Entwicklung eines Teststandes für die HV-Regelungselektronik des EMC des $\overline{\text{P}}$ANDA-Experiments an FAIR

Bachelor Thesis

von
Marvin Peter
aus Gießen

01. November 2017

II. Physikalisches Institut
Justus-Liebig-Universität Gießen

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
- 1.1 Motivation . . . 1
- 1.2 Übersicht zu $\overline{\text{P}}$ANDA und FAIR . . . 2
- 1.3 Das elektromagnetische Kalorimeter des $\overline{\text{P}}$ANDA-Detektors . . . 4
- 1.4 Die Avalanche-Photodiode . . . 6

2 Die HV-Regelungselektronik **7**
- 2.1 I^2C-Schnittstelle . . . 9
- 2.2 ADC . . . 9
- 2.3 Potentiometer . . . 9
- 2.4 Operationsverstärker . . . 10
- 2.5 Temperatursensor . . . 10

3 Die Software für die HV-Regelungselektronik **11**
- 3.1 Das Programm „hvd-tools“ . . . 11
- 3.2 Funktionen zum Auswerten der Daten: „data_analysis_tools“ . . . 14

4 Messungen zur Funktionalität der Elektronik **15**
- 4.1 Messungen an den APDs . . . 15
- 4.2 Messungen an 5.5 Gigaohm-Widerständen . . . 17
- 4.3 Vergleich Messung HV-Elektronik zu Messung Keithley an Messungen an APDs . . . 19
- 4.4 Regelung der Ausgangsspannung . . . 22
- 4.5 Vergleich von On-Board Spannungsmessung und tatsächlicher Ausgangsspannung . . . 24

5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick **28**
- 5.1 Ergebnisse . . . 28
- 5.2 Ausblick . . . 29

Literaturverzeichnis **30**

A Anhang **32**
- A.1 Schaltplan . . . 32
- A.2 Funktionen . . . 33
- A.3 Plots . . . 35

1 Einleitung

1.1 Motivation

Zum Verständnis der elementarsten Zusammenhänge in der Physik werden immer wieder neue, bessere Teilchenbeschleuniger gebaut. Damit später im Experiment gute und genaue Messwerte aufgenommen werden können, muss jedes Bauteil und jedes Stück Technik genau getestet und gegebenenfalls sogar völlig neu entworfen werden. Aus diesem Grund werden, schon Jahre bevor ein Detektor an seinem vorgesehen Ort zusammengebaut wird, viele Arbeitsstunden investiert, um das spätere Funktionieren des Detektors zu gewährleisten.

In dieser Arbeit wird kurz zusammengefasst, was FAIR und $\overline{\text{P}}$ANDA sind, was ein Elektromagnetisches Kalorimeter ist, wie das EMC des $\overline{\text{P}}$ANDA-Detektors aufgebaut ist und wozu es benötigt wird. Überwiegend wird sich jedoch mit dem Testen einer Hochspannungsregelungselektronik für die im EMC des $\overline{\text{P}}$ANDA-Detektors verwendeten Avalanche-Photodioden beschäftigt. Es stellt sich die Frage, wie genau die Hochspannung eingestellt werden kann, wie temperaturabhängig sie ist und wie eine Kalibrierung der HV-Elektronik möglich ist, bzw. wie diese später automatisiert werden kann.

1.2 Übersicht zu $\overline{\text{P}}$ANDA und FAIR

FAIR steht für „Facility for Antiproton and Ion Research“ und ist eine sich im Bau befindende Beschleunigeranlage zur Forschung mit Antiprotonen und Ionen. Die Anlage wird an der GSI in Darmstadt gebaut und soll mithilfe von neusten technologischen Innovationen Experimente mit höchster Präzision ermöglichen.

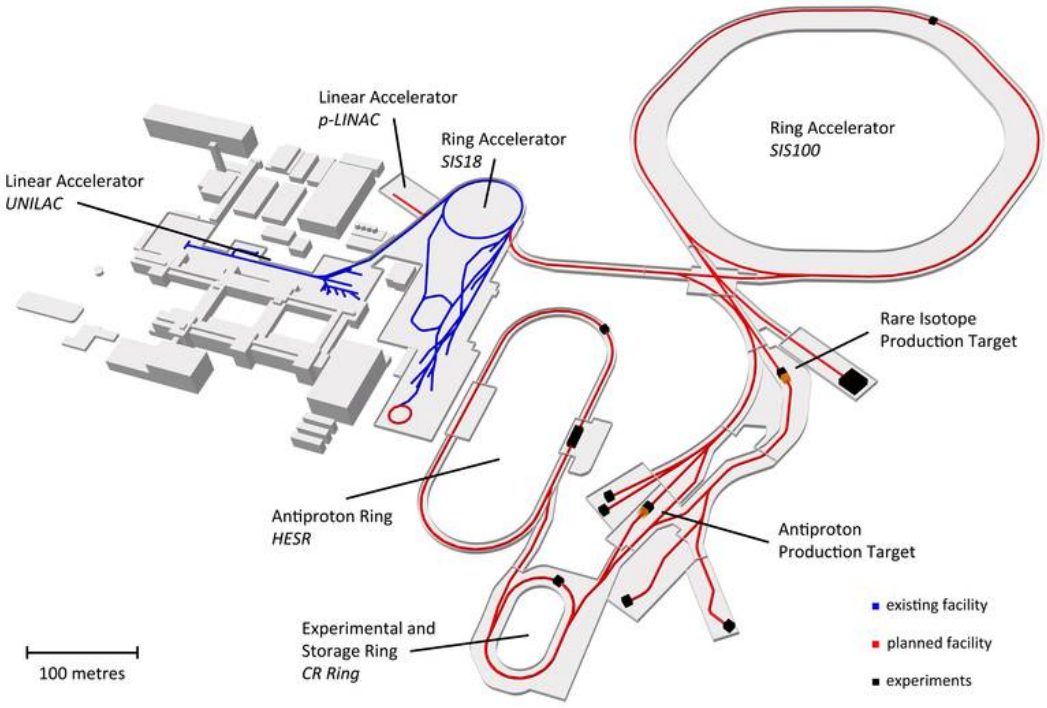

Abbildung 1.1: FAIR-Anlage, schematische Darstellung [1]

Wie in Abbildung 1.1 zu sehen ist, schließt FAIR direkt an die schon existierende Beschleunigeranlage der GSI an und besteht aus mehreren kleineren und einem großen Speicherring (siehe Abbildung 1.1), die eine Reihe an Experimenten beherbergen. Dabei werden verschiedene Forschungsgebiete abgedeckt, so soll an FAIR im Bereich der Atom und Plasmaphysik (APPA), komprimierter baryonischer Materie (CBM), Kernstruktur und Astrophysik (NUSTAR) sowie Physik mit hochenergetischen Antiprotonen ($\overline{\text{P}}$ANDA) geforscht werden. Auf das $\overline{\text{P}}$ANDA-Experiment soll in folgenden Abschnitten näher eingegangen werden.

$\overline{\text{P}}$ANDA steht für Anti**P**roton**A**nnihilation in **DA**rmstadt und soll mit höchster Präzision Messungen mit Antiprotonen ermöglichen. Dabei soll ein Antiprotonenstrahl auf ein fixes Target (Protonen (Wasserstoff) oder andere Kerne) treffen, wobei Impulse von 1.5-15 GeV/c möglich sein werden, dank des neu gebauten Hochenergie-Speicherrings (HESR). Es sollen einige Messungen zu fundamentalen Fragen der Quantenchromodynamik (QCD) untersucht werden, vor allem in Bereichen derer, welche nicht mithilfe von Störungstheorie beschrieben werden können [2]:

- Hadronenspektroskopie bis hoch zum Energiebereich des Charm-Quarks. Hier liegt das Hauptinteresse bei exotischen Zuständen wie z.B. sogenannten „Glueballs“ (Teilchen, die nur aus Gluonen bestehen), Hybriden (aus Quarks und Gluonen bestehende Teilchen) und Mehrquarkzuständen (Tetraquarks / Pentaquarks).
- Messungen zu Eigenschaften von Hadronen innerhalb von Kernmaterie.
- Untersuchungen von nicht-störungstheoretischen Dynamiken.
- Durch Antiprotonen angeregte Reaktionen sind ein sehr effektives Werkzeug, um Baryonen mit Strangeness in Kerne einzupflanzen. $\overline{\text{P}}$ANDA wird vor allem doppel-Λ-Hyperkerne[1] untersuchen, welche von großer Wichtigkeit für Untersuchungen zur Kernstruktur und $\Lambda\Lambda$-Interaktion sind.
- Exklusive Proton-Antiproton-Reaktionen können verwendet werden, um die Struktur von Nukleonen (Formfaktoren) und die Relevanz von gewissen theoretischen Modellen zu untersuchen.

Dabei sind Antiproton-induzierte Reaktionen besonders gut für die beschriebenen Messungen geeignet, da sie einen hohen „yield“, also eine große Ausbeute an für diese Messungen relevanten Reaktionskanälen bieten.
Es ist von besonderem Interesse, die starke Kraft bei mittleren bis großen Abständen zu vermessen, da sich dadurch ein tieferes Verständnis von „Confinement“ und der Natur der starken Wechselwirkung erhofft wird.

Der $\overline{\text{P}}$ANDA-Detektor ist wie die meisten Teilchendetektorsysteme nach einem sog. Zwiebelschalenprinzip aufgebaut und besteht (von innen nach außen) aus einem Target-System, einem Tracking-System, einem Magnetsystem, einem Elektromagnetischen Kalorimeter (siehe Abbildung 1.2), und einem Teilchenidentifikationssystem. Zusätzlich besitzt $\overline{\text{P}}$ANDA noch ein großes vorderes Spektrometer. Für genaue Messungen der Reaktionsprodukte müssen von möglichst allen entstandenen Teilchen Impuls und Energie bestimmt werden, um diese zu identifizieren und auf zerfallene Ursprungsteilchen zurückzuführen. Dafür werden zunächst Flugbahnen in einem Magnetfeld mithilfe des Magnetsystems und Tracking-Systems analysiert, woraus bei geladenen Teilchen aufgrund der Bahnkrümmung der Impuls der Teilchen bestimmt werden kann. Daraufhin werden im EMC alle Photonen, Positronen und Elektronen gestoppt und deren Energie bestimmt. Eine gewisse Ortsauflösung existiert auch im EMC aufgrund der Information, in welchen Kristallen ein Teilchen

[1] Hyperkern: Ein Kern, welcher zusätzlich zu Protonen und Neutronen noch mindestens ein Hyperon, also ein Baryon mit mindestens einem Strange-Quark, enthält

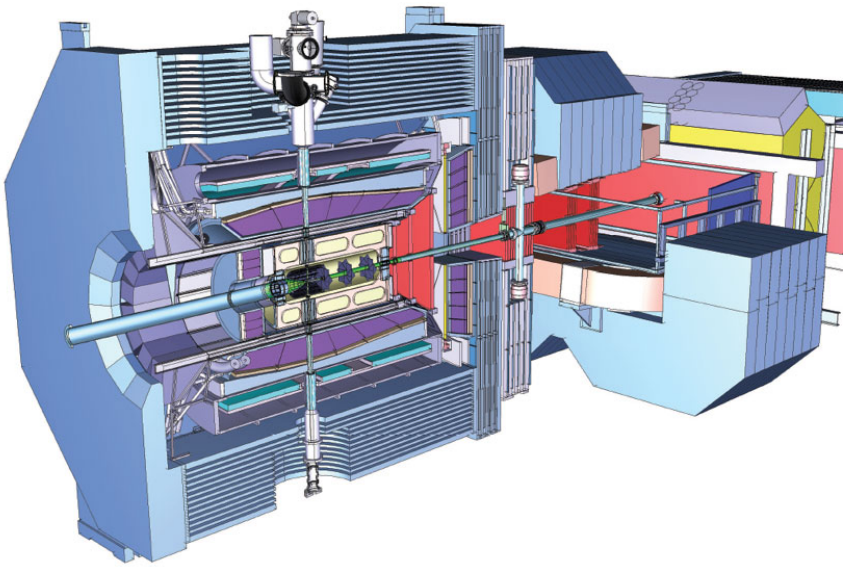

Abbildung 1.2: Gesamter $\overline{\text{P}}$ANDA-Detektor, schematische Darstellung [3]

Energie deponiert hat. Das Teilchenidentifikationssystem (kurz PID) ist dafür gedacht, alle übrigen langlebigen Teilchen, die nicht vom EMC gestoppt werden, zu identifizieren. Es soll im folgenden Abschnitt genauer auf das EMC eingegangen werden, da es für diese Arbeit relevant ist.

1.3 Das elektromagnetische Kalorimeter des $\overline{\text{P}}$ANDA-Detektors

Elektromagnetische Kalorimeter werden verwendet, um die Energiedeposition von hochenergetischen Photonen, Elektronen und Positronen genau zu messen und bietet dabei zusätzlich eine Ortsinformation. Elektronen, Positronen und Photonen, die in das EMC gelangen, erzeugen dort hauptsächlich durch Paarbildung und Bremsstrahlung einen sogenannten elektromagnetischen Schauer. Ein zur deponierten Energie proportionaler Anteil wird durch Szintillation im Kristall in Licht umgewandelt, welches von lichtempfindlichen Sensoren detektiert wird. Aufgrund der größeren Masse von Myonen und allen Hadronen, und den damit verbundenen geringeren Auswirkungen von Bremsstrahlungs-Effekten, können diese Teilchen nahezu ungehindert durch das EMC gelangen und deponieren nur einen Bruchteil ihrer kinetischen Energie dort.

Das elektromagnetische Kalorimeter des $\overline{\text{P}}$ANDA-Detektorsystems besteht aus mehreren Teilen, dem sogenannten „Barrel“ (engl. für Tonne) in der Mitte, vorderem und hinterem „Endcap“.

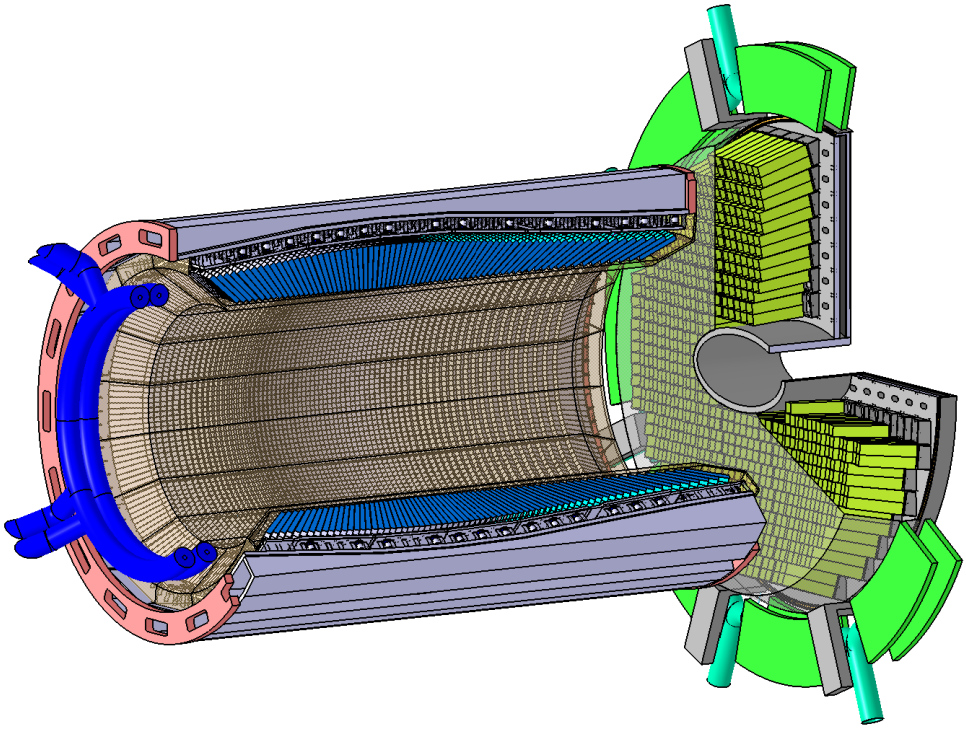

Abbildung 1.3: EMC des Panda-Detektors, schematische Darstellung ohne hinterem „Endcap“ [4]

Das Barrel besteht aus 11360 Kristallen, welche so angeordnet sind, dass sie auf den Kollisionspunkt zeigen und eine Art tonnenförmige Struktur bilden. Das vordere Endcap („FW-Endcap“), welches zusammen mit dem Barrel in Abbildung 1.3 zu sehen ist, besteht aus 3600 Kristallen und fällt im Vergleich zum hinteren Endcap (592 Kristalle) sehr groß aus. Der Detektor ist asymmetrisch aufgebaut, sowohl das Barrel, als auch die unterschiedlich großen Endcaps zeigen dies. Der Grund hierfür ist, dass mit einem Antiprotonenstrahl auf ein stationäres Wasserstoff-Target geschossen werden soll, was eine Verteilung der entstehenden Teilchen vorwiegend in Strahlrichtung (in Abbildung 1.3 nach rechts) zur Folge hat. Die im gesamten EMC verwendeten Kristalle bestehen aus Bleiwolframat (PWO) und besitzen jeweils zwei Avalanche-Photodioden zur Messung des Szintillationslichts, die mit Spezialklebstoff auf die Kristalle geklebt sind und auf die im nächsten Abschnitt noch näher eingegangen wird.

