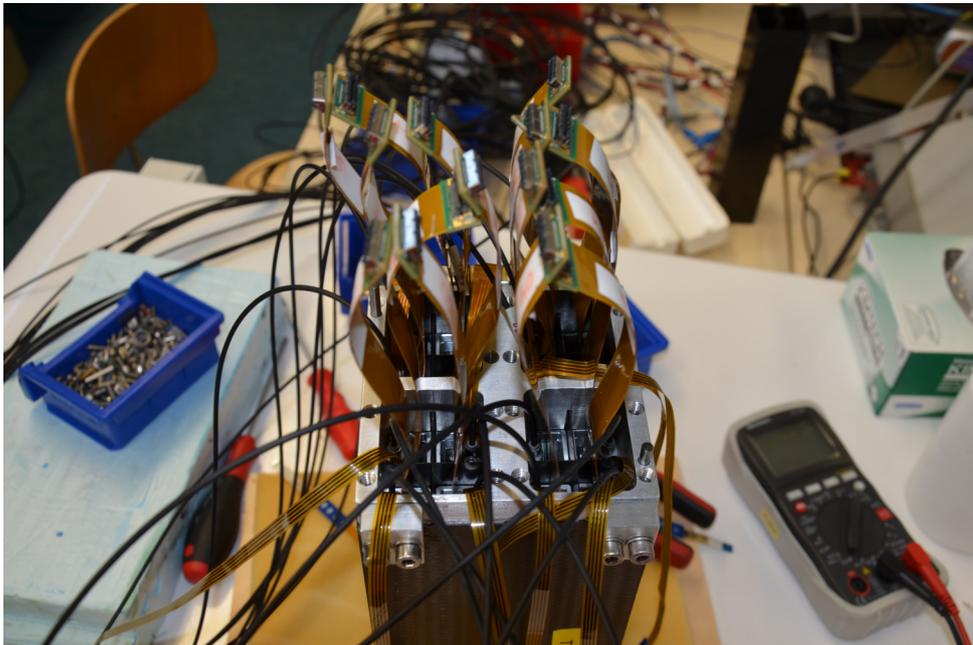


Abbildung 2.4: Zu sehen ist die Alveole mit dem aufgeschraubten Insert und die Verkabelung der Lichtwellenleiter, den ASIC-Anschlüssen und Den Temperatursensoren.

2.1.3 Die Endmontage des Prototyps

Wie in der BWEC gibt es zwei Montageplatten, die mit zwei Glasfaserbolzen zusammengehalten werden, um das kalte von dem warmen Volumen zu trennen. Das Insert wird an die erste Montageplatte geschraubt. Über die Montageplatte 1 wird der Detektor an der Montageplatte 2 befestigt, siehe Abbildung 2.5. An der Montageplatte 2 sind Durchführungen für die Sender Platinen der Front-End-Elektronik, die Lichtwellenleiter als auch für die Verteilerplatinen der Temperatursensoren vorhanden. Außerdem gibt es Durchführungen für die Kühlung und den Stickstoffanschluss.

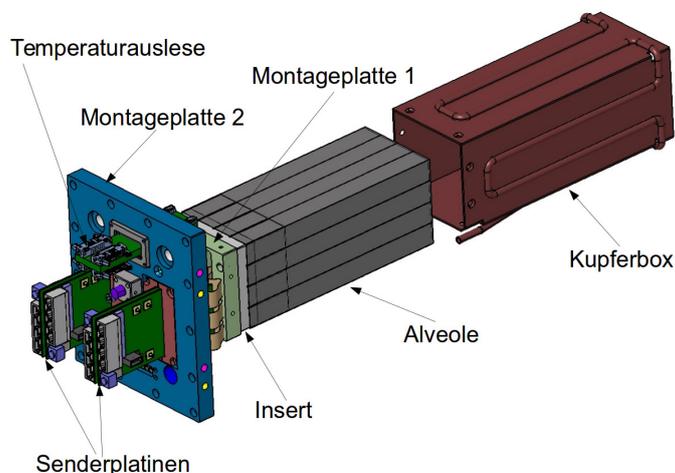


Abbildung 2.5: Man sieht die Alveole mit 16 Kristallen, über die die Kupferbox geschoben wird. Die Alveole ist an der Montageplatte 1 befestigt, die ihrerseits an Montageplatte 2 befestigt ist. Links sieht man die Senderplatten und die Temperatursensor-Verteilerplatten. [Nol14]

Montageplatte 2 ist am Trägersystem des Prototyps befestigt. Um die Alveole wird eine Kupferbox gestülpt, an der die Kühlrohre angebracht sind. Über diese kommt eine Aluminiumbox zur elektrischen Abschirmung. Auf die Sender Platinen und Temperatursensor-Verteilerplatten wird im Kapitel 2.2 eingegangen.

2.1.4 Kühlung und Isolierung

Um die Kühlung des Proto16 auf -25°C zu gewährleisten ist es wichtig den Detektor von der Umgebung, welche Raumtemperatur hat, zu isolieren. Eine Komponente der Isolierung ist, wie bereits erwähnt, die thermische Entkopplung von Montageplatte 1 und Montageplatte 2. Dies geschieht durch die Glasfaserbolzen, welche durch ihre geringe thermische Leitfähigkeit das kalte von dem warmen Volumen trennen. Eine weitere ist die Auskleidung der Aluminiumbox mit Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP). Außerdem sind die Lichtwellenleiter, die Sender Platinen und die Temperatursensor-Verteilerplatten Luft- und Lichtdicht verklebt. Die Kontaktflächen werden zusätzlich mit O-Ringen abgedichtet. Diese Maßnahmen führen zu einer thermische Isolierung des Kristallsystems von der Elektronik und der Umgebung. Den einzigen thermischen Kontakt stellen die Kabel dar.

Als Kältemaschine dient der Kühler Integral XT der Firma LAUDA. Dieser

pumpt die Kühlflüssigkeit Ethanol durch die Kühlrohre, welche auf die Kupferbox gelötet sind. Die Kupferbox ist, wie in Abbildung 2.5 zu sehen, über die Alveole gestülpt. Für die Kühlung sind an Montageplatte 2 unten rechts und links zwei Bohrungen angebracht. Durch diese werden die Kühlrohre über „Schnellstecker“ thermisch isoliert nach außen geführt.

Zwischen Aluminium und Kupferbox ist eine Luftschicht. Die Feuchtigkeit in der Luft fängt bei Temperaturen unter 15°C an zu kondensieren. Um Wasser- und Eisbildung zu vermeiden, wird dieser Bereich permanent mit Stickstoff geflutet. Ein- und Ausgang der Stickstoffleitung sind an der Montageplatte 2 angebracht.

2.2 Front-End-Elektronik

Wie zuvor beschrieben entsteht Szintillationslicht, wenn ionisierende Strahlung auf die PbWO_4 -Kristalle treffen. Gelangt dieses Licht in die APD wird durch den Photo-Effekt und den Avalanche-Effekt ein elektrischer Strompuls erzeugt. Dieser wird von einem Vorverstärker, dem ASIC (Application-Specific Integrated Circuit), gesammelt. Daraus wird im ASIC ein Signal erzeugt, welches zusätzlich geformt und verstärkt wird. Pro Avalanche Photodiode gibt es zwei Ausgangssignale mit unterschiedlicher Verstärkung. Dies ergibt vier Ausgangssignale pro Kristall.

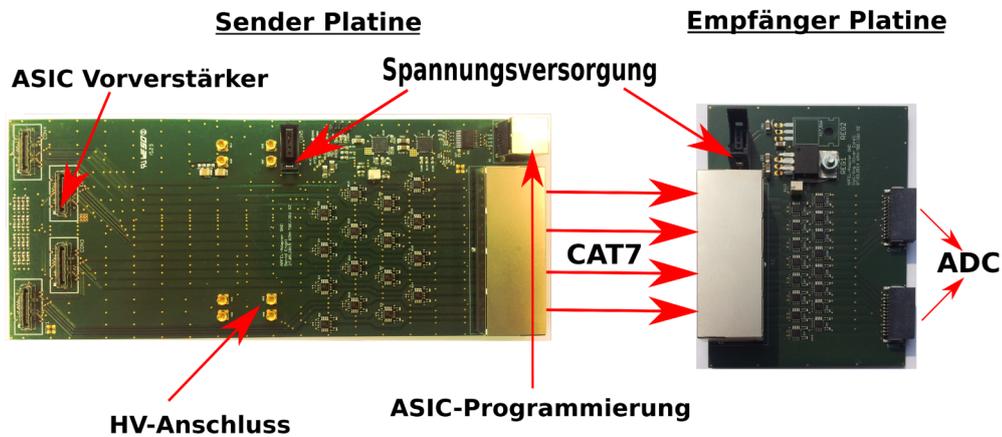


Abbildung 2.6: Zu sehen sind Sender und Empfänger Platine. Die Sender Platine hat vier ASIC-, acht HV-, vier RJ45- und je einem Spannungsversorgungs- und ASIC-Programmierungs-Anschluss. Die CAT7-Kabel führen die Signale von der Sender zur Empfänger Platine. Von hier aus gelangen die Signal dann an einen ADC (analog to digital converter).

Der Grund für die Benutzung der Senderboards ist, dass der ADC (analog to digital converter) circa 10 m vom Detektor entfernt sind. Die ASIC haben nicht genug Leistung, um das Signal über so lange Kabel zu treiben.

Die Abbildung 2.6 zeigt Sender und Empfänger Platine, wie sie in Proto16 zum Einsatz kommen. Pro Sender Platine sind jeweils vier ASIC angeschlossen. Also werden insgesamt vier Sender Platinen für die 16 Kristalle benötigt. In der Mitte des Sender Platine sind acht Hochspannungsanschlüsse, für jede Avalanche Photodiode einen. Direkt daneben, in schwarz, ist die Spannungsversorgung der Platine. Rechts oben ist der Eingang der ASIC-Steuerung, hierüber ist die Sender Platine mit einem Controller-Board verbunden. Darunter sind vier RJ45-Anschlüsse, die über 10 m langen CAT7-Kabeln mit der Empfänger Platine verbunden sind. Insgesamt werden also 16 CAT7-Kabel angeschlossen. Von der Empfänger Platine gelangen die Signale dann an den ADC.

2.3 Slow Control

Die Slow Control bezeichnet alle Subsysteme des Detektors, die den Detektor steuern und überwachen. Bei dem Prototyp bezieht sich dies unter anderem auf die Temperatursauslese und das Lichtpulsersystem. Auf diese wird in diesem Ka-

pitel kurz eingegangen.

Die Temperatursensoren werden innerhalb des gekühlten Bereiches in die Temperatursensor-Verteilerplatinen eingesteckt. Diese dienen nur zur Durchführung des Signals durch die thermische Abschirmung. Die Auslese der Signale erfolgt über das „Temperature and Humidity Monitoring Board“ (THMP). Bei dem THMP handelt es sich um ein modular aufgebautes Auslesesystem auf das unterschiedliche Piggi Back Boards aufgesetzt werden können. Dieses ist das PANDA Standard System zum Auslesen von Temperatur, Druck und Feuchtigkeit. [Col08]

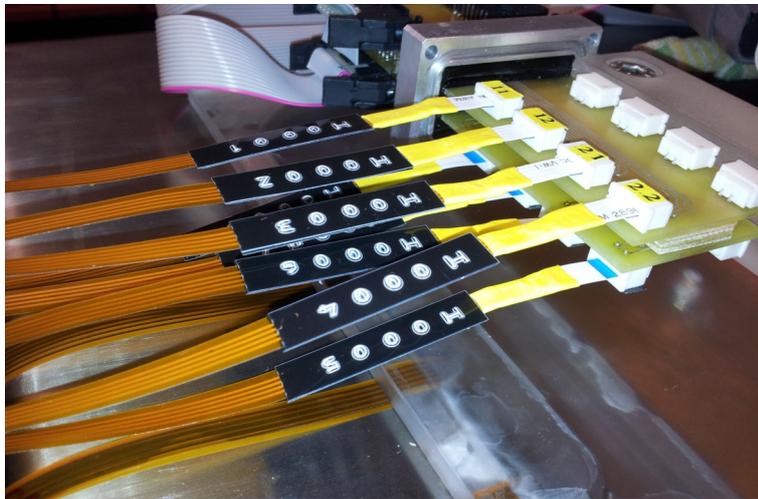


Abbildung 2.7: Das Bild zeigt die Temperatursensor-Verteilerplatinen mit acht eingesteckten Temperatursensoren.

Wie bereits erwähnt ist an jedem Kristall ein Lichtwellenleiter angebracht, über den Lichtpulse eingekoppelt werden können. Die Lichtpulse werden von einem in Mainz entwickelten Lichtpulsersystem in jeden Kristall eingekoppelt. Hierbei handelt es sich um ein Multiplexersystem mit 16 Kanälen. Bei dem LED-Pulsersystem befindet sich an jedem der 16 Lichtpuls-Ausgänge eine Leuchtdiode (LED). Diese emittieren Licht mit einer Wellenlänge von $\lambda = 455 \text{ nm}$. Über die Regelung der Spannungen der LED können Lichtpulse unterschiedlicher Intensität generiert werden. Die Spannung jeder Leuchtdiode kann hierbei individuell verändert werden. Diese Testpulse dienen dazu die Elektronik auch bei Zimmertemperatur zu testen. Außerdem verlieren die Kristalle nach längerem Strahlbetrieb an Durchsichtigkeit. Durch Bestrahlung der Kristalle mit Licht im Wellenlängenbereich von 350 bis 1800 nm kann dies rückgängig gemacht werden. [Nol14]

Kapitel 3

Neuerungen an Proto16

3.1 Anbringung der APD an den Kristallen

Beim Säubern der Kristalle wurde festgestellt, dass nahezu alle Kristalle ähnliche Kratzer an der Stirnseite aufweisen. Diese stammen von der Keramikhülle der APD. Da Keramik ein härteres Material als Bleiwolframat ist, konnte der Kristall beschädigt werden. Um erneute Beschädigungen der Kristalle zu vermeiden, wurden zwei Maßnahmen ergriffen:

Erstens wird zwischen den Kristallen und den APD ein optisches Fett aufgetragen, um den direkten Kontakt zu vermeiden. Hierbei ist es wichtig dass keine Lufteinschlüsse im Fett vorhanden sind, da Lufteinschlüsse die Lichttransmission beeinflussen. Abbildung 3.1 zeigt ein Lichtbild durch den Kristall nach dem Auftragen des Silikon Fettes vom Typ EJ-550 und der Anbringung der APD.

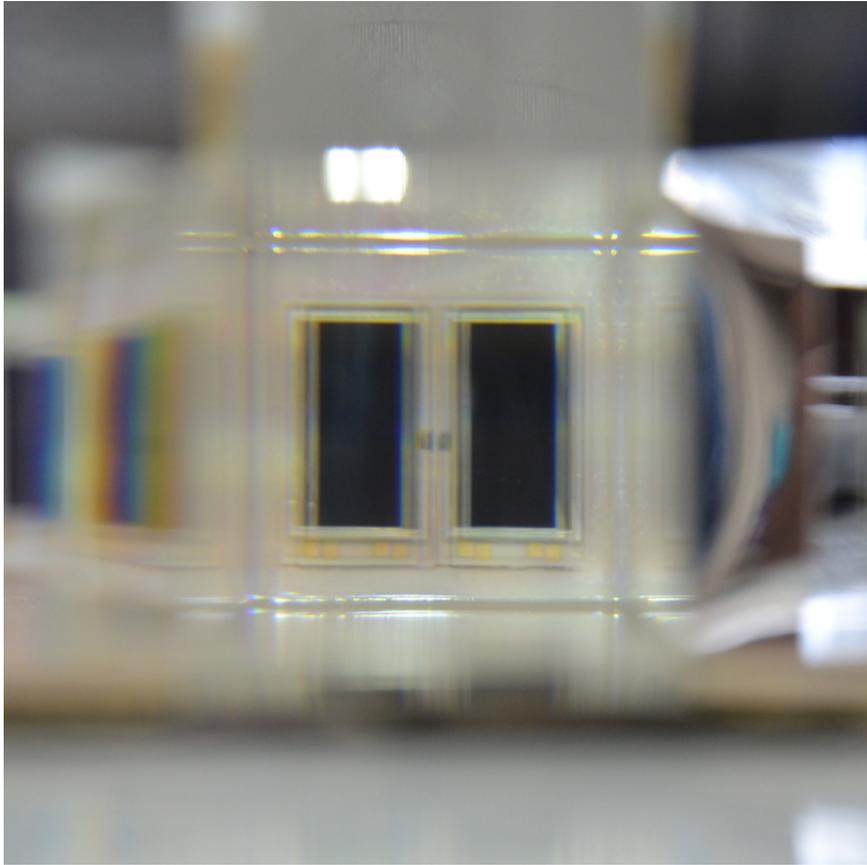


Abbildung 3.1: Zu sehen ist ein Lichtbild eines Kristalls, bei dem zwei APD mittels optischen Fettes angebracht wurden.

Zweitens werden die bisherig verwendeten Federn um die APD an die Kristalle zu drücken durch Kugelfallen ersetzt.

Die Federn befanden sich zwischen Insert und Aluminium-Kapsel. Je eine Feder hat eine Aluminium-Kapsel samt APD an einen Kristall gedrückt. Das Problem mit den Federn ist, dass diese einen zu großen Druck ausüben. Dadurch drücken die Keramikhüllen der APD zu fest auf die Kristalle und beschädigen diese. Außerdem lassen sich die Federn nicht individuell einstellen, sodass die Kraft auf die verschiedenen Kristalle unterschiedlich ist.

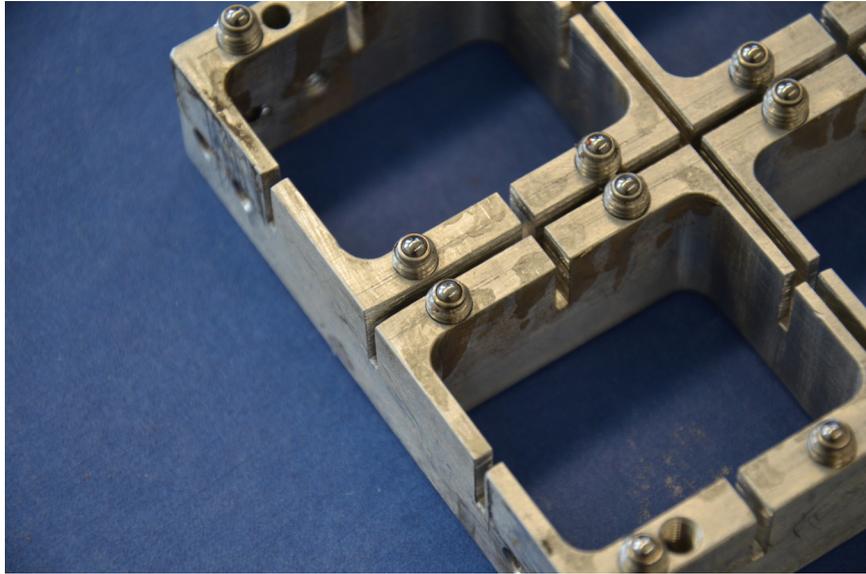


Abbildung 3.2: Ausschnitt von der Unterseite des Inserts mit den Kugelfallen.

Um die Kugelfallen zu befestigen, wurden in das Insert Gewinde gebohrt, ein Gewinde pro Kristall, siehe Abbildung 3.2. Das Insert hat die Aufgabe zu verhindern, dass die Kristalle in der horizontalen verrutschen. Es befindet sich zwischen Alveole und Montageplatte 1, siehe Kapitel 2.1.3. Nach der Justierung der Kristalle und des Inserts werden alle Kugelfallen gleich fest angezogen, um einen gleichmäßigen Anpressdruck zu gewährleisten. Zusätzlich werden die Kugelfallen mit Schrauben gekontert, damit sich die Kugelfallen nicht lösen können. Außerdem stellen die Kugelfallen den elektrischen Kontakt zwischen Aluminium-Kapsel der APD und Insert her, sodass die Aluminium-Kapsel geerdet ist.

Durch diese zwei Maßnahmen werden die Kristalle wesentlich schonender behandelt und es entstehen keine neuen Kratzer.

3.2 Planung und Konstruktion einer Abschirmung für die Sender Platinen

Um zu verhindern, dass die Datenaufnahme durch Störsignale auf den Senderboards verschlechtert wird, wurde im Rahmen dieser Bachelorarbeit eine Abschirmung entwickelt. Die Abschirmung soll als Faraday'scher Käfig die Senderboards der Front-End-Elektronik abschirmen. Sie besteht aus 1 mm Stahlblech und hat die Maße $100 \times 160 \times 120 \text{ mm}^3$. In Richtung des Detektors ist das

Metallgehäuse offen. Da es an der Montageplatte 2 befestigt wird, schließt diese auf der offenen Seite den Faraday'schen Käfig. Auf der entgegengesetzten Seite dient eine abnehmbare Stahlplatte als Deckel. Dieser wird mit Magneten an dem Gehäuse festgehalten. Der elektrische Kontakt zwischen Deckel und Gehäuse kann so sichergestellt werden.

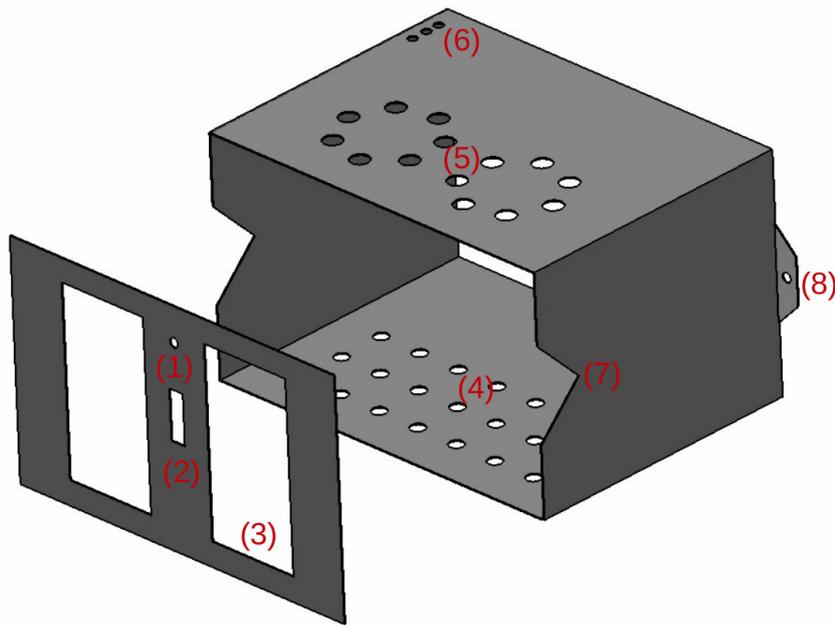


Abbildung 3.3: CAD-Zeichnung der Abschirmung mit Deckel. Die Löcher sind vorgesehen für: (1) LEMO-Anschluss, (2) Parallele Schnittstelle, (3) RJ45-Anschlüsse, (4) Lufteinzug, (5) Ventilatoren, (6) Versorgungsspannungsanschluss, (7) HV-Kabel, (8) Befestigung an Montageplatte 2.

Wie in Abbildung 3.3 zu sehen ist, sind an dem Metallgehäuse verschiedene Bohrungen vorhanden. Da diese nur punktuell sind, wird die Funktion des Faraday'schen Käfigs durch diese nicht beeinträchtigt.

