

**Erstellung einer Teststation für die
Photomultiplier-Module des
Oberflächen-Szintillations-Detektors am
Pierre-Auger-Observatorium**

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science (B.Sc.)
in Physik
an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Vorgelegt von

Leon Joshua Kubitz

2435903

23. September 2025

Korrigierte Version

1. Gutachter:

Prof. Dr. Karl-Heinz Kampert

Bergische Universität Wuppertal

2. Gutachter:

Prof. Dr. Stefan Ulmer

Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Abschlussarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst zu haben. Sowohl inhaltlich als auch wörtlich entnommene Inhalte wurden als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in dieser oder vergleichbarer Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ort, Datum: _____ Unterschrift: _____

Abstract

Deutsche Version

In dieser Arbeit wurde eine Teststation entwickelt und gebaut, mit der die Photomultiplier-Module des Oberflächen-Szintillations-Detektors am Pierre-Auger-Observatorium innerhalb einer kompakten Box auf ihre Funktion getestet werden können. Dafür wurde diese Box mit Anschlüssen versehen und ein Haltemechanismus entworfen, in den die Photomultiplier-Module eingesetzt werden können. Die Messungen erfolgen durch ein Upgraded Unified Board, das durch eine eigens hierfür entwickelte Software mit einem Graphical User Interface gesteuert wird.

English version

In this work, a testing station was developed and constructed to verify the functionality of the photomultiplier modules of the Surface Scintillator Detector at the Pierre Auger Observatory. For this purpose, the box was equipped with connectors and a holding mechanism was designed in which the photomultiplier modules can be inserted. The measurements are performed using an Upgraded Unified Board, which is controlled by dedicated software developed for this purpose.

Inhaltsverzeichnis

1. Motivation	1
2. Theoretischer Hintergrund	2
2.1. Kosmische Strahlung und das Pierre-Auger-Observatorium	2
2.1.1. Oberflächendetektor	3
2.1.2. Oberflächen-Szintillations-Detektoren	4
2.1.3. Fluoreszenz-Detektor	5
2.2. Photomultiplier	6
2.2.1. Funktionsweise	6
2.2.2. Hamamatsu R9420	7
3. Aufbau der Teststation	10
3.1. Mechanischer Aufbau	10
3.2. Verbaute elektrische Komponenten	12
3.2.1. Upgraded Unified Board	12
3.2.2. LED-Flasher	15
3.3. Haltemechanismus	16
4. Software der Teststation	19
4.1. Software auf dem UUB	19
4.1.1. Auslesen des Signals	19
4.1.2. Steuern und Auslesen der Slow Control	20
4.1.3. Setzen der LED-Flasher	21
4.1.4. Setzen des Triggers	21
4.2. Testing Tool	22
4.2.1. Funktion: RUN TEST-PMT	24
4.2.2. Funktion: LINEARITY CHECK	27
4.2.3. Weitere Funktionen	28

5. Messungen mit der Teststation	31
5.1. Messungen zum Testen der Photomultiplier-Module auf ihre Funktionalität	31
5.2. Linearitätsmessungen	33
5.3. Ausblick	37
6. Zusammenfassung	38
A. Anhang	40
Literatur	49

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Das Pierre-Auger-Observatorium.	3
2.2.	Eine Bodenstation nach dem AugerPrime Upgrade.	4
2.3.	Schematische Darstellung eines Oberflächen-Szintillations-Detektors.	5
2.4.	Schematischer Aufbau eines Photomultipliers am Beispiel eines linear-fokussierten Photomultipliers.	6
2.5.	Spektrale Empfindlichkeit, Quanteneffizienz und Gain des Hamamatsu R9420.	8
2.6.	Hamamatsu R9420 Photomultiplier mit ISEG-Basis und PVC-Röhre.	8
3.1.	Schematischer Aufbau der Teststation.	11
3.2.	Die Teststation bei der Benutzung.	12
3.3.	Ein UUB der Version SDEUUB - 003.	13
3.4.	Die zwei für diese Teststation verwendeten Auger LED-Flasher.	15
3.5.	3D-Modell der PMT-Halterung in FreeCAD.	16
3.6.	Gedruckte und zusammengebaute PMT-Halterung auf der Aluminiumplatte	17
3.7.	Das über Distanzbolzen an der Metallplatte angebrachte UUB	17
4.1.	Das Login-Fenster des Testing Tools	23
4.2.	Screenshot des Testing Tools.	24
4.3.	Die Pfadstruktur der Messdaten auf dem Laptop	25
4.4.	Die Funktionalität eines SSD-PMTs wurde gemessen	26
4.5.	Eine Linearitätsmessung wurde ausgeführt	27
4.6.	Beispiele für Meldungsfenster des Programms	29
4.7.	Diese Fehlermeldung wird dem Nutzer beispielsweise angezeigt, wenn keine Verbindung zwischen dem UUB und dem Laptop mehr besteht	29
5.1.	Eine in der Teststation durch die Funktion 'RUN TEST-PMT' durchgeführte Messung an einem SSD-PMT.	32
5.2.	Die zu Abbildung 5.1 dazugehörige Ausgabe im Textfeld bei einer beispielhaften Funktionalitätsmessung.	33
5.3.	Eine Linearitätsmessung mit der Teststation.	34

5.4.	Einzelne Messung im High-Gain-Kanal.	35
5.5.	Eine Linearitätsmessung mit der Teststation im Low-Gain-Kanal des SSD- PMTs (ADC8).	36
A.1.	Sechs der Step-Dateien des gedruckten Haltemechanismus in FreeCAD. . .	41
A.2.	Vier der Step-Dateien des gedruckten Haltemechanismus in FreeCAD. . . .	42
A.3.	In FreeCAD dargestellte Step-Datei der in der Werkstatt aus Aluminium gefertigten Grundplatte.	43
A.4.	Ein Beispiel für die INI-Datei des Testing Tools	44
A.5.	Grafiken der Funktionalitätsmessungen mit der Teststation.	45
A.6.	Testmessungen der Linearitätsmessungen mit der Teststation.	46

Tabellenverzeichnis

A.1. In der Teststation fest verbaute Bauteile.	40
---	----

Abkürzungsverzeichnis

ADC	Analog-Digital-Wandler (Analog-to-Digital Converter)
AERA	Auger Engineering Radio Array
DAC	Digital-Analog-Wandler (Digital-to-Analog Converter)
FD	Fluoreszenzdetektor
FPGA	Field Programmable Gate Array
FTP	File Transfer Protocol
FWHM	Halbwertsbreite (Full Width at Half Maximum)
GUI	Graphical User Interface (Grafische Benutzeroberfläche)
HEAT	High Elevation Auger Telescopes
HV	Hochspannung (High Voltage)
INI	Initialisierungsdatei
JSON	JavaScript Object Notation
LPMT	Large PMT
PMT	Photomultiplier (Photomultiplier Tube)
RAM	Random-Access Memory
SD	Oberflächendetektor (Surface Detector)
SDEU	Surface Detector Electronics Upgrade
SPMT	Small PMT
SSD	Oberflächen-Szintillations-Detektor (Scintillator Surface Detector)
UUB	Upgraded Unified Board
WCD	Wasser-Tscherenkow-Detektor (Water Cherenkov Detector)

1. Motivation

Das Pierre-Auger-Observatorium ist das weltweit größte Observatorium für kosmische Strahlung. Es wurde im Westen Argentiniens errichtet, um die Ursprünge kosmischer Strahlung höchster Energie zu erforschen. Eine der Hauptkomponenten dieses Observatoriums ist der Oberflächendetektor, der sich über eine Fläche von 3000 km^2 verteilt und aus 1660 einzelnen Bodenstationen besteht. Bei diesen handelt es sich jeweils um einen mit hochreinem Wasser gefüllten Tank (Water Cherenkov Detector, WCD), der einfallende geladene Teilchen in Form von Tscherenkov-Licht mithilfe von drei Photomultipliern (PMTs) detektiert. Diese drei großen PMTs werden als Large PMT (LPMT) bezeichnet. Im Zuge des kürzlich erfolgten Prime Upgrades wurden diese Bodenstationen um einen weiteren kleinen PMT im Tank (Small PMT, SPMT) und einen Oberflächen-Szintillations-Detektor (Scintillator Surface Detector, SSD) erweitert.

Der SSD ist ein insgesamt 4 m^2 großer Plastikdetektor, der auf den Bodenstationen installiert wurde, um durch die Kombination der WCD- und SSD-Messungen die Massenzusammensetzung der kosmischen Strahlung höchster Energie besser bestimmen zu können. Das im Szintillator erzeugte Licht wird über Lichtleiter in einem sogenannten „Cookie“ gebündelt und einem einzigen PMT zugeführt. Bei diesem PMT handelt es sich um den PMT vom Typ Hamamatsu R9420.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, eine kompakte Teststation zu entwickeln, mit der die in den Oberflächen-Szintillations-Detektoren verbauten Photomultiplier (SSD-PMT) vor Ort in Argentinien auf ihre Funktion überprüft werden können.

2. Theoretischer Hintergrund

In diesem Kapitel wird der theoretische Hintergrund dieser Bachelorarbeit erläutert. Zuerst wird auf das Pierre-Auger-Observatorium und dessen Hauptkomponenten eingegangen. Im Anschluss wird zuerst die generelle Funktionsweise von Photomultipliern beschrieben und abschließend werden die Eigenschaften der in den Oberflächen-Szintillations-Detektoren verbauten Photomultiplier vom Typ Hamamatsu R9420 erläutert.

2.1. Kosmische Strahlung und das Pierre-Auger-Observatorium

Bei kosmischer Strahlung höchster Energie handelt es sich um die energiegeladesten Teilchen, die in der Natur beobachtet werden. Wenn diese auf die Erdatmosphäre treffen, entstehen durch die Wechselwirkung mit den atmosphärischen Atomen sekundäre Teilchen. Diese erzeugen in Form einer Kaskade weitere sekundäre Teilchen. Dieses Phänomen wird als ausgedehnte Luftschauer bezeichnet. Durch die Anregung der Stickstoff-Atome in der Atmosphäre entsteht dabei Fluoreszenzlicht im ultravioletten Spektrum [1].