1.4 Die Avalanche-Photodiode

Eine Avalanche-Photodiode (kurz APD), ist eine Halbleiter-Photodiode, in welcher durch photoelektrischen Effekt freie Ladungsträger (Elektron-Loch-Paare) erzeugt werden und durch einen Lawineneffekt das Signal schon in der Photodiode verstärkt wird, ähnlich einem Photomultiplier.

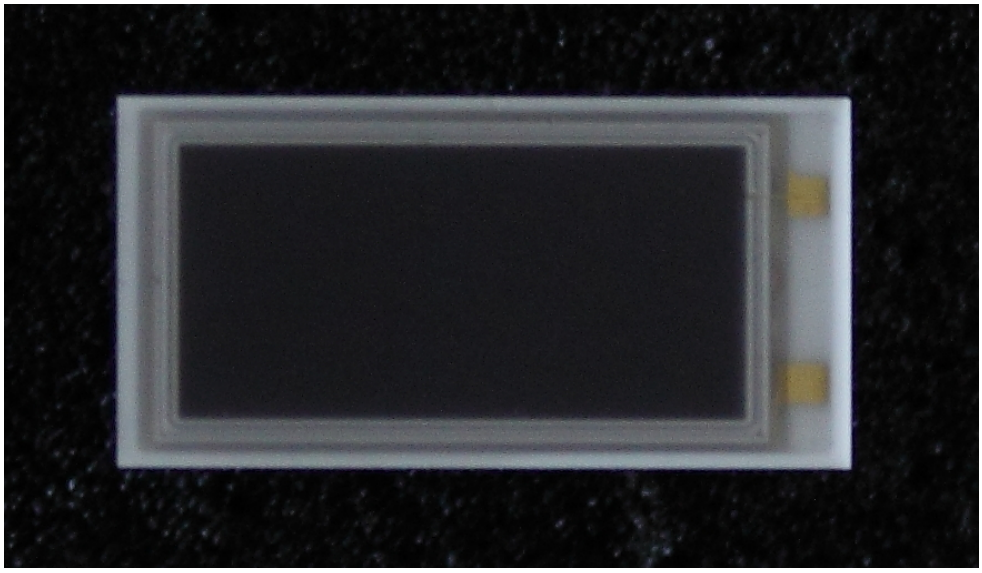

Abbildung 1.4: Eine APD, wie sie im PANDA-EMC verbaut werden soll

In Abbildung 1.4 ist eine APD zu sehen, wie sie im $\overline{\text{P}}$ANDA-EMC verwendet werden soll. Sie wird mit der in der Abbildung sichtbaren Seite auf einen PWO-Kristall geklebt und besitzt zwei Elektroden, zwischen denen eine Hochspannung in Sperrrichtung angelegt wird. Die Auslese von Signalen aus der APD geschieht durch Messung von Spannungsänderungen an der APD, die beim Erzeugen von freien Ladungsträgern in der APD durch Lichteinfall entstehen. Die im Experiment verwendeten APDs haben Betriebsspannungen im Bereich von 350-390 V und jede einzelne APD soll dabei mit einer eigenen Spannung betrieben werden, so dass ihr Verstärkungsfaktor möglichst identisch ist mit dem aller anderen APDs. Dass dies nicht bei allen APDs bei der gleichen Spannung der Fall ist, ist bedingt durch die Herstellung und kann nicht vermieden werden. Im EMC des $\overline{\text{P}}$ANDA-Detektors werden die APDs unterhalb des Durchbruchs betrieben, wo sie Signale liefern, welche proportional zur einfallenden Strahlungsleistung sind, wie auch die Intensität des Szintillationslichts proportional zur deponierten Energie ist. Diese Eigenschaften werden benötigt, da im EMC die von den Teilchen deponierte Energie sehr genau gemessen werden soll. Um eine genaue Messung der im Kristall deponierten Energie zu ermöglichen, ist es also wichtig, dass die Hochspannung sehr genau und konstant einstellbar ist, um den Verstärkungsfaktor der APD auf einem bestimmten Wert zu halten. Dafür wurde eine Hochspannungsregelungselektronik konzipiert, auf welche in den nächsten Abschnitten besonders eingegangen werden soll.

2 Die HV-Regelungselektronik

Die Aufgabe der HV-Regelungselektronik besteht darin, die anliegende Spannung auf die APDs zu verteilen. Bei ungefähr 350-390 V soll die Spannung jeder einzelnen APD separat auf ein Zehntel Volt genau eingestellt werden können, damit die APDs auf gleichen Gain ($= f(U_B)$) eingestellt werden können. Ein digitales Potentiometer regelt einen MOSFET[1], dadurch wird die Ausgabespannung eingestellt.

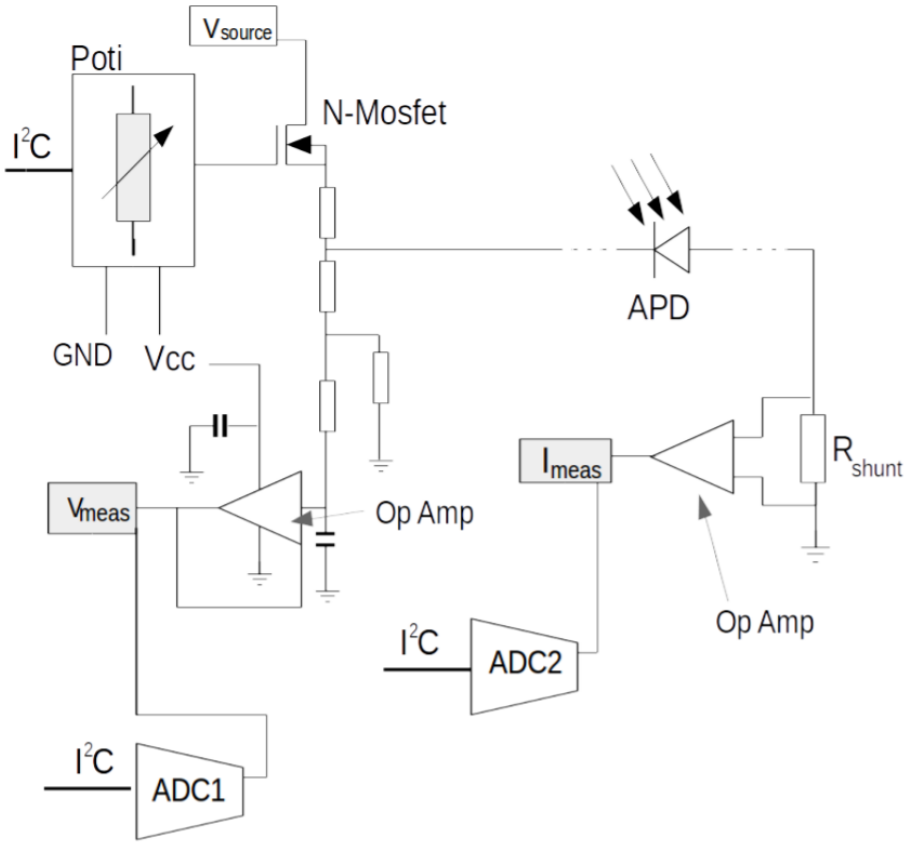

Abbildung 2.1: Schaltplan der HV-Regelungselektronik für die Bias-Versorgung und -Überwachung der APDs

Es werden außerdem Spannung und Strom gemessen. Dies erfolgt über einen Analog-zu-Digital Konverter (kurz ADC). Für jede APD existiert ein Ausgangskanal mit jeweils einem

[1] metal–oxide–semiconductor field-effect transistor
(zu deutsch: Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor)

Potentiometer und zwei ADCs, welche über eine I²C-Schnittstelle angesteuert werden.

In Abbildung 2.1 ist der Schaltplan eines HV-Kanals vereinfacht gezeigt, eine genauere Zeichnung befindet sich im Anhang.

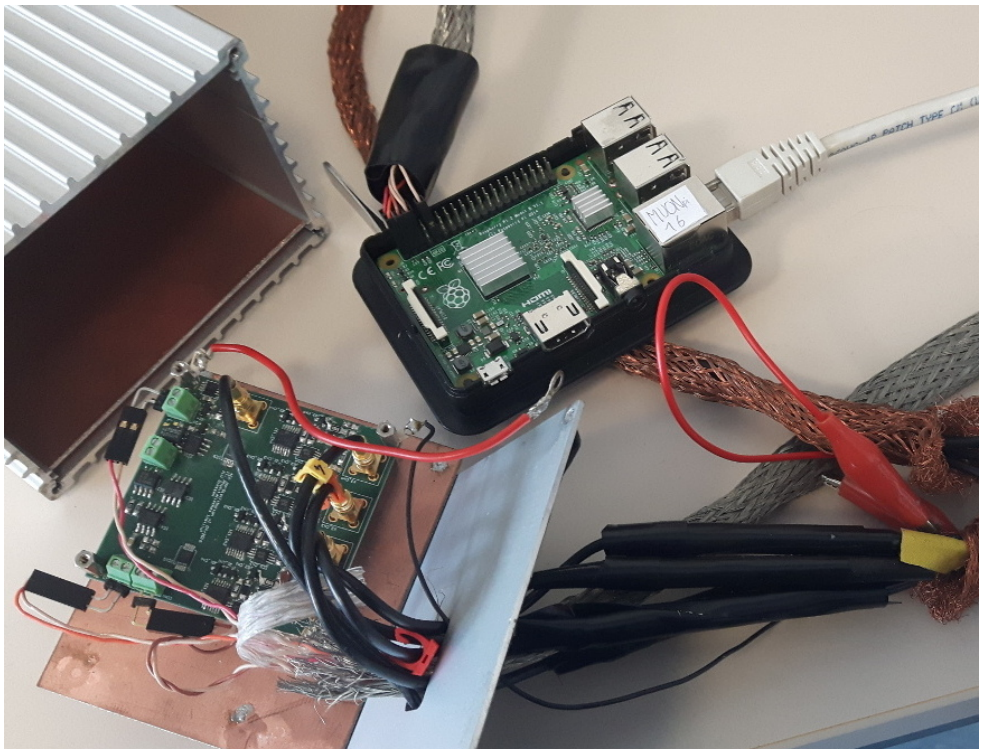

Abbildung 2.2: Aufbau der HV-Regelungselektronik (unten links) mit Raspberry Pi (oben, mittig)

Wie in Abbildung 2.2 abgebildet, besitzt die HV-Elektronik 3.3 V und 5.0 V als Spannungsversorgung (rotes und orangenes dünnes Kabel), sowie einen Kanal für die anliegende Hochspannung (einzelnes dickes Kabel auf der HV-Elektronik) und vier Ausgangskanäle für Hochspannung (rechts auf der HV-Elektronik). Ein späterer Prototyp der HV-Elektronik wird acht Ausgangskanäle besitzen, so wie dies in der finalen Version geplant ist. Die Ansteuerung über die I²C-Schnittstelle erfolgt in der hier benutzten Messanordnung über einen Raspberry Pi [5] Dies ist ein kostengünstiger, kompakter Miniaturcomputer, welcher I²C schon von Werk aus unterstützt und die benötigten Pins zum Anschließen bereits besitzt.

2.1 I²C-Schnittstelle

I²C (kurz für „Inter-Integrated Circuit“) ist eine Schnittstelle, welche vor allem zum Anschließen von integrierten Schaltkreisen (ICs) an einen Mikrocontroller, oder wie in diesem Fall, an einen Prozessor (hier an den Raspberry Pi) verwendet wird. Bei dieser Schnittstelle gibt es zwei Signale, eines für den Takt (Clock) und eines ist das taktsynchrone Datensignal. In der hier verwendeten Schaltung wird der Raspberry Pi als Master und alle ICs auf der HV-Elektronik als Slave betrieben. Der Master gibt das Taktsignal und initiiert Verbindungen, die Slaves antworten nur auf Anfragen.

2.2 ADC

Auf der HV-Regelungselektronik ist ein ADS1115 [6] 16-Bit ADC verbaut. ADCs wandeln Analogsignale in Digitalsignale um, indem sie zunächst das Analogsignal abtasten, in diskrete Spannungswerte aufteilen und daraufhin diese diskreten Werte in eine Zahl umwandeln. Dieser Zahlenwert kann dann z.B. über die I²C-Schnittstelle abgerufen werden. Zum Charakterisieren von ADCs sind vor allem Genauigkeit und Abtastrate entscheidend, wobei die Genauigkeit maßgeblich von der Anzahl der Quantisierungsintervalle (und damit der Bits) und dem Signal-Rausch-Verhältnis abhängt. Die Abtastrate hängt von der Fluktuation des internen Zeitgebers und der Anzahl der Bits ab, da für eine feste Abtastrate der interne Zeitgeber umso schneller arbeiten muss, je mehr Bits das Ausgangssignal hat, und die Taktfrequenz des internen Zeitgebers durch die Fluktuation begrenzt ist.

2.3 Potentiometer

In der HV-Elektronik sind X9119 [7] 16-Bit Potentiometer verbaut. Digitale Potentiometer können z.B. über eine I²C-Schnittstelle programmiert werden und wie beim analogen Potentiometer kann deren Widerstandswert geändert werden. Dabei sollen sie möglichst linear arbeiten, also die Größe der Intervalle zwischen den Widerstandswerten soll möglichst gleich sein (außer bei logarithmischen Potentiometern, bei denen ein logarithmisches Verhalten verlangt ist). Außerdem soll die Auflösung möglichst hoch sein.

2.4 Operationsverstärker

Die in der HV-Elektronik eingebauten Operationsverstärker sind vom Typ TLV2374 [8]. Sie haben eine Vielzahl von Funktionen, je nachdem wie sie geschaltet sind. So können sie z.B. als Verstärker, invertierender Verstärker, Integrierer, etc. verwendet werden. In der HV-Elektronik wird ein Operationsverstärker als Transimpedanzverstärker vor den ADC zur Spannungsmessung und einer als Differenzverstärker vor den ADC zur Strommessung geschaltet (siehe Abbildung 2.1 oder Schaltplan im Anhang).

2.5 Temperatursensor

Um die Temperatur der Elektronik auslesen zu können, befindet sich ein LM75AD [9] Temperatursensor auf der Platine. Dieser kann im für diesen Zweck relevanten Bereich Temperaturen mit einer Auflösung von 0.125° C messen, dabei ist ein Offset von der tatsächlichen Temperatur von bis zu ±2° C angegeben. Die Daten dieses Sensors wurden bisher noch nicht zur Auswertung verwendet. Eine Temperaturüberwachung ist jedoch sehr sinnvoll, da die ADC-Werte und damit die gemessene Spannung und auch die APDs temperaturabhängig sind und durch eine genaue Charakterisierung der Temperaturabhängigkeit eine Kalibrierung möglich ist. Es fiel jedoch während der Messungen auf, dass die vom LM75AD ausgelesene Temperatur sich deutlich von der im Thermoschrank eingestellten Temperatur unterschied. Es bleibt zu klären, ob die HV-Elektronik warm wird, was sehr wahrscheinlich ist, oder ob der Temperatursensor nicht genau arbeitet.