Oben an der Abschirmung sind Bohrungen für Ventilatoren vorhanden. Hier sind zwei 12 Volt Ventilatoren, siehe Abbildung 3.4, zur Kühlung der Senderboards befestigt. Unter Ausnutzung der Konvektion wird die warme Luft nach oben abgesogen. Damit die Luft in das Gehäuse einströmen kann, befinden sich an der Unterseite Luftlöcher.

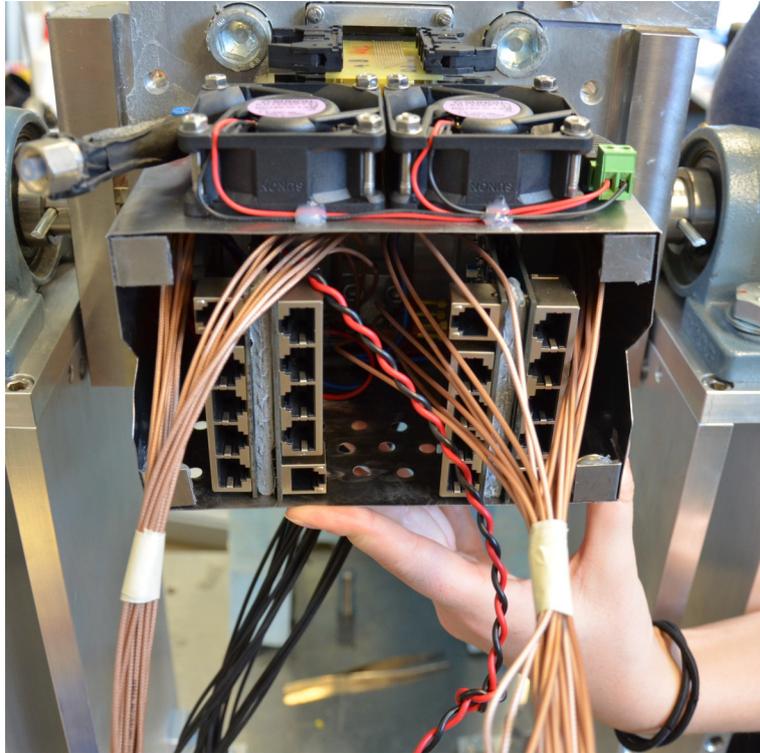


Abbildung 3.4: Die offene Abschirmung. Man sieht oben auf dem Gehäuse die Ventilatoren, rechts und links gehen die HV-Kabel ab und in der Mitte sieht man das rot-schwarze Spannungsversorgungskabel des Controller-Boards für die Vorverstärker.

Zur Verkürzung der Kabelwege, wird die Spannungsversorgung der vier Senderboards und des Controller-Boards innerhalb des Metallgehäuses verlegt. Die Spannungsversorgung der Boards kann einfach außen am Gehäuse angeschlossen werden, diese wird dann getrennt an die vier Senderboards und an das ASIC-Controller-Board weitergeleitet. Dies erleichtert die Kabelführung, da nun an Stelle von 18 Kabel nur noch vier Kabel (Plus, Minus und zwei mal Erde) zum Detektor führen.

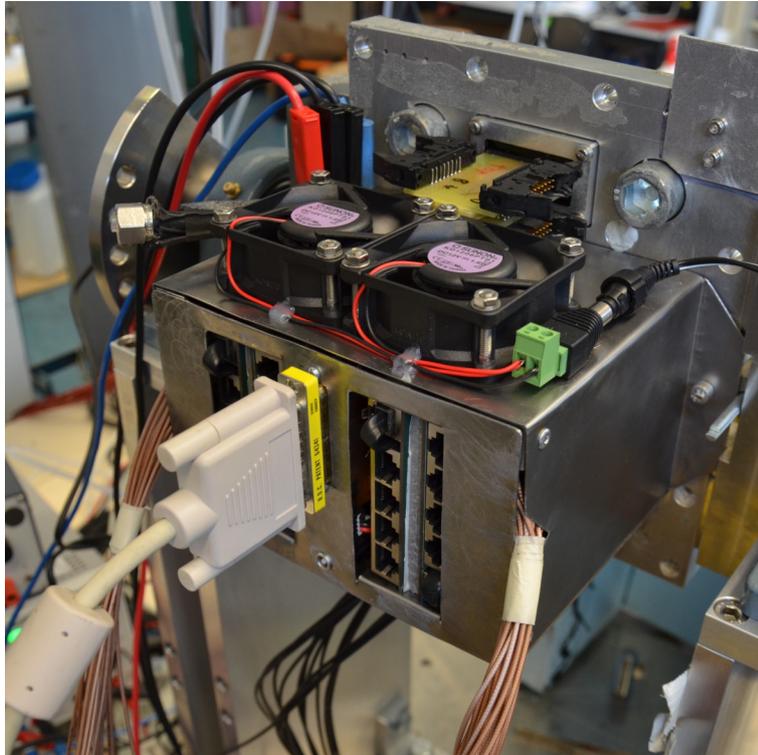


Abbildung 3.5: Die geschlossene Abschirmung. Hinten links gehen die Spannungskabel ab. Vorne ist die parallele Schnittstelle angeschlossen und darunter ist der LEMO-Stecker. Rechts und links vom Deckel gehen die HV-Kabel ab.

An dem Deckel ist das ASIC-Controller-Board befestigt, sodass der LEMO-Stecker und die parallele Schnittstelle bei geschlossenem Kasten gesteckt werden können. Der ASIC kann intern Testpulse erzeugen, um die Ausleseketten zu überprüfen. Gleichzeitig löst das Controller-Board ein TTL-Triggersignal aus, das am LEMO-Anschluss abgegriffen werden kann. Über die parallele Schnittstelle können die ASIC von einem Computer aus programmiert werden. Das Controller-Board und die Sender Platinen sind über gekürzte „Telefonkabel“ mit RJ12-Anschlüssen verbunden. Damit die RJ45-Kabel problemlos an den Sender Platinen angebracht werden können, befinden sich Löcher im Deckel der Abschirmung. Zusätzlich sind dort auch noch Halterungen angebracht, um die Sender Platinen in Position zu halten. Die HV-Kabel werden an kleinen Aussparungen rechts und links des Deckels nach außen geführt, siehe Abbildung 3.5.

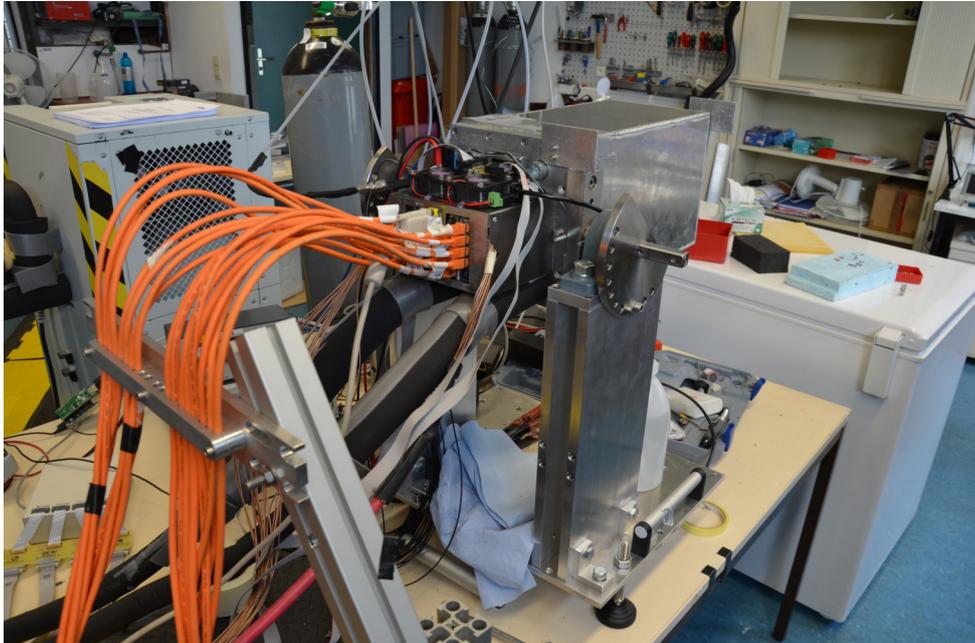


Abbildung 3.6: Der fertig montierte Prototyp auf seinem Trägersystem. Um die Senderboards ist die Abschirmung mit Ventilatoren befestigt. Die orangenen CAT7-Kabel führen zu den Empfänger Platinen der Front-End-Elektronik.

Kapitel 4

Temperaturmessung im Prototyp

Für Proto16 werden spezielle Temperatursensoren benötigt. Diese müssen besonders dünn sein und die Temperatur im Bereich von -30°C bis -15°C auf $0,1^{\circ}\text{C}$ genau messen.

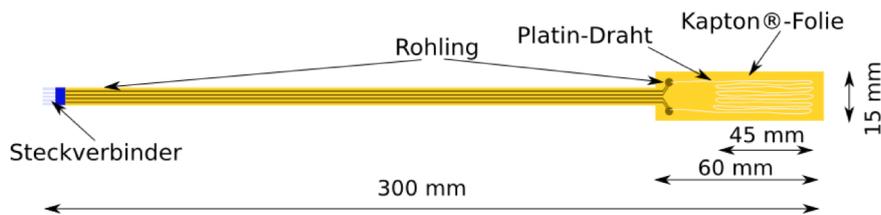


Abbildung 4.1: Aufbau des Temperatursensors PT100. [Nol14]

Auf der Abbildung 4.1 sieht man den 0,1 mm dünnen Temperatursensor, wie er auch in Proto16 zum Einsatz kommt. Der $200\ \mu\text{m}$ dicke Platindraht wird zickzackförmig auf einer Fläche von $45\ \text{mm} \times 15\ \text{mm}$ verlegt. Platin wird verwendet, da sich, wie bei fast allen Metallen, sein Widerstand mit der Temperatur ändert. Der Draht wird von zwei nicht leitenden Kapton-Folien eingeschlossen. PT100 steht für den verwendeten Platindraht und den Widerstand $100\ \Omega$, den der Sensor bei 0°C hat. Bevor die Sensoren einsatzbereit sind, müssen diese allerdings kalibriert werden.

4.1 Kalibration der Temperatursensoren

Zur Messung der Temperaturverteilung in Proto16 werden 16 PT100 Temperatursensoren vorbereitet. Um die Temperatursensoren zu kalibrieren, werden sie zusammen mit einem Eichsensor in eine Gefriertruhe gelegt. Der Eichsensor

liegt mittig zwischen je acht zusammengefassten Temperatursensoren. Um die Temperatur um die Sensoren möglichst konstant zu halten befinden sich diese zusätzlich zwischen zwei Kupferplatten, welche die Temperaturänderung träge machen.

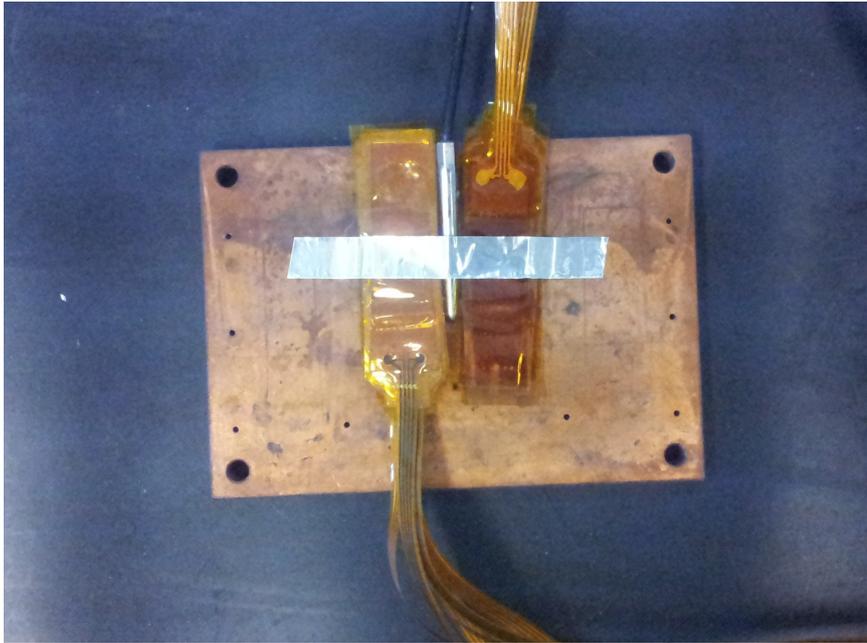


Abbildung 4.2: Aufbau der Kalibrierung der Temperatursensoren mit dem Eichsensor in der Mitte, und den zu kalibrierende Sensoren rechts und links daneben.

Es ist bereits bekannt, dass die zu kalibrierenden Sensoren einen Hysterese-Effekt aufweisen [Nol14]. Es macht also einen Unterschied aus welcher Richtung die Temperatur angefahren wird. Um dies zu berücksichtigen werden je sechs Datenpunkte beim Abkühlen und je fünf Datenpunkte beim Warmfahren aufgenommen. Für jeden eingestellten Temperaturwert der Gefriertruhe wird von der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Software sichergestellt, dass ein Temperaturplateau vorliegt. Ein Temperaturplateau bezeichnet hierbei längere Zeiten von einer nahezu konstanten Temperatur. In diesem Fall werden zehn Messungen in einem Abstand von je 10 Sekunden vorgenommen. Wenn die Standardabweichung dieser Daten kleiner als $0,004^{\circ}\text{C}$ ist startet die Datenaufnahme automatisch. Es ist wichtig, dass die Daten nur dann genommen werden, wenn man sicher sein kann, dass die Temperatur stabil ist.

Die Datenpunkte errechnen sich aus dem Mittelwert von 20 Messungen, welche in einem Abstand von je 10 Sekunden aufgenommen werden. Der statistische Fehler dazu ist die Standardabweichung auf den Mittelwert durch die Wurzel der

Anzahl der Messungen. Die Referenztemperatur wurde jeweils vom Eichsensor für alle Temperaturplateaus gleich gemessen und wird dann den entsprechenden Widerständen der Sensoren zugeordnet. Die so erhaltenen sensorspezifischen Daten werden mit einem Polynom dritten Grades angepasst. Dies ist gängige Praxis bei den PT100 Sensoren bei PANDA [Csa11] [Nol14]. Beispielhaft wird die gemessene Eichkurve für Sensor CH11 in Abbildung 4.3 gezeigt.

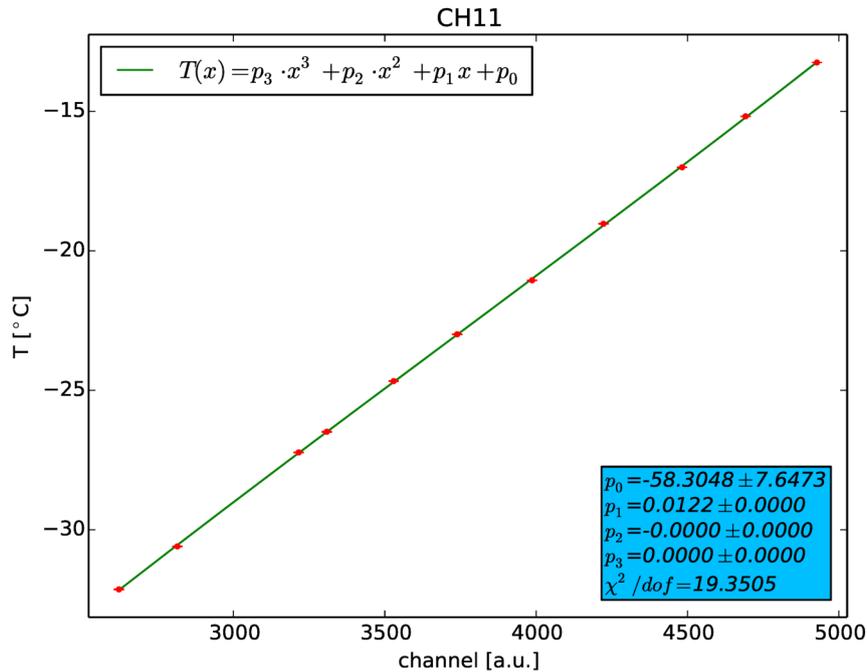


Abbildung 4.3: Eichkurve des Temperatursensors CH11 mit einem Ausgleichspolynom dritten Grades. Abgebildet ist die Temperatur in °C gegen den ADC-Kanal in willkürlichen Einheiten (a.u.).

Der Fehler auf die Datenpunkte berechnet sich folgendermaßen:

$$\Delta T = \sqrt{(\Delta T_{stat})^2 + (\Delta T_{sys})^2} \quad (4.1)$$

mit: $\Delta T_{sys} = |T| \cdot \alpha + const.$

Wobei der konstante Term des systematischen Fehlers weggelassen wird, da dies ein konstanter Offset ist und bei Temperaturdifferenzen weg fällt. Für die Auswertung in Proto16 sind nur Temperaturgradienten von Interesse. Der Faktor $\alpha = 0,0005$ ist auf Grund des Eichsensors (Typ $\frac{1}{10}$ Klasse B) gegeben. Für

einen fest gesetzten Temperaturwert der Gefriertruhe wurde von dem Eichsensor beispielsweise eine Temperatur von $-24,67^{\circ}\text{C}$ mit einem Messfehler von $\Delta T_{stat} = 0,007^{\circ}\text{C}$ gemessen. Dadurch errechnet sich der Gesamtfehler auf die Temperatur zu $\Delta T = 0,014^{\circ}\text{C}$. Alle Fehler auf die Temperaturen sind kleiner als $0,03^{\circ}\text{C}$, somit wird die angestrebte Genauigkeit der Temperatursensoren erreicht. Im Anhang A.1.2 befinden sich die restlichen Graphen.

Wie zu sehen ist, liegt der Interpolationsgraph gut auf den Messpunkten. Das heißt, die Näherung mit dem Polynom dritten Grades bildet den Temperaturverlauf in dem entsprechenden Temperaturbereich gut ab.

Um zu überprüfen, ob zusätzlich zu dem statistischen Fehler noch ein systematischer vorliegt wurde für jeden Sensor ein Residuenplot angefertigt. Beispielhaft hier wieder für Sensor CH11:

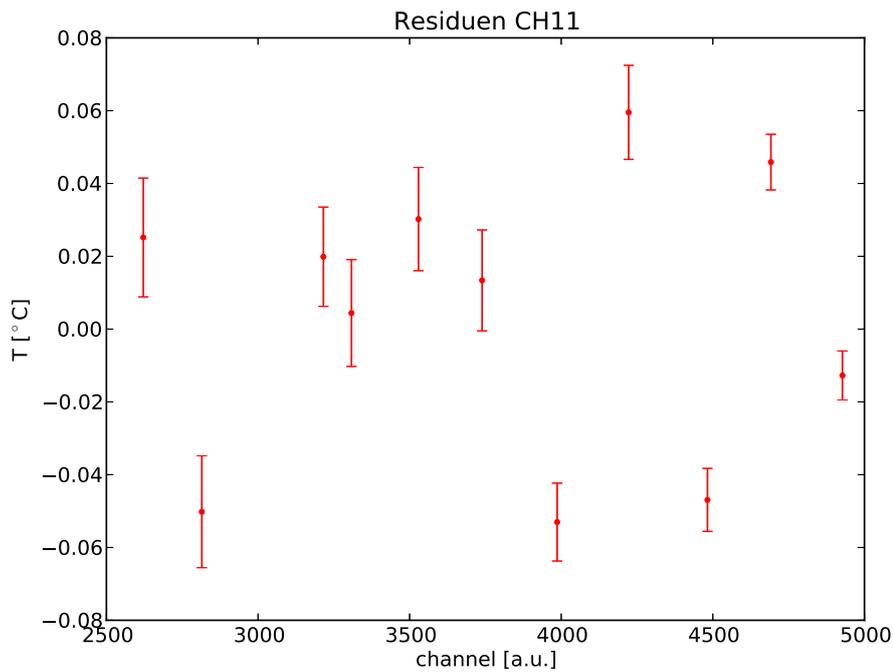


Abbildung 4.4: Residuenplot des Temperatursensors CH11. Hier ist die Differenz der gemessenen Temperatur und der errechneten Temperatur aus dem Polynom gegen den ADC-Kanal aufgetragen.

In Abbildung 4.4 ist zu sehen, dass die Abweichung der Datenpunkte vom Interpolationsgraphen größer ist als der errechnete Fehler auf die Daten. Daraus lässt sich schließen, dass das Polynom dritten Grades den Datenverlauf nicht

optimal beschreibt. Ein Polynom höheren Grades würde die Datenpunkte vermutlich besser beschreiben. Da aber die Abweichung der Datenpunkte zum Interpolationsgraph kleiner als $0,1^{\circ}\text{C}$ ist, siehe Residuenplot in Abbildung 4.4, ist die angestrebte Genauigkeit gegeben. Ebenfalls in Abbildung 4.4 gut zu erkennen ist, dass die Fehler um Null streuen. Es ist kein strukturierter Verlauf der Streuung erkennbar, was darauf schließen lässt, dass keine weiteren signifikanten systematischen Fehler vorhanden sind.

4.2 Temperaturmessungen mit dem Proto 16

4.2.1 Positionierung der Sensoren

Die PT100-Sensoren werden direkt an den eingepackten Kristallen befestigt. Dies ermöglicht eine Temperaturüberwachung des Detektors. Ferner ist es möglich, Aussagen über Temperaturgradienten zu treffen. Um möglichst genau die Temperaturgradienten im Detektor zu bestimmen, wurden die Sensoren wie in Abbildung 4.5 positioniert.

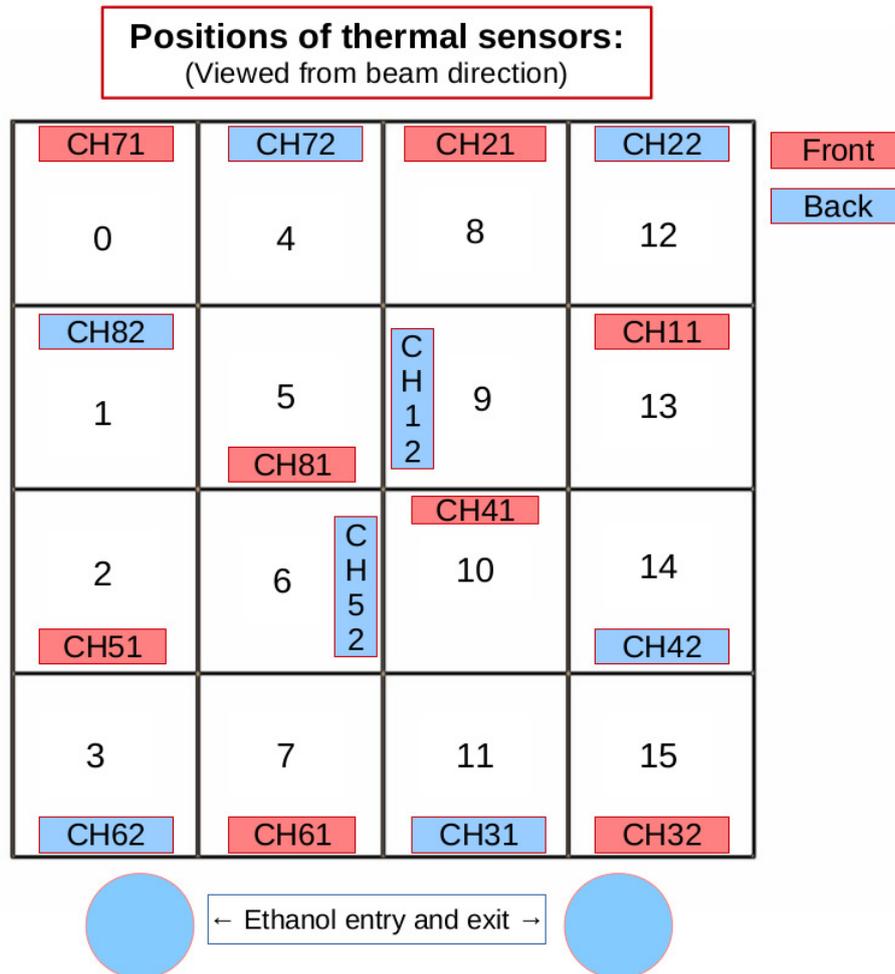


Abbildung 4.5: Platzierung der Temperatursensoren in der 4×4 -Alveole. „Front“ bezeichnet die Seite aus der bei der Strahlzeit der Elektronenstrahl kommt. Auf der Seite, die mit „Back“ bezeichnet ist, sind die APD, ASIC und Senderboards angeschlossen.