Das Pierre-Auger-Observatorium ist ein internationales physikalisches Großexperiment mit dem Ziel die Ursprünge der hochenergetischen kosmischen Strahlen zu erforschen. Das ursprüngliche Konzept wurde im Jahr 1991 von Jim Cronin und Alan Watson während der International Cosmic Ray Conference in Dublin vorgeschlagen. Die Konstruktion begann im Jahr 2002 und erste Daten konnten bereits 2004 vor Abschluss der Bauphase gesammelt werden. Im Jahr 2008 wurde der Bau offiziell abgeschlossen. Als Standort wurde die Provinz Mendoza im Westen Argentiniens, auf einer weiten hochgelegenen Ebene bei der Stadt Malargüe gewählt [1].

Das Observatorium hat das Hauptziel, den Ursprung und die Eigenschaften von kosmischen Strahlen oberhalb von 10^{17} eV zu erforschen. Dafür wurde es als Hybrid-Detektor

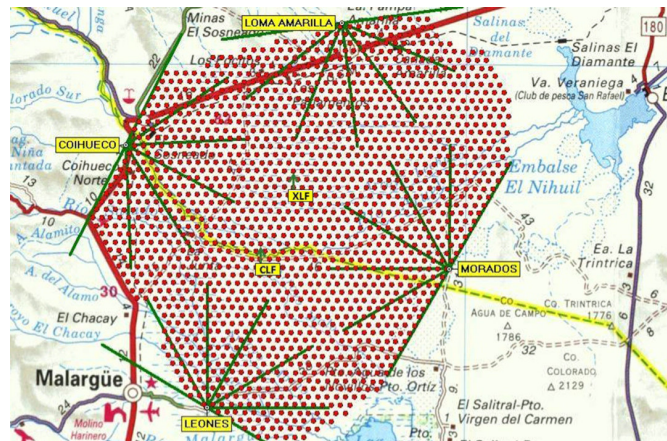


Abbildung 2.1.: Das Pierre-Auger-Observatorium. Jeder Punkt bezeichnet einen der 1660 Bodenstationen. Durch den Bereich zwischen den grünen Linien sind die Blickfelder der Teleskope an den vier Standorten des Fluoreszenzdetektors dargestellt [1].

konzipiert und bestand ursprünglich aus einem großen Oberflächendetektor (Surface Detector, SD), bestehend aus 1660 einzelnen Bodenstationen sowie einem Fluoreszenzdetektor (FD), bestehend aus 27 Teleskopen an vier Standorten. Es wurde auch nach der Fertigstellung im Jahre 2008 stetig erweitert und im Zuge dessen unter anderem mit einem Radiodetektor, dem Auger Engineering Radio Array (AERA) sowie einem Myonendetektor ergänzt [2].

Im Jahr 2019 begann die Konstruktion des AugerPrime Upgrades, im Zuge dessen wurden den Bodenstationen unter anderem Oberflächen-Szintillations-Detektoren und Radioantennen hinzugefügt [3].

2.1.1. Oberflächendetektor

Der Oberflächendetektor (SD) besteht aus 1660 einzelnen Bodenstationen (siehe Abbildung 2.2), sogenannten Wasser-Tscherenkow-Detektoren (Water Cherenkov Detectors, WCDs), welche als Array eine Fläche von 3000 km^2 , mit einem Abstand von $1,5 \text{ km}$ zwischen den Stationen, bedecken. Bei diesen handelt es sich um Wassertanks mit einem Durchmesser von jeweils $3,6 \text{ m}$, die mit 12000 l hochreinem Wasser gefüllt sind. Beim Durchgang relativistisch geladener Teilchen durch das Wasser, entsteht Tscherenkow-Strahlung, die durch extrem empfindliche PMTs detektiert wird [1].

Im Zuge des AugerPrime Upgrades wurden die Bodenstationen jeweils um Radioantennen, einen Oberflächen-Szintillations-Detektor und einen weiteren kleinen 1-Zoll-PMT (Small

PMT, SPMT) im Tank erweitert, der zusätzlich zu den bestehenden drei großen 9-Zoll-PMTs (Large PMT, LPMT) hinzugefügt wurde. Die Elektronik der Bodenstationen wurde dabei umfassend erneuert und das Unified Board, das zuvor im Einsatz war, wurde durch ein Upgraded Unified Board (UUB) ersetzt. Dieses liefert Schnittstellen für die Signale der bestehenden sowie neuen PMTs und erhöht die Abtastfrequenz sowie den Dynamikbereich im Vergleich zum Vorgänger [4].

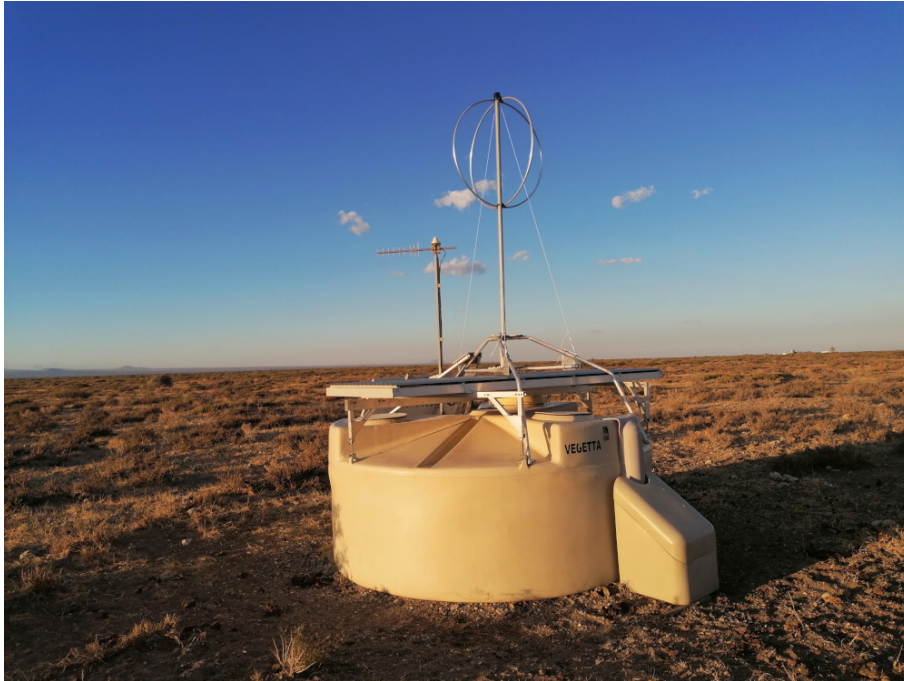


Abbildung 2.2.: Eine Bodenstation nach dem AugerPrime Upgrade. Auf dem Tank angebracht ist der SSD und die Radioantenne zu sehen [3].

Jede Bodenstation ist autark gestaltet und wird über ein Photovoltaiksystem mit Spannung versorgt [4].

2.1.2. Oberflächen-Szintillations-Detektoren

Mit dem Hauptziel, die Massenzusammensetzung der primären kosmischen Strahlung besser ermitteln zu können, wurden im Zuge des AugerPrime Upgrades auf den Bodenstationen zusätzlich Oberflächen-Szintillations-Detektoren (Scintillator Surface Detectors, SSD) angebracht [3].

Da die SSDs auf die einzelnen Schauerkomponenten, Elektronen, Myonen und Photonen, anders reagieren als die WCDs, lassen sich durch einen Vergleich der Messungen in den SSDs und den WCDs Aussagen über das Verhältnis dieser Komponenten treffen. Das

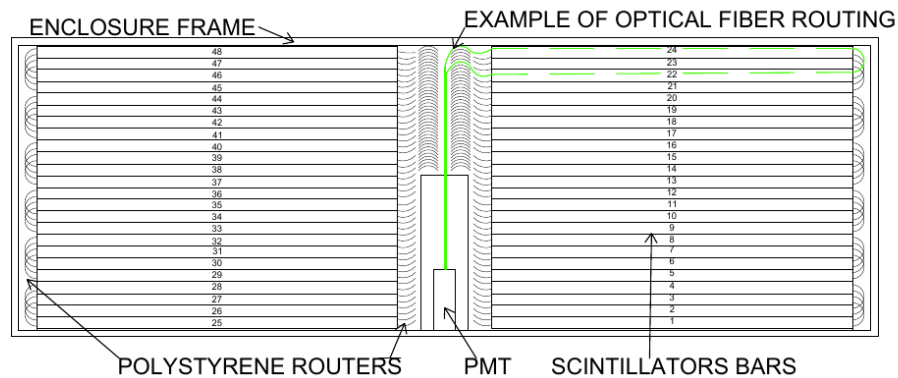


Abbildung 2.3.: Schematische Darstellung eines Oberflächen-Szintillations-Detektors [3].

Signal in den SSDs wird dabei stärker von den Elektronen dominiert, während das in den WCDs eher von Myonen und Photonen abhängig ist [2].

In Abbildung 2.3 ist der schematische Aufbau eines SSDs zu sehen. Jeder SSD besteht aus zwei Szintillatorplatten mit einer aktiven Fläche von jeweils circa 2 m^2 . Jede dieser Platten besteht wiederum aus 24 Stäben aus extrudiertem Kunststoff. Wenn die Stäbe von geladenen Teilchen der Luftschauber durchquert werden, werden diese durch Stoßprozesse angeregt und geben die Anregungsenergie in Form von Szintillationslicht wieder ab. Dieses Licht wird von Lichtleitern gesammelt, die in einer U-Konfiguration verlegt sind. Die Lichtleiter werden gebündelt und leiten das Licht auf einen PMT, der zwischen den Szintillatorplatten positioniert ist. Bei diesem SSD-PMT handelt es sich um den PMT vom Typ Hamamatsu R9420 [3].