3 Die Software für die HV-Regelungselektronik

Eine der Hauptaufgaben bestand darin, die Software für die HV-Regelungselektronik zu programmieren, beziehungsweise vorhandene Software zu erweitern und zu verbessern. Dabei bestand die Motivation darin, die Regelungselektronik derart zu kalibrieren, dass es möglich wird, die Ausgabespannung auf ein Zehntel Volt genau einzustellen.

Die Software zum Ansteuern der Potentiometer, ADCs, Temperatursensoren und der eeproms war bereits vorhanden, deckte aber nur low-level-Zugriffe auf die I^2C-Hardware ab. Mit diesem Grundsatz an Klassen und Funktionen war es daraufhin möglich ein Programm zu schreiben, welches die Potentiometer-Stellungen ändert und Spannung sowie Strom ausliest [10].

3.1 Das Programm „hvd-tools“

Damit die HV-Elektronik noch besser getestet werden konnte, wurde das Programm „hvd-tools“ geschrieben. Dieses bietet die Unterstützung von komplexeren Startparametern, wie z.B. die Auswahl der einzelnen Kanäle oder das Einstellen einer fixen Spannung.

Der Grundaufbau des Programms sieht wie folgt aus:

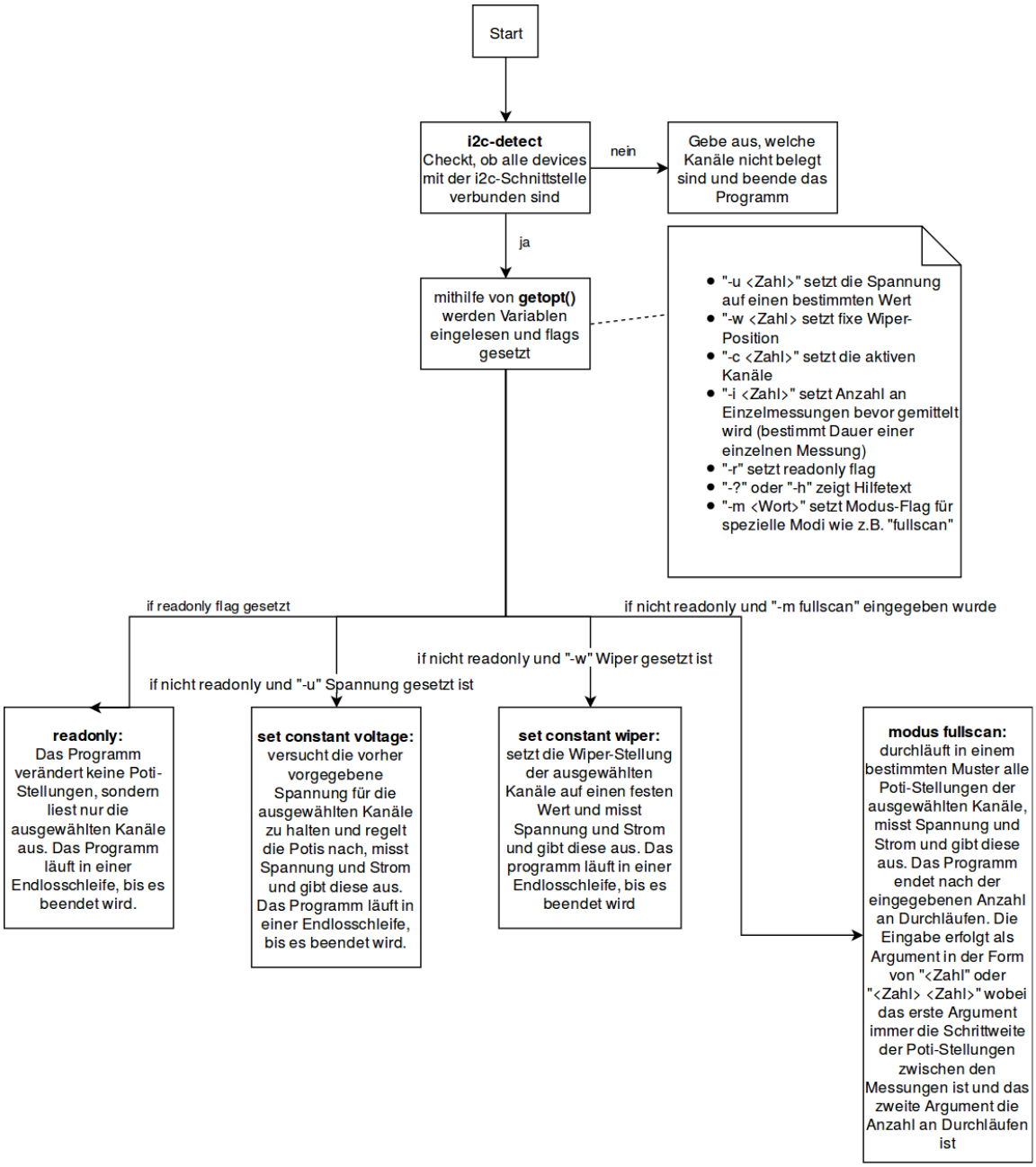

Abbildung 3.1: Grundaufbau des hvd-tools Programms.

Es soll jedoch noch um Funktionen erweitert werden, die nicht nur Messungen, sondern auch explizit die Kalibrierung mithilfe der gemessenen Daten ermöglichen soll. Diese Kalibrierung soll eine präzise Einstellung der ausgegebenen Spannung ermöglichen und erfolgt durch Vergleich der internen Spannungsmessung mit externen Messdaten. Der Programmabschnitt „i2c-detect“ wurde aus dem Open Source erhältlichen Quellcode des Programms „i2c-detect“, welches standardmäßig auf dem Raspbian-Betriebssystem installiert ist, kopiert und für die Zwecke dieses Programms verändert. So wurde z.B. die Erkennung der von unserem Programm benötigten, angeschlossenen I^2C-Kanäle in die Funktion des „i2c-detect“-Programms integriert und die „main“-Funktion des Programms in eine normale Funktion umgewandelt, die dann von „hvd-tools“ ausgeführt werden kann. Eine Schwierigkeit bestand darin, dass „i2c-detect“ in C, „hvd-tools“ jedoch in C++ geschrieben ist. Die Lösung dafür besteht darin, den C-Code zu einem Object-File zu kompilieren und diesen daraufhin an die restlichen C++-Object-Files zu hängen. Es muss lediglich dem Compiler von „hvd-tools“ mitgeteilt werden, dass der „i2c-detect“-Teil in C geschrieben ist [11].

Der Abschnitt zum Einlesen der Startparameter mithilfe von `getopt()` wurde einfach von einem älteren Programm kopiert. Das Grundprinzip besteht darin, dass beim Start gewisse Parameter übergeben werden können. Im Programm können dadurch flags gesetzt, bzw. Variablen verändert werden [12].

Zum einfachen Kompilieren des Programms wurde ein Makefile geschrieben, sodass mit dem einfachen Befehl `make` automatisch die Dateien, die seit dem letzten Kompilieren verändert worden sind, neu kompiliert werden [13].

3.2 Funktionen zum Auswerten der Daten: „data_analysis_tools“

Um den Teststand fertigzustellen, müssen die gemessenen Daten ausgewertet werden um eine Kalibrierung der HV-Elektronik zu ermöglichen. Dazu wurden einige Funktionen geschrieben, die dies ermöglichen sollen. So sind z.B. Funktionen zum Einlesen von Daten aus einer Datei, structs zum einfachen Speichern von Punkten oder Geraden, sowie Funktionen zum Aufteilen und Zusammenfügen von Datenpaketen vorhanden. Diese sind alle in der Datei „data_analysis_tools“ gespeichert. Dabei sind einige der Funktionen überladen [14], damit Standardwerte nicht immer neu eingegeben werden müssen. Die Erklärungen zu einzelnen Funktionen befinden sich im Anhang.

4 Messungen zur Funktionalität der Elektronik

Um ein Verständnis davon zu erhalten, wie präzise die HV-Regelungselektronik die Strom- und Spannungswerte misst und wie eine Kalibrierung möglich sein könnte, wurden zunächst Messreihen an unterschiedlichen Kanälen der HV-Elektronik mit verschiedenen Spannungslasten durchgeführt.

4.1 Messungen an den APDs

Als erstes wurden mit dem Prototypen der HV-Regelungselektronik einfache I-U-Kennlinien von APDs aufgenommen und die Messungen der einzelnen Kanäle und APDs verglichen. Bei diesen Messungen wurde die Temperatur konstant auf 15 °C gehalten.

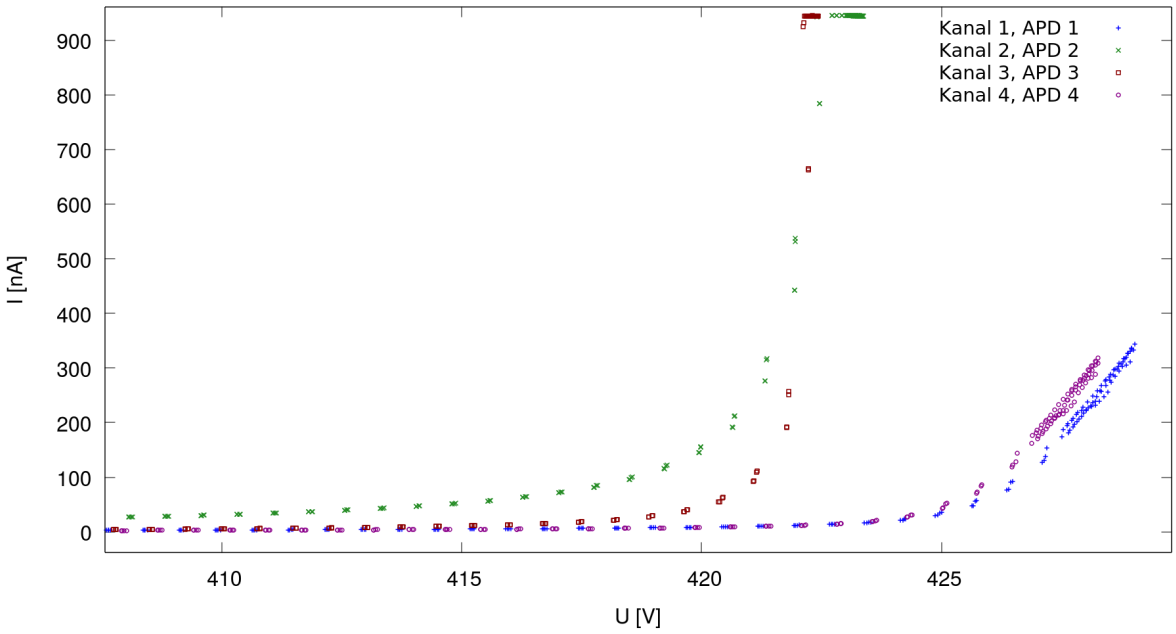

Abbildung 4.1: Messung der 4 APDs mit der HV-Elektronik

Es fällt auf, dass die Messungen mit Offsets in x- und y-Richtung behaftet sind und zudem noch verschieden stark ansteigen.

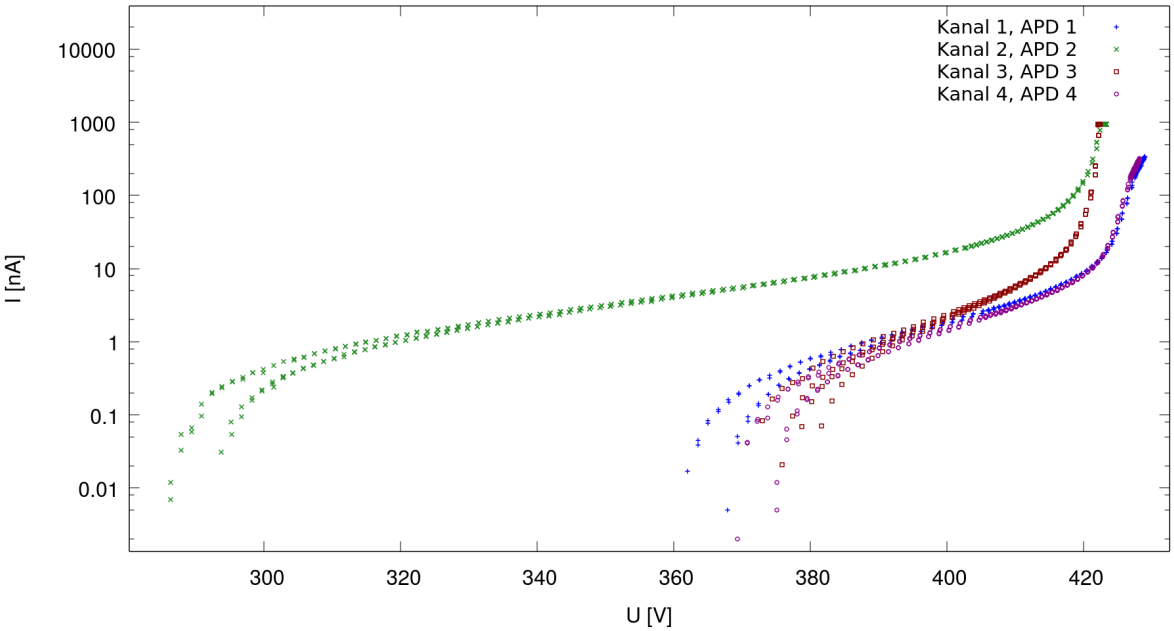

Abbildung 4.2: Messung der Kennlinien von 4 APDs mit der HV-Elektronik, logarithmische Darstellung

Dies war auch zu erwarten, da bekannt ist, dass die APDs unterschiedlichen Gain besitzen und die HV-Elektronik nicht kalibriert ist, sie also sowohl in der Spannungs- als auch in der Strommessung einen Offset hat, den es noch zu ermitteln gilt. Es stellte sich also die Frage, wie genau die Messungen mit der HV-Elektronik sind, also wie präzise Veränderungen in Spannung und Strom gemessen werden können, und wie die Spannungskalibrierung durchgeführt werden kann. Außerdem war nicht klar, wie stark temperaturabhängig die Messungen sind.

4.2 Messungen an 5.5 Gigaohm-Widerständen

Da die APDs sich untereinander sehr unterscheiden, stark temperaturabhängig sind und eine komplizierte I-U-Kennlinie besitzen, wurde versucht, große Widerstände als Referenz zu verwenden, um die einzelnen Kanäle der HV-Elektronik zu charakterisieren. Es wurden 5.5 GΩ Widerstände in Epoxidharz eingegossen, damit diese sich nicht durch äußere Einwirkung, wie z.B. Fett verändern können. Diese konnten sowohl mit der HV-Elektronik, als auch mit einem Keithley 2410 [15] Sourcemeter vermessen werden. Auch hier wurde eine I-U-Kennlinie erstellt, diese sollte aufgrund des ohmschen Gesetzes eine Gerade darstellen. Diese Messungen dienten zum Vergleich der mit der HV-Elektronik gemessenen Spannungen und Ströme mit den tatsächlichen.

Zunächst wurde die I-U-Kennlinie eines einzelnen Widerstands (R1) mit verschiedenen Kanälen der HV-Elektronik nacheinander aufgenommen und es zeigen sich deutliche Unterschiede.