Bei der Positionierung der Temperatursensoren wird beachtet, dass möglichst viele Temperaurgradienten bestimmt werden können. Deshalb ist es wichtig, dass möglichst viele Randpunkte abgedeckt werden. 12 von den 16 Sensoren sind am Rand des Detektors positioniert. Durch diese Anordnung kann man in allen drei Raumrichtungen die Gradienten bestimmen. Außerdem ermöglicht diese Anordnung auch die Messung des Temperaturgradientens von einzelnen Kristallen. „Front“ Bezeichnet in dieser Anordnung immer die Seite, bei der

während der Strahlzeit der Strahl auf den Detektor trifft. Auf der Seite „Back“ sind die APD, ASIC und Senderboards angebracht.

4.2.2 Kühlungs- und Aufwärmvorgang

Nachdem der Prototyp komplett zusammen gebaut wurde, konnte die Kühlung angeschlossen werden und der Detektor wurde mit den neu kalibrierten Temperatursensoren erstmals kalt gefahren. Um den thermischen Stress auf die Kristalle gering zu halten, wird die Temperatur etappenweise bis auf -25°C heruntergefahren. Der Verlauf der Temperatur ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

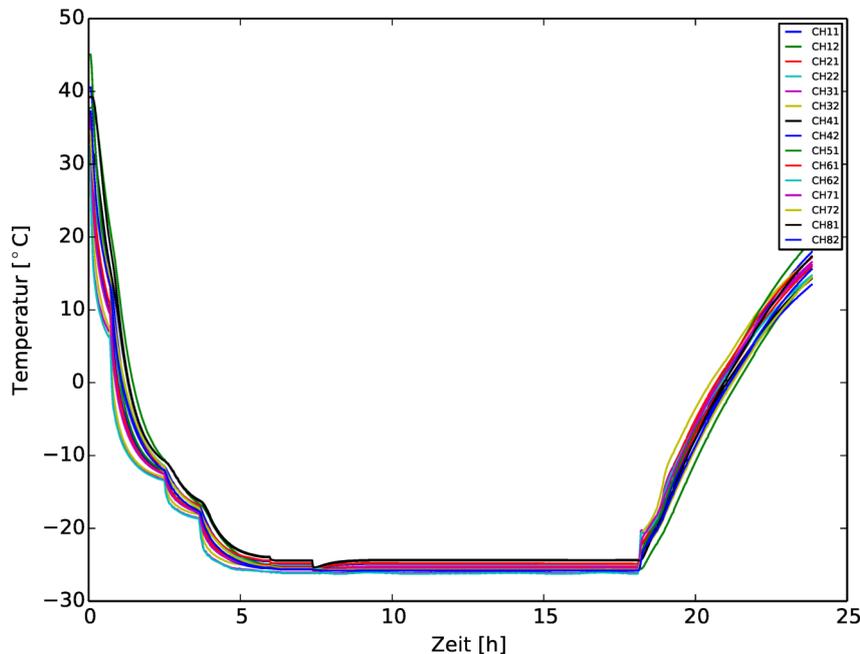


Abbildung 4.6: Mit den kalibrierten Sensoren gemessener Temperaturverlauf während des Kühlungs- und Aufwärmvorgangs.

Bei dem Justieren der Kugelfallen, siehe Kapitel 3.1, wurde Sensor CH52 beschädigt, sodass dessen Daten nicht verwendbar sind. Deshalb sind in Abbildung 4.6 die Temperaturen aller Sensoren außer CH52 zu sehen. Zur besseren Unterscheidbarkeit, wurden diese in verschiedenen Farben abgebildet. Gut zu erkennen ist, dass sich der Detektor ohne Probleme kalt fahren lässt. Das ist daran zu erkennen, dass die Sensoren gleichmäßig fallende Temperaturen messen. Die

kleinen Knicke im Verlauf bei circa drei und vier Stunden kommen daher, dass zu diesen Zeitpunkten die Solltemperatur der Kühlung herabgesetzt wurde. Also hat sich zu diesen Zeitpunkten die Temperatur des Kühlmittels abrupt geändert. Die Schwankungen zwischen der fünften und achten Stunde kommen daher, dass die Kühlung noch nicht stabil lief. Nachdem die Einstellungen an dem Kühlgerät angepasst wurden, konnte sich die Temperatur aber stabilisieren.

Um bessere Aussagen darüber zu treffen, wie sich die Temperatur im zeitlichen Verlauf entwickelt, ist in Abbildung 4.7 ein Ausschnitt des Temperaturverlaufs von der 10. bis zur 15. Stunde abgebildet.

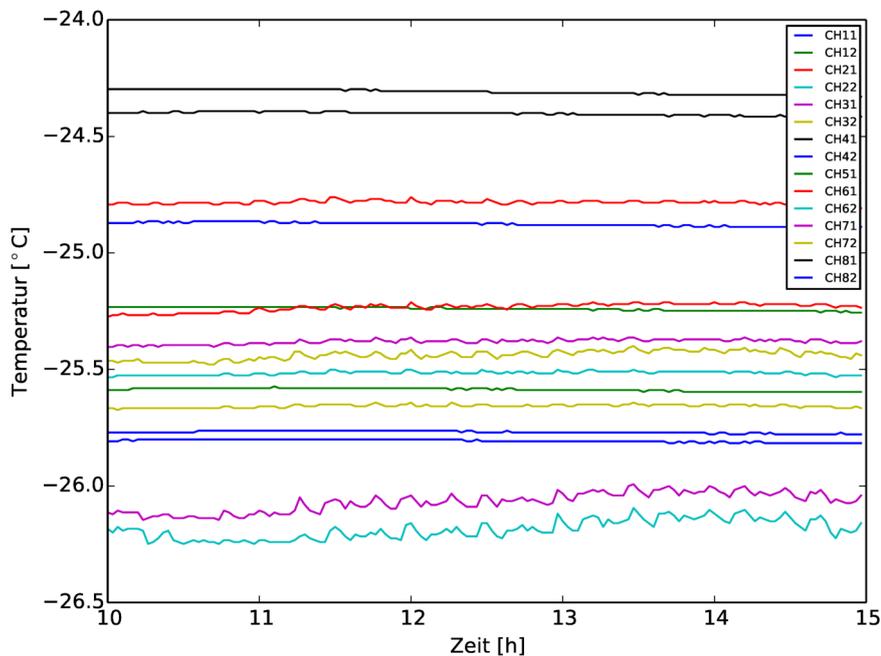


Abbildung 4.7: Der Plot zeigt einen Ausschnitt von Abbildung 4.6 bei der Solltemperatur.

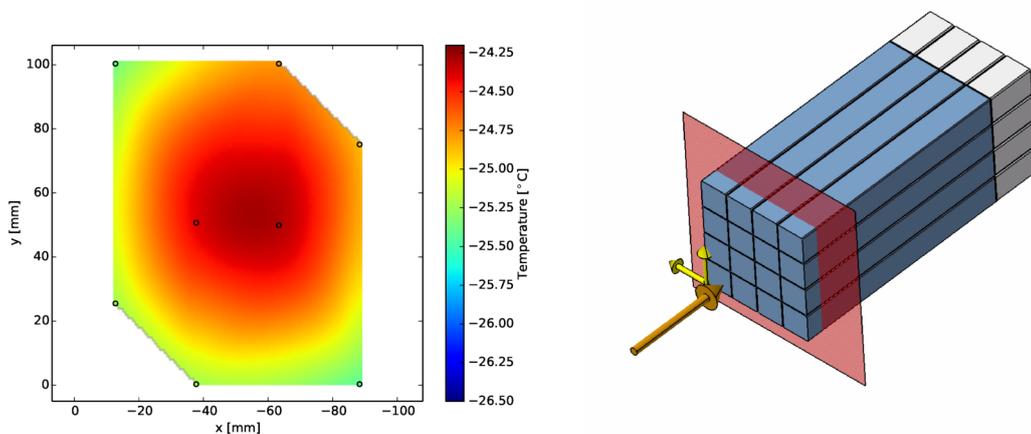
In oberer Abbildung ist gut zu sehen, dass die Temperatur der einzelnen Sensoren sehr stabil ist. Sie schwankt maximal um $0,2^{\circ}\text{C}$. Auffällig ist, dass die Sensoren CH31 und CH62 mit der niedrigsten Temperatur am meisten schwanken. Diese beiden Sensoren befinden sich direkt am Ein- und Ausgang der Ethanol-Kühlung. Sie spiegeln also die Schwankungen der Temperatur des Kühlmittels wider. CH81 und CH41 mit der höchsten Temperatur befinden sich mittig auf der Front-Seite. Die räumliche Temperaturverteilung wird im nächsten Kapitel

genauer untersucht.

4.2.3 Räumliche Temperaturverteilung in Proto16

In Abbildung 4.7 ist deutlich zu sehen, dass die Temperatur im Detektor nicht homogen ist, sondern vom Ort abhängt. Die Temperatur verschiedener Sensoren variiert bis zu 2°C von $-26,7^\circ\text{C}$ bis $-24,7^\circ\text{C}$. Dies hängt damit zusammen, dass die Kühlung nur außen verläuft und somit nicht an allen Stellen des Detektors die gleiche Kühlleistung erbringen kann.

Neben der zeitlichen Stabilität der Sensoren, ist auch die räumliche Temperaturverteilung im Prototyp wichtig. Hierzu wurde aus den Werten von Abbildung 4.7 für jeden Sensor der Mittelwert gebildet und Konturplots an verschiedenen Schnitten des Detektors vorgenommen. Dabei wurde die Interpolationsmethode „cubic splines“ verwendet. Diese Methode verwendet für die Interpolation stückweise stetige Polynome dritten Grades [Com16]. Die Positionen der Sensoren sind durch schwarze Kreise in den Plots gekennzeichnet. Alle Konturplots wurden mit gleichen Temperaturintervallen in der Farbskala ausgestattet, so dass die gleiche Farbe in den verschiedenen Plots auch die gleiche Temperatur repräsentiert.



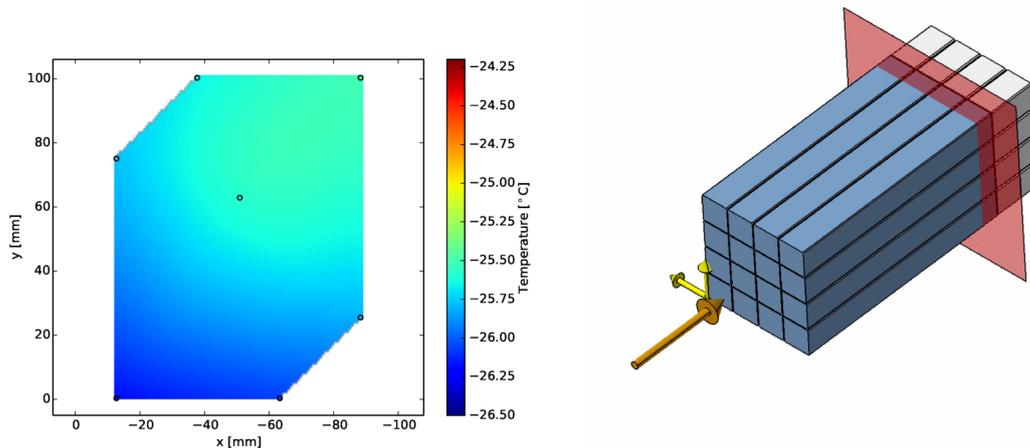
(a) Konturplot von dem Frontschnitt durch den Prototyp.

(b) Position des Schnittes

Abbildung 4.8: Frontschnitt durch den Prototyp.

Wie in Abbildung 4.8 zu sehen ist, nimmt die Temperatur in Richtung der äußeren Kristalle ab. Das liegt daran, dass die Kühlung nur um den Detektor

herum verläuft. Die CAD-Zeichnung zeigt die genaue Position des Schnittes im Detektor an. Auffällig ist, dass gerade Vorne die Ecken kühler sind, dies liegt daran, dass genau hier die Kühlrohre entlang laufen. Den Verlauf der Kühlrohre kann man in Abbildung 2.5 sehen.



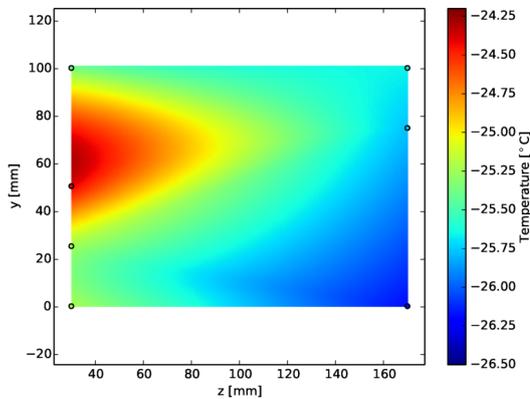
(a) Konturplot von dem hinteren Schnitt durch den Prototyp.

(b) Position des Schnittes.

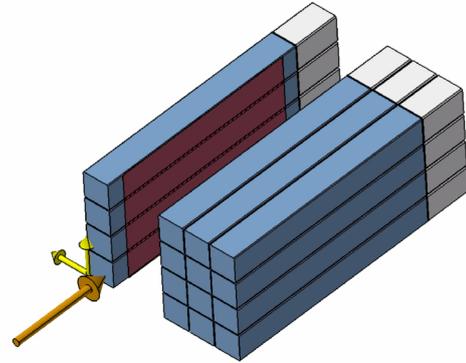
Abbildung 4.9: Hinterer Schnitt durch den Prototyp.

In Abbildung 4.9 ist gut zu erkennen, dass die Temperatur weitestgehend homogen ist. Die maximale Temperaturdifferenz ist kleiner als 1°C . Es ist lediglich unten etwas kühler als oben, was darauf zurück zu führen ist, dass unten die Ein- und Ausgänge der Kühlung sind, und somit unten etwas mehr Kühlrohr verläuft als oben.

Im Vergleich mit dem vorderen Schnitt ist der hintere Schnitt um 1°C bis 2°C kühler. Die Querschnitte 1 und 2 in Abbildung 4.10 und 4.11 zeigen dies nochmals sehr deutlich. Dies kann überraschend wirken, da man erwartet, dass die Front-End-Elektronik (ASIC und Senderboard), welche sich hinten am Detektor befindet, die Kristalle zusätzlich aufheizt. Aus diesen Temperaturmessungen ist aber zu erkennen, dass die Wärmeabfuhr der Elektronik suffizient ist.

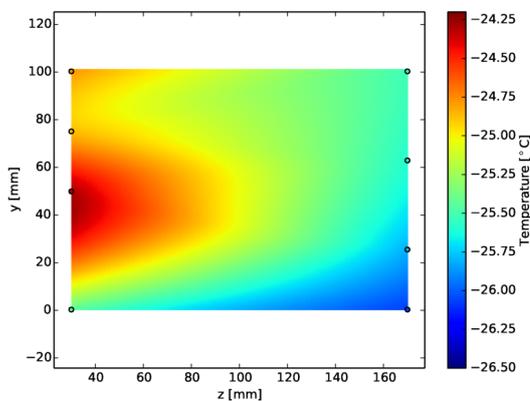


(a) Konturplot.

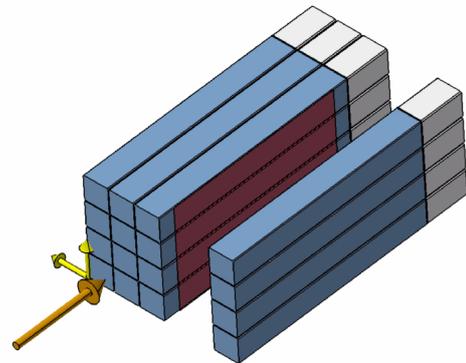


(b) Position des Schnittes.

Abbildung 4.10: Querschnitt 1 durch den Prototyp.



(a) Konturplot.



(b) Position des Schnittes.

Abbildung 4.11: Querschnitt 2 durch den Prototyp.

Eine mögliche Erklärung für den Temperaturunterschied von „Front“ und „Back“ ist, dass an der vorderen Seite des Detektors keine Kühlung verläuft. An der hinteren Seite sind die Kristalle aber über die Heatsinks der ASIC und über das Insert, welches fast vollständig aus Aluminium ist, an die Kühlung angekoppelt. Der Temperaturgradient deutet zusätzlich darauf hin, dass die Vakuuminisulations-Paneele (VIP) der Aluminiumbox nicht optimal funktionieren.

Kapitel 5

Charakterisierung der Avalanche Photodioden

In Proto16, wie später auch im \bar{P} ANDA elektromagnetischen Kalorimeter (im Barrel, der rückwärtigen Endkappe und in Teilen der Vorwärtsendkappe), werden zur Auslese des in den PbWO_4 erzeugten Szintillationslichtes Avalanche Photodioden (APD) verwendet. Diese zeichnen sich im Vergleich zu anderen Photodioden durch ihre Unempfindlichkeit gegenüber hohen magnetischen Feldern aus. Außerdem sind sie strahlungshart, das heißt durch Strahlung werden die APD in ihrer Funktion nicht beeinträchtigt oder beschädigt. [Col08]

Das Ziel in diesem Kapitel ist es über die Bestimmung der Kennlinien der APD deren Verstärkung M zu bestimmen. Um den Einfluss der APD-Verstärkung auf das gemessene Signal zu erläutern, wird hier genauer auf den Zusammenhang zwischen gemessenem Signal und deponierter Energie eingegangen. Die Höhe der gemessenen Signalpulse, U_{max} , ist proportional zur deponierten Energie im Kristall. Es gilt:

$$E = \frac{U_{max}}{LY \cdot A \cdot Q \cdot G \cdot M} \quad (5.1)$$

LY ist die Lichtausbeute des Kristalls, die von der Temperatur abhängt. $A = \frac{A_{APD}}{A_{Kristall}} = 0,16$ gibt die effektive Abdeckungsfläche der Kristall-Stirnseite mit den APD an. Q bezeichnet die Quanteneffizienz, die bei den verwendeten APD bei 0,7 liegt. G ist die Verstärkung der ASIC.

Die Verstärkung M der APD weist eine starke Abhängigkeit von der angelegten Bias-Spannung auf. Genau diese Abhängigkeit wird in diesem Kapitel bestimmt, um die APD im optimalen Arbeitsbereich zu betreiben.

5.1 Funktionsweise der Avalanche Photodiode

Die APD basieren auf dem inneren photoelektrischen Effekt und dem Avalanche-Effekt (Lawinendurchbruch). Sie bestehen auf einem schichtweise dotierten Silizium-Halbleiter. Wie in Abbildung 5.1 zu sehen, ist der Halbleiter in Schichten mit $p^+ - i - p - n^+$ aufgebaut. Das + steht hier für eine starke Dotierung. Die schwach positiv dotierte intrinsische i -Schicht dient als Absorptionsgebiet. Durch Anlegen der Sperrspannung (negativ an p^+ und positiv an n^+) wird die Raumladungszone zusätzlich vergrößert.

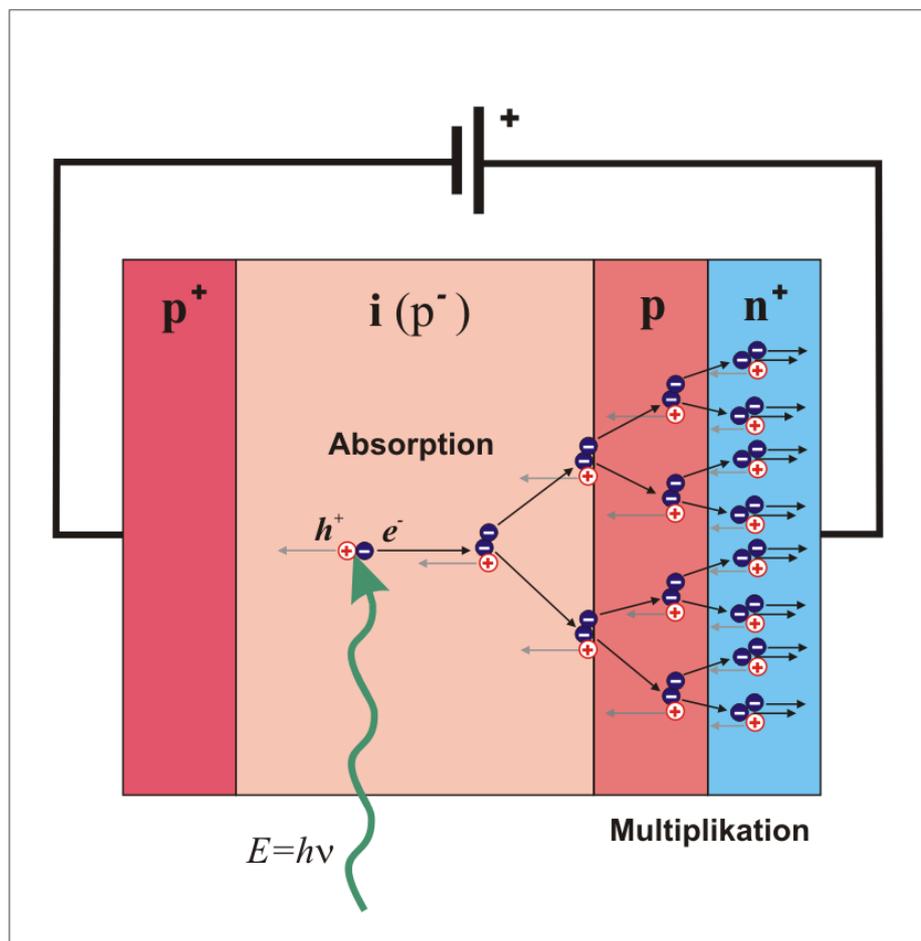


Abbildung 5.1: Schematischer Aufbau einer Silizium Avalanche Photodiode. Trifft ein Photon mit ausreichend hoher Energie in den Absorptionsbereich, wird ein Elektron-Loch-Paar erzeugt. Durch die angelegte Sperrspannung und die entsprechenden Dotierungen werden viele weitere Ladungsträger erzeugt. Es kommt zu einem Lawineneffekt. [Kir16]

Trifft nun ein Photon mit ausreichender Energie, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, auf die Absorptionsschicht, wird dort ein Elektron-Loch-Paar erzeugt. Durch die angelegte Spannung driften die negativ geladenen Teilchen in Richtung Anode in die Multiplikationszone. Die Multiplikationszone wird durch die Raumladungszone des $p-n^+$ -Übergangs erzeugt. Wegen des großen elektrischen Feldes, werden die Elektronen dort beschleunigt. Durch Stöße werden weitere Atome ionisiert und es entstehen Sekundärladungsträger. Diese werden dann ebenfalls beschleunigt, und erzeugen ihrerseits neue Elektron-Loch-Paare. Dieser Effekt ist der sogenannte Avalanche- oder auch Lawinen-Effekt und führt zu einer Verstärkung der primären Ladung. Dadurch sind die erzeugten Strompulse einfacher zu messen.