2.1.3. Fluoreszenz-Detektor

Bei dem Fluoreszenz-Detektor (FD) handelt es sich um 24 einzelne Teleskope, die das SD-Array von vier Standorten aus überblicken und das durch die Schauer in der Erdatmosphäre erzeugte Fluoreszenzlicht im ultravioletten Bereich detektieren. An jedem der vier Standorte befinden sich sechs unabhängige Teleskope, die jeweils einen Azimutwinkel von 30° abdecken. Durch die Kombination der Teleskope wird so eine 180° -Abdeckung im Azimut erfasst. Die Standorte und Blickfelder der Teleskope sind in Abbildung 2.1 zu sehen. Zusätzlich wurden drei weitere High Elevation Auger Telescopes (HEAT) vor dem FD-Standort in Coihueco errichtet, die ein höheres Sichtfeld abdecken [2].

2.2. Photomultiplier

In diesem Abschnitt soll auf die in den Bodenstationen verbauten Photomultiplier eingegangen werden. Zunächst wird die generelle Funktionsweise eines Photomultipliers beschrieben. Anschließend wird speziell auf den im Oberflächen-Szintillations-Detektor eingebauten Photomultiplier vom Typ Hamamatsu R9420 eingegangen.

2.2.1. Funktionsweise

Photomultiplier (Photomultiplier Tube, PMT) sind hochempfindliche Elektronenröhren mit extrem schneller Reaktionszeit, die dazu dienen, kleinste Lichtsignale im Spektrum des ultravioletten, sichtbaren und nahen Infrarotbereichs durch Erzeugung und Verstärkung eines elektrischen Signals zu detektieren [5].

Für die Erzeugung eines elektrischen Signals im PMT wird der äußere photoelektrische Effekt genutzt, welcher das Phänomen beschreibt, dass mit Licht bestrahlte Metalle oder Halbleiter im Vakuum Elektronen emittieren. Dies wurde im Jahr 1887 von Hertz entdeckt und im Jahr 1888 von Hallwachs bestätigt. Im Jahr 1905 lieferte Einstein eine theoretische Erklärung in Form der Quantisierung der Energie des Lichts selbst. Dabei übertragen die Photonen des einfallenden Lichts ihre Energie auf die gebundenen Elektronen im Valenzband des Materials, werden angeregt und können bei ausreichender Photonenenergie als Photoelektronen aus dem Material heraustreten. Das Verhältnis der emittierten Photoelektronen zur Anzahl der einfallenden Photonen nennt sich Quanteneffizienz und wird üblicherweise in Prozent angegeben. Diese ist dabei von der Wellenlänge abhängig [5].

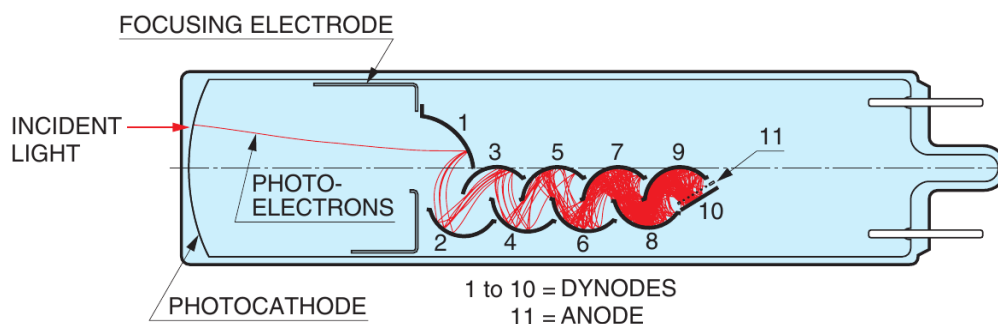


Abbildung 2.4.: Schematischer Aufbau eines Photomultipliers am Beispiel eines linear-fokussierten Photomultipliers [5, S. 17].

Der schematische Aufbau eines Photomultipliers ist in Abbildung 2.4 zu sehen. Ein typischer Photomultiplier besteht aus einem Eingangsfenster, durch das Licht in eine Vakuumröhre tritt, das dann auf eine Photokathode trifft und so Photoelektronen erzeugt. Diese werden dann mittels einer Fokussierungselektrode mithilfe einer Spannung auf den Elektronenvervielfacher geleitet. Die spektrale Empfindlichkeit bei verschiedenen Wellenlängen ist dabei vom Material der Photokathode und des Eingangsfensters abhängig. Die Empfindlichkeit bei langen Wellenlängen wird vom Material der Photokathode bestimmt, während die Empfindlichkeit bei kurzen Wellenlängen vom Material des Eingangsfensters abhängig ist [5, 6].

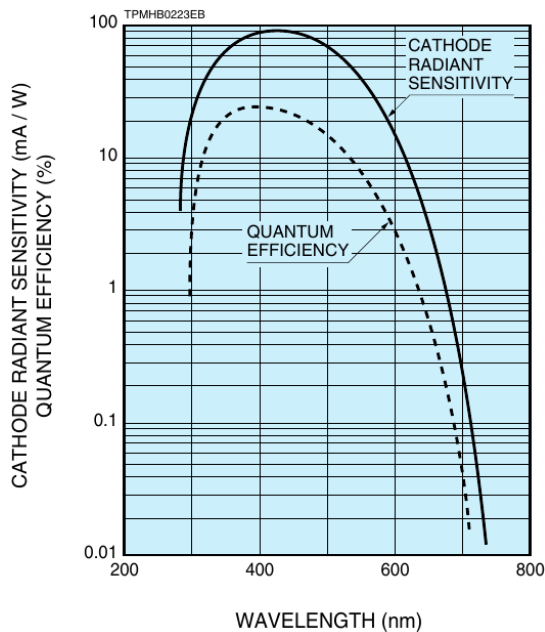
Photokathoden werden dabei in Reflexionsmodus-Kathoden und Transmissionsmodus-Kathoden unterteilt. Side-on-PMTs verwenden Reflexionsmodus-Kathoden, bei denen die Photokathode aus einer Metallplatte besteht und die Elektronen in die entgegengesetzte Richtung des einfallenden Lichts emittiert werden. Bei Head-on-PMTs werden lichtdurchlässige Transmissionsmodus-Kathoden verwendet. Diese sind als dünner Film auf einer transparenten Glasplatte angebracht und emittieren Elektronen beim Durchtritt durch diese in die Richtung des einfallenden Lichts [5].

Der Elektronenvervielfacher besteht in der Regel aus 8 bis 19 weiteren Elektroden, sogenannten Dynoden, welche die Elektronen als Kaskade durch Sekundäremission vervielfachen. Die Linearität, der Verstärkungsfaktor und die Reaktionszeit eines PMTs hängen stark von der Spannung zwischen den Dynoden sowie der Anordnung und Anzahl dieser ab, welche je nach Typ des PMTs sehr unterschiedlich ausfallen kann. Die vervielfachten Elektronen treffen dann abschließend auf die Anode und erzeugen dort ein elektrisches Signal [6].

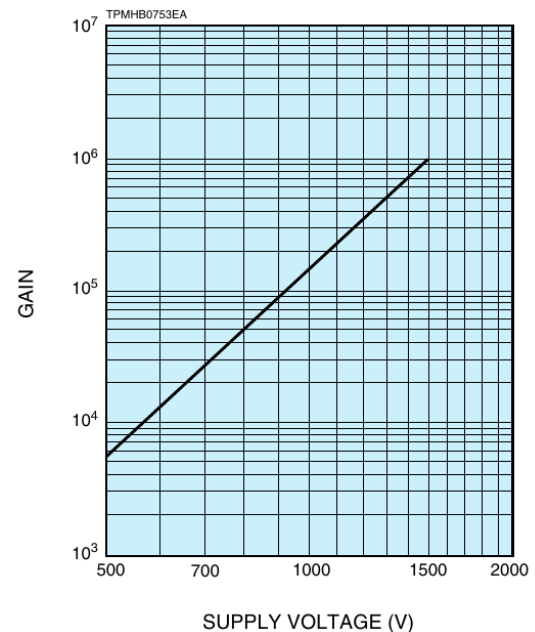
2.2.2. Hamamatsu R9420

Beim Photomultiplier vom Typ Hamamatsu R9420 handelt es sich um einen linearfokussierten PMT vom Head-on-Typ mit einem Durchmesser von 1,5 Zoll. Er wurde speziell für Szintillationsmessungen und Anwendungen, die eine schnelle Reaktionszeit erfordern, konzipiert. Mit einer Bialkali-Photokathode und einem Eingangsfenster aus Borosilikatglas liegt die spektrale Empfindlichkeit im Bereich von 300 bis 650 nm und die Wellenlänge der maximalen Empfindlichkeit bei 420 nm [7].

Wie in Abbildung 2.5a zu sehen ist, hat es bei den Wellenlängen, welche für die SSDs von Interesse sind, eine gute Quanteneffizienz. Diese liegt mit circa 500 nm im grünen Farbspektrum. Die Verstärkung im PMT vom Typ Hamamatsu R9420 erfolgt durch 8 Dynodenstufen. Diese ist in Abbildung 2.5b zu sehen. Beim Betrieb in den SSDs besitzen sie bei einem Gain von $5 \cdot 10^4$ eine exzellente Linearität [2, 8].

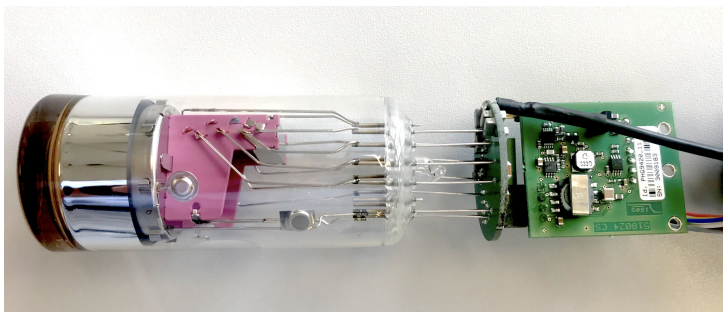


(a) Typische spektrale Empfindlichkeit und Quanteneffizienz [7].



(b) Typischer Gain [7].

Abbildung 2.5.: Spektrale Empfindlichkeit, Quanteneffizienz und Gain des Hamamatsu R9420.



(a) Hamamatsu R9420 Photomultiplier ohne PVC-Röhre. Die ISEG-Basis wurde am Modul fest verlötet [3].