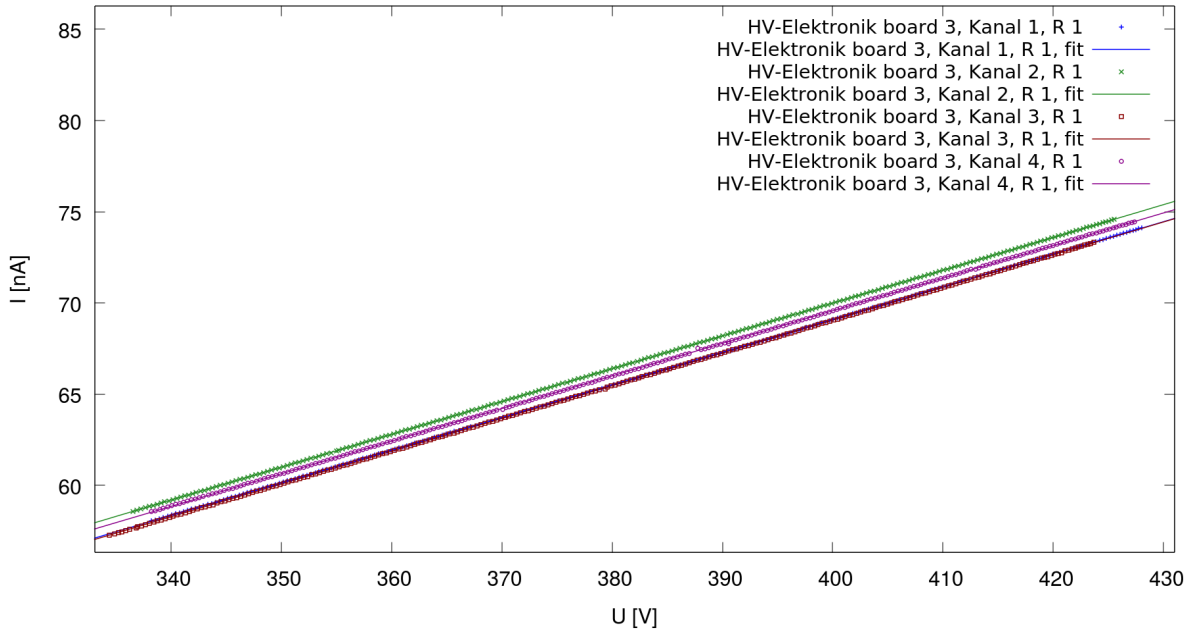

Abbildung 4.3: Messung 1 HV-Elektronik an 5.5 GΩ Widerstand, verschiedene Kanäle

In Abbildung 4.3 lässt sich erkennen, dass die verschiedenen Kanäle der HV-Elektronik offensichtlich unterschiedliche Offsets besitzen. Obwohl diese Messungen nicht temperaturstabilisiert durchgeführt wurden, sind die verschiedenen Messergebnisse dennoch nicht auf Temperaturschwankungen zurückführbar, da in einem relativ kurzen Zeitraum gemessen wurde und das Labor klimatisiert war. Es wurden Geradenfits erzeugt und die Abweichung der einzelnen Messpunkte von ihrer jeweiligen Geraden in Abhängikeit der Spannung dargestellt, um Hinweise auf nichtlineares Verhalten aufzuzeigen.

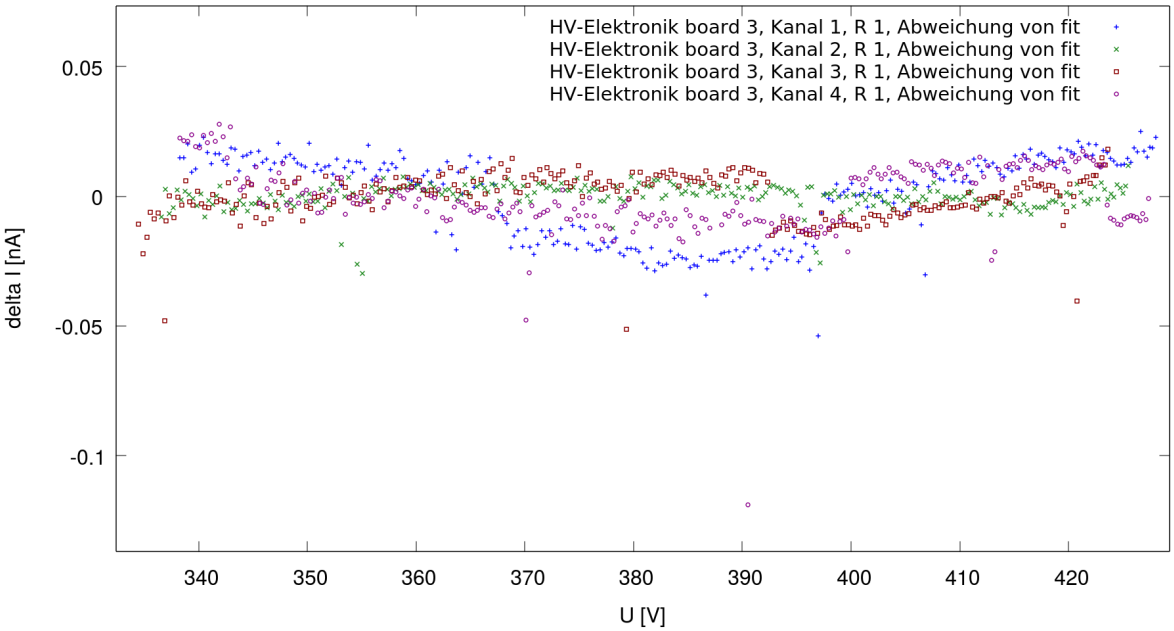

Abbildung 4.4: HV-Regelung an 5.5 GΩ Widerstand, Differenz zu Fitgeraden

In Abbildung 4.4 sind die Abweichungen der einzelnen Punkte von der Fit-Geraden dargestellt. Die vier Messungen wurden, da an einem einzigen Widerstand gemessen wurde, nicht gleichzeitig durchgeführt, was die markante Ähnlichkeit in Abweichungen von der Geraden ungewöhnlich erscheinen lässt. Es wird vermutet, dass dies einfach die Charakteristik des Widerstands (mit Leckströmen) darstellt. Es war schwierig mithilfe dieser Widerstände eine Kalibrierung durchzuführen, da bei so geringen Strömen die Messgenauigkeit vor allem für die Messung der Stromstärke nicht ausreicht. Selbst wenn eine genaue Messung möglich wäre, wäre dennoch nicht klar, ob jetzt ein Offset in x- oder y-Richtung besteht. Es ist also nicht einfach möglich aus einer solchen Geraden den Spannungsoffset zu bestimmen, wenn der Stromoffset unbekannt ist. Dieses Problem besteht nicht bei I-U-Kennlinien von APDs, da der Verlauf dort nicht linear ist.

4.3 Vergleich Messung HV-Elektronik zu Messung Keithley an Messungen an APDs

Das Keithley 2410 Sourcemeter ist eine sehr präzise (0.012% Präzision) Spannungsversorgung bis 1100 V, welche gleichzeitig oder alternativ als Multimeter verwendet werden kann. Die ersten Messungen, die mit dem Keithley durchgeführt wurden, waren wieder das Aufnehmen von I-U-Kennlinien von APDs und Widerständen. Es wurde für jede APD zweimal die I-U-Kurve aufgenommen, ohne Temperaturstabilisierung, um Abweichungen zu erkennen, welche auf eine Temperaturabhängigkeit hinweisen.

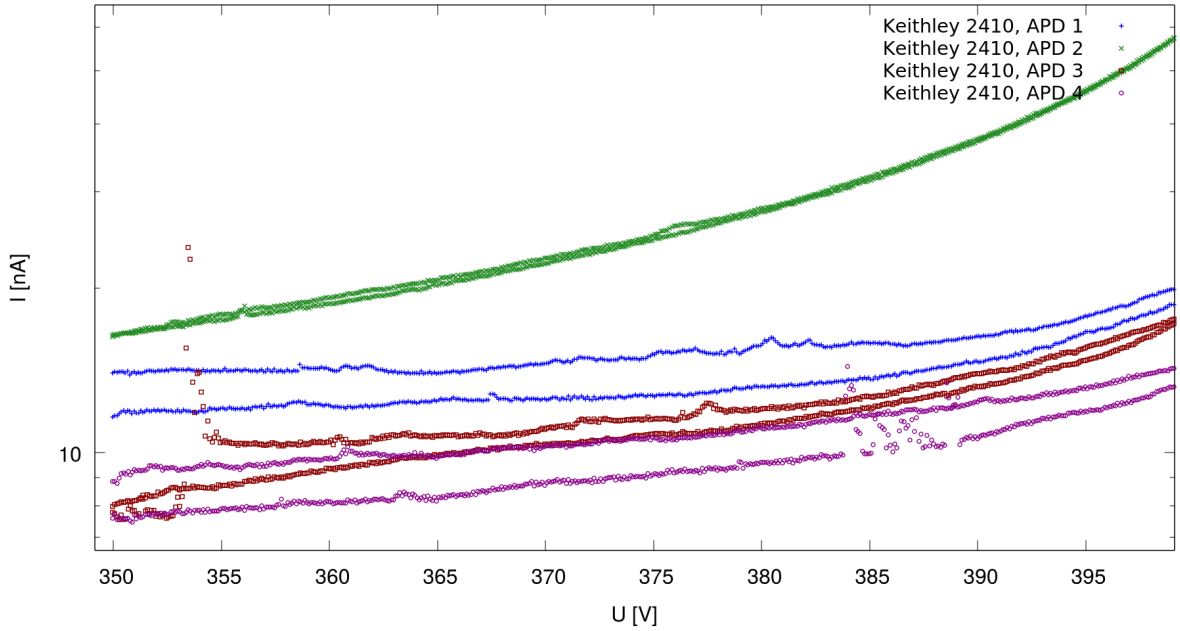

Abbildung 4.5: Messung der I-U-Kennlinie der 4 APDs mithilfe des Keithley 2410 Sourcemeters, logarithmische Darstellung.

In Abbildung 4.5 wird deutlich, dass die APDs unterschiedlichen Gain bei direkt hintereinander durchgeführten Messungen besitzen. Es könnte sein, dass dieses Verhalten auf Erwärmung der APDs und deren Temperaturanfälligkeit zurückzuführen ist. Es könnte auch einen anderen Grund haben, welcher noch nicht genau bekannt ist.

Dennoch wurde versucht, eine der mit der HV-Elektronik aufgenommenen Kennlinien an eine mit dem Keithley 2410 aufgenommenen Kennlinie anzugleichen. Dazu reicht es, den x- und y-Offset und einen Faktor zu finden, um eine der Kurven der anderen anzugleichen. Es wurden Messungen von APD 2 mit der HV-Elektronik und mit dem Keithley 2410 Sourcemeter durchgeführt und miteinander verglichen (siehe Abbildung 4.6).

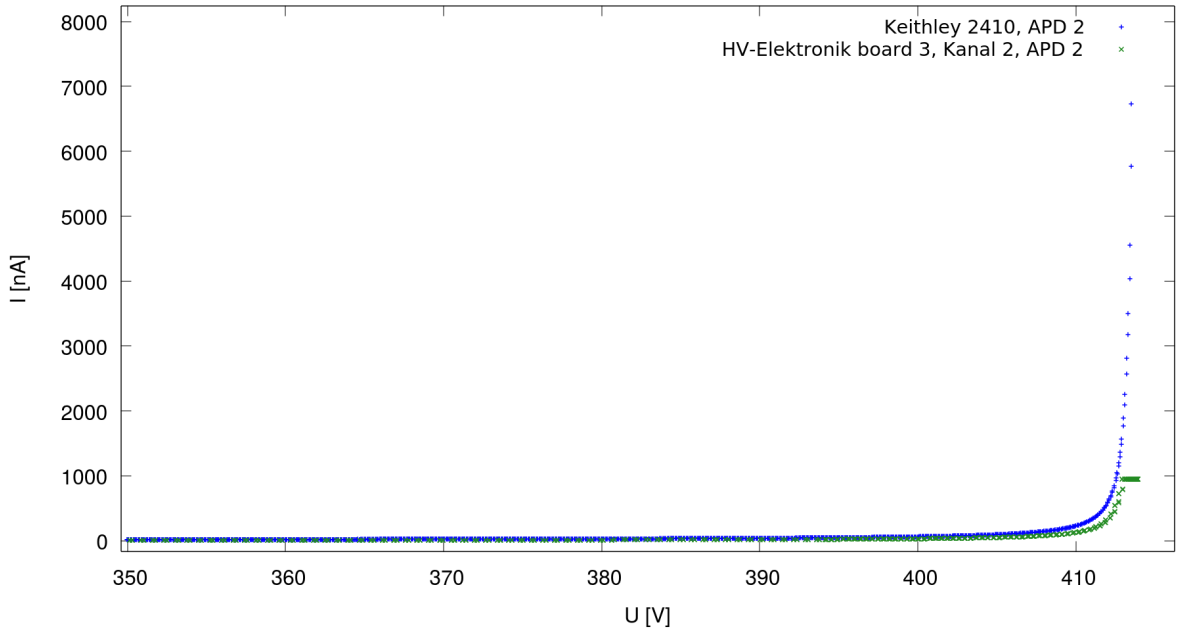

Abbildung 4.6: Vergleich der Messungen von APD 2 mit der HV-Elektronik und mit dem Keithley 2410 Sourcemeter.

Diese APD wurde ausgewählt, da der x-Offset hier annähernd bei null liegt. Falls dies nicht der Fall sein sollte, muss dieser zunächst bestimmt werden.

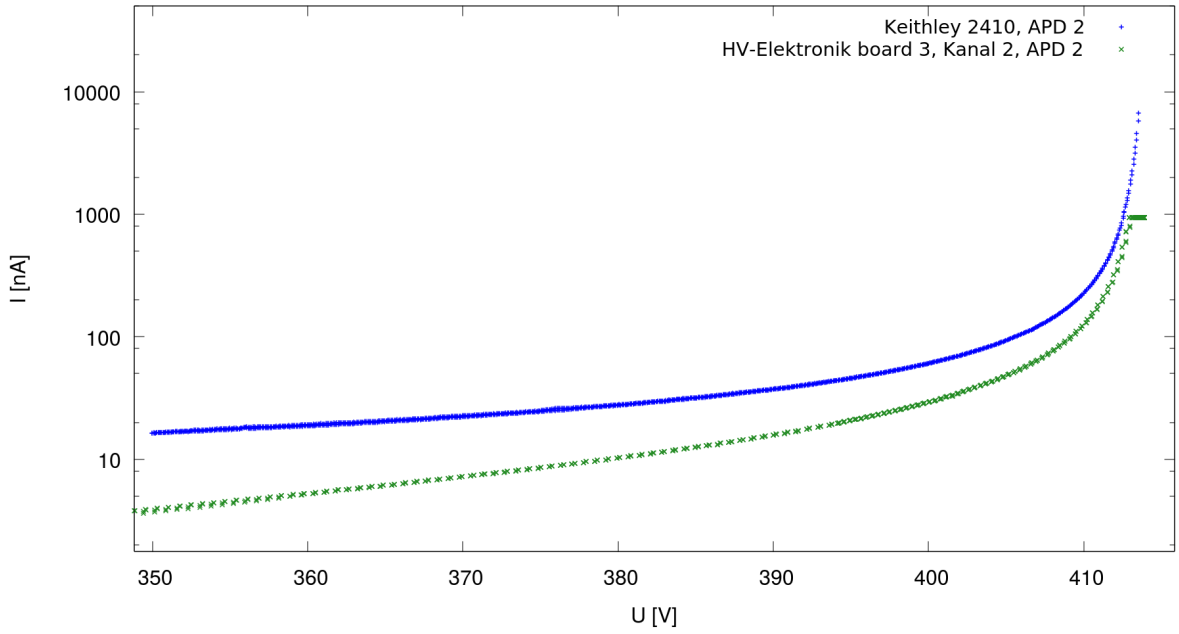

Abbildung 4.7: Vergleich der korrigierten Messungen von APD 2 mit der HV-Elektronik und mit dem Keithley 2410 Sourcemeter, logarithmische Darstellung.

In der logarithmischen Darstellung wird ein Offset in y-Richtung durch ein schnelleres oder langsameres Ansteigen der Kurve deutlich. Ein Faktor in der normalen Darstellung macht sich durch einen Offset in logarithmischer Darstellung bemerkbar. Wenn der x-Offset bekannt ist (muss zuerst angeglichen werden), können durch geschicktes Verändern des y-Offsets und des Vorfaktors die y-Werte einer Kurve so verändert werden, dass sie genau auf der anderen Kurve liegen (siehe Abbildung).