Mit dieser Methode können große Verstärkungen erreicht werden. Für die rückwärtige Endkappe als auch für den Proto16 werden Verstärkungen von $M = 150 - 500$ benutzt [Nol14]. Die in Proto16 verwendeten APD haben unterschiedliche Kennlinien. Diese müssen für jede APD ermittelt werden, um die Spannung zu errechnen, die für die gewünschte Verstärkung M eingestellt werden müssen.

5.2 Bestimmung der APD-Kennlinien

5.2.1 Datennahme

In der Vorbereitung der Proto16 Teststrahlzeit lagen keine Charakterisierungen der verwendeten APD von dem PANDA-APD-Lab vor. Aus diesem Grund musste die Kalibrierung selbst vorgenommen werden. Die Kalibrierung erfolgt pro Kristall-Channel direkt mit Proto16. An jedem Kristall sind zwei APD, die zur Unterscheidung mit 0 und 1 gekennzeichnet sind, angebracht. Es werden also 32 APD charakterisiert.

Über den Lichtpuls werden für jeden Kristall Lichtpulse mit individueller Intensität eingekoppelt. Um das Signal auf den dynamischen Bereich der Ausleselektronik anzupassen, wird die Diodenspannung der LED des Lichtpulsers so eingestellt, dass das Signal für jede APD bei einer angelegten Spannung von 100 V gut zu erkennen ist und kurz vor der Durchbruchspannung noch im ADC Eingangsbereich liegt.

Zur Aufnahme der Pulse wird die Datenerfassung über den Lichtpuls mit einer Frequenz von ~ 3 kHz getriggert.

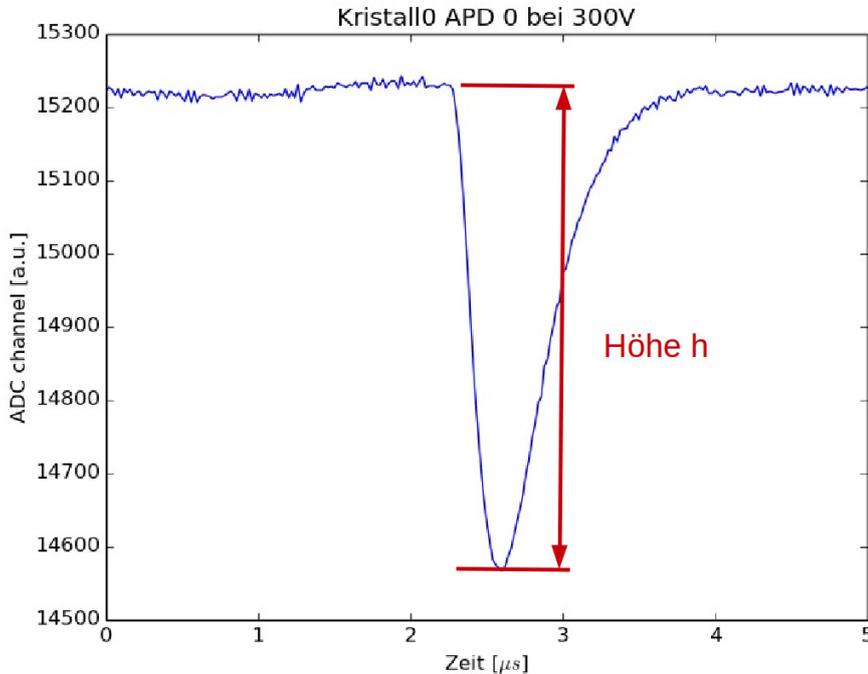


Abbildung 5.2: Typischer Puls eines Lichtpulsereignisses. Zu sehen ist das Signal der kleinen Verstärkung des ASIC von Kristall 0 APD 0. An der APD liegt eine Hochspannung von 200 V an. Das Licht wird von dem Lichtpulsereignis eingekoppelt.

Die Pulshöhe ist in Abbildung 5.2 eingezeichnet. Um die Höhe der Pulse genau zu extrahieren, wird das Rohsignal der APD mit einem speziellen Verfahren gefiltert. Die Pulshöhe ist proportional zur deponierten Energie, speziell in diesem Fall also proportional zur zu messenden Lichtmenge.

Die Verteilung der aufgenommenen Pulshöhen werden für jede aufgenommene Spannung und jede APD in einem Histogramm dargestellt. Für jede Spannung wurden circa 20 000 Events aufgenommen.

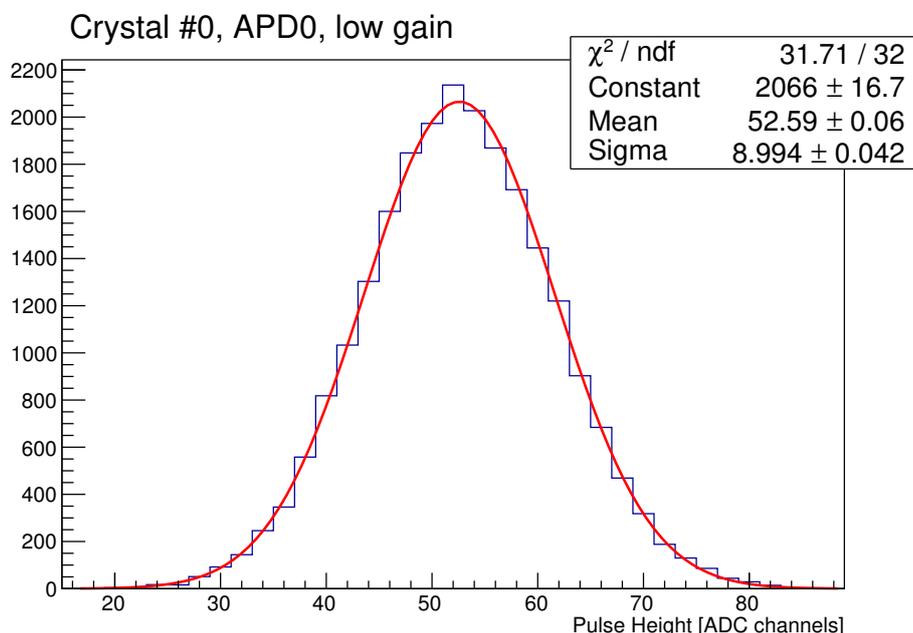


Abbildung 5.3: Das Histogramm stellt die Verteilung der gemessenen Pulshöhen der APD 0 von Kristall 0 dar. Es wurde das Signal der kleinen Verstärkung des ASIC-Vorverstärkers verwendet. An der APD liegt eine Bias-Spannung von 160 V an. Durch den Gaußfit, wird die Höhe des Pulses mit Fehler bestimmt.

Für LED-Lichtpulse entspricht die Verteilung der Pulshöhen einer Gaußkurve. Für die verschiedenen Biasspannungen wird also ein Gaußfit an die Histogramme angepasst und jeweils Mittelwert μ und Standardabweichung σ mit Fehler $\Delta\mu$ und $\Delta\sigma$ bestimmt. Bis hierhin wurden die Daten von einem vorhandenen Root-basierten Analyse-Framework voranalysiert.

5.2.2 Bestimmung der Kennlinie mit den voranalysierten Daten

Die Parameter der Gaußfits werden zur Bestimmung der APD-Kennlinien benutzt. Da die APD unterschiedliche Charakteristika haben, geraten manche Signale bei hohen Spannungen über 385 V in Sättigung. Diese Daten können nicht zur Anpassung der Kennlinie verwendet werden und müssen daher vor der Anpassung selektiert werden. Dies geschieht über die stückweise numerische Ableitung von $\frac{d\mu}{dU}$. Sobald die zweite Ableitung negativ ist, werden die Daten herausgenommen und nicht für die Analyse weiterverwendet.

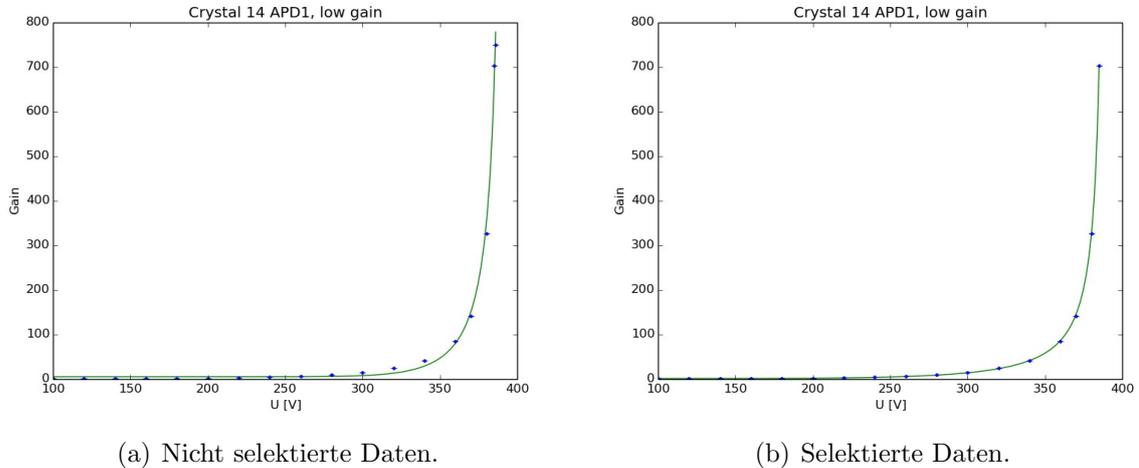


Abbildung 5.4: Aufgenommene Kennlinie von APD 1 an Kristall 14.

In Abbildung 5.4, insbesondere im Bereich von 300 V bis 350 V, ist gut zu erkennen, dass die ausgewählte Funktion die selektierten Daten besser beschreibt als die nicht selektierten. Dies liegt daran, dass der letzte Datenpunkt für die gezeigte APD in Abbildung 5.4 (a) zu nahe an der Durchbruchsspannung $U_{br} = 389,67 \pm 0,05$ aufgenommen wurde.

Geplottet wird die Verstärkung gegen die Spannung. Durch die Normierung der jeweiligen Mittelwerte μ bei gegebener Spannung auf den Mittelwert bei der Spannung von 100 V wird die Verstärkung M ermittelt und eine relative Kalibrierung vorgenommen.

Die Funktion:

$$f(U) = \frac{A}{1 - \left(\frac{U}{U_{br}}\right)^k} + C \quad (5.2)$$

wird an die Daten angepasst. Hierbei handelt es sich um eine phänomenologische Funktion, die nicht theoretisch herleitbar ist, aber das Verhältnis von Verstärkung zur angelegten Spannung am besten beschreibt. Diese Funktion wird ebenfalls von der PANDA-Kollaboration zur Bestimmung der APD-Kennlinien benutzt. Sie ist so konstruiert, dass man an ihren Parametern die Durchbruchspannung U_{br} der APD ablesen kann. Die ermittelten Werte der phänomenologischen Funktion sind im Anhang A.2 zu finden.

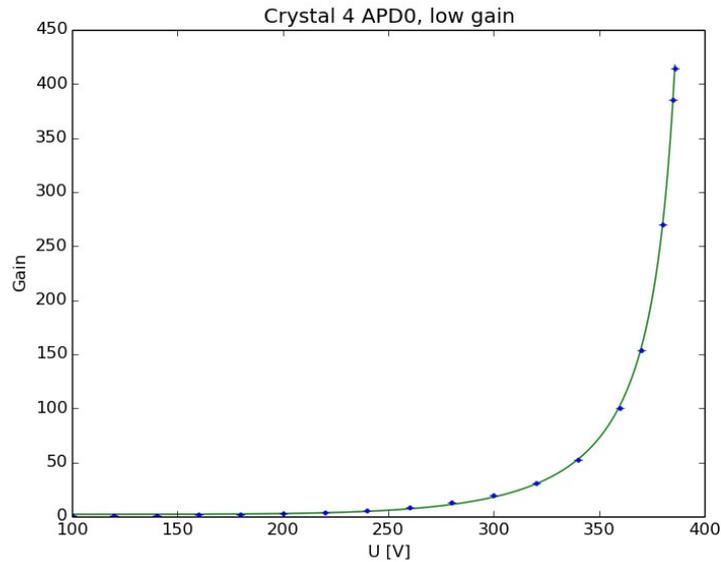


Abbildung 5.5: APD-Kennlinie von APD 0 an Kristall 4. Die Parameter der verwendeten Funktion 5.2 sind: $A = 114\,13 \pm 11\,43$, $U_{br} = 398\,94 \pm 0\,36$, $k = 7\,36 \pm 0\,49$ und $C = -112\,08 \pm 11\,05$.

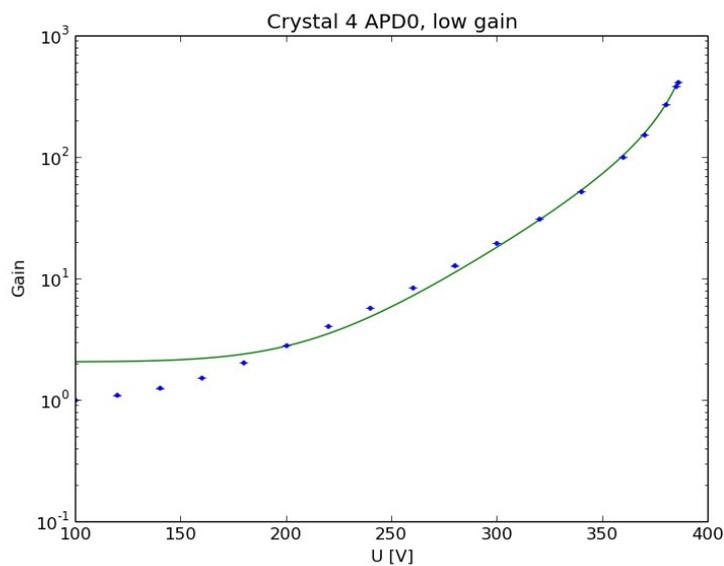


Abbildung 5.6: Zu sehen ist der Logarithmische Plot der APD-Kennlinie von APD 0 an Kristall 4.

Wie in oberer Abbildung zu erkennen ist, kann die Funktion den Verlauf der Daten für kleine Spannungen nicht ideal beschreiben. Dies liegt daran, dass die Interpolationsfunktion für kontinuierlich eingestrahktes Licht ist. Für diese Analyse wurde aus technischen Gründen aber gepulstes Licht verwendet. Unter kontinuierlich eingestrahktem Licht versteht man, dass das Licht zu jeder Zeit die gleiche Intensität I besitzt. Bei gepulstem Licht hingegen gilt: $\frac{dI}{dt} \neq 0$. Um die Abweichungen der Daten von der Fitfunktion genauer zu untersuchen werden die relativen Residuenplots betrachtet.

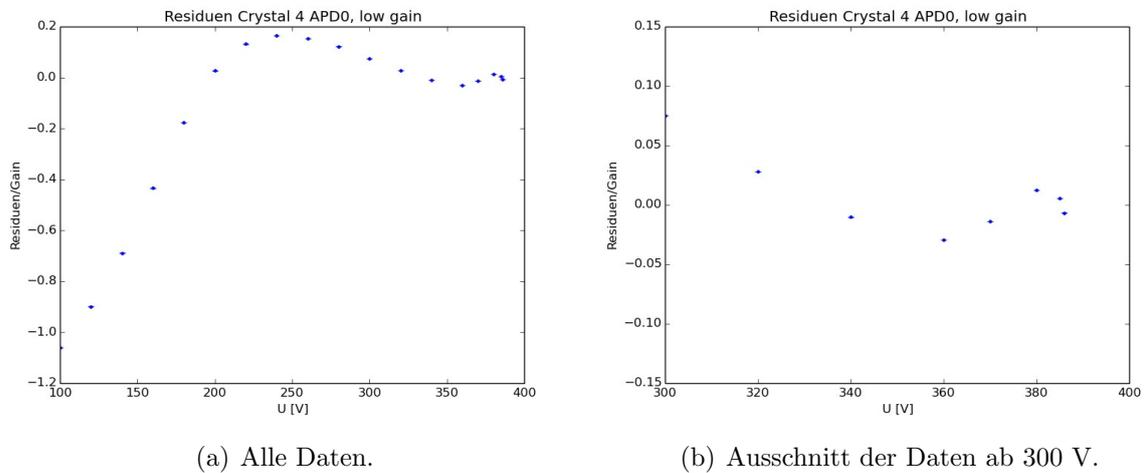


Abbildung 5.7: Relativer Residuenplot von APD 0 an Kristall 4. Hier ist die Differenz der ermittelten Verstärkung und der Fitfunktion $f(U)$ geteilt durch die Verstärkung gegen die Spannung aufgetragen.

Abbildung 5.7 (a) zeigt deutlich, dass die Funktion $f(U)$ 5.2 den Datenverlauf nicht gut beschreibt. Insbesondere für Spannungen unter 300 V ist ein strukturierter Verlauf des Residuenplots erkennbar. Außerdem ist die prozentuale Abweichung der Fitfunktion zu den Messdaten sehr groß, bei unter 150 V sogar über 50%. Dies zeigt, dass die Funktion für kleine Spannungen nicht verwendet werden kann.

Bei Spannungen über 340 V, siehe Abbildung 5.7 (b), sieht man, dass die Abweichungen der Daten vom Fit keinen strukturierten Verlauf haben, sondern um Null streuen. Außerdem weichen die Werte der Fitfunktion maximal um 5% von den Messdaten ab. Das heißt für große Spannungen kann das Fitergebnis für die „Interpolation“ zwischen den Messdaten verwendet werden. Für die Strahlzeit werden nur Verstärkungen von $M = 150$ und $M = 400$, das heißt Spannungen ab 350 V, benutzt. In diesem Bereich stellt die phänomenologische Funktion die

Daten gut dar. Deshalb ist die verwendete Funktion für unsere Zwecke ausreichend.

Bei der gezeigten APD ergibt sich für eine Verstärkung von $M = 400$ eine Spannung von $U = 385,51$ V.

Aus den Parametern der phänomenologischen Funktion, siehe Tabelle A.2, wurden für die Strahlzeit die Spannungen für Verstärkungen von $M = 150$ und $M = 400$ ermittelt. Diese Verstärkungen sind in Tabelle 5.1 angegeben:

Kristall	APD	U_{bias} [V]	
		Gain 150	Gain 400
0	0	367.922	384.921
0	1	367.239	384.688
1	0	368.556	387.192
1	1	368.493	386.530
2	0	369.889	386.443
2	1	368.658	385.810
3	0	371.283	387.606
3	1	368.431	385.894
4	0	369.128	385.509
4	1	367.225	384.192
5	0	367.534	384.811
5	1	368.755	385.991
6	0	366.587	384.199
6	1	369.092	385.041
7	0	368.244	384.720
7	1	368.822	384.427
8	0	366.531	384.739
8	1	366.878	384.757
9	0	367.206	386.212
9	1	368.353	386.491
10	0	366.807	384.405
10	1	368.053	384.581
11	0	368.491	385.982
11	1	368.384	385.903
12	0	366.757	383.336
12	1	367.454	383.460
13	0	367.555	383.295
13	1	367.705	382.656
14	0	370.161	382.407
14	1	370.593	381.698
15	0	367.766	383.184
15	1	366.910	382.108

Tabelle 5.1: Ermittelte Bias-Spannungen aus der phänomenologischen Funktion 5.2 für Verstärkungen von 150 und 400.

Kapitel 6

Fazit

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit dem Prototyp für die rückwärtige Endkappe des elektromagnetischen Kalorimeters des PANDA-Experiments an FAIR. Dieser Prototyp, Proto16, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit für eine Teststrahlzeit am Mainzer Mikrotron (MAMI) erfolgreich vorbereitet.

Zuerst galt es, den vorhandenen Proto16 von Grund auf aufzubauen. Hierbei wurden zwei Neuerungen vorgenommen. Durch die erste Neuerung, nämlich dem Benutzen eines optischen Fettes zwischen APD und Kristall, konnten weitere Beschädigung der Kristalle durch die Keramikhülle der APD verhindert werden. Es gilt noch zu untersuchen, ob das optische Fett als Kontakt zwischen APD und Kristall den bisher geplanten Kleber in der BWEC ersetzen kann. Die zweite Neuerung ist die Senderkartenabschirmung der Front-End-Elektronik. Diese verhindert nicht nur elektromagnetische Störeinflüsse, sondern erleichtert auch die Kabelführung des Prototyps.

Um die Temperaturhomogenität des Prototyps zu messen, wurden in dieser Bachelorarbeit 16 speziell für die BWEC entwickelte Temperatursensoren zwischen -30°C und -15°C auf $0,1^{\circ}\text{C}$ genau kalibriert. Diese Sensoren wurden in den Detektor eingebaut. Bei einer Temperaturstudie zeigte sich, dass der zeitliche Verlauf der Temperatur weitestgehend konstant ist. Die größten Schwankungen von $0,2^{\circ}\text{C}$ waren an dem Ein- und Ausgang der Kühlung zu verzeichnen. Um bessere Aussagen über die räumliche Temperaturverteilung machen zu können, wurden zusätzlich Konturplots von vier verschiedenen Schnitten durch Proto16 angefertigt. Diese zeigten, dass die „Front“ Seite um 1°C bis 2°C wärmer ist als die „Back“ Seite. Das liegt daran, dass der Proto16 nicht an allen Seiten gleich gekühlt wird. Um das einseitige Erwärmen des Detektors zu verhindern, sollte das Kühlverfahren und oder die Isolation verbessert werden.

Für die Teststrahlzeit im Mai 2016 am Mainzer Mikrotron wurden im Rahmen dieser Bachelorarbeit die APD des Proto16 charakterisiert. Dies geschieht durch die Bestimmung der Kennlinien aller APD mit einer phänomenologischen

Funktion, welche auch von dem $\overline{\text{PANDA}}$ -APD-Lab verwendet wird. Anhand der Parameter dieser Funktion kann die angelegte Bias-Spannung an den APD ermittelt werden um eine bestimmte Verstärkung zu erreichen. Mit den errechneten Parametern der phänomenologischen Funktion wurden während der Strahlzeit gute Ergebnisse erzielt. Trotzdem zeigt Kapitel 5.2.2, dass nach einer Funktion gesucht werden muss, die die Daten der Kennlinie für eine gepulste Zeitstruktur der APD Belichtung besser beschreibt.