(b) Der SSD-PMT in der PVC-Röhre [3].

Abbildung 2.6.: Hamamatsu R9420 Photomultiplier mit ISEG-Basis und PVC-Röhre.

Für die Verwendung in den SSDs wird der PMT mit einer ISEG-Basis betrieben, die fest mit dem PMT verlötet ist (siehe Abbildung 2.6a). Für die Hochspannung ist in dieser ein Cockcroft-Walton-Schaltkreis verbaut. Der in der ISEG-Basis verwendete Spannungsteiler wurde für eine möglichst gute Linearität optimiert. Zusätzlich ist in die ISEG-Basis ein Temperatursensor integriert worden. Wie in Abbildung 2.6b zu sehen, ist das Ensemble, bestehend aus PMT und ISEG-Basis, in einer PVC-Röhre montiert und zwischen diesem und einem Flansch befindet sich eine Feder. Durch diese wird die PMT-Einheit gegen einen sogenannten „Cookie“ gedrückt, in dem die aus dem Szintillator kommenden Lichtleiter gebündelt werden [3, 8].

3. Aufbau der Teststation

In diesem Kapitel soll es um den Aufbau der selbst entwickelten Teststation gehen. Zuerst wird auf den allgemeinen Aufbau eingegangen. Anschließend werden die verbauten mechanischen und elektrischen Komponenten und die Integration dieser in eine Teststation beschrieben.

3.1. Mechanischer Aufbau

Ziel dieser Bachelorarbeit war es, eine möglichst kompakte und portable Messstation zu entwickeln, mit der die SSD-PMTs des Typs Hamamatsu R9420 mitsamt ISEG-Basis in der PVC-Röhre auf ihre Funktionalität überprüft werden können.

Die mechanische Integration der Teststation erfolgt in einer ZARGES-Box XS aus Aluminium mit den maximalen Außenmaßen $50 \times 34 \times 20 \text{ cm}^3$ [9]. Die Datenübertragung erfolgt über einen RJ-45-Anschluss, der mit einem Keystone-Adapter an der Außenseite der Box angebracht wurde [10]. Für eine optionale serielle Verbindung wurde außerdem mit einem weiteren Keystone-Adapter ein USB-Typ-B-Anschluss angebracht. Für eine 24 V-Stromversorgung wird ein externes Netzteil verwendet. Dafür befindet sich über einen dritten Keystone-Adapter ein Gleichstromanschluss des Typs DC 5.5 x 2.1 mm an der Außenseite der Box. Alle Anschlüsse wurden mit schwarzem Silikonkleber abgedichtet, um die Einstrahlung von Licht zu verhindern.

Als Netzteil dient ein gängiges 36-Watt-Steckernetzteil mit einem Eurostecker-Anschluss (Steckdosentyp C) und einer Eingangsspannung, die im Bereich von 100 - 240 V Wechselspannung, bei einer Netzfrequenz von 50/60 Hz, liegt. Die in Argentinien verwendete Netzspannung liegt bei 220 V (AC, 50 Hz) und ist somit in diesem Bereich. Dort sind neben dem dort üblichen Steckdosentyp I teilweise auch Steckdosen mit einem Anschluss vom Steckdosentyp C vorhanden, somit kann dieses Netzteil dort unter Umständen ohne Adapter verwendet werden [11].

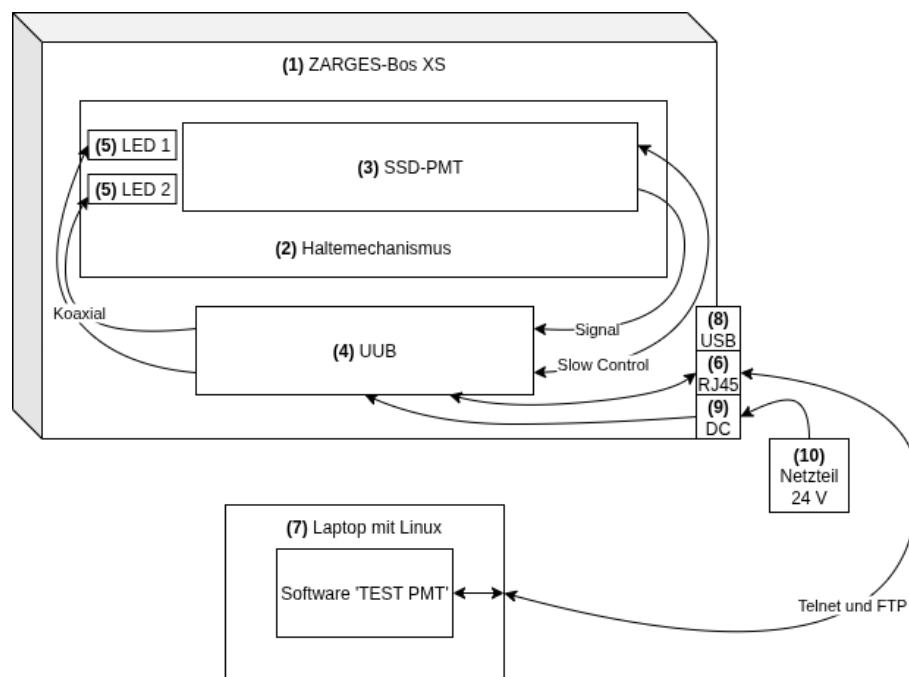


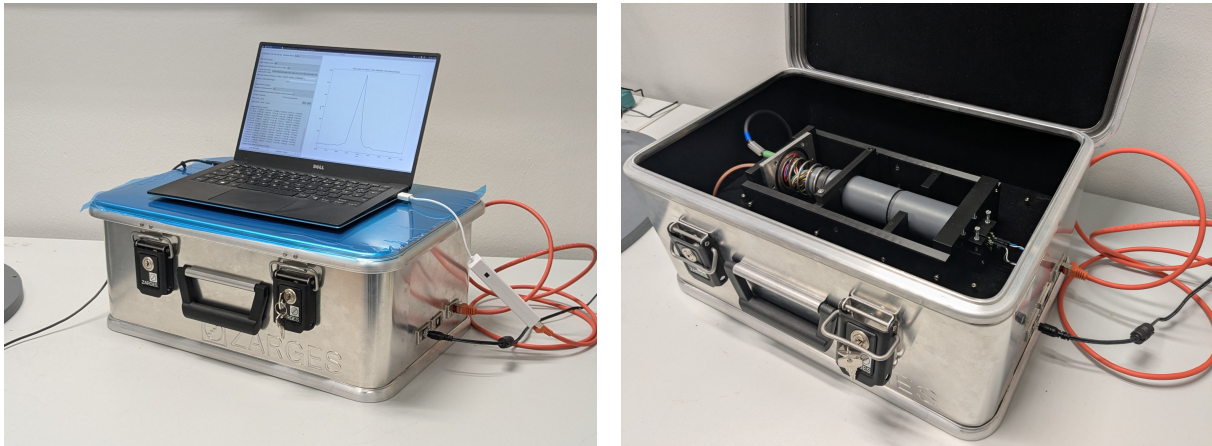
Abbildung 3.1.: Schematischer Aufbau der Teststation. Innerhalb einer ZARGES-Box XS (1) befindet sich ein Haltemechanismus (2) für die zu testenden SSD-PMTs vom Typ Hamamatsu R9420 (3). Der Haltemechanismus ist auf einer Aluminiumplatte befestigt, die auf Füßen innerhalb der Box steht. Auf der Unterseite dieser Platte ist ein UUB (4) angebracht. Es werden zwei LED-Flasher (5) verwendet, welche unabhängig voneinander vom UUB gepulst werden können und als Lichtquelle dienen. Auf der Außenseite der Box befindet sich ein RJ-45-Anschluss (6) für die Datenübertragung zwischen dem UUB und dem Laptop (7). Optional ist eine Datenübertragung über einen USB-Typ-B-Anschluss (8) möglich. Das UUB wird über einen DC-Anschluss (9) mit der Spannungsversorgung (10) verbunden.

Die Wände und der Deckel der Box wurden von innen mit schwarzer Folie ausgekleidet und der Boden wurde mit schwarzem Fotokarton bedeckt, um Lichtreflexionen zu minimieren.

Der eigens für diese Teststation entwickelte Haltemechanismus für den SSD-PMT und die beiden LED-Flasher wurde im 3D-Druckverfahren gefertigt und auf einer 290×420 mm großen Aluminiumplatte befestigt. Der Haltemechanismus wird in Abschnitt 3.3 näher beschrieben. Mittels Distanzbolzen wird auf der Unterseite der Platte ein UUB angeschraubt, das im Kapitel 3.2.1 näher beschrieben wird. Für genügend Abstand zum Boden sorgen dabei 70 mm lange Füße, die ebenfalls im 3D-Druckverfahren gefertigt wurden. Innerhalb der Box wird das UUB mit einem M12 4-Pin-Anschluss über ein Kabel, das fest mit der Innenseite des DC-Keystone-Adapters verlötet ist, mit der Spannungsversorgung

verbunden.

Über den RJ-45-Anschluss wird ein Laptop mit der Box verbunden, auf dem die für diesen Aufbau selbst entwickelte Software läuft, welche im Kapitel 4.2 näher beschrieben wird. In Tabelle A.1 befindet sich eine Auflistung der in der Teststation fest verbauten Bauteile.



(a) Im geschlossenen Zustand werden mit eingesetztem SSD-PMT Messungen vorgenommen und die Auswertung ist auf dem Laptop zu sehen.

(b) Die Box wurde geöffnet und ein SSD-PMT wurde im Haltemechanismus fixiert.

Abbildung 3.2.: Die Teststation bei der Benutzung.

3.2. Verbaute elektrische Komponenten

In diesem Abschnitt wird auf die elektrischen Hauptkomponenten eingegangen, die in der Teststation verbaut sind. Die zentrale elektrische Komponente bildet dabei das Upgraded Unified Board, das zunächst beschrieben wird. Im Anschluss wird auf die LED-Flasher eingegangen, die für die Messungen an den SSD-PMTs als Lichtquelle dienen.