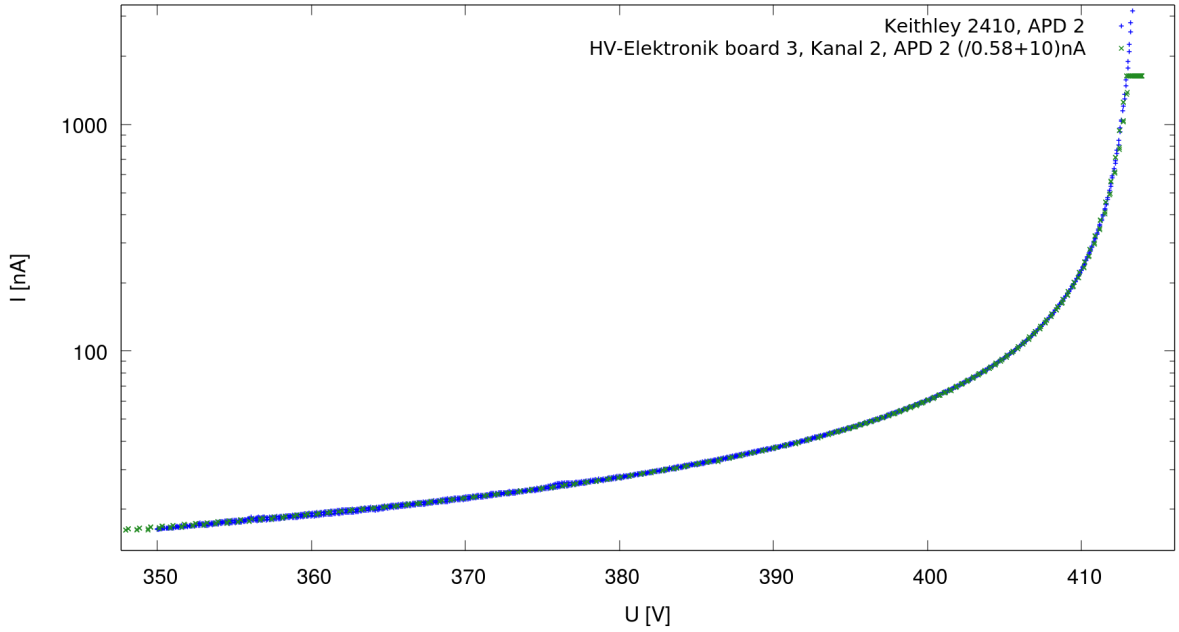

Abbildung 4.8: Vergleich der korrigierten Messungen von APD 2 mit der HV-Elektronik und mit dem Keithley 2410 Sourcemeter, logarithmische Darstellung

Wie in Abbildung 4.8 zu sehen ist, lässt sich durch Verschieben und Strecken der I-U-Kurve der HV-Elektronik eine Übereinstimmung mit der Kurve des Keithley Sourcemeters erzeugen. Durch die logarithmische Darstellung entsteht hier der Schein, es wäre schon eine sehr genaue Übereinstimmung erreicht worden, Abbildung 4.8 zeigt nur, dass es prinzipiell möglich ist.

4.4 Regelung der Ausgangsspannung

Die zuvor beschriebene Regelfunktion wurde getestet, indem die gesamte Elektronik in einem Thermoschrank bei verschiedenen Temperaturen gemessen wurde. Die Temperatur wurde dabei in 5 °C Schritten alle 24 Stunden von 20 °C auf 5 °C variiert. Ziel war es, mithilfe des Regelkreises auf einer konstanten Spannung zu bleiben, welche nur maximal ein Zehntel Volt von dem eingegebenen Sollwert von 379.3 V abweichen sollte. Dabei wurde nur auf interne Spannungsmessung der HV-Regelelektronik als Regelparameter zurückgegriffen, welche wie im Abschnitt 4.3 beschrieben von der tatsächlich ausgegebenen Spannung abweicht. Zum Vergleich wurden zwei Kanäle geregelt und die anderen beiden nicht.

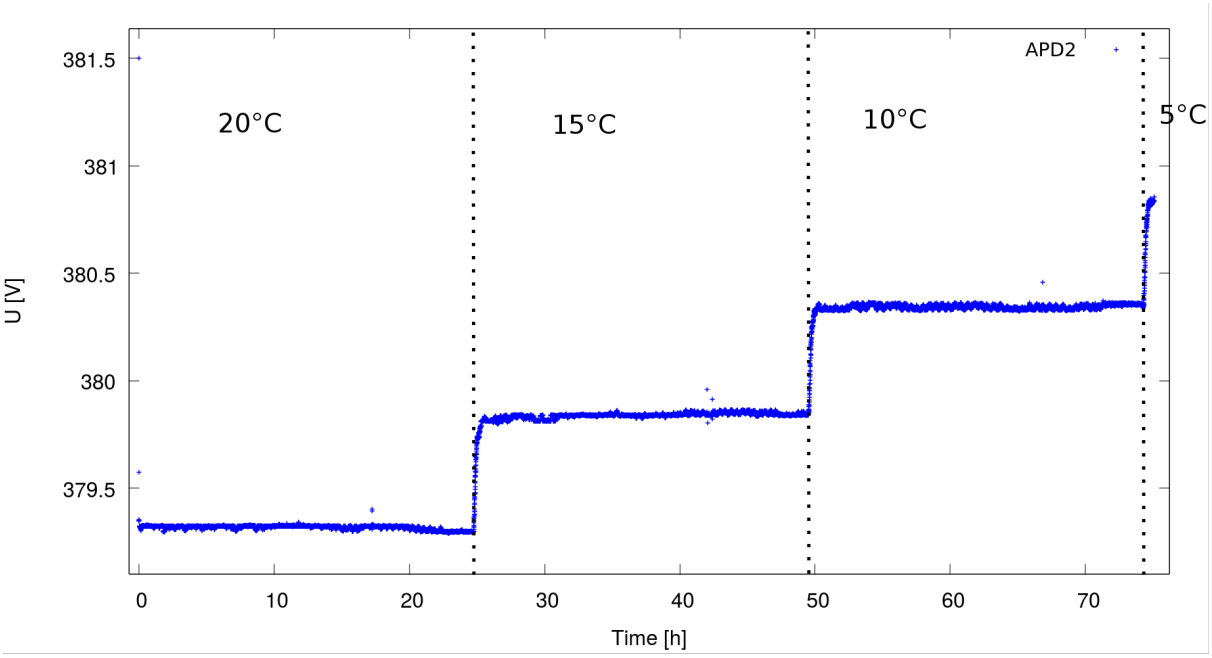

Abbildung 4.9: APD2 nicht reguliert, bei unterschiedlichen Temperaturen ändert sich die Spannung bei fester Poti-Stellung

Aus Abbildung 4.9 geht hervor, dass die von der HV-Elektronik gemessene Ausgabespannung bei konstanter Poti-Stellung um ca. 0.1 V/K variiert.

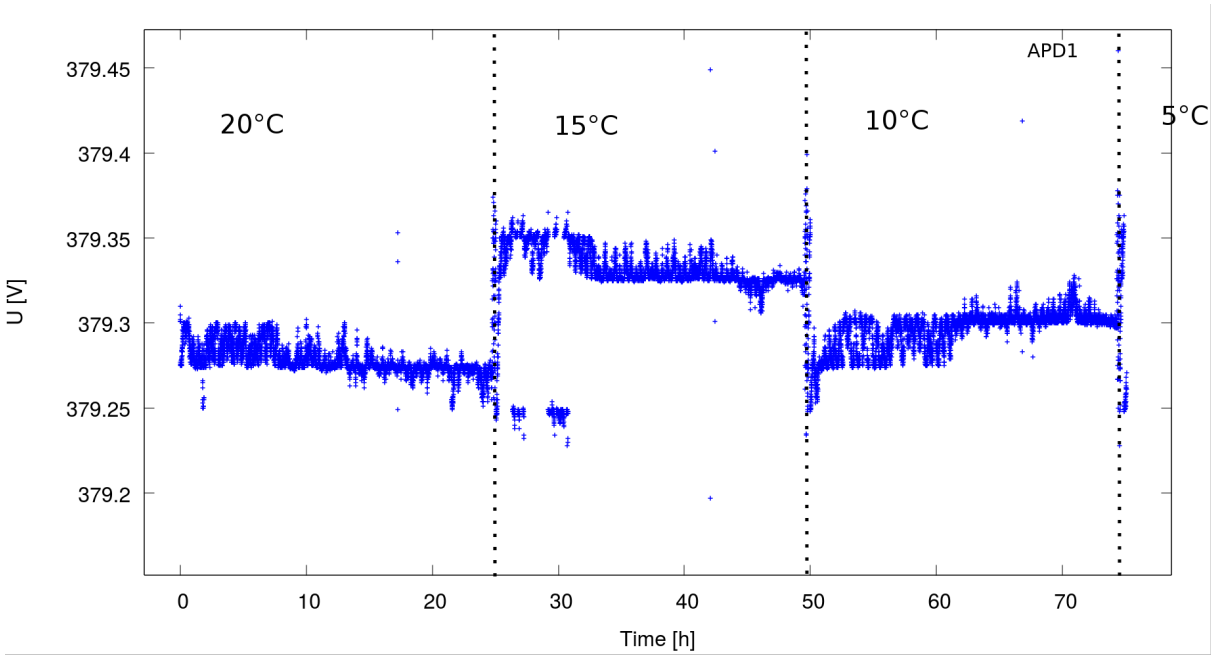

Abbildung 4.10: APD1 im Thermoschrank, Spannung wird auf 379.3 V reguliert, kleine Abweichungen (Drift) bei unterschiedlichen Temperaturen

Wie in Abbildung 4.10 zu sehen ist, funktioniert der Regelkreis sehr gut. Im Vergleich zum nicht regulierten Verhalten (Abbildung 4.9) ist die Abweichung vom gewünschten Wert nicht größer als die geforderten 0.1 V. Durch Verkleinerung des gesamten Spannungsbereichs kann mit den auf 1024 Poti-Stellungen begrenzten Einstellmöglichkeiten eine noch bessere Genauigkeit erzielt werden, da die 0.1 V Abweichung allein durch die Genauigkeit des Potis begrenzt ist.

Es besteht jedoch weiterhin das Problem der nicht genau bekannten Beziehung zwischen der Ausgabespannung, die von der HV-Elektronik gemessen wird, und der realen Ausgabespannung.

4.5 Vergleich von On-Board Spannungsmessung und tatsächlicher Ausgangsspannung

Es blieb weiterhin zu klären, wie sich die von der Regelungselektronik gemessene Spannung von der tatsächlichen Spannung unterscheidet. Eine Idee, dies herauszufinden, war es, das Keithley 2410 Sourcemeter als möglichst genaue Spannungsquelle zu verwenden und ein Keithley 2000 Multimeter [16] zum Messen der Spannung zu verwenden. Diese Werte wurden mit einer Zeitmarke[1] versehen und daraufhin mit den Werten der HV-Regelungselektronik verglichen, welche gleichzeitig die Ausgabespannung gemessen hat. Es wurden dabei verschiedene Poti-Stellungen durchlaufen. Im Idealfall wäre ein gerader Spannungsanstieg zu erwarten, der bei HV-Elektronik und Keithley Multimeter deckungsgleich ist. Dass es einen irgendwie gearteten Offset zwischen Spannungsmessung und tatsächlicher Ausgabespannung gibt, war schon vorher bekannt.

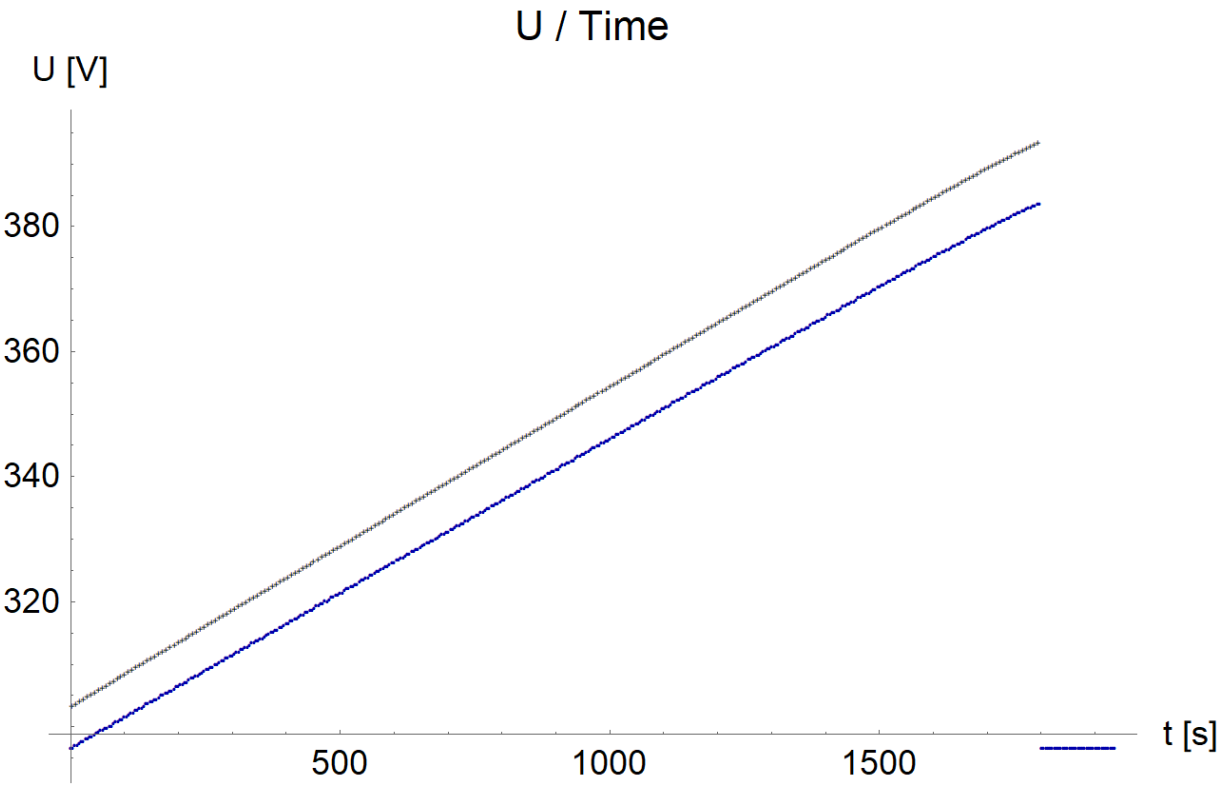

Abbildung 4.11: Messung der On-Board gemessenen Spannung und Ausgangsspannung mit Keithley 2000 gemessen
(unten: HV-Elektronik Kanal 1, oben: Keithley 2000 Multimeter).

Es fiel auf, dass aufgrund des im Verhältnis zur APD sehr geringen Innenwiderstands des Multimeters ein sehr großer Strom fließt (über Faktor 10 größer). Dies könnte zu Pro-

[1] `https://en.wikipedia.org/wiki/Unix_time`
(24.10.2017, 9:11 Uhr)

blemen mit der internen Spannungsmessung der HV-Elektronik geführt haben. Wie in Abbildung 4.11 zu sehen ist, verhält sich die Spannung annähernd linear. Jedoch kann ein deutlicher Offset zwischen Keithley und HV-Elektronik erkannt werden, welcher mit zunehmender Spannung größer wird. Viel mehr kann aus dieser Abbildung nicht entnommen werden, da die x-Achse nur zur Synchronisation der Spannungsmesswerte dient und die Krümmung die sich bei hohen Spannungen abzeichnet auch dadurch zustande gekommen sein könnte, dass die Einzelmessungen länger gedauert haben. Diese Krümmung ist demnach nicht aussagekräftig.
Um eine Aussage über das Verhalten des Offsets treffen zu können, wurde nun in Abständen von ca. 20 Sekunden die Differenz zwischen zwei ungefähr übereinander liegenden Punkten berechnet und gegen die Zeit aufgetragen (Abbildung 4.12). Ein Geradenfit für beide Kurven wäre hier nicht angebracht gewesen, da schon an diesem Plot zu erkennen ist, dass die Kurve nicht gerade ist. Es wurde dennoch ein linearer Offset zwischen den Kurven vermutet.