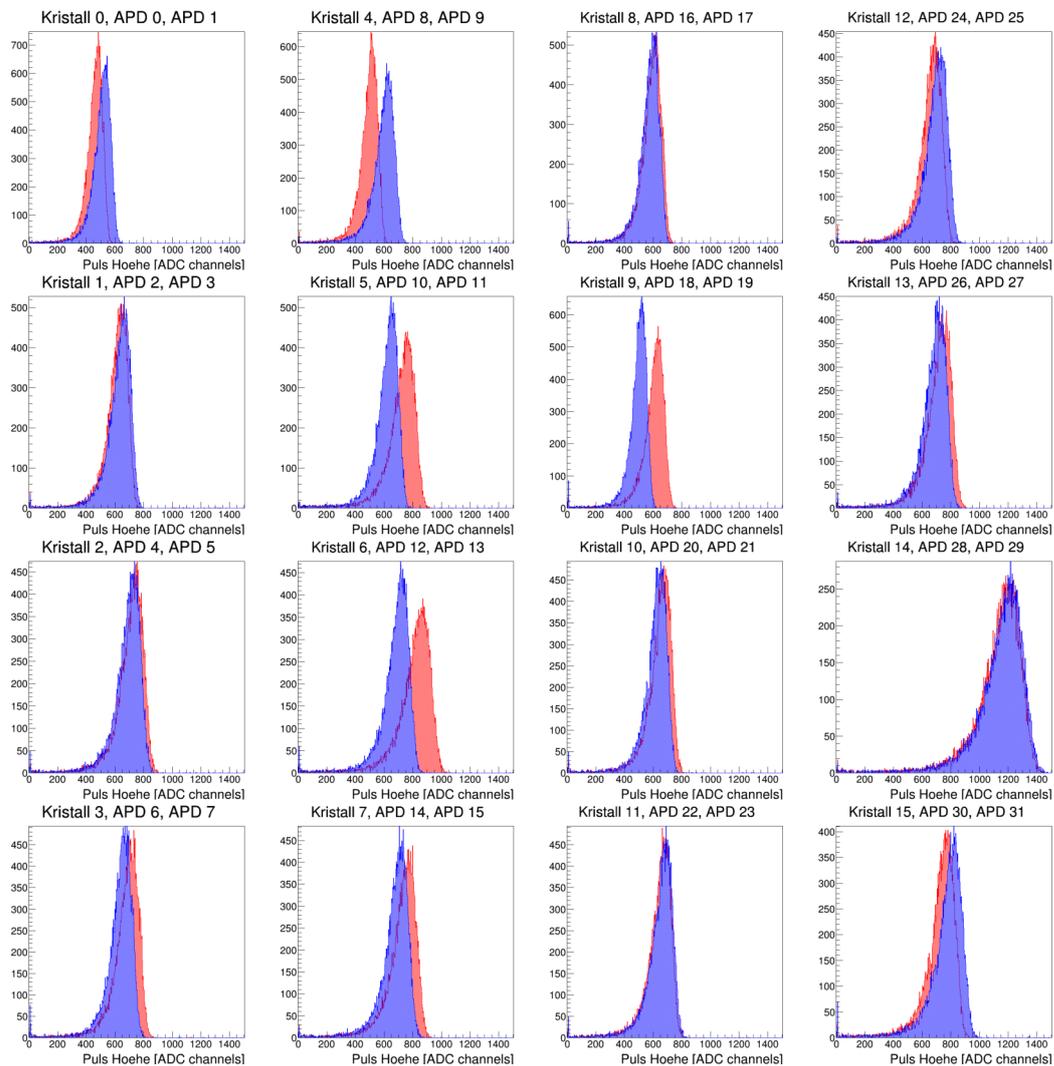


Abbildung 6.1: Die Single APD Spektren bei zentralem Einschuss eines Elektronenstrahles mit einer Energie von 600 MeV. Die roten Histogramme stellen jeweils die geraden und die blauen die ungeraden APD-Nummern dar. Die APD haben eine Verstärkung von $M = 150$.

Zur Zeit der Abgabe ist die Stahlzeit gerade eine Woche vorbei. Trotzdem sollen hier als Beispiel die „Single APD Spektren“ bei zentralem Einschuss des Elektronenstrahles mit einer Energie von 600 MeV gezeigt werden. Die APD wurden auf eine Verstärkung von 150 eingestellt. Man sieht, dass in den meisten Fällen die Spektren gut übereinander liegen. Dies war eines der Ziele der APD Charakterisierung.

Aus dieser Arbeit lässt sich schließen, dass die verwendeten Komponenten und Techniken des Prototyps soweit entwickelt sind, dass deren Skalierung zur finalen rückwärtigen Endkappe des $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Kalorimeters nicht mehr viel im Weg steht. Nichtsdestotrotz hat diese Bachelorarbeit aber auch gezeigt, wo noch Verbesserungsbedarf besteht. Auch diese Erkenntnisse sind Meilensteine auf dem Weg in Richtung $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment.

Literaturverzeichnis

- [Col08] PANDA Collaboration. Technical Design Report for: PANDA Electromagnetic Calorimeter. *Technical Design Report*, 2008.
- [Com16] The Scipy Community. Interpolation. <http://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/tutorial/interpolate.html>, May 2016.
- [Csa11] Anikó Csapó. Kalibrierung von Temperatursensoren für das PANDA elektromagnetische Kalorimeter. *Bachelorarbeit*, 2011.
- [Kir16] Kirnehkrib. Avalanche-Photodiode. https://de.wikipedia.org/wiki/Avalanche-Photodiode#/media/File:APD2_German.png, May 2016.
- [Nol14] Oliver Noll. Prototypentwicklung für die rückwärtige Endkappe des PANDA-Kalorimeters. *Masterarbeit*, 2014.
- [PAN16] PANDA. Das Experiment PANDA. <https://panda.gsi.de/oldwww/>, May 2016.

Anhang A

Anhang

A.1 Temperaturmessung im Prototyp

A.1.1 Datenaufnahme-Algorithmus für die Sensorkalibration

```
2 #####
3 #                               Temperature Measurement for Calibration #
4 #                               Author: Sahra Wolff #
5 #                               April, 2016 #
6 #####

8 import sys
9 import os
10 import time
11 import datetime
12 import time
13 import numpy as np
14 import serial
15 import math

18 #Initialize THMP
19 os.system("caput PANDA:EMC:THMP:1792:TriggerAdcBuffer.PROC 1")
20 os.system("caput PANDA:EMC:THMP:1792:TriggerAdcBuffer.SCAN \"1 second\")

23 #Initialize AGILENT
24 ser = serial.Serial(port='/dev/ttyS0',baudrate=9600,parity=serial.PARITY_ODD
25 ,bytesize=serial.SEVENBITS)
26 ser.isOpen()

28 #Temperature PV handling
29 class TSENSOR:
30     def __init__(self, tid):
31         """ this is the doc"""
32         self.TID = tid

34     def chID(self):
```

```

35         return self.TID

37     def temp(self):
38         return os.popen("caget "+PANDA:EMC:TEMP:"+str(self.TID)+":Tmom").readline().split()[1]

40     def raw(self):
41         return os.popen("caget "+PANDA:EMC:TEMP:"+str(self.TID)+":Traw").readline().split()[1]

45 class TMAIN:
46     def __init__(self, tid):
47         """ this is the doc"""
48         self.TID = tid

50     def chID(self):
51         return self.TID

53     def raw(self):
54         ser.write("MEAS:TEMP? RTD, (@"+str(self.TID)+")\r\n")
55         out = ''
56         time.sleep(0.5)
57         while ser.inWaiting() > 0:
58             out += ser.read(1)
59         return out

62 print '\n sit down, drink a coffee, enjoy yourself.'

65 #Main Sensor
66 main = TMAIN(110)

68 #Sensors
69 CH11 = TSENSOR(11)
70 CH12 = TSENSOR(12)
71 CH21 = TSENSOR(21)
72 CH22 = TSENSOR(22)
73 CH31 = TSENSOR(31)
74 CH32 = TSENSOR(32)
75 CH41 = TSENSOR(41)
76 CH42 = TSENSOR(42)
77 CH51 = TSENSOR(51)
78 CH52 = TSENSOR(52)
79 CH61 = TSENSOR(61)
80 CH62 = TSENSOR(62)
81 CH71 = TSENSOR(71)
82 CH72 = TSENSOR(72)
83 CH81 = TSENSOR(81)
84 CH82 = TSENSOR(82)

87 LIST = [main, CH11, CH12, CH21, CH22, CH31, CH32, CH41, CH42, CH51, CH52, CH61, CH62, CH71, CH72, CH81, CH82]

90 #temperature stability test

92 #####
93 #the set teperature (needs to be modified if freezer temperature was changed) #
94 #Tset = -12
95 #
96 #####

```

```
97 #the known temperature offset
98 offset = -3.1
99 #the expected equilibrium temperature measured by the AGILENT module
100 Texp = Tset + offset
101 #the accepted temperature interval
102 dT = 0.2
103 #limits
104 Tlow = Texp - dT
105 Thigh = Texp + dT

107 #print Texp, Tlow, Thigh

109 a = 10000
110 d = 10
111 while (d > 0.004) or (a > Thigh) or (a < Tlow):
112     tap = []
113     for k in range(10):
114         top = main.raw()
115         tap.append(float(top))
116         time.sleep(10)
117     a = np.mean(tap)
118     d = np.std(tap)
119     print a,d

121 print '\n start measurement...'

124 # x times measurement with 10sec sleep
125 x = 20
126 allvalues = []
127 for i in range(int(x)):
128     for j in range(len(LIST)):
129         allvalues.append(float(LIST[j].raw()))
130     time.sleep(5)

134 # creating the mean-value and standard deviation in FINAL
135 FINAL = []
136 for j in range(len(LIST)):
137     new = list()
138     for i in range(int(x)):
139         new.append(allvalues[j+i*len(LIST)])
140     FINAL.append(np.mean(new))
141     FINAL.append(np.std(new)/math.sqrt(x))

145 #write file
146 Tint = round(float(FINAL[0]),2)
147 output = open('output/calib_'+str(Tint)+'.txt', 'w')
148 #~ output = open('calib_'+str(Tint)+'.txt', 'w')
149 #~ output = open('output/dummy.txt', 'w')

152 #Header
153 for i in range(len(LIST)):
154     output.write('CH'+str(LIST[i].chID())+' dCH'+str(LIST[i].chID())+' ')

156 output.write('\n')
```

```

159 #Data
160 #~ output.write(str(T))
161 for i in range(len(FINAL)):
162     output.write(" "+str(FINAL[i]))

165 #Email notification
166 os.system("echo \"stand up, stop drinking coffee, stop enjoying yourself ;)\\"
167 | mail -s \"Fertischh!!!\" wolff.sahra@googlemail.com")
168 os.system("echo \"stand up, stop drinking coffee, stop enjoying yourself ;)\\"
169 | mail -s \"Fertischh!!!\" onoll@students.uni-mainz.de")

```

A.1.2 Kalibration der Temperatursensoren

Die Kalibrationskurven aller Temperatursensoren

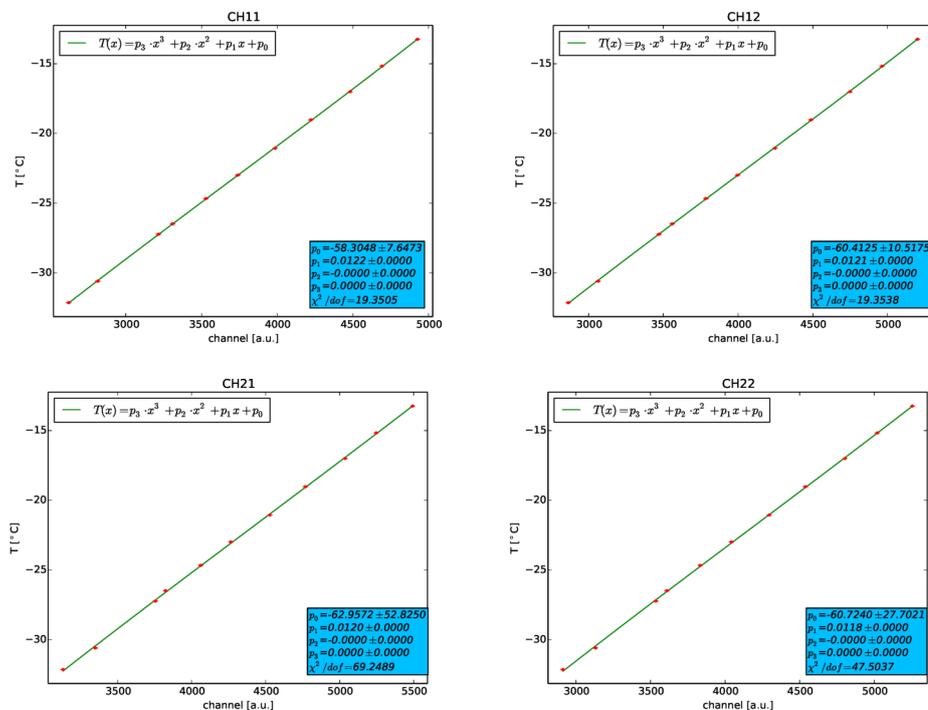


Abbildung A.1:

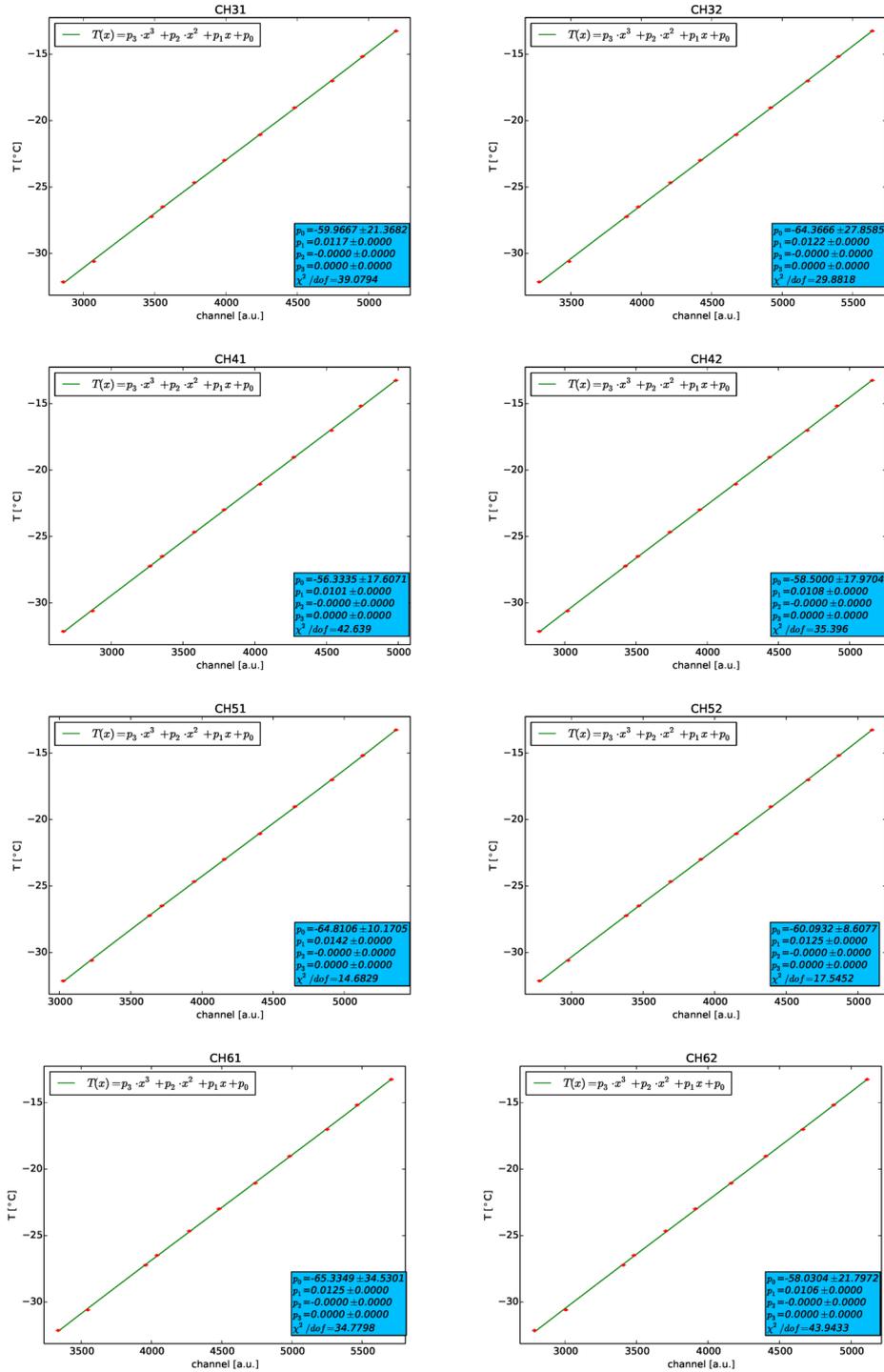


Abbildung A.2:

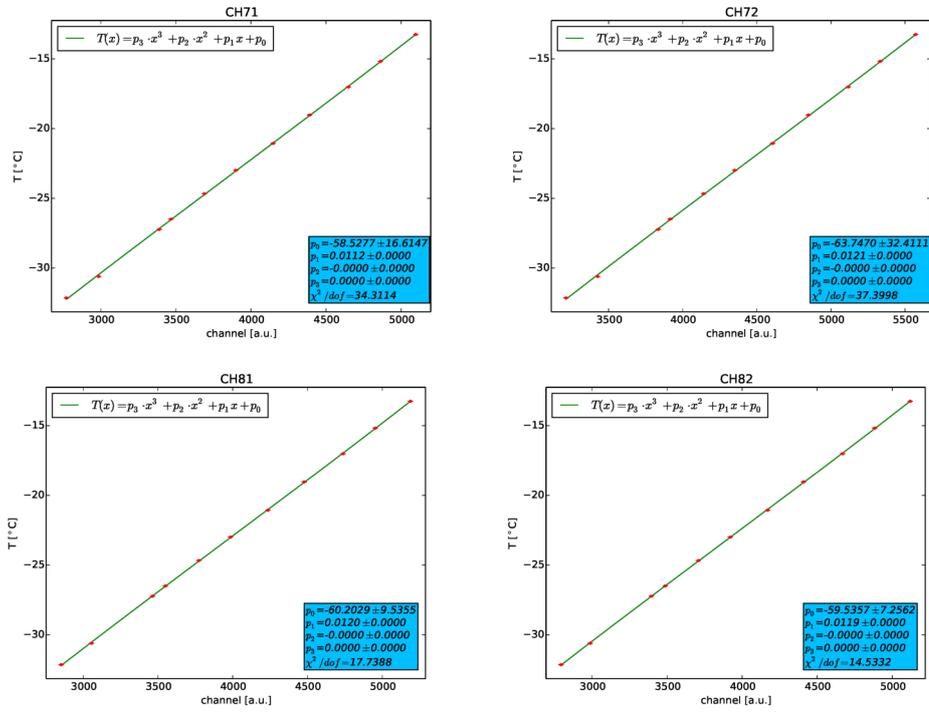


Abbildung A.3:

Die Residuenplots aller Temperatursensoren

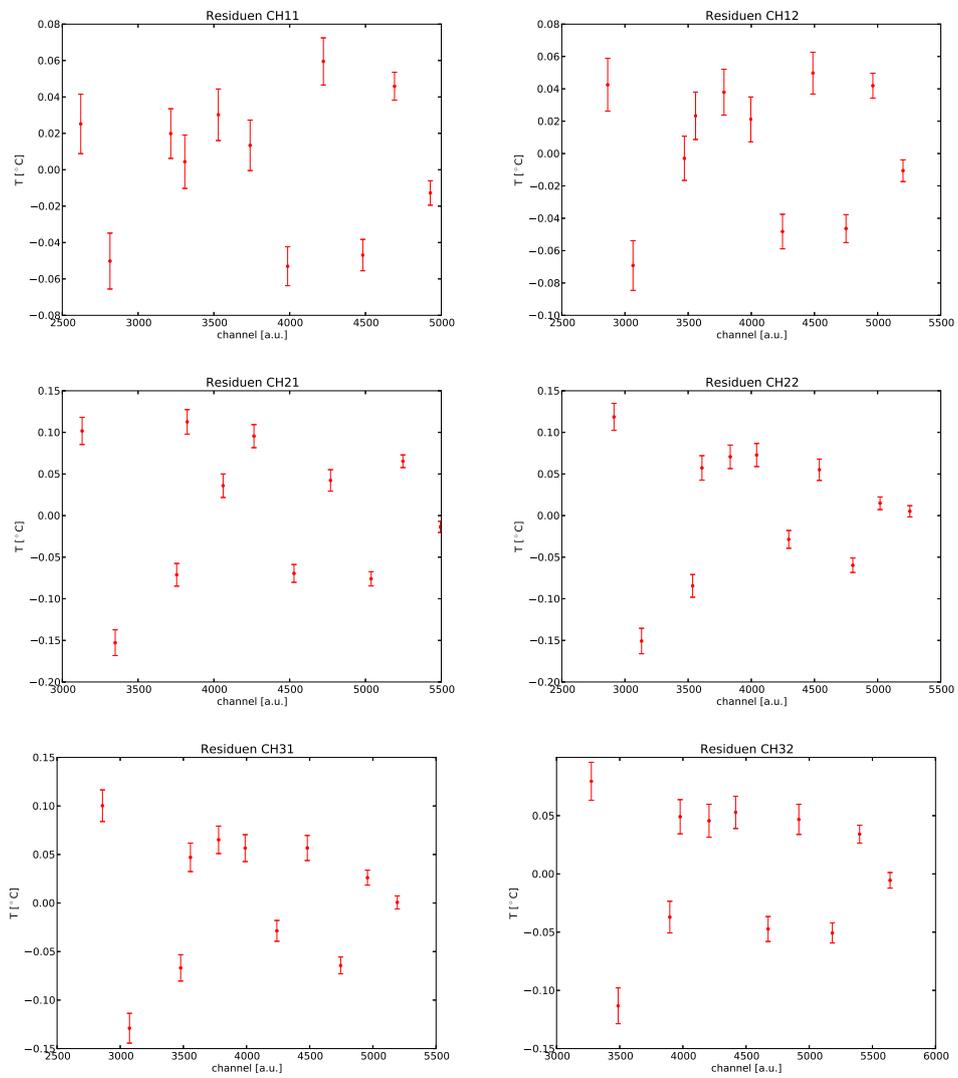


Abbildung A.4:

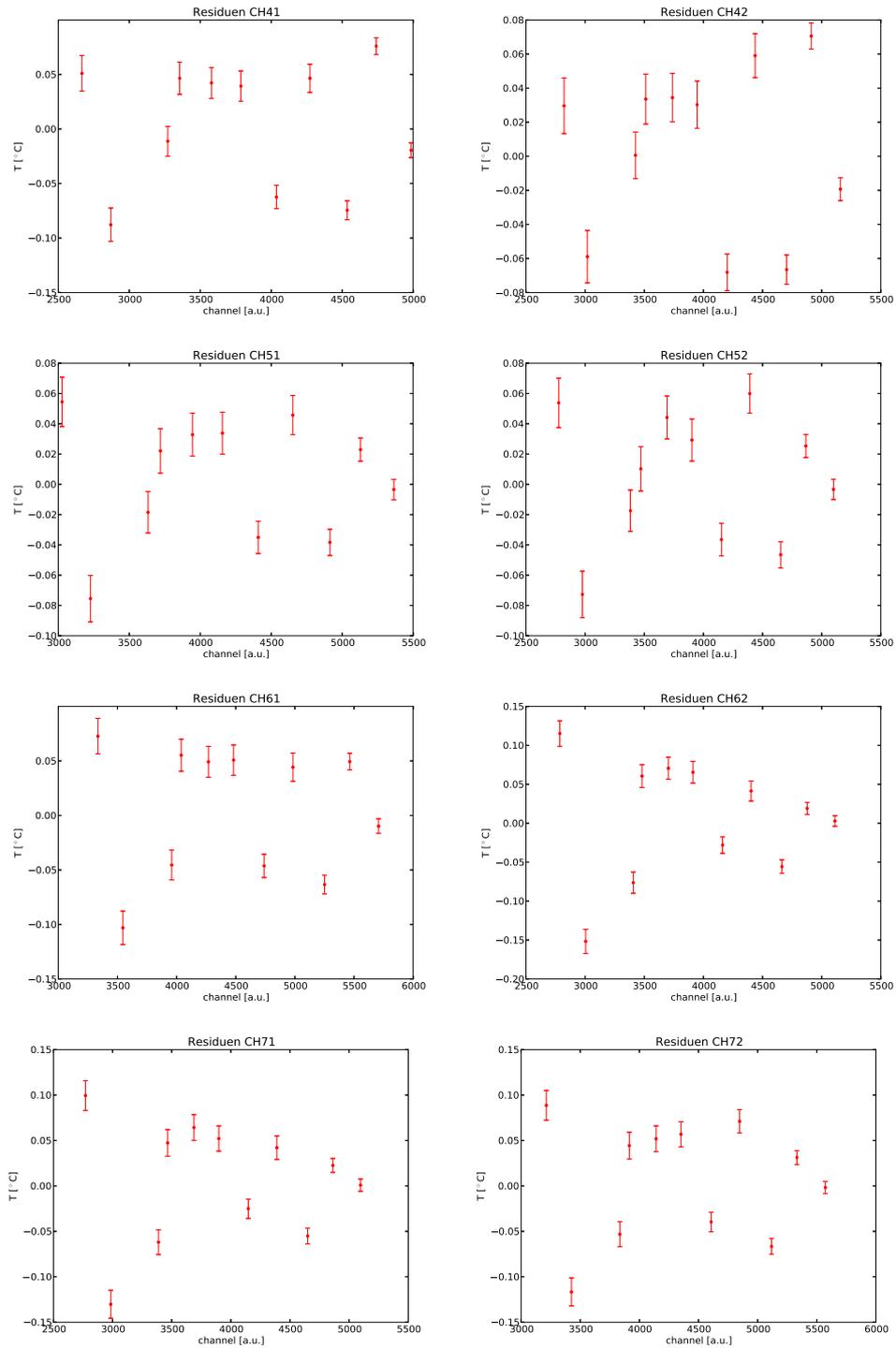


Abbildung A.5:

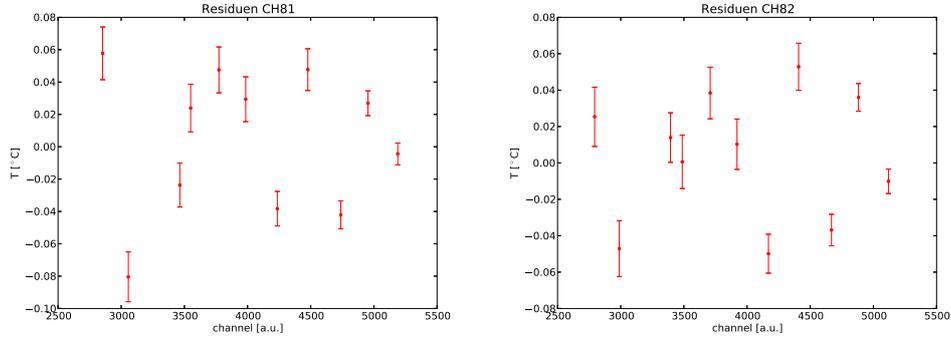


Abbildung A.6:

A.1.3 Kühlings- und Aufwärmvorgang

Mittelwerte von der 10. bis zur 15. Stunde bei eingestellter Solltemperatur:

	T [°C]	ΔT [°C]
CH11	-24.876282	0.000681
CH12	-25.586733	0.000546
CH21	-24.783886	0.000692
CH22	-25.515359	0.000611
CH31	-26.068573	0.003353
CH32	-25.437857	0.001566
CH41	-24.309261	0.000866
CH42	-25.806148	0.000508
CH51	-25.239283	0.000586
CH52	-60.068300	5.802 e-16
CH61	-25.232888	0.001339
CH62	-26.185573	0.003365
CH71	-25.380106	0.000836
CH72	-25.656879	0.000539
CH81	-24.402493	0.000643
CH82	-25.768763	0.000457

Tabelle A.1: Mittelwerte von der 10. bis zur 15. Stunde. CH52 ist beschädigt.

A.1.4 Räumliche Temperaturverteilung in Proto16

Algorithmus zum Erstellen der Konturplots

```

2 #####
3 #           Erstellen der Konturplots von Schnitten durch Proto16           #
4 #                               Author: Sahra Wolff                               #
5 #                               Mai, 2016                                         #
6 #####

8 import numpy as np
9 import glob
10 import math
11 import matplotlib.pyplot as plt
12 import matplotlib.mlab as mlab
13 import scipy.optimize
14 from scipy.interpolate import griddata
15 import scipy.interpolate

18 raw = glob.glob('*.*txt')

20 NAME = ['CH11', 'CH12', 'CH21', 'CH22', 'CH31', 'CH32', 'CH41', 'CH42', 'CH51', 'CH52',
21 'CH61', 'CH62', 'CH71', 'CH72', 'CH81', 'CH82']
22 dic = {'CH11': 'H0074', 'CH12': 'H0065', 'CH21': 'H0054', 'CH22': 'H0068', 'CH31': 'H0064',
23 'CH32': 'H0051', 'CH41': 'H0063', 'CH42': 'H0072', 'CH51': 'H0066', 'CH52': 'H0036', 'CH61': 'H0067',
24 'CH62': 'H0035', 'CH71': 'H0061', 'CH72': 'H0077', 'CH81': 'H0059', 'CH82': 'H0039'}
25 dic2 = {'0': 'CH71', '1': 'CH82', '2': 'CH51', '3': 'CH62', '4': 'CH72', '5': 'CH81', '6': 'CH52',
26 '7': 'CH61', '8': 'CH21', '9': 'CH12', '10': 'CH41', '11': 'CH31', '12': 'CH22', '13': 'CH11',
27 '14': 'CH42', '15': 'CH32'}
28 Told = []

30 #read data
31 alldata = np.genfromtxt(raw[0], skip_header=1)
32 for i in range(len(alldata)/2):
33     Told.append(alldata[i])
34 T = [Told[12], Told[15], Told[8], Told[11], Told[13], Told[14], Told[9], Told[10],
35 Told[2], Told[1], Told[6], Told[4], Told[3], Told[0], Told[7], Told[5]]

38 #position of calibration sensors
39 x = np.array([-12.75, -12.75, -12.75, -12.75, -37.75, -37.75, -50.15, -37.75, -63.35,
40 -50.95, -63.35, -63.35, -88.35, -88.35, -88.35, -88.35])
41 z = np.array([30, 170, 30, 170, 170, 30, 170, 30, 30, 170, 30, 170, 30, 170, 30])
42 y = np.array([100.3, 75.1, 25.5, 0.3, 100.3, 50.7, 37.7, 0.3, 100.3, 62.9, 49.9, 0.3,
43 100.3, 75.1, 25.5, 0.3])

45 #setzt die Grenzen der Temperaturen der Farbpalette fest
46 Vmin = -26.5
47 Vmax = -24.2

49 #####FRONT
50 xf = np.array([x[0], x[2], x[5], x[7], x[8], x[10], x[13], x[15]])
51 yf = np.array([y[0], y[2], y[5], y[7], y[8], y[10], y[13], y[15]])
52 Tf = np.array([T[0], T[2], T[5], T[7], T[8], T[10], T[13], T[15]])
53 xfi, yfi = np.linspace(min(xf), max(xf), 102), np.linspace(min(yf), max(yf), 102)
54 xfi, yfi = np.meshgrid(xfi, yfi)
55 Tfi = griddata((xf, yf), Tf, (xfi, yfi), method='cubic')

57 #Plot
58 plt.imshow(Tfi, vmin=Vmin, vmax=Vmax, extent = [-89,-12,101,0])
59 plt.axis('equal')
60 plt.gca().invert_xaxis()
61 plt.gca().invert_yaxis()
62 #~ plt.title("Inhomogeneity")

```

```

63 plt.xlabel("x [mm]")
64 plt.ylabel("y [mm]")
65 #colorbar
66 cbar = plt.colorbar()
67 cbar.set_label(r"Temperature [{}^\{\circ\}C]")
68 #positions of the sensors
69 plt.scatter(xf, yf, c = Tf, vmin=Vmin, vmax=Vmax)
70 #save
71 plt.savefig('FRONT.pdf')
72 plt.clf()

75 #####BACK
76 xf = np.array([x[1], x[3], x[4], x[9], x[11], x[12], x[14]])
77 yf = np.array([y[1], y[3], y[4], y[9], y[11], y[12], y[14]])
78 Tf = np.array([T[1], T[3], T[4], T[9], T[11], T[12], T[14]])

80 xfi, yfi = np.linspace(min(xf), max(xf), 102), np.linspace(min(yf), max(yf), 102)
81 xfi, yfi = np.meshgrid(xfi, yfi)
82 Tfi = griddata((xf, yf), Tf, (xfi, yfi), method='cubic')

84 #Plot
85 plt.imshow(Tfi, vmin=Vmin, vmax=Vmax, extent=[-89,-12, 101, 0])
86 plt.axis('equal')
87 plt.gca().invert_xaxis()
88 plt.gca().invert_yaxis()
89 #~ plt.title("Inhomogeneity")
90 plt.xlabel("x [mm]")
91 plt.ylabel("y [mm]")
92 #colorbar
93 cbar = plt.colorbar()
94 cbar.set_label(r"Temperature [{}^\{\circ\}C]")
95 #positions of the sensors
96 plt.scatter(xf, yf, c = Tf, vmin=Vmin, vmax=Vmax)
97 #save
98 plt.savefig('BACK.pdf')
99 plt.clf()

102 #####1.Schnitt
103 yf = []
104 zf = []
105 Tf = []
106 for i in range(len(T)/2):
107     if i !=6:
108         yf.append(y[i])
109         zf.append(z[i])
110         Tf.append(T[i])

112 zfi, yfi = np.linspace(min(zf), max(zf), 200), np.linspace(min(yf), max(yf), 102)
113 zfi, yfi = np.meshgrid(zfi, yfi)
114 Tfi = griddata((zf, yf), Tf, (zfi, yfi), method='cubic')

116 #Plot
117 plt.imshow(Tfi, vmin=Vmin, vmax=Vmax, aspect = 'auto', extent=[30, 170, 101, 0])
118 plt.axis('equal')
119 plt.gca().invert_yaxis()
120 #~ plt.title("Inhomogeneity")
121 plt.xlabel("z [mm]")
122 plt.ylabel("y [mm]")
123 #colorbar
124 cbar = plt.colorbar()

```

```

125 cbar.set_label(r"Temperature [{}^\circ{}C]")
126 #positions of the sensors
127 plt.scatter(zf, yf, c = Tf, vmin=Vmin, vmax=Vmax)
128 #save
129 plt.savefig('CUT1.pdf')
130 plt.clf()

133 #####2.Schnitt
134 yf = []
135 zf = []
136 Tf = []
137 for i in range(len(T)/2):
138     yf.append(y[i+8])
139     zf.append(z[i+8])
140     Tf.append(T[i+8])

142 zfi, yfi = np.linspace(min(zf), max(zf), 200), np.linspace(min(yf), max(yf), 102)
143 zfi, yfi = np.meshgrid(zfi, yfi)
144 Tfi = griddata((zf, yf), Tf, (zfi, yfi), method='cubic')

146 #Plot
147 plt.imshow(Tfi, vmin=Vmin, vmax=Vmax, aspect = 'auto', extent=[30, 170, 101, 0])
148 plt.axis('equal')
149 plt.gca().invert_yaxis()
150 #~ plt.title("Inhomogeneity")
151 plt.xlabel("z [mm]")
152 plt.ylabel("y [mm]")
153 #colorbar
154 cbar = plt.colorbar()
155 cbar.set_label(r"Temperature [{}^\circ{}C]")
156 #positions of the sensors
157 plt.scatter(zf, yf, c = Tf, vmin=Vmin, vmax=Vmax)
158 #save
159 plt.savefig('CUT2.pdf')
160 plt.clf()

```

A.2 Avalanche Photodiode

A.2.1 Bestimmung der APD-Kennlinien

Algorithmus zum Erstellen der Kennlinien

```

2 #####
3 #                               Erstellen der Kennlinien der APDs          #
4 #                               Author: Sahra Wolff                          #
5 #                               Mai, 2016                                    #
6 #####

8 import numpy as np
9 import glob
10 import matplotlib as mb
11 import matplotlib.pyplot as plt
12 import pylab
13 import scipy.optimize

```

```
16 raw = sorted(glob.glob('results2/*.dat'))

19 #daten einlesen und alle in einer Liste speichern
20 alldata = []
21 for i in range(len(raw)):
22     LIST = np.genfromtxt(raw[i], skip_header=1, unpack=True)
23     alldata.append(LIST)

26 #erstellt die Daten sortiert nach Kristallnummer:cno und ADPnummer:apd
27 def data(cno, apd):
28     temp = cno*4+apd
29     X = alldata[temp][1]
30     Y = alldata[temp][4]/alldata[temp][4][2]
31     DY = alldata[temp][5]/alldata[temp][4][2]
32     #~ print X,Y,DY
33     A = np.array([X,Y,DY])
34     return A

37 def sigma(cno, apd):
38     temp = cno*4+apd
39     X = alldata[temp][1]
40     sig = alldata[temp][6]
41     A = np.array([X,sig])
42     return A

46 #~ #kuerzt die daten anhand der sigma werte (via Ableitung)
47 #~ def hdif(X,Y,DY,sig):
48     #~ Dsig = []
49     #~
50     #~ for i in range(len(sig)-1):
51         #~ Dsig.append((sig[i+1]-sig[i])/(X[i+1]-X[i]))
52     #~ cut=[]
53     #~ #via Ableitung
54     #~ for i in range(len(Dsig)-1):
55         #~ if i > 15: #gibt an ab wo daten abgeschnitten werden koennen
56             #~ if Dsig[i] > Dsig[i+1]:
57                 #~ cut.append(i+2)

59 #kuerzt die daten anhand der mu werte (via Ableitung)
60 def hdif(X,Y,DY,sig):
61     dY = []

63     for i in range(len(Y)-1):
64         dY.append((Y[i+1]-Y[i])/(X[i+1]-X[i]))
65     cut=[]
66     #via Ableitung
67     for i in range(len(dY)-1):
68         if i > 15: #gibt an ab wo daten abgeschnitten werden koennen
69             if dY[i] > dY[i+1]:
70                 cut.append(i+2)

72     cut = np.array(cut)
73     X = np.delete(X, cut)
74     Y = np.delete(Y, cut)
75     DY = np.delete(DY, cut)
76     sig = np.delete(sig, cut)
```

```

78     return np.array([X,Y,DY])

82 #open file (write data in file at the end of the script)
83 output = open('apdkennlinie.txt', 'w')
84 output.write('#Kristall APD      A      dA      Ub      dUb      k      dk
      C      dC      Chi/dof \n')

87 #interpolation function
88 def func(x,A,Ub,k,C):
89     return A/(1-(x/Ub)**k)+C

92 #Schleife fuer Plots und Datenausgabe
93 for i in range(len(raw)/4):
94     print i
95     for j in range(2):

98         #daten konstruieren
99         X,Y,DY = data(i,j)
100        X, sig = sigma(i,j)
101        X,Y,DY = hdif(X,Y,DY,sig)
102        X,Y,DY = X[2:],Y[2:],DY[2:] # die daten werden erst ab 100V verwendet

105        #create fit, error of fit parameters and chi
106        popt, pcov = scipy.optimize.curve_fit(func, X, Y, p0=(150.,396.,8.,-150.))
107        perr = np.sqrt(np.diag(pcov))

109        A,Ub,k,C = popt[0],popt[1],popt[2],popt[3]
110        dA,dUb,dk,dC = perr[0],perr[1],perr[2],perr[3]

112        residuals = Y-func(X,A,Ub,k,C)
113        dof = len(X)-len(popt)
114        chi = sum(residuals**2/DY**2)
115        redchi = chi/dof

118        # plot fit
119        xx = np.linspace(min(X), max(X), 500)
120        pylab.plot(xx, func(xx,A,Ub,k,C),'-g',
121        label = '$T(x) = p_3 \cdot x^3 + p_2 \cdot x^2 + p_1 x + p_0$')

124        #error plot
125        plt.errorbar(X,Y, xerr = None, yerr = DY, fmt = '.')
126        plt.xlabel('HV[V]')
127        plt.ylabel('Gain')
128        plt.title('Crystal '+str(i)+' APD'+str(j)+' , low gain')
129        plt.yscale('log') #Logarithmische Darstellung der y-Achse
130        plt.savefig('log_Crystal'+str(i)+'APD'+str(j)+'_lowgain'+'.jpg')
131        plt.close()

134        #write file
135        output.write(str(i)+' '+str(j)+' '+str(A)+' '+str(dA)+' '+str(Ub)+' '+str(dUb)+
136        ' '+str(k)+' '+str(dk)+' '+str(C)+' '+str(dC)+' '+str(redchi)+'\n')

```

Ermittelte Werte für die Interpolationsfunktion

K	APD	A	ΔA	U_{br}	ΔU_{br}	k	Δk	C	ΔC	$\frac{\text{Chi}}{\text{dof}}$
00	0	155.02	24.07	399.91	0.68	8.62	0.81	-152.40	23.54	626143.7
00	1	159.93	25.91	400.23	0.81	8.54	0.81	-157.34	25.39	695467.9
01	0	162.87	28.21	403.92	1.14	8.12	0.77	-160.43	27.71	736728.7
01	1	151.39	21.81	402.40	0.84	8.02	0.66	-149.04	21.37	712423.9
02	0	115.47	12.25	400.06	0.43	7.36	0.51	-113.41	11.87	308980.3
02	1	134.72	19.38	400.44	0.70	7.84	0.69	-132.44	18.91	514353.7
03	0	104.01	9.02	400.74	0.37	6.97	0.40	-102.15	8.73	207677.7
03	1	144.10	20.69	401.05	0.75	8.03	0.68	-141.74	20.23	601239.1
04	0	114.13	11.43	398.94	0.36	7.36	0.49	-112.08	11.05	294400.9
04	1	137.75	17.50	398.74	0.53	8.01	0.64	-135.41	17.04	523063.6
05	0	160.11	24.57	400.20	0.76	8.63	0.77	-157.59	24.08	633247.0
05	1	132.04	15.41	400.63	0.52	7.70	0.57	-129.80	15.00	341622.9
06	0	172.36	31.04	400.20	0.91	8.83	0.92	-169.62	30.45	836359.1
06	1	141.28	20.04	398.75	0.55	8.69	0.77	-138.80	19.56	630620.3
07	0	134.85	18.40	398.75	0.51	8.15	0.72	-132.46	17.90	465726.5
07	1	139.92	20.29	397.80	0.51	8.82	0.82	-137.38	19.78	678350.5
08	0	176.15	27.74	401.40	0.79	8.66	0.79	-173.40	27.20	826174.9
08	1	162.01	22.65	400.75	0.65	8.40	0.71	-159.41	22.15	681604.6
09	0	174.42	30.17	403.61	1.12	8.26	0.78	-171.88	29.65	794290.4
09	1	151.25	20.01	402.45	0.70	7.97	0.62	-148.88	19.57	590077.1
10	0	162.76	26.85	400.15	0.81	8.55	0.83	-160.14	26.30	747285.3
10	1	144.31	19.66	398.88	0.53	8.48	0.73	-141.77	19.17	647730.5
11	0	150.64	20.97	401.32	0.68	8.24	0.69	-148.18	20.50	965391.4
11	1	154.29	22.34	401.36	0.71	8.35	0.72	-151.77	21.86	978071.9
12	0	166.74	29.57	398.21	0.66	9.21	1.02	-163.84	28.92	912663.7
12	1	160.67	29.31	397.66	0.64	9.35	1.07	-157.77	28.65	975974.0
13	0	129.41	18.00	396.54	0.45	8.30	0.77	-127.00	17.48	552784.3
13	1	126.36	16.16	395.13	0.30	8.60	0.78	-123.83	15.62	559423.6
14	0	86.04	13.75	391.79	0.18	8.08	1.04	-83.84	13.04	227553.2
14	1	57.46	4.34	389.67	0.05	6.52	0.42	-55.94	4.00	57333.3
15	0	131.23	17.54	396.18	0.37	8.55	0.78	-128.71	17.00	535452.3
15	1	130.39	15.77	394.09	0.32	8.62	0.72	-127.92	15.28	555985.1

Tabelle A.2: Werte der Interpolationsfunktion.