3.2.1. Upgraded Unified Board

Das Upgraded Unified Board (UUB) wurde als Teil des Surface Detector Electronics Upgrade (SDEU) im Zuge des AugerPrime Upgrade entwickelt und wird als zentrale Platine in den Bodenstationen eingesetzt. Es steuert die Hochspannung und verarbeitet die Signale der drei LPMTs und das des SPMTs sowie des SSD-PMTs [2]. Es bietet außerdem

digitale Schnittstellen für die Radioantennen und für die unterirdischen Myonendetektoren [4].

Zur Kalibrierung und Überwachung der PMTs innerhalb des WCD können zwei LED-Flasher über das UUB gesteuert werden, welche beide bei einigen Bodenstationen innerhalb des Tanks montiert wurden und Licht in das Wasser emittieren können. Die Helligkeit dieser kann über einen 12-Bit-Digital-Analog-Wandler (Digital-to-Analog Converter, DAC) feinjustiert werden [12]. Die Steuerspannung liegt dabei bei bis zu 10 V [13].

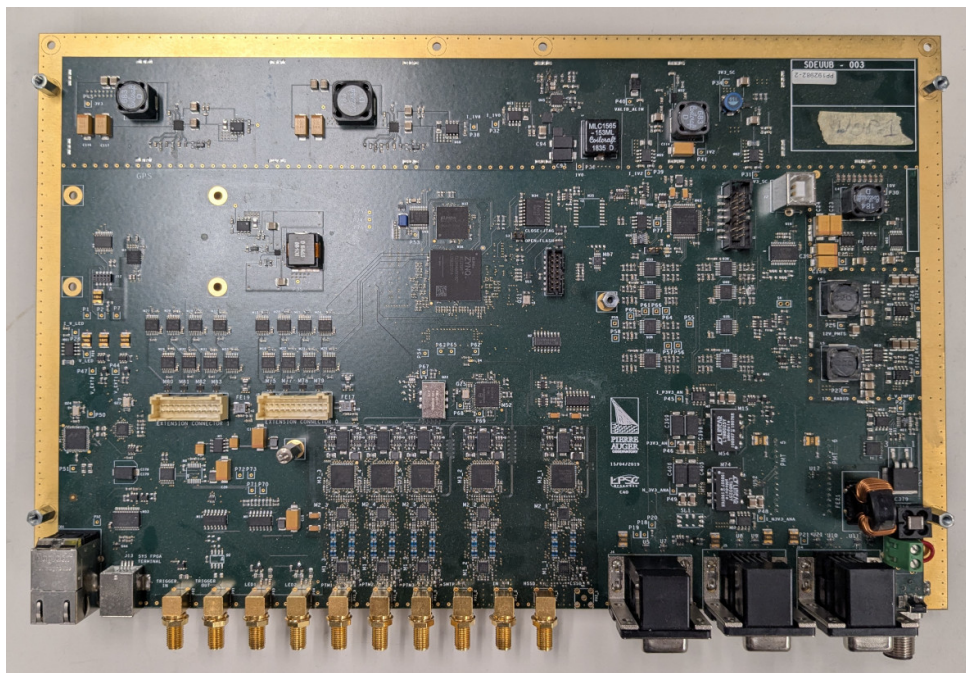


Abbildung 3.3.: Ein UUB der Version SDEUUB - 003.

Das UUB basiert auf einem Xilinx Zynq Field Programmable Gate Array (FPGA) mit zwei eingebetteten 333 MHz ARM Cortex A9 Mikroprozessoren, 4 Gbit LP-DDR2 Arbeitsspeicher und 2 Gbit Flash-Speicher. Die grundlegenden Funktionen, wie zum Beispiel die Trigger-Funktionalitäten, sind auf dem FPGA implementiert, während komplexere Funktionen unter Linux ausgeführt werden. Verwendet wird dabei Xilinx Petalinux, ein leichtes Linux-Betriebssystem für FPGA-basierte Embedded-Systeme, welches auf ARM-Prozessoren läuft. Für die Slow Control, welche die Hochspannung der PMTs setzt und verschiedene Parameter überwacht, wird ein separater Mikrocontroller, vom Typ MSP430, verwendet [4].

Die Anodensignale der LPMTs und das des SSD-PMTs werden in Low-Gain und High-Gain aufgeteilt. Beim SSD-PMT und bei den LPMTs liegt das High-Gain-Verhältnis bei 32. Das Low-Gain-Verhältnis bei den LPMTs liegt bei 1 und beim SSD-PMT bei 0,25.

Das SPMT hat nur einen Low-Gain-Kanal mit einem Gain-Verhältnis von 1. Um das Timing zu erhalten und Signalverzerrungen zu minimieren, liegt zwischen den zwei Verstärkungsstufen ein Bessel-Tiefpassfilter 7. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 60 MHz. Die verstärkten und gefilterten Signale werden mit 12-Bit-Analog-Digital-Wandler (Analog-to-Digital Converter, ADC), des Typs Analog Devices AD9628, mit einer Sampling-Frequenz von 120 MS/s digitalisiert und dann vom FPGA verarbeitet [4].

Verwendung des UUB für die Teststation

Das UUB vereinigt viele Funktionen auf einer Platine. Für diese Teststation werden jedoch nicht alle dieser umfänglichen Funktionen benötigt, sodass ein UUB mit einem Defekt an einer anderen Stelle, zum Beispiel in einem LPMT-Kanal, gut für diese Teststation verwendet werden kann.

Das UUB wird in diesem Aufbau für die Steuerung der Hochspannung, zur Steuerung der LED-Flasher, zum Setzen des Triggers, zum Messen der Daten sowie zur Dateiübertragung verwendet. Der SSD-PMT wird dazu über einen 15-Pin HD D-Sub Anschluss mit der Slow Control des UUBs verbunden. Durch die Slow Control lässt sich die Hochspannung des PMTs setzen und sie liefert über die Ausgabe von Überwachungsparametern einen ersten Aufschluss über die Funktionalität des PMTs. Das Anodensignal des SSD-PMTs wird mittels eines Koaxialkabels über einen SMA-Anschluss an das UUB übertragen, verarbeitet und kann innerhalb des PetaLinux-Betriebssystems weiterverarbeitet werden. Die LED-Flasher werden ebenfalls über SMA mit dem UUB verbunden und innerhalb der Linux-Oberfläche gesteuert. Das Betriebssystem des UUBs kann über Telnet gesteuert werden und das File Transfer Protocol (FTP) wird für die Dateiübertragung verwendet.

Das PetaLinux-Betriebssystem befindet sich, mit all seinen Komponenten, in einer komprimierten Datei im Flash-Speicher des UUBs und wird bei jedem Start in das Random-Access Memory (RAM) entpackt, damit das System starten kann. Das bedeutet, dass jede Änderung im System mit einem Neustart des UUBs verloren geht. Somit gäbe es nur die Möglichkeit des 'Patching' (englisch to patch = flicken, Korrekturauslieferung für Software) um permanente Änderungen am System vorzunehmen, ohne das Linux-Abbild neu erstellen zu müssen. Dabei wird die Änderung nach jedem Start des Kernels in den Wurzelordner geschrieben, und vorhandene Dateien, z.B. Binärdateien, können überschrieben werden [14].

Für eine einfache Migration auf andere UUBs, wurde eine Softwarelösung erarbeitet, die mit den auf dem UUB vorhandenen Softwarekomponenten auskommt. Die für die Test-

station geschriebene Software, welche im Kapitel 4.2 näher beschrieben wird, funktioniert somit ohne Patching.

3.2.2. LED-Flasher

Zu Überwachungs- und Kalibrierungszwecken der PMTs innerhalb des WCD wurden in einigen Bodenstationen zwei LED-Flasher montiert, die in den Tank strahlen. Diese wurden als Ensemble in einem Gehäuse montiert, das oben mittig am Tank angebracht ist. Zum Schutz vor Feuchtigkeit wurde das Gehäuse mit Silikon gefüllt [13].

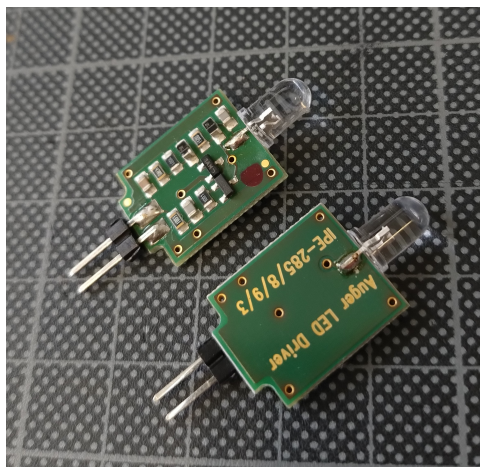


Abbildung 3.4.: Die zwei für diese Teststation verwendeten Auger LED-Flasher.

Die LED-Flasher wurden so entworfen, dass die erzeugten Lichtpulse denen ähnlich sind, die durch kosmische Strahlung in den Wassertanks erzeugt werden [15].

Bei den verwendeten LEDs handelt es sich um L-7113NBC mit einer dominanten Wellenlänge im blauen Bereich von 445 nm. Der Betrachtungswinkel dieser liegt dabei bei 16° [13].

Die LEDs sind fest mit ihren Treiberplatinen verlötet (siehe Abbildung 3.4). Die Helligkeit der LED-Flasher kann jeweils vom UUB unabhängig voneinander mit einer Steuerspannung von bis zu 10 V feinjustiert werden, die Pulse werden dabei mit einem positiven Puls in Höhe von 4 V erzeugt. Ein gleichzeitiges Pulsen der LEDs ist somit auch möglich. Die Halbwertsbreite der mit den LED-Flashern erzeugten Pulse liegt bei etwa 6 ns und die maximale Amplitude liegt bei 10^8 Photonen [13].