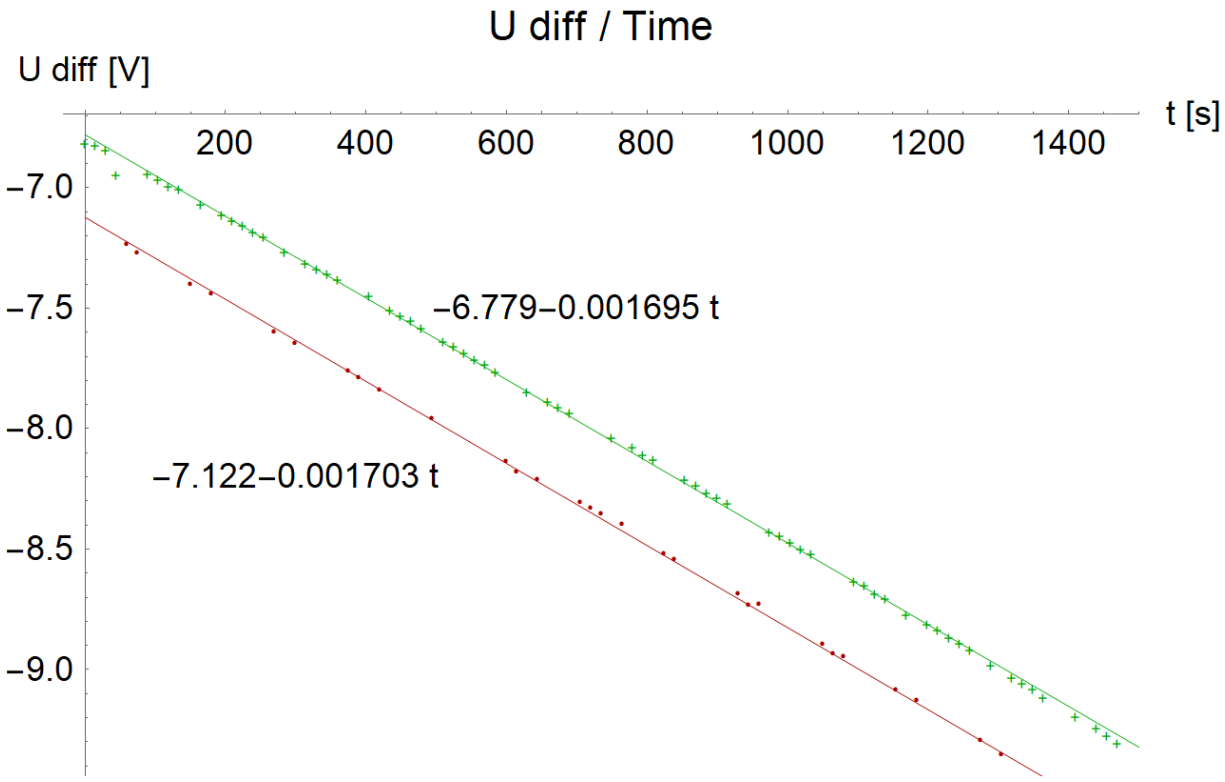

Abbildung 4.12: Messung der Ausgabespannung mit HV-Elektronik und Keithley 2000
(oben: Messpunkte der HV-Elektronik,
unten: Messpunkte des Keithley 2000 Multimeters).

Wären die Punkte, wie zunächst angenommen, statistisch um ihre jeweilige Kurve verteilt und wäre der Offset zwischen den beiden Kurven linear, würde sich als Offset eine Gerade ergeben, deren Punkte wieder statistisch um diese Gerade verteilt sind. Es zeigen sich deutlich zwei Geraden ab. Dies rührt daher, dass die Messung nicht perfekt synchron, also von

ein und demselben Programm, durchgeführt worden ist, sondern die beiden Programme nur durch einen Zeitstempel synchronisiert wurden und die Messintervalle unterschiedlich waren.

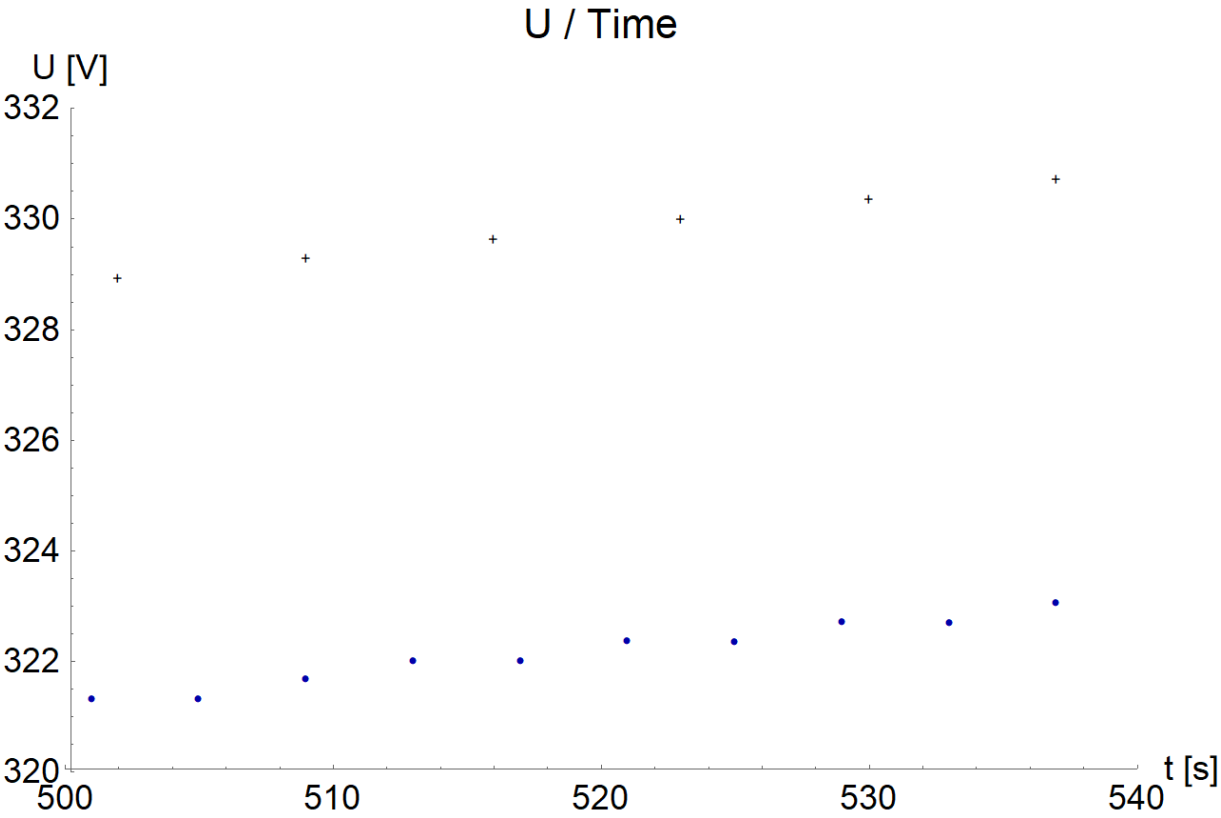

Abbildung 4.13: Messung der Differenz der Ausgabespannung zwischen HV-Elektronik und Keithley 2000 (vergrößert)
(oben: Messpunkte der HV-Elektronik,
unten: Messpunkte des Keithley 2000 Multimeters).

In Abbildung 4.13 ist deutlich zu erkennen, dass die Messungen des Keithley 2000 Multimeters in ca. jeder zweiten Messung dann stattfinden, wenn die Spannung der HV-Elektronik noch nicht eingependelt ist. Dies führt zu dem Phänomen, dass zwei Geraden als Differenz zwischen den Messwerten entstehen. Es wäre demnach sinnvoll, ein Programm zu schreiben, welches sowohl Keithley als auch HV-Elektronik ansteuern kann.

Diese Messung zeigt schon, dass der Offset zwischen den beiden Messungen linear mit der Spannung bzw. mit dem Strom stark ansteigt. Um die vorher bereits vermutete Verfälschung der Messung mit der HV-Elektronik durch zu großen Stromfluss zu bestätigen, wurde eine weitere synchrone Messung bei niedrigeren Spannungen (bis 50 V) durchgeführt.

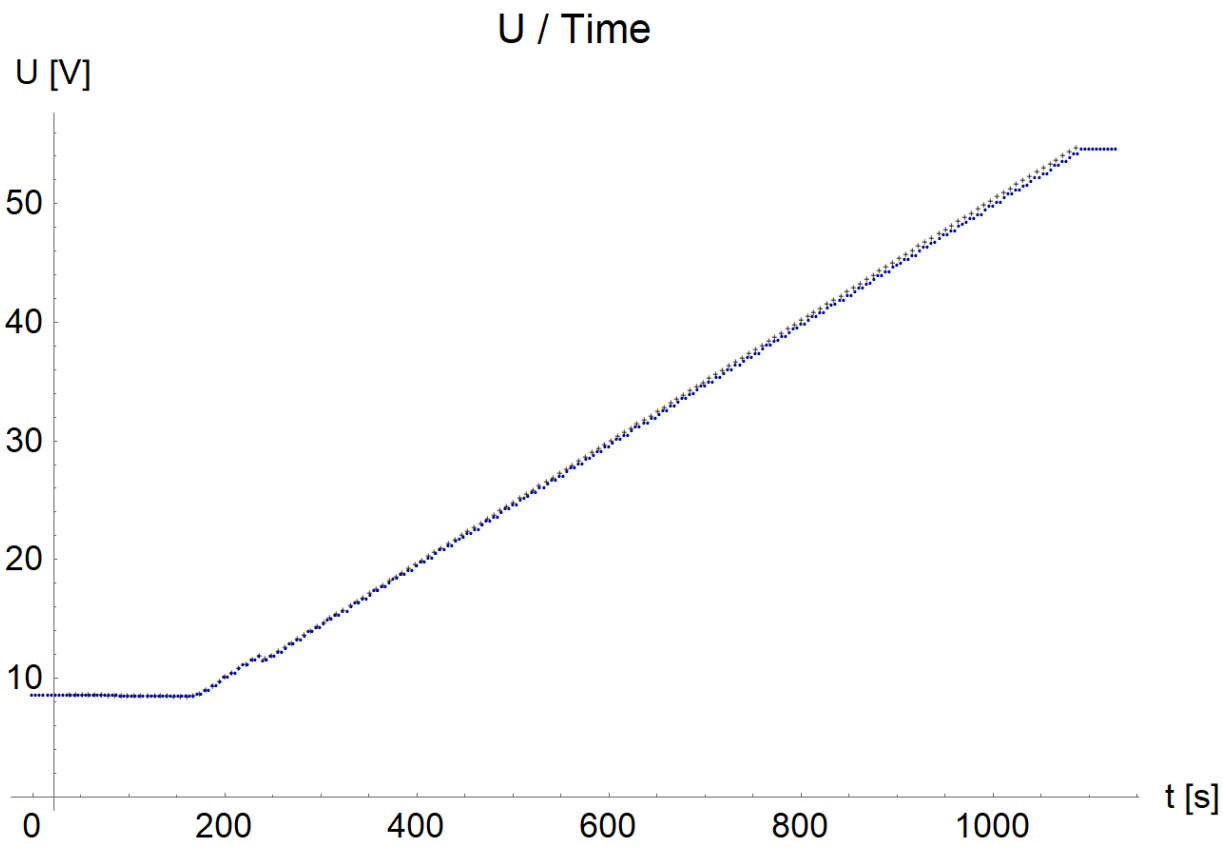

Abbildung 4.14: Messung der Ausgabespannung mit HV-Elektronik und Keithley 2000 (unten: HV-Elektronik Kanal 1, oben: Keithley 2000 Multimeter).

Es zeigt sich deutlich, dass der Offset bei niedrigen Spannungen (und damit auch bei niedrigen Strömen) wesentlich geringer ist. Anhand des Schaltplans in Abbildung 3.1 zeigt sich, dass durch einen zu geringen Widerstand an der Stelle der APD, der Spannungsteiler nicht mehr richtig funktioniert und zu wenig Spannung am Operationsverstärker und damit am Spannungsmessungs-ADC anliegt. Dies führt zur Messung einer geringeren Spannung durch die HV-Elektronik, als eigentlich ausgegeben wird.

5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick

5.1 Ergebnisse

Im Rahmen dieser Thesis wurden Messungen der HV-Regelungselektronik für die Spannungsversorgung der APDs des EMC des geplanten $\overline{\text{P}}$ANDA-Detektors getestet. Ziel war es, einen Teststand zu entwerfen, welcher automatisch die HV-Regelungselektronik kalibriert, so dass die ausgegebene Spannung bis auf ein Zehntel Volt genau eingestellt werden kann. Dazu wurden zunächst I-U-Kennlinien von APDs mit der HV-Regelungselektronik vermessen. Es stellte sich die Frage nach der Temperaturabhängigkeit der APDs und der HV-Regelungselektronik, sowie der Frage nach der besten Möglichkeit einer Kalibrierung. Daraufhin wurde die Idee einer Kalibrierung anhand von hochohmigen Widerständen in Betracht gezogen und Messungen an 5.5 GΩ-Widerständen durchgeführt. Diese Messungen können als Abschätzung der Güte der On-Board-Messungen verwendet werden, sie alleine reichen jedoch nicht für eine Kalibration, da nicht beide Offsets (Strom- und Spannungsoffset) aus einer Geraden bestimmt werden können. Als nächstes wurde mit einem hochpräzisen Messgerät die I-U-Kennlinien der APDs vermessen und mit den Messungen der HV-Elektronik verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass die I-U-Kennlinien, die von dem genauen Messgerät direkt hintereinander gemessen wurden, voneinander abweichen, was eine starke Temperaturabhängigkeit der APDs aufzeigt. Bei dem Vergleich mit Messungen durch die HV-Elektronik konnte durch Einstellen von x- und y-Offsets und eines Faktors die eine Kurve auf die andere Kurve gelegt werden, was zeigt, dass eine Kalibrierung anhand von Referenzkurven von APDs theoretisch möglich ist. Ein Algorithmus, welcher diese Aufgabe automatisch übernimmt, muss noch erstellt werden. Die HV-Elektronik und auch die APDs sind temperaturabhängig (bei der HV-Elektronik ca. 0.1 V/K). Es empfiehlt sich, jede Messung im Labor bei möglichst konstanter und klar definierter Temperatur durchzuführen und auch erst zu messen, wenn die APDs und die HV-Elektronik auf einer gewissen Betriebstemperatur sind. Zum Schluss wurde die von der HV-Elektronik ausgegebene Spannung direkt mit einem sehr präzisen Multimeter gemessen. Bei dieser Messung wurde jedoch festgestellt, dass durch den geringen Innenwiderstand des Multimeters eine zu große Last an der HV-Elektronik hängt und dadurch die Messung verfälscht wird. Jene direkte Messung der Ausgangsspannung scheint dennoch die erfolgversprechendste Methode zur Kalibrierung im Labor zu sein. Jedoch müsste das Problem mit den zu großen Strömen und damit verbundenem Messfehler gelöst werden. Für eine spätere Korrektur der Kalibrierung ist die Methode der Kalibrierung anhand von Referenz-APDs die beste Lösung.

5.2 Ausblick

Als nächsten Schritt wäre es sinnvoll, die Auslesesoftware des Keithley 2000 Multimeters mit der Auslesesoftware der HV-Elektronik zu koppeln, um gleichzeitig bei beiden Geräten die Spannung messen zu können. Es sollte dafür ein Operationsverstärker mit Rückkopplung vor das Keithley 2000 geschaltet werden, damit die Impedanz erhöht wird, das Keithley nicht eine zu große Last darstellt und das Messergebnis der HV-Elektronik nicht beeinflusst wird. Es müsste jedoch ein Operationsverstärker gefunden werden, welcher 400 V aushält. Alternativ müsste bei niedrigeren Spannungen eine Kalibrierung durchgeführt werden, wobei nicht klar wäre, ob dies zum Erfolg führen würde. Es wird vermutet, dass dadurch eine präzise Kalibrierung im Labor möglich ist. Um eine Kalibrierung während des Betriebs durchführen zu können, müsste diese dann anhand der I-U-Kennlinie der jeweiligen APDs durchgeführt werden. Dass dies prinzipiell möglich ist, wurde im Abschnitt 4.3 gezeigt, eine genauere Betrachtung wäre noch durchzuführen, inklusive dem Erstellen eines Algorithmus, welcher die Kalibrierung übernimmt. Vor allem bei dieser Methode müsste genau auf die Temperatur geachtet werden und es müsste bei genau gleichen Bedingungen gemessen werden. Alternativ könnte die genaue Temperaturabhängigkeit von APD und HV-Elektronik bestimmt und in einer Tabelle hinterlegt werden.