Fit der Datenpunkte mit der Fitfunktion

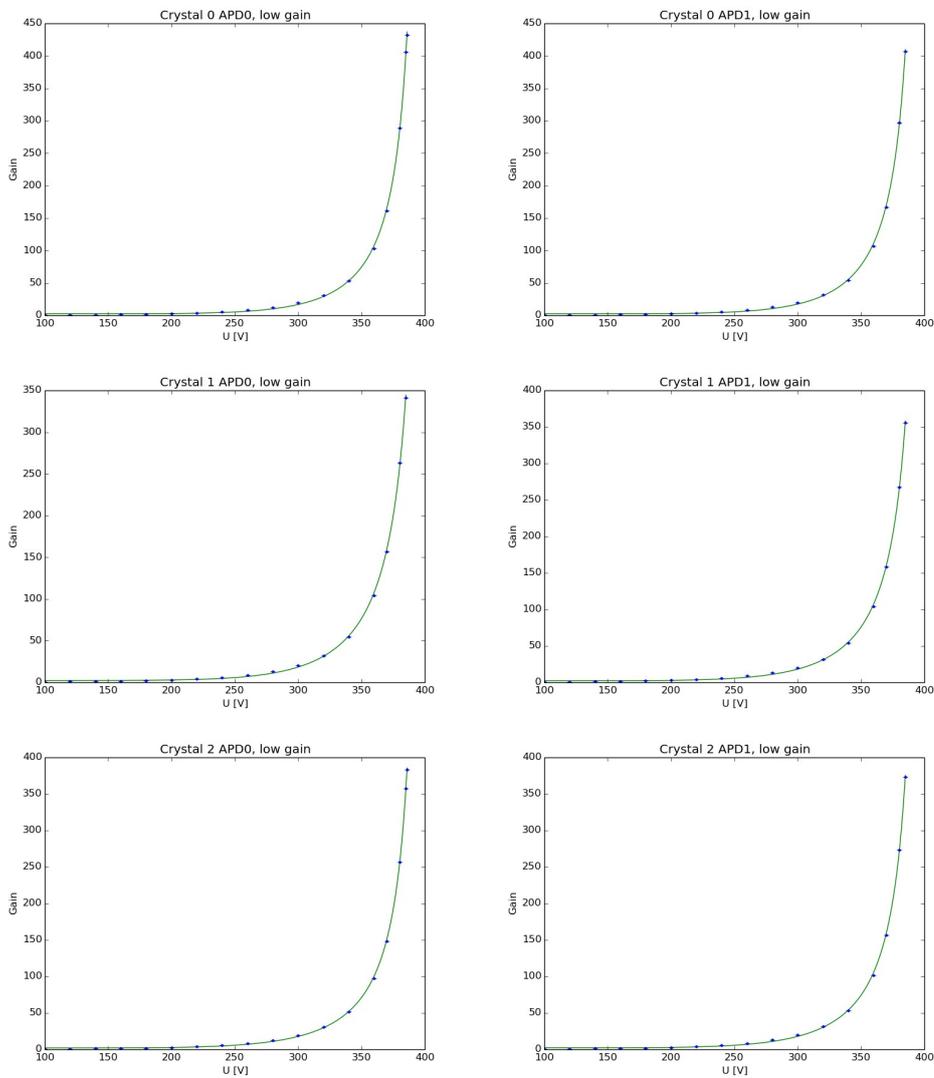


Abbildung A.7:

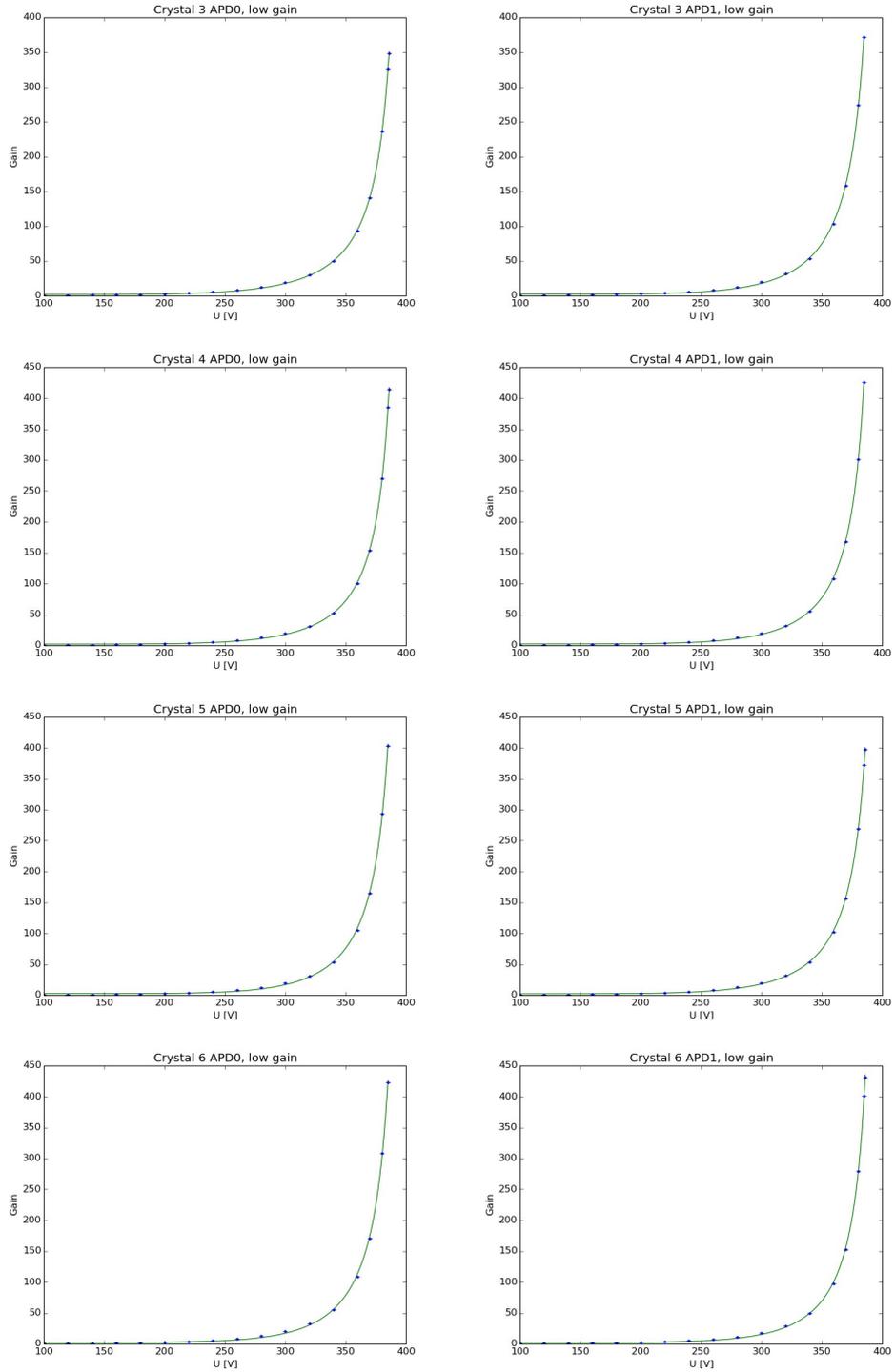


Abbildung A.8:

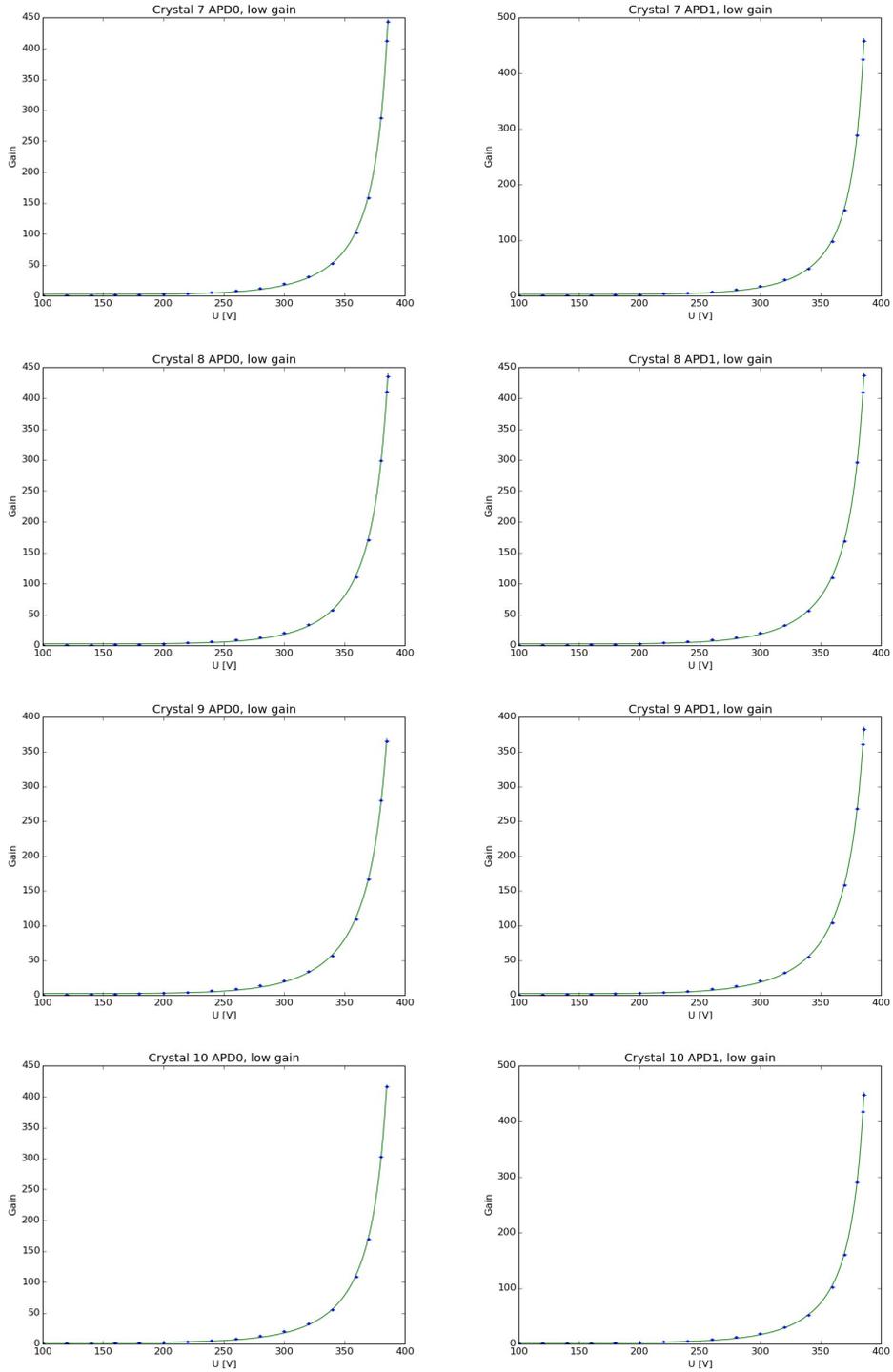


Abbildung A.9:

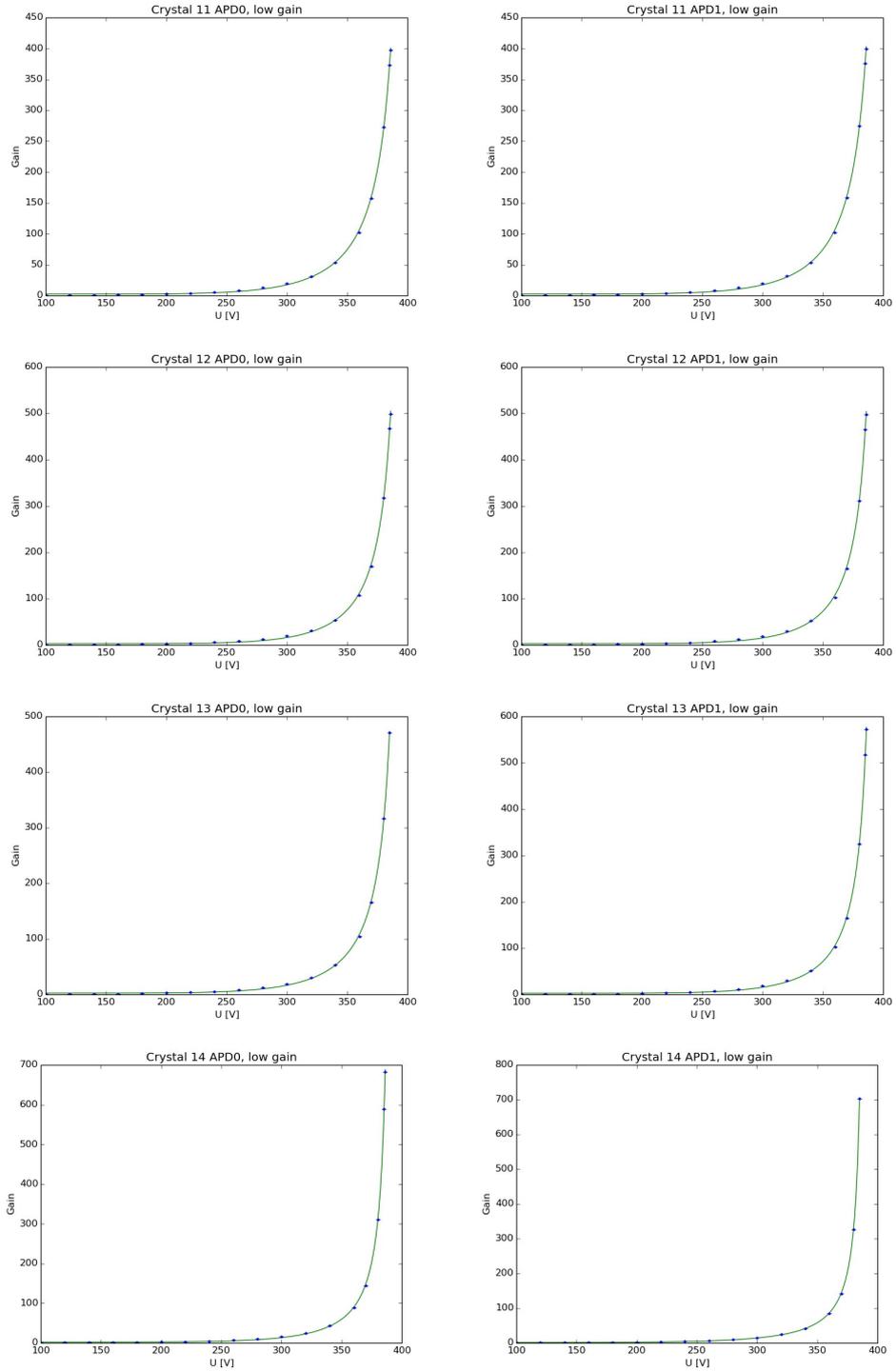


Abbildung A.10:

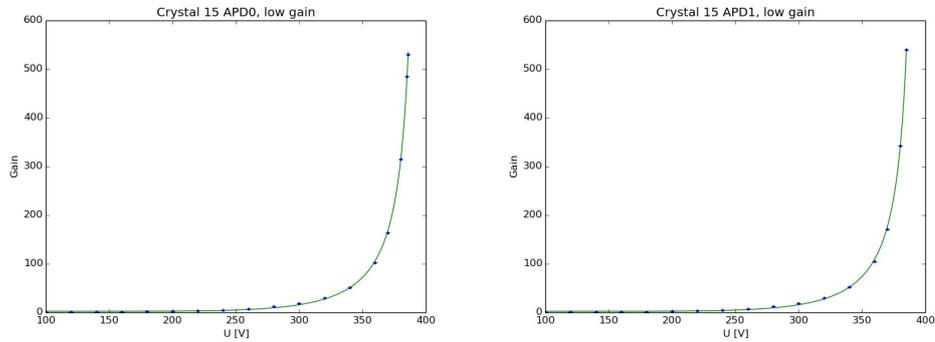


Abbildung A.11:

Logarithmischer Fit der Datenpunkte mit der Fitfunktion

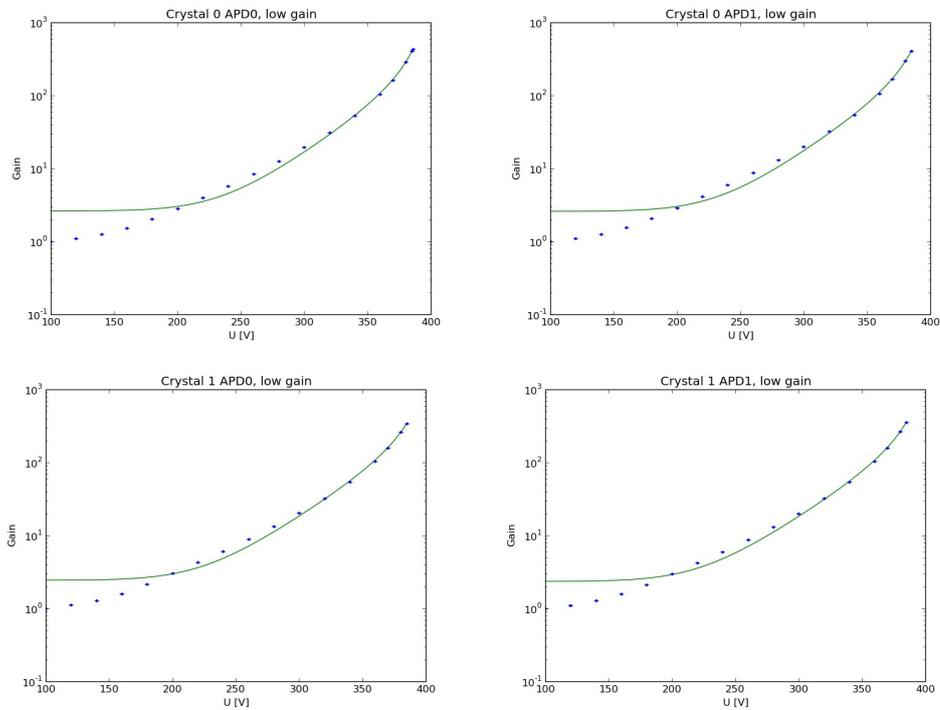


Abbildung A.12:

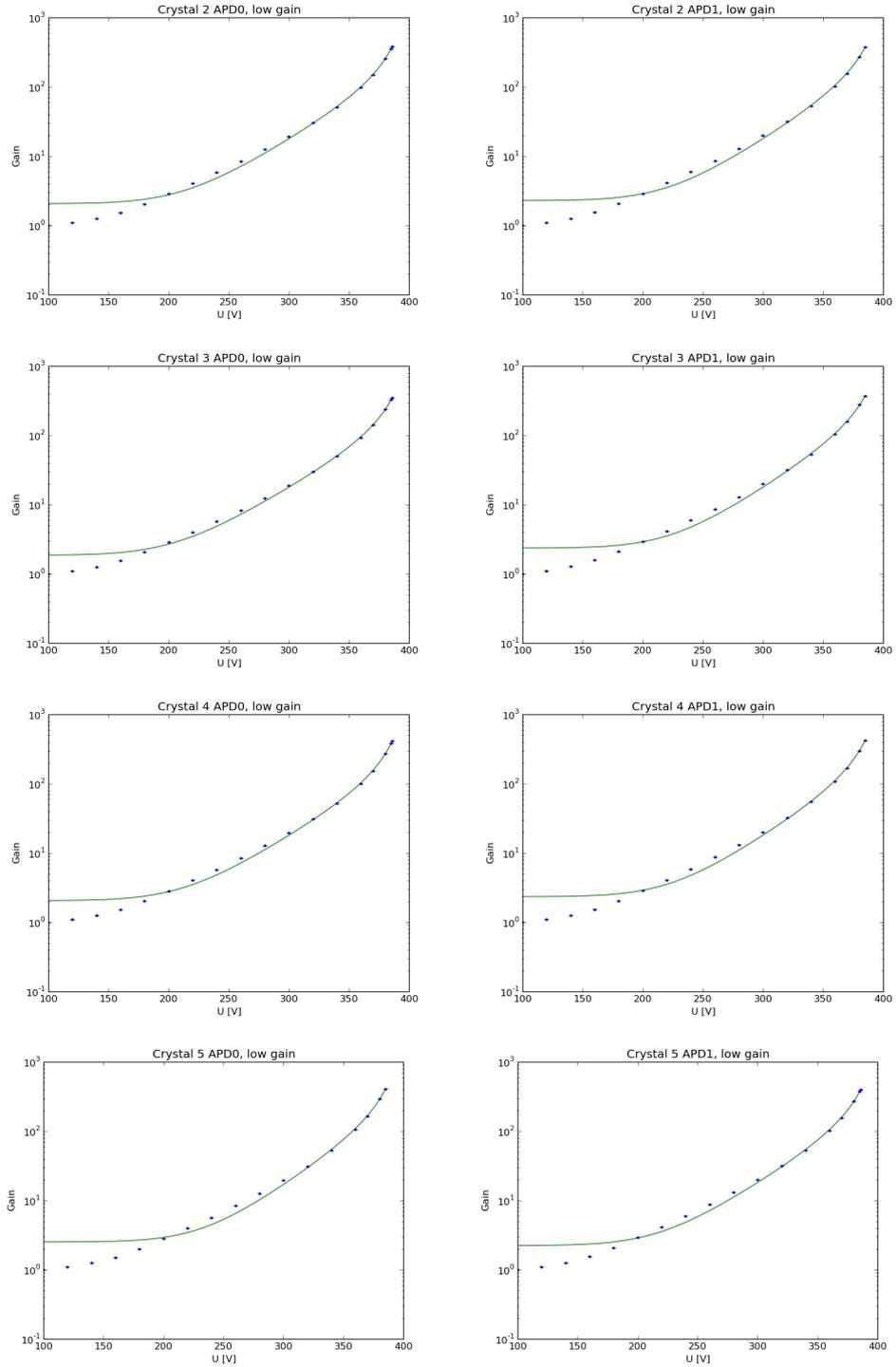


Abbildung A.13:

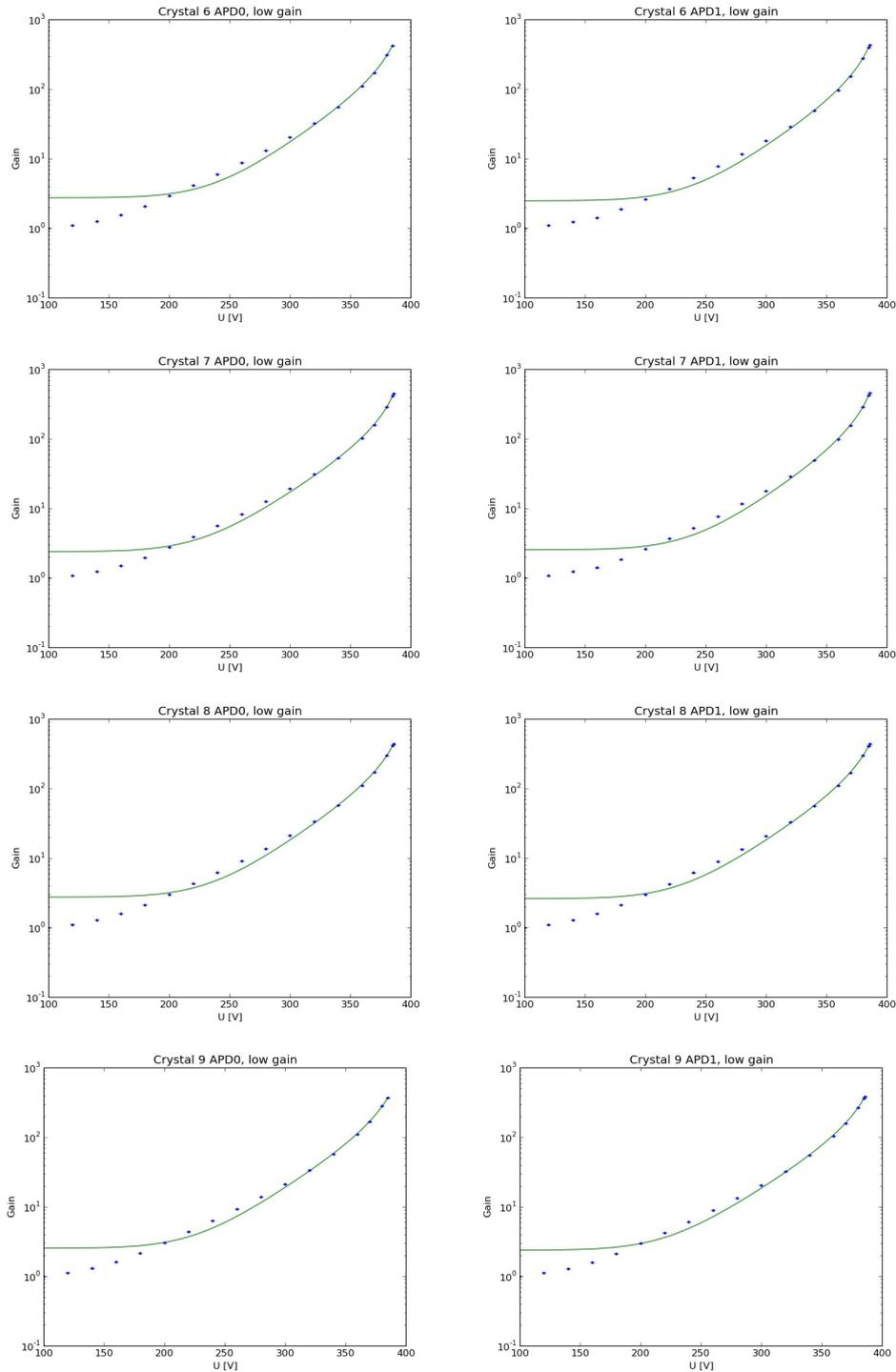


Abbildung A.14:

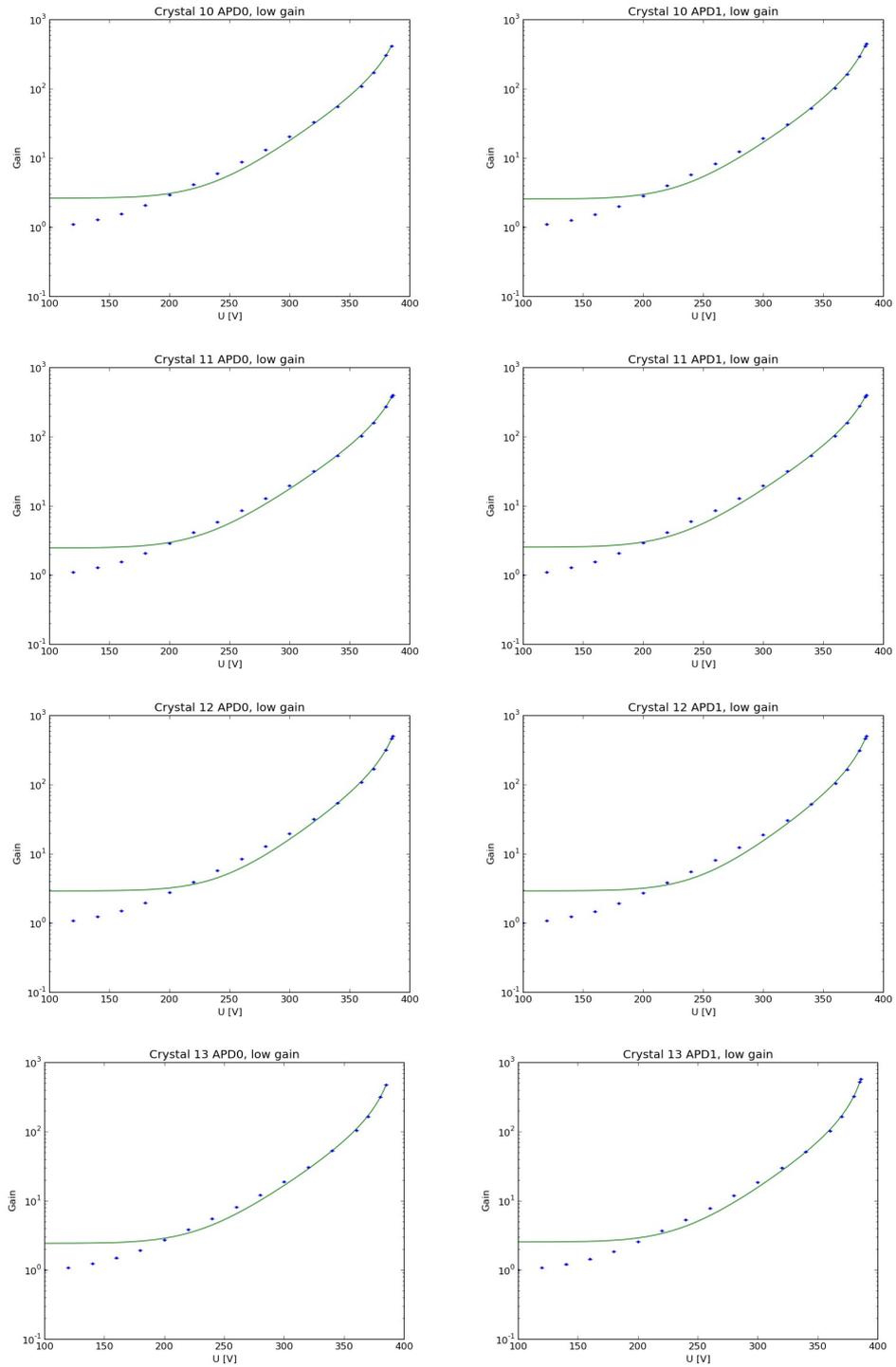


Abbildung A.15:

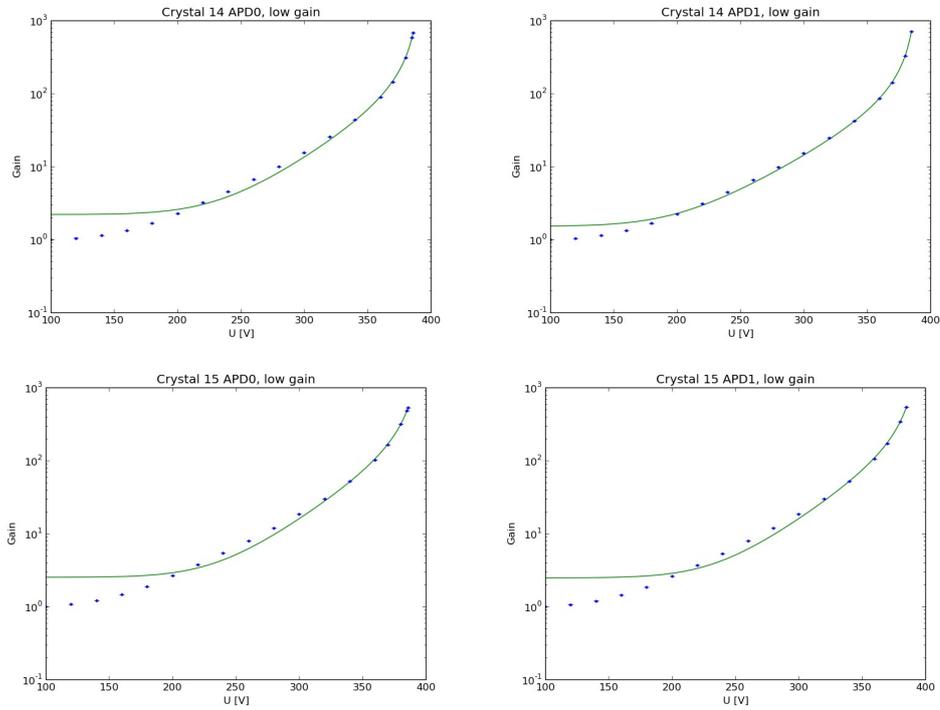


Abbildung A.16:

Relative Residuenplots

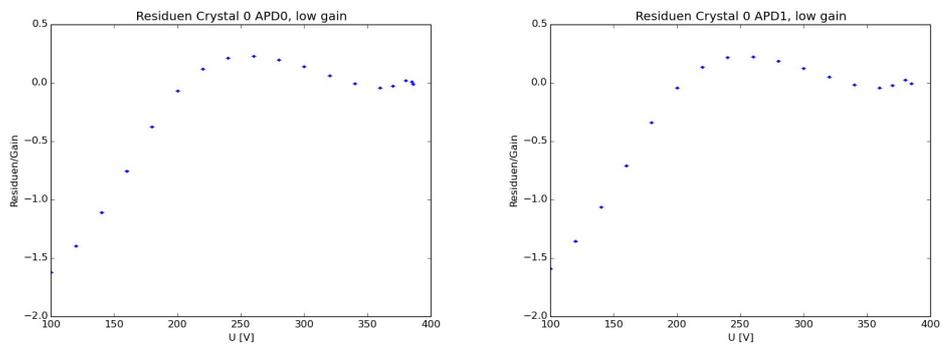


Abbildung A.17:

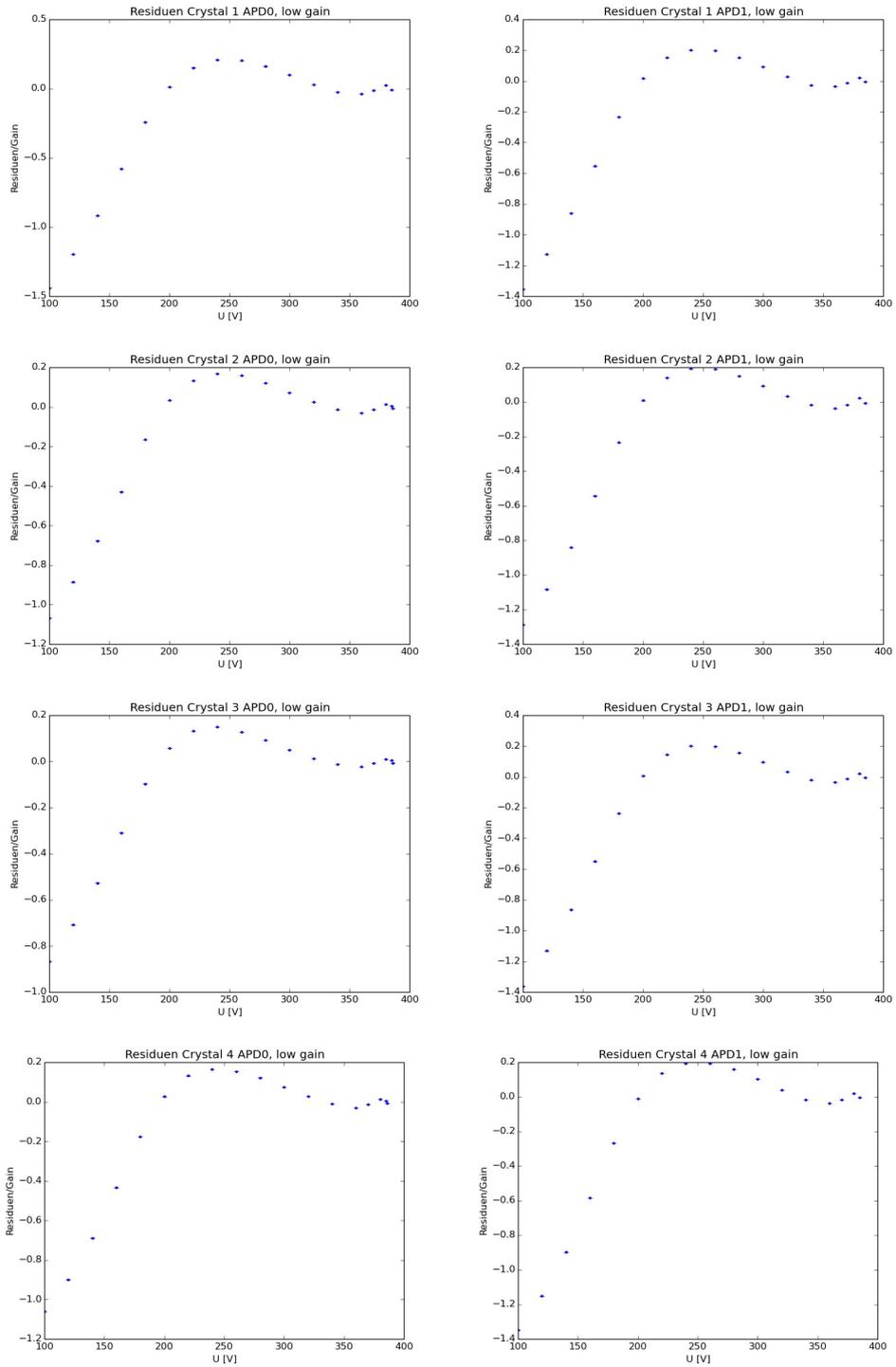


Abbildung A.18:

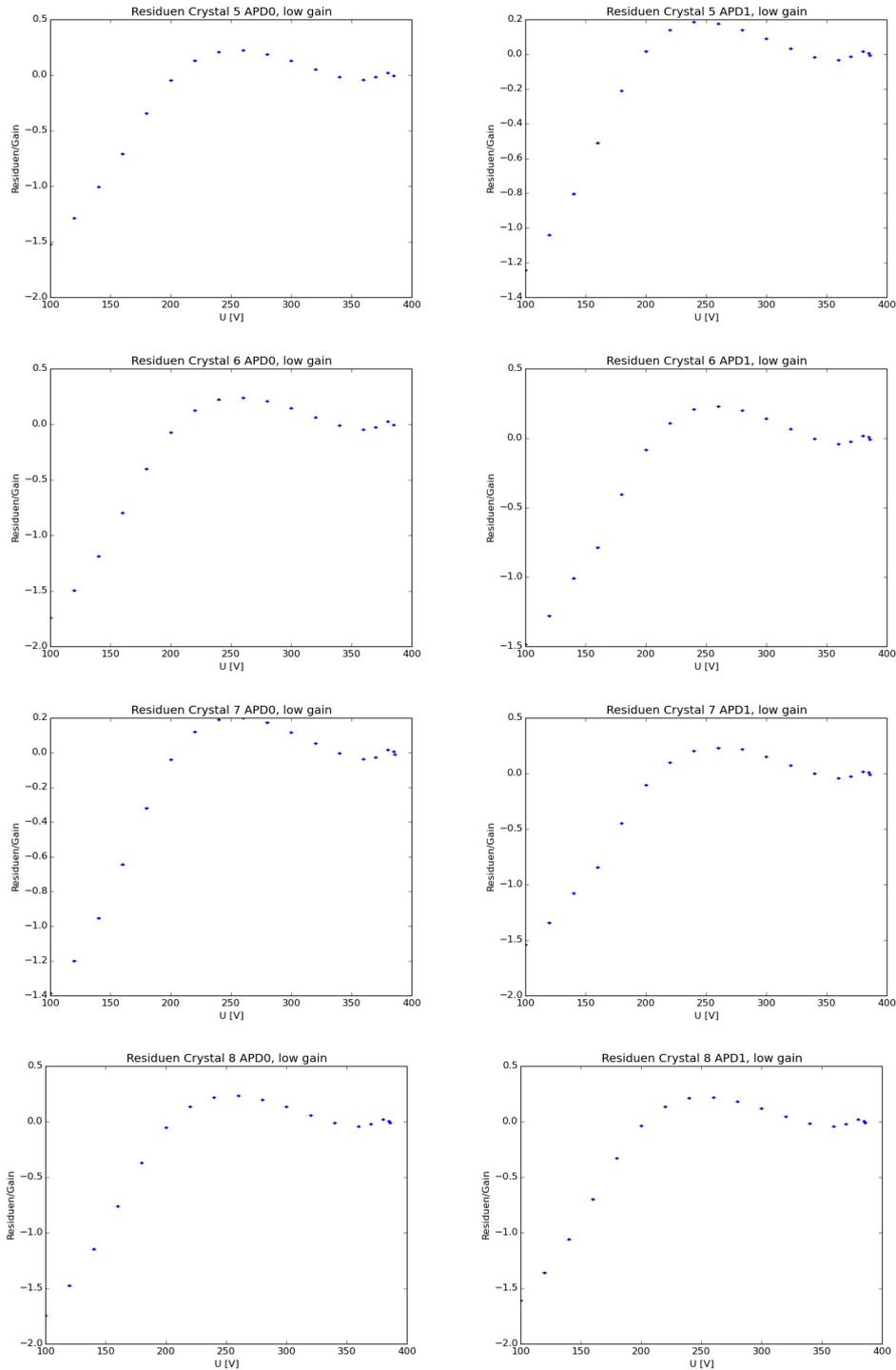


Abbildung A.19:

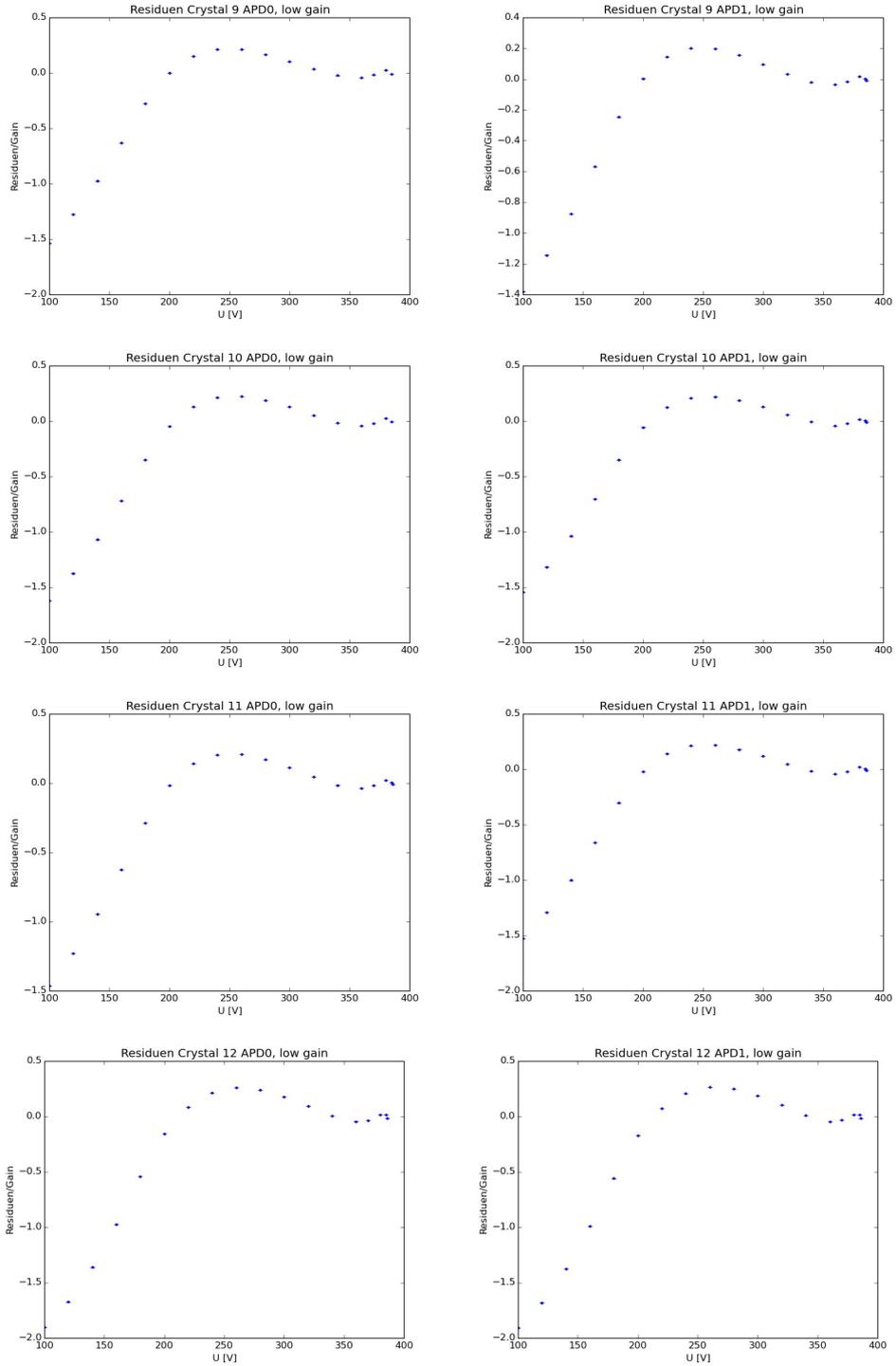


Abbildung A.20:

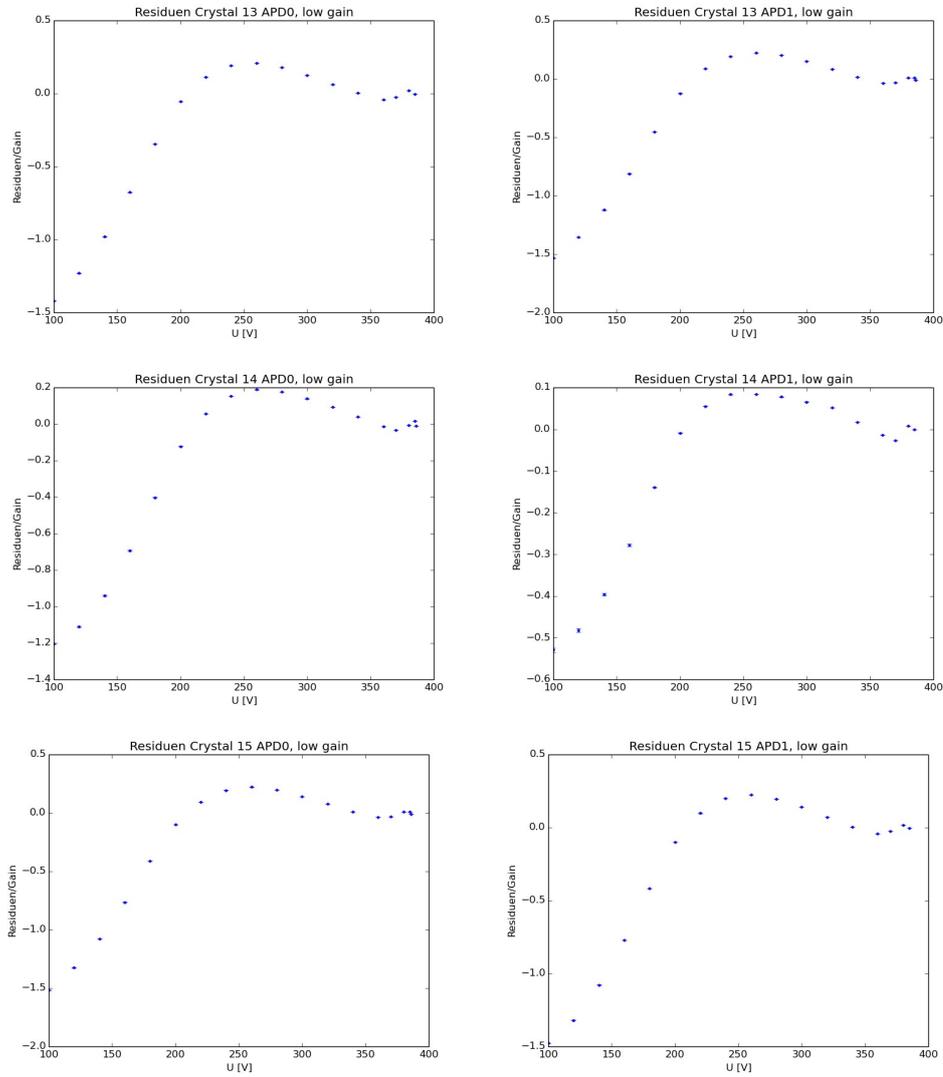


Abbildung A.21:

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die in irgendeiner Form zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Insbesondere möchte mich bei Professor Dr. Frank Maas bedanken. Er hat mich herzlich in seiner Arbeitsgruppe aufgenommen und es mir ermöglicht dort meine Bachelorarbeit zu schreiben.

Mein größter Dank geht an Oliver Noll, durch den ich erst zu HIM gekommen bin. Er stand mir jeden Tag zur Seite, hat mir alles wichtige erklärt und zur passenden Zeit für Ansporn und Aufmunterung gesorgt. Ohne ihn wäre diese Bachelorarbeit nicht möglich gewesen.

Besonders möchte ich auch Dr. Luigi Capozza dafür danken, dass mir vieles erklärt und beigebracht hat und dass er meine Arbeit Korrektur las und mit vielen wertvollen Verbesserungsvorschlägen meine Sicht erweitert hat.

Außerdem will ich David Rodriguez Pineiro danken, welcher mir durch die Anfertigung von CAD-Zeichnungen half meine Arbeit anschaulicher zu gestalten. Mein Dank geht auch an Matthias Walz aus der Mechanischen Werkstatt. Durch seine engagierte Hilfe konnte der Praktische Teil dieser Arbeit schneller fertiggestellt werden.

Insbesondere möchte ich auch der ganzen AG Maas für das gute Arbeitsklima danken. Alle waren stets freundlich und halfen mir wenn ich Fragen hatte.