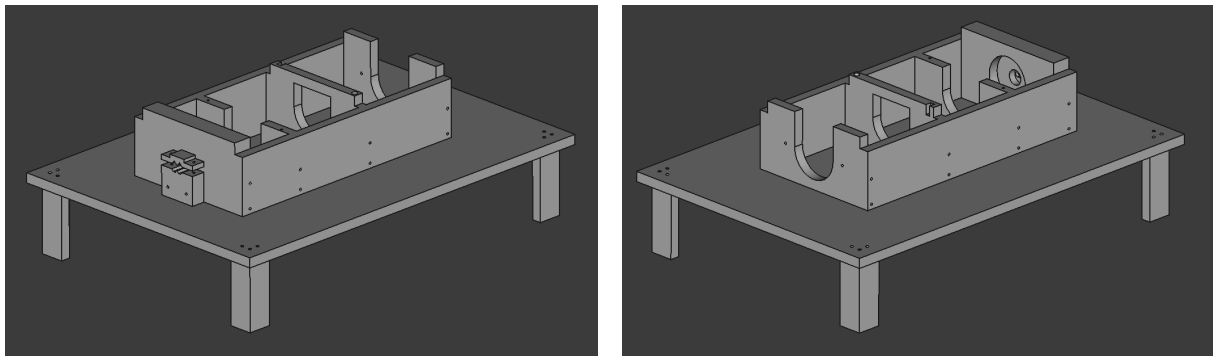
Auch nach dem AugerPrime-Upgrade blieben die LED-Flasher im Einsatz und in das UUB wurde eine Steuerschaltung integriert, um diese zu betreiben [2].

Verwendung der LED-Flasher für die Teststation

Als Lichtquelle für die zu testenden SSD-PMTs werden in der Teststation zwei dieser LED-Flasher verwendet. Da die LEDs gleichzeitig und unabhängig voneinander gepulst werden können, ist es möglich, mit den LED-Flashern Linearitätsmessungen der PMTs vorzunehmen. Diese Funktion wurde in die Software der Teststation integriert und wird im Kapitel 4.2.2 näher erläutert.

3.3. Haltemechanismus

Im Rahmen dieser Bachelor-Thesis wurde eine Halterung entwickelt, die eine möglichst einfache und schnelle Befestigung sowie Entnahme der SSD-PMTs, welche sich in der PVC-Röhre befinden, ermöglicht. Gleichzeitig soll die Halterung aber auch für einen sicheren Halt der PMTs innerhalb der portablen Box sorgen. Die Halterung besteht aus 15 Komponenten, die einzeln im 3D-Druckverfahren in schwarzem Plastik gefertigt und mit M3-Schrauben miteinander verschraubt wurden.

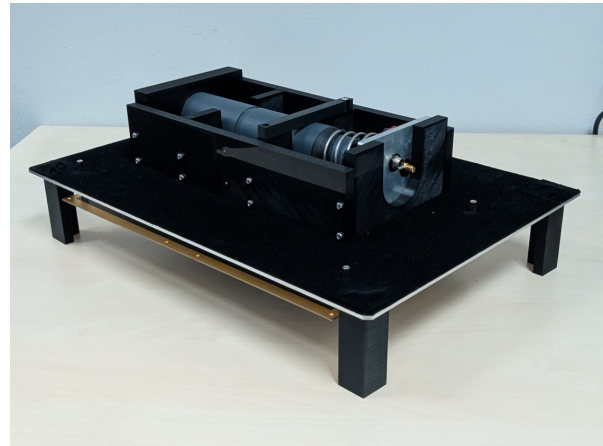
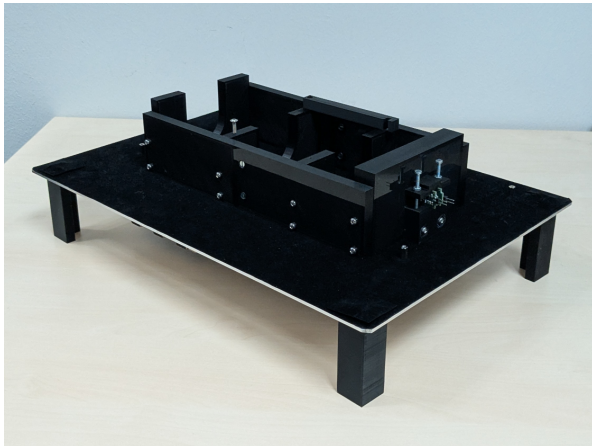


(a) Vorderseite

(b) Rückseite

Abbildung 3.5.: 3D-Modell der PMT-Halterung in FreeCAD.

Das eigens entwickelte 3D-Modell und die dazugehörigen Step-Dateien wurden mit dem Programm FreeCAD erstellt. Der 3D-Druck, die Erstellung einer technischen Zeichnung der Grundplatte sowie die Herstellung der Grundplatte aus Aluminium wurden dann anhand der selbst erstellten Step-Dateien in Auftrag gegeben. Die Gesamtansicht des 3D-Modells ist in Abbildung 3.5 zu sehen. In den Abbildungen A.1, A.2 und A.3 im Anhang befinden sich außerdem Abbildungen der einzelnen Step-Dateien.



(a) Die Vorderseite des Haltemechanismus. Die beiden LED-Flasher wurden in die dafür vorgesehene Halterung eingesetzt.

(b) Die Rückseite des Haltemechanismus. Es wurde ein SSD-PMT eingesetzt.

Abbildung 3.6.: Gedruckte und zusammengebaute PMT-Halterung auf der Aluminiumplatte.

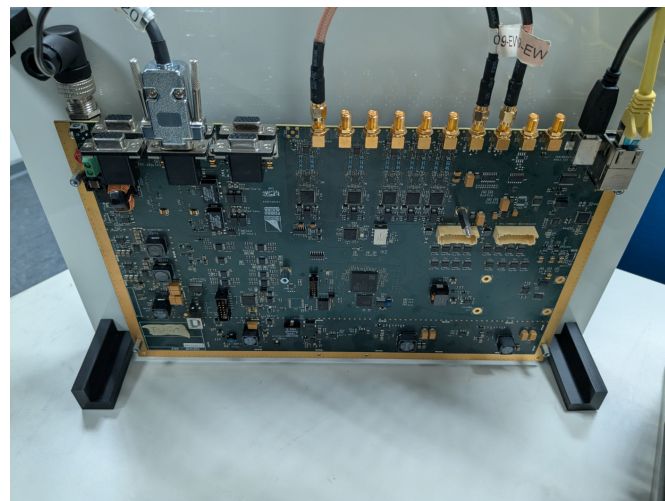


Abbildung 3.7.: Das über Distanzbolzen an der Metallplatte angebrachte UUB. Es wurde mit allen für die Teststation vorgesehenen Kabeln verbunden. Für genügend Abstand zum Boden der Box sorgen die 70 mm langen Füße.

Die PVC-Röhre des PMTs liegt auf zwei Liegeflächen auf. Die Maße sind dabei möglichst eng gewählt, sodass kaum Bewegungsspielraum zur Seite besteht. Nach oben kann der PMT über eine Halterung fixiert werden, die sich durch Drehen öffnen lässt, wenn man den PMT entnehmen möchte. Die Glasseite des PMTs wird 1 cm tief in eine Öffnung geschoben, hinter der die zwei LED-Flasher fixiert sind. Diese Öffnung sorgt für einen zusätzlichen Halt. Die Feder des PMT-Moduls ist leicht gespannt und drückt gegen eine Auflagefläche. Diese hat an den Anschlüssen eine Aussparung, die nach oben offen ist

und ein Austauschen des PMTs auch möglich macht, wenn es bereits über die Kabel mit dem UUB verbunden wurde.

4. Software der Teststation

In diesem Kapitel soll es um die für die Teststation entwickelte Software gehen. Zuerst wird auf die im PetaLinux-Betriebssystem bereits vorhandenen Programme auf dem UUB eingegangen, welche für dieses Projekt verwendet werden. Im Anschluss wird der Aufbau und die Funktion des Tools zum Testen der SSD-PMTs beschrieben.

4.1. Software auf dem UUB

Für die speziellen Anforderungen des PMTs befinden sich auf dem PetaLinux-Betriebssystem einige Binärdateien, die über die Kommandozeile ausgeführt werden können. Diese wurden in der Programmiersprache C geschrieben und für die Verwendung auf dem ARM-Prozessor kompiliert.

Im Folgenden werden die Programme, die für die Teststation verwendet werden, kurz beschrieben.

4.1.1. Auslesen des Signals

Zum Auslesen der Low-Gain- und High-Gain-Kanäle aller PMTs wird das Programm 'scope' verwendet. Die Ausgabe dieses Programms wird innerhalb der Kommandozeile in JSON-Dateien mit einer Dateigröße von jeweils 311.464 Byte überschrieben. Bei den verwendeten 12-Bit-ADCs liegt die Amplitude im Bereich zwischen 0 und 4095 Bins. Jeder Kanal enthält dabei 2048 Samples, die mit einer Sampling-Frequenz von 120 MS/s aufgenommen werden [4]. Der zeitliche Abstand zwischen den Samples liegt somit bei 8,33 ns.

4.1.2. Steuern und Auslesen der Slow Control

Mit dem Programm 'slowc' wird die Slow Control gesteuert. Beispielsweise lässt sich mit dem Befehl 'slowc -p4 -v600' die Hochspannung des SSD-PMTs auf 600 V setzen. Der Befehl 'slowc -a' liefert außerdem einen Überblick über die Überwachungsparameter (gekürzt):

PMT Stat:	HVmon[V]	Imon[uA]	Tmon[C]
PMT1	7.0	1.9	0.5
PMT2	7.0	3.7	0.7
PMT3	9.3	7.5	0.5
SSD_PMT	287.2	0.6	295.7
SM_PMT	9.3	7.5	0.9
PMT6	9.3	9.3	0.7

Power supplies

Nominal	Actual	Current
10V	9985.2 [mV]	
1V	993.3 [mV]	86.7 [mA]
	(...)	