Literaturverzeichnis

[1] FAIR-Anlage. [Online]. Available: www.fair-center.eu/public/what-is-fair/accelerators.html

[2] PANDA-Collaboration, "Physics performance report for panda: Strong interaction studies with antiprotons," *arXiv:0903.3905 [hep-ex]*, 2009.

[3] PANDA-Detektor. [Online]. Available: https://panda.gsi.de/article/panda-detector-overview

[4] PANDA-EMC. [Online]. Available: https://panda.gsi.de/oldwww/html/det/emc/emc_new.png

[5] Raspberry Pi. [Online]. Available: https://www.raspberrypi.org/help/

[6] "ADS1115 ADC Datasheet." [Online]. Available: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/ads1115.pdf

[7] "X9119 Digital Potentiometer Datasheet." [Online]. Available: https://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/x911/x9119.pdf

[8] "TLV2374 OpAmp Datasheet." [Online]. Available: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv2371.pdf

[9] "LM75AD Temperatursensor Datasheet." [Online]. Available: http://www.mouser.com/ds/2/302/LM75A-1126516.pdf

[10] C. L. Hahn, "Measurements on the radiation hardness of the high voltage subdistribution prototype of the electromagnetic calorimeter for the panda experiment," Master Thesis, Justus-Liebig-Universitaet Giessen, May 2017.

[11] extern C. [Online]. Available: https://stackoverflow.com/questions/1041866/in-c-source-what-is-the-effect-of-extern-c

[12] getopt. [Online]. Available: https://www.gnu.org/software/libc/manual/html_node/Example-of-Getopt.html

[13] Makefile-Tutorial. [Online]. Available: https://www.cs.umd.edu/class/fall2002/cmsc214/Tutorial/makefile.html

[14] function overloading. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Function_overloading

[15] "Keithley 2410 Sourcemeter Datasheet." [Online]. Available: http://www.testequipmentdepot.com/keithley/sourcemeter-smu-instruments/single-channel-sourcemeter-smu-instrument-2410.htm

[16] "Keithley 2000 Multimeter Datasheet." [Online]. Available: https://www.tek.com/tektronix-and-keithley-digital-multimeter/keithley-2000-series-6%C2%BD-digit-multimeter-scanning

A Anhang

A.1 Schaltplan

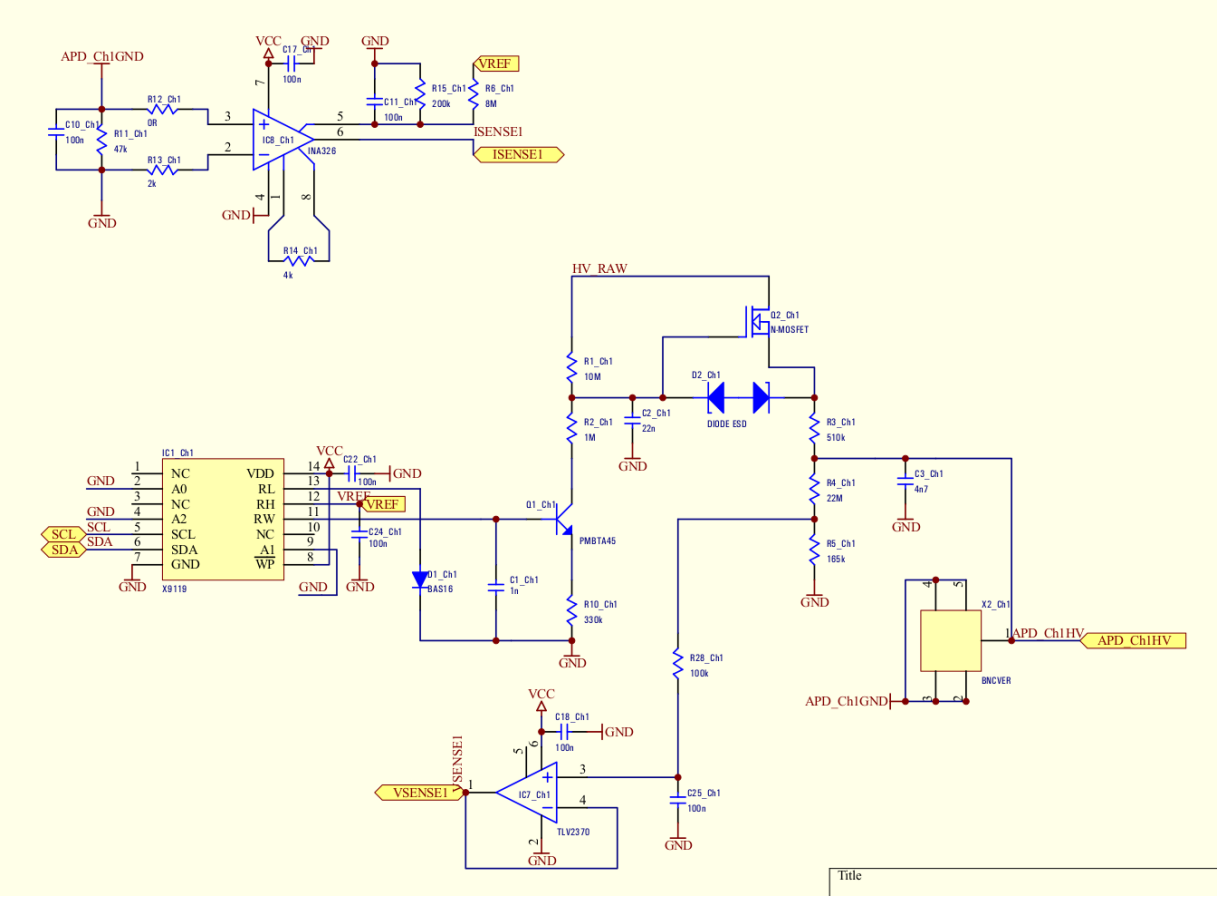

Abbildung A.1: Schaltplan eines Kanals der HV-Elektronik, detailliert

A.2 Funktionen

Strukturen und Eingabe- Ausgabe- bzw. Formatierungsfunktionen:

„Point“ struct
Um Datenpunkte zu analysieren, wurde ein struct „Point“ erfunden, welches x- und y-Werte (als „double“) eines Punktes speichert.

„Line“ struct
Eine Linie ist hier als Gerade mit linker und rechter Grenze definiert (a*x+b), enthält also die Variablen „a“, „b“, „left“ und „right“. Dabei entsprechen „left“ und „right“ den x-Werten der linken bzw. rechten Grenze der Linie.

„LinePointFormat“ struct
Auch eine Definition für eine Linie, jedoch wird diese hier durch zwei Punkte, also zwei „Point“ structs (p1 und p2), definiert.

„getDataFromFile“
Diese Funktion dient dazu, Daten aus einer Datei zu lesen und in einem Vector zu speichern. Erhält einen (in der Regel leeren) „std::vector“ der Typen „Point“, „int“, „double“ oder „std::string“ als Referenz. In diesen Vector werden die aus der Datei gelesenen Daten gespeichert. Da sie als Referenz übergeben wurden, werden die Originalen Vectoren beschrieben. Außerdem erhält die Funktion weiterhin in jedem Fall einen Dateinamen als „std::string“. Darüber hinaus erhält die Funktion je nachdem, welcher Variablentyp gewählt worden ist, Informationen über die Spalten und Zeilen, die ausgelesen werden müssen und zum Schluss noch, welches Trennzeichen zwischen den Spalten steht. Die Informationen über die auszulesenden Spalten variiert je nach Art des Vectors, so müssen z.B. für einen Vector vom Typ „Point“ zwei Spalten (der x- und y-Werte) angegeben werden, beim Vector vom Typ „std::string“ gar keine, da hier ganze Zeilen ausgelesen werden sollen.

„printData“
Diese Funktion akzeptiert einen Vector jeder Art von struct, welcher im Rahmen dieser Funktionensammlung erstellt worden ist, Typ „int“, „double“ oder „std::string“ und zusätzlich optional einen Dateinamen für das Schreiben in eine Datei. Wird kein Dateiname eingegeben, wird der Inhalt des Vectors auf der Konsole ausgegeben.

„getLinesAsXYPoints“
Wandelt einen Vector vom Typ „Line“ in einen vector vom Typ „LinePointFormat“ um.

„countLines“
Erhält einen Dateinamen und gibt die Anzahl Zeilen in der Datei aus unter Verwendung der in „<algorithm>“ enthaltenen „count“-Funktion in Kombination mit einem „Istream-Iterator“.

„splitAtWiperMinMax“
: Diese Funktion erhält einen Vector vom Typ „std::string“, der alle Zeilen einer Datei enthält, einen leeren Vector von einem Vector vom Typ „std::string“ und einen Vector vom Typ „int“, welcher die Pottentiometerstellungen (also genau eine Spalte des ersten Vectors) enthält. Der erste Vector wird an jedem Minimum bzw. Maximum der Wiperstellung aufgeteilt und die einzelnen Fragmente in den zweiten, am Anfang leeren Vector geschrieben.

„join“
: Ist eine für Vectoren der Typen „Line“, „Point“ und „LinePointFormat“ definierte Funktion, welche zwei Daten enthaltende und einen leeren Vector übergeben bekommt und die beiden nicht leeren Vectoren zusammenfügt.

Weitere Hilfs-Funktionen sind selbsterklärend oder nicht weiter bedeutend oder nicht ausgereift.

Funktionen, die für das Kalibrieren der HV-Elektronik und zum Auswerten der Daten entscheidend sind:

„linearFit“
: Diese Funktion bekommt einen Vector aus „Points“ übergeben und gibt eine Linie vom Typ „Line“ (als Rückgabewert) zurück, wobei erster und Letzter Punkt die Grenzen markieren.

„getLines“
: Hier wird ein leerer Vector vom Typ „Line“, ein voller Vector vom Typ „Point“ und eine Bin-Größe übergeben. Die Funktion nimmt jeweils alle Punkte des „Point“-Vectors, welche sich in einem Bin befinden, nutzt die Funktion „linearFit“ zum Fitten einer Linie in diesem Bereich und schreibt alle Linien in den „Line“-Vector.

„getParameters“
: Diese Funktion sollte ursprünglich die Kalibrierung an APD-Kennlinien durchführen, ist jedoch noch nicht fertig und funktioniert nicht. Es sollten Parameter aus dem Vergleich der Linien, welche mithilfe der vorher beschriebenen Funktionen aus der Referenzkennlinie entstanden sind, mit der zu kalibrierenden Kurve berechnet werden. Diese Parameter sollten dann ein Angleichen der gemessenen APD-Kennlinie an die Referenzkennlinie ermöglichen, was einer Kalibrierung des Kanals entsprechen würde.

A.3 Plots

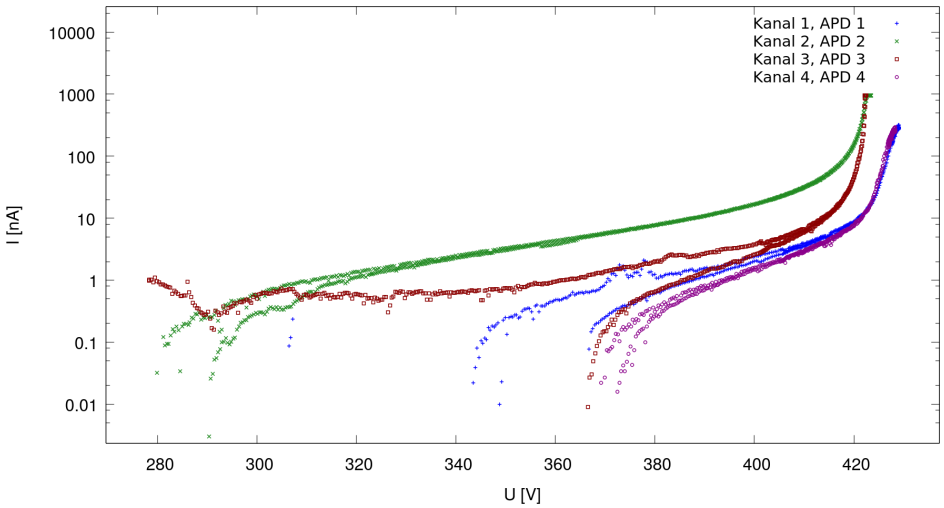

Abbildung A.2: Messung der 4 APDs mit der HV-Elektronik, logarithmische Darstellung

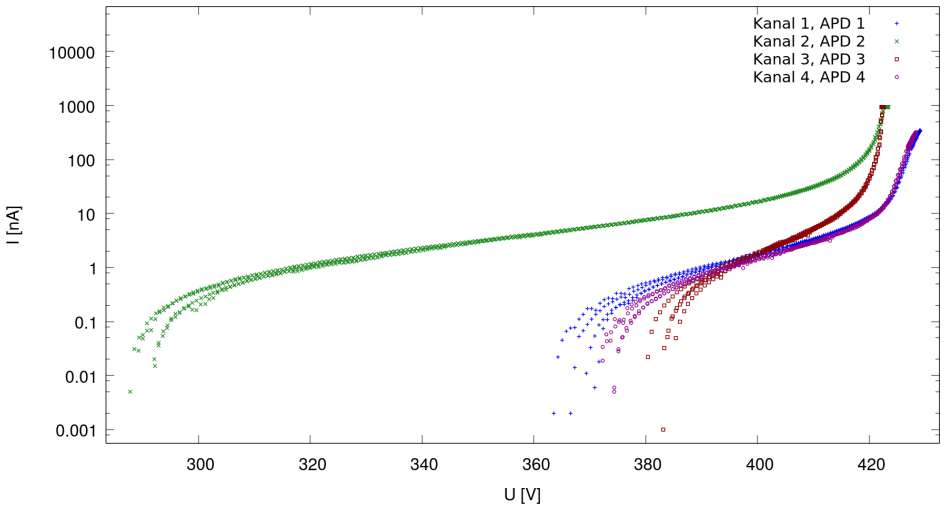

Abbildung A.3: Messung der 4 APDs mit der HV-Elektronik, logarithmische Darstellung