In diesem Fall wurde ein SSD-PMT mit dem UUB verbunden und die Hochspannung auf den Wert 600 V gesetzt. Die Werte bei Tmon haben dabei die Einheit Kelvin, also Tmon[K]. Die Parameter, die bei HVmon[V] abgelesen werden, müssen mit dem Faktor 2 multipliziert werden, um die korrekten Hochspannungen zu erhalten. [12]

Durch das Verwenden von 'slowc -A' erhält man die selben Überwachungsparameter als Hexadezimalzahlen:

0x007b	0x0003	0x0a9e	0x0004	0x0003	0x0021	0x0004	0x0094
0x0004	0x0003	0x0a99	0x0005	0x0004	0x0036	0x0004	0x0b0e
0x0003	0x0003	0x0a7a	0x0005	0x0003	0x096a	0x0005	0x0912
0x0003	0x0005	0x0a7a	0x0005	0x0650	0x08de	0x0004	0x0155
0x0003	0x0004	0x0005	0x0004	0x0acd	0x0137	0x0004	0x09a8
0x0004	0x09aa	0x0004	0x0004	0x0a94	0x0188	0x0005	0x0a68
0x0002	0x09a9	0x0004	0x0005	0x0aaa	0x0481	0x08ce	0x0a9a
0x0001	0x09a9	0x0004	0x0004	0x0215	0x03db	0x0004	0x0b24

Da dies in einer einheitlichen Tabellenschreibweise geschieht, wodurch die weitere Verarbeitung im Vergleich zur Ausgabe von `'slowc -a'` sehr erleichtert wird, wird in der Software zum Testen der PMTs diese Funktion verwendet.

Die Temperatur des SSD-PMTs, mit dem Eintrag in der 4. Zeile und 5. Spalte, `0x0650 = 1616` lässt sich dann über den Faktor $295/1612$ in die gegebene Temperatur von $295,7\text{ K}$ umrechnen. Analog dazu lässt sich die Hochspannung des SSD-PMTs, mit dem Eintrag in der 1. Zeile und 1. Spalte, `0x007b = 123` über den Faktor $2872/615$ in die korrigierte Hochspannung $2 * 287.2\text{ V} = 574,4\text{ V}$ umwandeln.

4.1.3. Setzen der LED-Flasher

Die LED-Flasher können unter anderem mit dem Programm `'led'` gesteuert werden. Zum Beispiel wird mit dem Befehl `'led 500 0 500 0 10'` die Helligkeit der ersten LED auf einen DAC-Wert von 500 gesetzt. Der Maximalwert liegt dabei bei 4095. Der Wert `'10'` beschreibt dabei die Pulslänge in Vielfachen von 100 ns und wäre in diesem Fall also bei 1 ms. Diese Funktion wird in der Kombination mit den LED-Flashern allerdings nicht verwendet, da die LED-Flasher unabhängig von der vom UUB ausgehenden Pulslänge, Pulse mit einer Halbwertsbreite von circa 6 ns erzeugen [13].

Da der 12-Bit-DAC des PMTs zum Steuern der beiden LED-Flasher vier Ausgänge hat, werden jeweils zwei davon für einen LED-Flasher verwendet. Für den ersten LED-Flasher werden die Ausgänge 1 und 3 verwendet und für den zweiten LED-Flasher die Ausgänge 2 und 4. Die Software zum Testen der SSD-PMTs orientiert sich hier an der Implementierung des Oszilloskops innerhalb des UUB-Web-Interfaces und die DAC-Werte dieser Ausgänge wurden jeweils gleichgeschaltet [12, 16].

Für die Linearitätsmessung ist es notwendig, die LED-Flasher jeweils einzeln sowie gleichzeitig zu betreiben. Dies wird im Folgenden als LED-Konfiguration bezeichnet, wobei Konfiguration 1 den Betrieb des ersten LED-Flashers, Konfiguration 2 den Betrieb des zweiten LED-Flashers und Konfiguration 3 den Betrieb beider LED-Flasher gleichzeitig beschreibt.

4.1.4. Setzen des Triggers

Mit dem Programm `'trigger'` kann der Trigger gesetzt werden. Beim Trigger handelt es sich um eine im FPGA implementierte Funktion. Wenn diese ausgelöst wird, werden

die Spuren (Traces) der PMTs an den ARM-Prozessor übertragen [4]. Diese können dann im PetaLinux Betriebssystem ausgelesen werden (siehe Abschnitt 4.1.1). Die Einstellung des Triggers wurde analog zu der im UUB-Web-Interface implementierten Oszilloskop-Funktion gewählt.

4.2. Testing Tool

Für die Steuerung der Teststation kommt eine eigens hierfür konzipierte und entwickelte Software zum Einsatz. Diese wurde in der Programmiersprache Python (Version 3.12.3) geschrieben [17]. Für das Graphical User Interface (Grafische Benutzeroberfläche, GUI) und das Multithreading wird das Paket 'PySide6' verwendet. Zur Anwendung kommt dabei das Anwendungsframework 'Qt' [18].

Die Berechnung der Daten wird mit den Python-Paketen 'Numpy' und 'Scipy' erleichtert [19, 20]. Die automatisierte Steuerung des PMTs über das Protokoll Telnet wurde innerhalb des Python-Pakets 'Exscript' implementiert [21]. Für die grafische Auswertung werden die Messdaten mit 'matplotlib' gerendert und in das GUI eingebettet [22]. Die Funktionalität für die Dateiübertragung mit dem Protokoll FTP sowie weitere Funktionen wie zum Beispiel Dateioperationen, der Zugriff auf Dateien und Ordner, das Einlesen der Konfigurationsdatei, das Einlesen der JSON-Dateien und der Zugriff auf Funktionen des Betriebssystems sind in der Python-Standardbibliothek enthalten [23].

Es werden alle gängigen Linux-Distributionen und Desktopumgebungen unterstützt, wobei die Display-Server-Protokolle Wayland und X11 verwendet werden können. Dies wurde in Stichproben anhand der Linux-Distributionen Ubuntu, Fedora und Linux Mint sowie an den Desktopumgebungen XFCE, KDE, GNOME und Cinnamon getestet. Windows und MacOS werden theoretisch auch von Python und allen verwendeten Paketen unterstützt, allerdings ist auf diesen Betriebssystemen die Software nicht getestet worden.

Die Standardsprache des Programms ist Englisch. Da dieses Programm in Argentinien verwendet werden soll, lässt es sich zusätzlich auf lateinamerikanisches Spanisch umstellen. Für die Übersetzung aus dem Englischen ins Spanische wurde größtenteils der Online-dienst DeepL des Betreibers DeepL SE verwendet [24].

Nach dem Start der Software öffnet sich ein Login-Fenster, in dem der Benutzername und das Passwort des UUBs eingegeben werden müssen (siehe Abbildung 4.1). Dies ist notwendig, damit eine erfolgreiche Telnet-Verbindung aufgebaut werden kann und eine

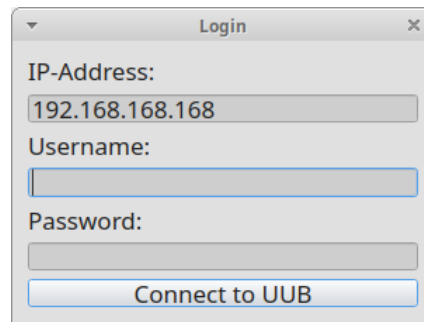


Abbildung 4.1.: Das Login-Fenster des Testing Tools.

spätere Datenübertragung über FTP möglich ist. Danach öffnet sich das eigentliche GUI der Software (siehe Abbildung 4.2).

Das GUI ist in ein linkes und ein rechtes Layout aufgeteilt. In dem rechten Layout befindet sich eine Leinwand, auf der die Plots dargestellt werden. Im linken Layout kann der Nutzer Einstellungen für die Messungen vornehmen. Die Standardeinstellungen werden dabei innerhalb einer INI-Datei festgelegt, die bei jedem Start des Programms eingelesen wird (siehe Abbildung A.4). In der INI-Datei lassen sich auch weitere fortgeschrittene Softwareeinstellungen festlegen. Unter anderem lässt sich dort auch auswählen, ob das Programm auf Englisch oder auf lateinamerikanisches Spanisch eingestellt werden soll.

Unterhalb der Einstellungen im linken Layout befindet sich ein Textfeld, in dem Meldungen, wie zum Beispiel der Status des Messvorgangs, angezeigt werden. Darunter sind zwei Buttons, die die Messvorgänge, den PMT-Funktionalitätstest und den Linearitätstest auslösen, sowie ein dritter Button, mit dem der Nutzer die zuvor aufgenommenen und berechneten Messdaten abspeichern kann.

Wenn ein Messvorgang gestartet wird, werden die vorherigen Messdaten der ausgelösten Messfunktion auf dem Laptop gelöscht. Es wird die Telnet-Verbindung zum UUB überprüft und anschließend ein Worker-Thread gestartet. Meldungen über den Status des Messvorgangs werden jeweils über ein Signal an das GUI gesendet und im Textfeld eingeblendet. Die beiden Messfunktionen werden in den Abschnitten 4.2.1 und 4.2.2 erläutert. Auf weitere Funktionen, wie die Funktion zum Abspeichern der Messdaten, wird im Abschnitt 4.2.3 eingegangen. Wie in Abbildung A.4 zu sehen ist, lässt sich der Pfad für die Messdaten auf dem Laptop über die INI-Datei festlegen. Die Daten der beiden Messfunktionen werden dabei in verschiedene Unterordner geschrieben und beeinflussen sich nicht gegenseitig. Die Pfadstruktur auf dem Laptop ist in Abbildung 4.3 zu sehen.