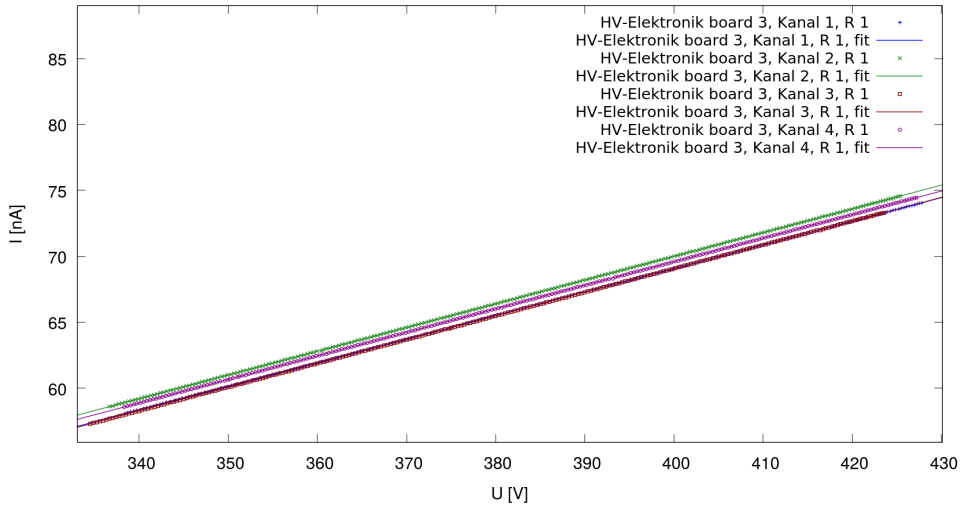

Abbildung A.4: Messung 2 HV-Elektronik an 5.5 GΩ Widerstand, verschiedene Kanäle

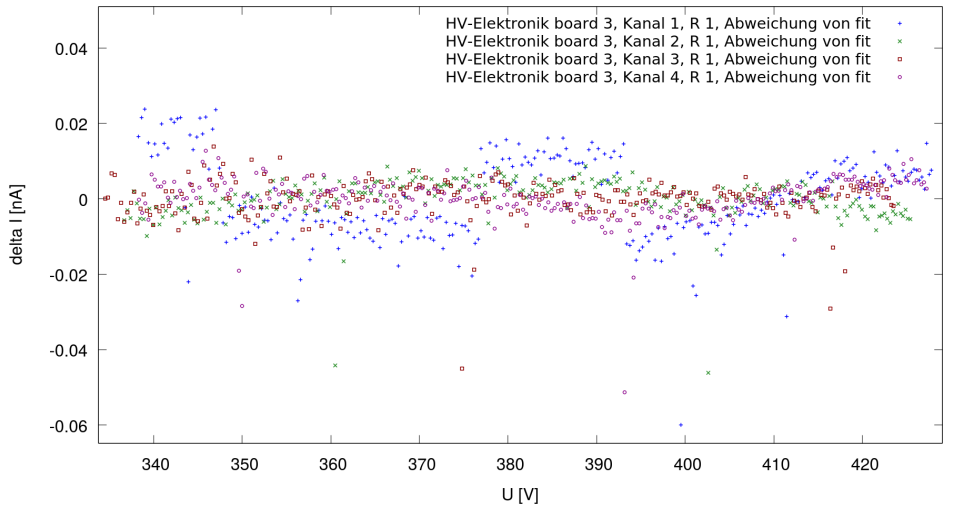

Abbildung A.5: Messung 2 HV-Elektronik an 5.5 GΩ Widerstand, Differenz zu Fitgeraden

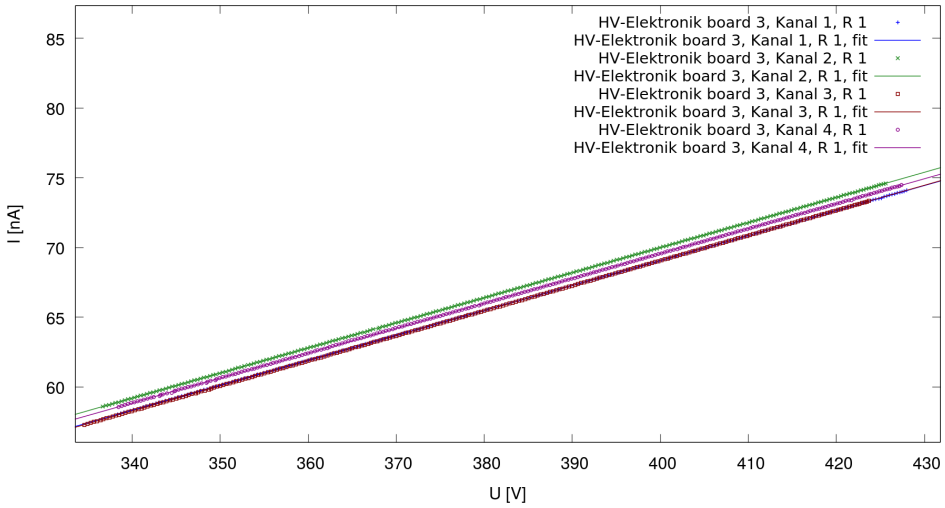

Abbildung A.6: Messung 3 HV-Elektronik an 5.5 GΩ Widerstand, verschiedene Kanäle

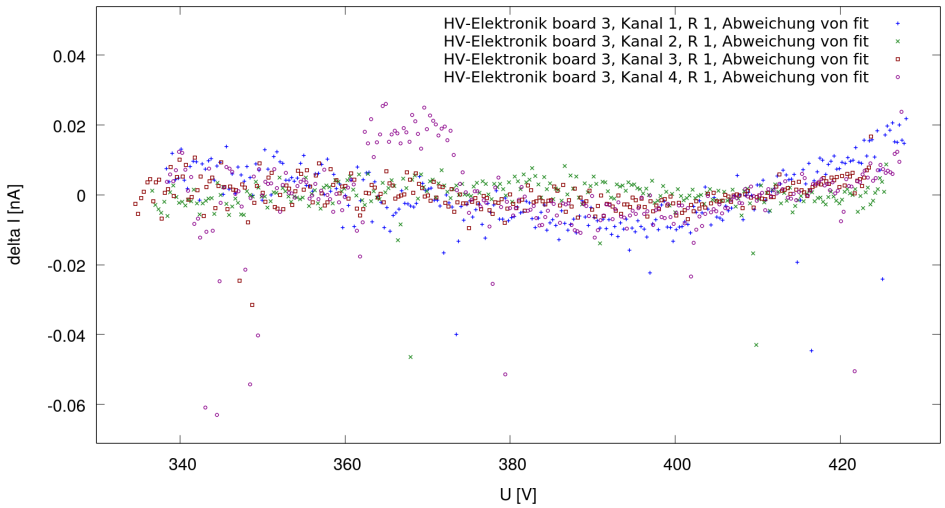

Abbildung A.7: Messung 3 HV-Elektronik an 5.5 GΩ Widerstand, Differenz zu Fitgeraden

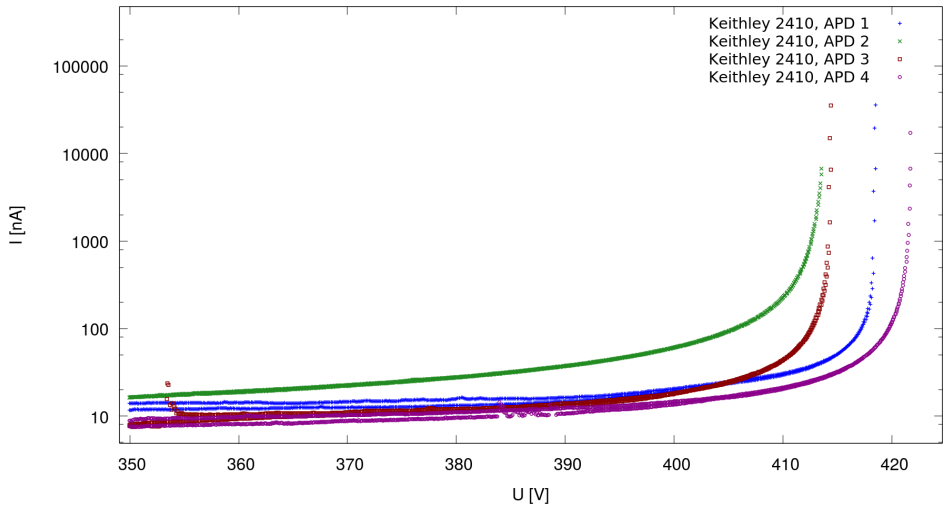

Abbildung A.8: Messung der 4 APDs mit dem Keithley 2410 Sourcemeter, logarithmische Darstellung

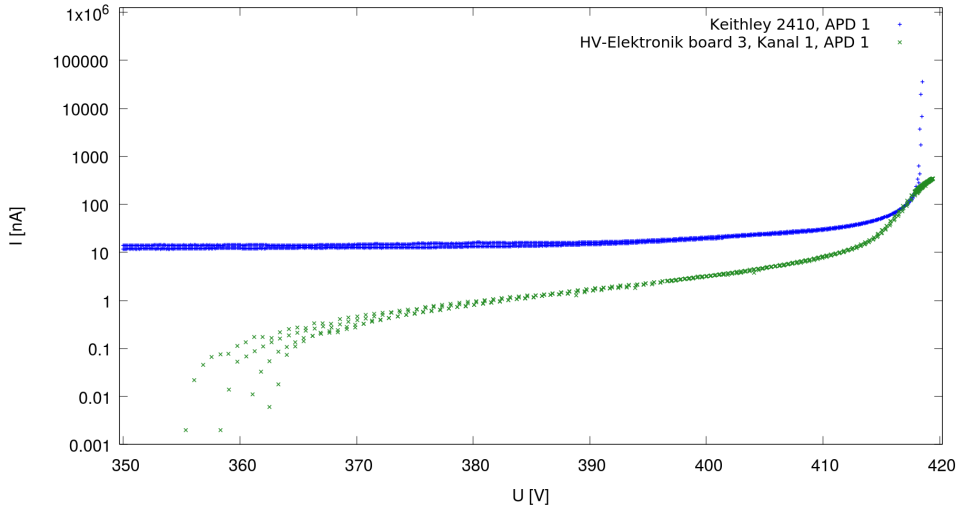

Abbildung A.9: Vergleich der Messungen von APD 1 mit der HV-Elektronik und mit dem Keithley 2410 Sourcemeter, logarithmische Darstellung

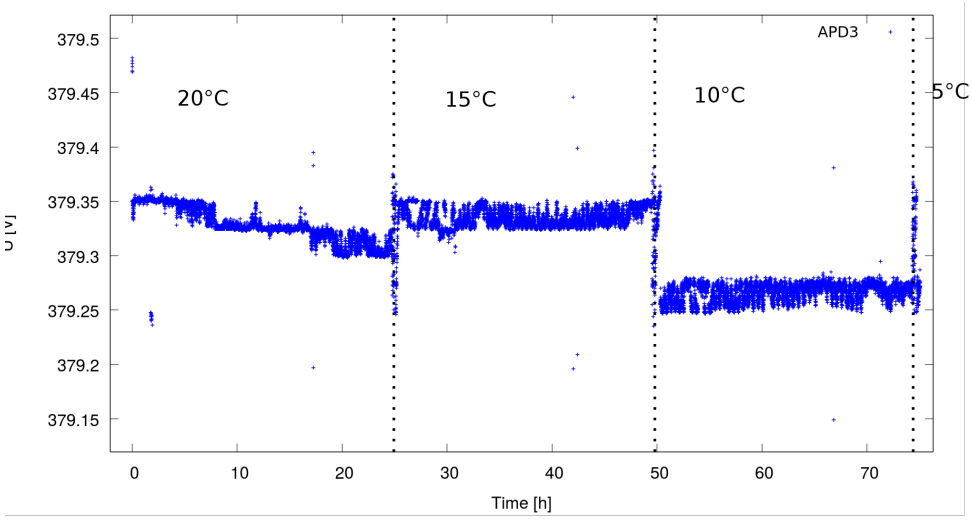

Abbildung A.10: APD3 reguliert bei unterschiedlichen Temperaturen

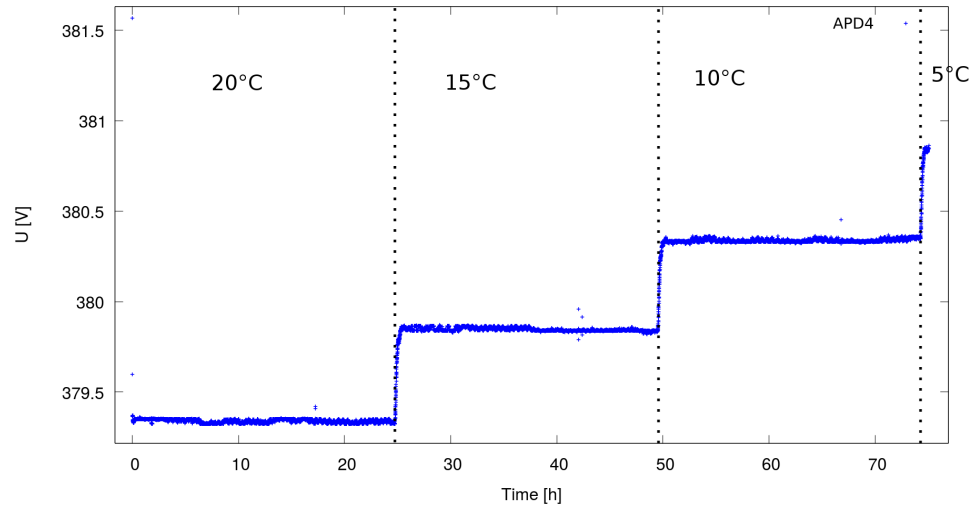

Abbildung A.11: APD4 nicht reguliert bei unterschiedlichen Temperaturen

Abbildungsverzeichnis

1.1 FAIR-Anlage, schematische Darstellung 2
1.2 Gesamter $\overline{\text{P}}$ANDA-Detektor, schematische Darstellung 4
1.3 EMC des Panda-Detektors, schematische Darstellung 5
1.4 APD 6

2.1 Schaltplan der HV-Regelungselektronik 7
2.2 Aufbau der HV-Regelungselektronik mit Raspberry Pi 8

3.1 flowchart hvd-tools 12

4.1 Messung der 4 APDs mit der HV-Elektronik, logarithmische Darstellung . 15
4.2 Messung der I-U-Kennlinien 4 APDs mit der HV-Elektronik, logarithmische Darstellung 16
4.3 Messung 1 HV-Elektronik an 5.5 GΩ Widerstand, verschiedene Kanäle . . . 17
4.4 HV-Regelung an 5.5 GΩ Widerstand, Differenz zu Fitgeraden 18
4.5 Messung der I-U-Kennlinie der 4 APDs mithilfe des Keithley 2410 Sourcemeters, logarithmische Darstellung 19
4.6 Vergleich der Messungen von APD 2 mit der HV-Elektronik und mit dem Keithley 2410 Sourcemeter 20
4.7 Vergleich der korrigierten Messungen von APD 2 mit der HV-Elektronik und mit dem Keithley 2410 Sourcemeter, logarithmische Darstellung 20
4.8 Vergleich der korrigierten Messungen von APD 2 mit der HV-Elektronik und mit dem Keithley 2410 Sourcemeter, logarithmische Darstellung 21
4.9 APD1 im Thermoschrank, Spannung wird nicht reguliert 22
4.10 APD1 im Thermoschrank, Spannung wird auf 379.3 V reguliert 23
4.11 Messung der On-Board gemessenen Spannung und Ausgangsspannung mit Keithley 2000 gemessen. 24
4.12 Messung der Differenz der Ausgabespannung zwischen HV-Elektronik und Keithley 2000 25
4.13 Messung der Differenz der Ausgabespannung zwischen HV-Elektronik und Keithley 2000 (vergrößert). 26
4.14 Messung der Ausgabespannung mit HV-Elektronik und Keithley 2000. . . . 27

A.1 Schaltplan eines Kanals der HV-Elektronik, detailliert 32
A.2 Messung der 4 APDs mit der HV-Elektronik, logarithmische Darstellung . 35
A.3 Messung der 4 APDs mit der HV-Elektronik, logarithmische Darstellung . 35
A.4 Messung 2 HV-Elektronik an 5.5 GΩ Widerstand, verschieden Kanäle . . . 36
A.5 Messung 2 HV-Elektronik an 5.5 GΩ Widerstand, Differenz zu Fitgeraden . 36

A.6 Messung 3 HV-Elektronik an 5.5 GΩ Widerstand, verschieden Kanäle . . . 37
A.7 Messung 3 HV-Elektronik an 5.5 GΩ Widerstand, Differenz zu Fitgeraden . 37
A.8 Messung der 4 APDs mit dem Keithley 2410 Sourcemeter, logarithmische Darstellung 38
A.9 Vergleich der Messungen von APD 2 mit der HV-Elektronik und mit dem Keithley 2410 Sourcemeter, logarithmische Darstellung 38
A.10 APD3 im Thermoschrank, Spannung wird reguliert 39
A.11 APD4 im Thermoschrank, Spannung wird nicht reguliert 39

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, die vorgelegte Thesis selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt zu haben, die ich in der Thesis angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Thesis erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze gute wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der ‚Satzung der Justus-Liebig-Universität zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis' niedergelegt sind, eingehalten. Gemäß § 25 Abs. 6 der Allgemeinen Bestimmungen für modularisierte Studiengänge dulde ich eine Überprüfung der Thesis mittels Anti-Plagiatssoftware.

Datum	Unterschrift