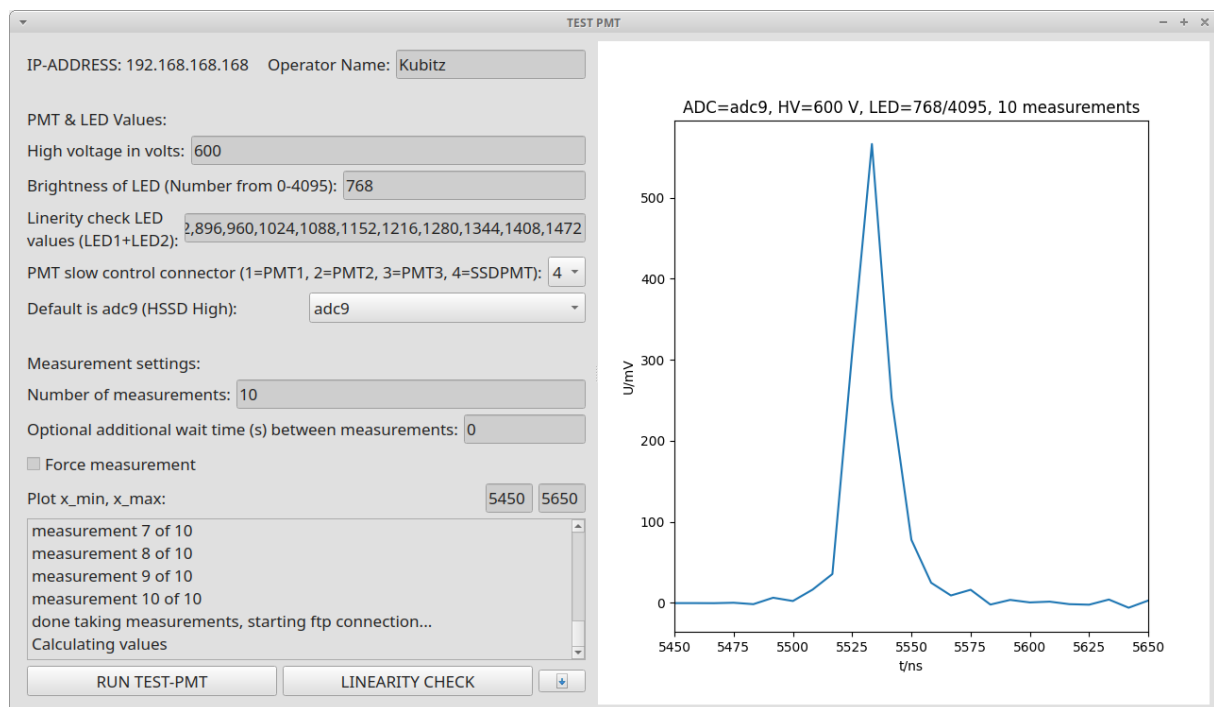


Abbildung 4.2.: Screenshot des Testing Tools. Hier in der Version 5.3.0. In diesem Fall wird es in der Desktopumgebung XFCE ausgeführt und es wurde die Messfunktion 'RUN TEST-PMT' gestartet.

4.2.1. Funktion: RUN TEST-PMT

Um die generelle Funktionalität eines PMTs zu testen, wird eine Funktion innerhalb der Software verwendet, die den Namen 'RUN TEST-PMT' trägt. Zuvor können einige Messparameter im GUI spezifiziert werden. Zur Ausführung von Befehlen innerhalb des PetaLinux-Betriebssystems werden diese mit dem Paket 'Exscript' über das Protokoll 'Telnet' an das UUB übermittelt.

Vor dem Messvorgang wird mithilfe der Ausgabe des Temperatursensors in der ISEG-Basis überprüft, ob eine Verbindung zwischen der Slow Control des PMTs und dem PMT vorliegt. Dazu wird der Befehl `slowc -A` ausgeführt und mit 'Awk' der richtige Eintrag der Matrix ausgelesen. Ab einem Schwellwert von 50 K wird von einer Verbindung zum Temperatursensor ausgegangen. Andernfalls wird eine Fehlermeldung ausgegeben. Anschließend werden mit den jeweiligen Befehlen auf dem UUB die Helligkeit der ersten LED und die Hochspannung (High Voltage, HV) des PMTs auf die jeweils vom Benutzer angegebenen Werte und der Trigger auf den Standardwert gesetzt. Daraufhin wird überprüft, ob die ausgelesene HV circa 90% des angegebenen Wertes erreicht hat. Dafür wird jede Sekunde analog zur Temperatur der Überwachungsparameter der HV ausgelesen und

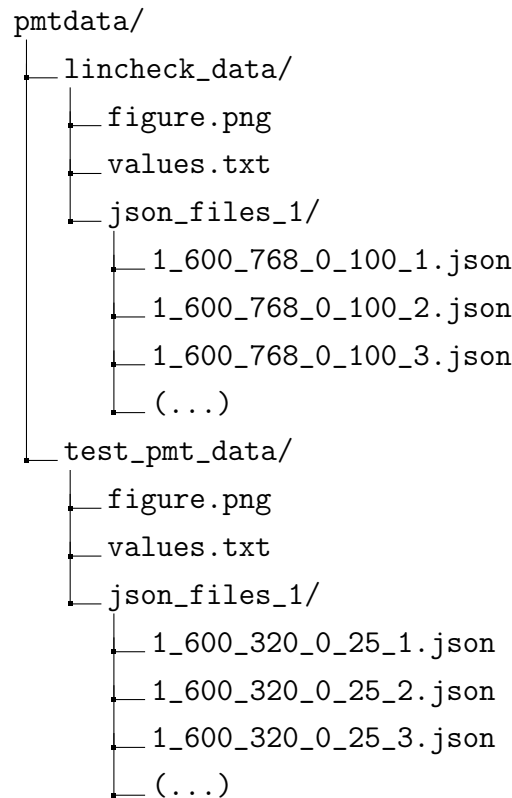


Abbildung 4.3.: Die Pfadstruktur der Messdaten auf dem Laptop. Die Dateien `values.txt` beinhalten die berechneten Messdaten der letzten Messung und in den Dateien `figure.png` werden die mit `matplotlib` gerenderten Graphen abgespeichert. Die Benennung der JSON-Dateien folgt dem Schema: `[LED-Konfiguration]_[Hochspannung]_[DAC LED 1]_[DAC LED 2]_[Anzahl der Messungen]_[Nummer der Messung].json`.

mit dem gesetzten Wert (HVset) abgeglichen. Wenn die ausgelesene HV nach 8 s noch immer nicht bei $0,9 \times \text{HVset}$ ist, wird im Normalfall der Messvorgang mit einer Fehlermeldung abgebrochen. Das Abbrechen kann durch das Aktivieren der Checkbox 'Force measurement' verhindert und so ein weiterer Messvorgang erzwungen werden.

Auf dem UUB werden alle JSON-Dateien vorheriger Messungen entfernt, um sicherzustellen, dass genügend Speicherplatz für neue Messungen vorhanden ist. Dann wird das Programm `scope` ausgeführt, um dessen Ausgabe in JSON-Dateien zu überschreiben. Ob die Daten erfolgreich geschrieben wurden, wird anschließend überprüft. Die Anzahl der Messungen wurde vom Nutzer im Voraus festgelegt. Auf dem UUB ist im Pfad `/var/volatile/` ein Dateisystem mit einem Gesamtspeicher von circa 500 MB eingehängt, in dem die JSON-Dateien in der Standardeinstellung in einem Unterordner gespeichert werden. Der Pfad lässt sich allerdings auch in der INI-Datei einstellen. Nach dem

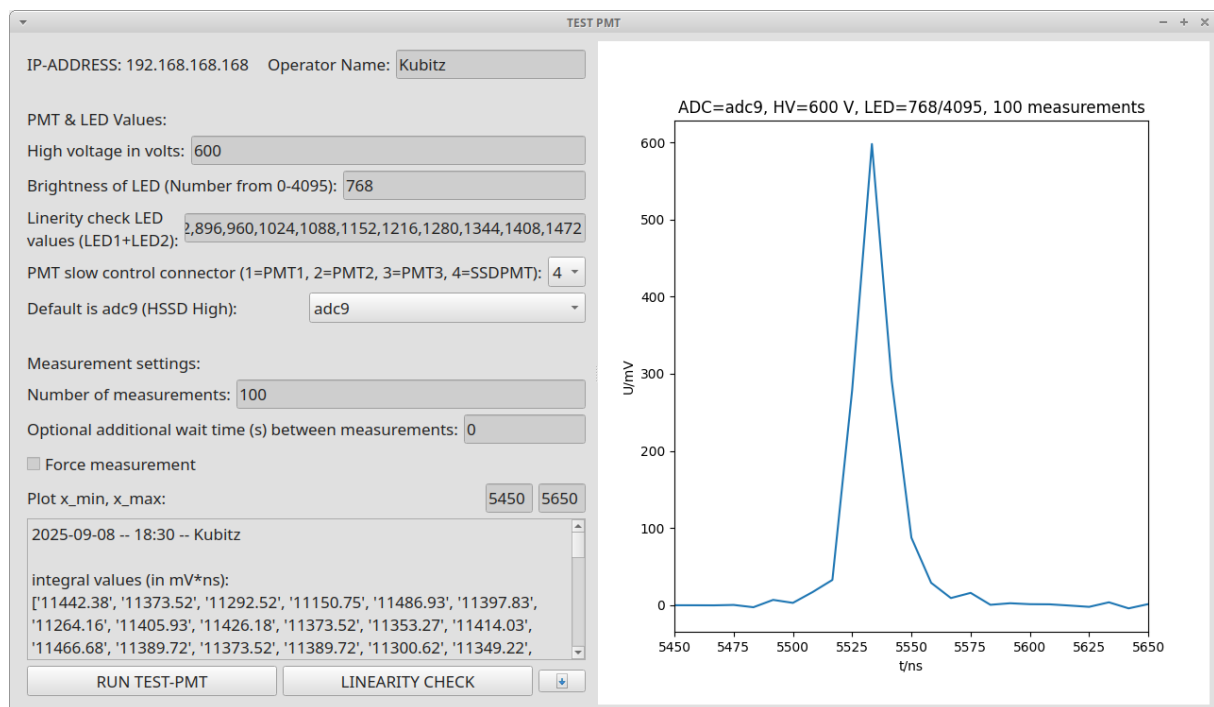


Abbildung 4.4.: Die Funktionalität eines SSD-PMTs wurde gemessen. Links sind die berechneten Messdaten zu sehen. Auf der rechten Seite wird die Messung grafisch dargestellt.

Erstellen der Messdaten wird die erste LED wieder ausgeschaltet und es werden über FTP alle Dateien in den für diese Messfunktion festgelegten Unterordner gespeichert.

Für die Auswertung werden alle Dateien mit der Dateiendung `.json` aus dem Unterordner für diese Funktion eingelesen. Der für die Auswertung verwendete ADC-Kanal ist vom Nutzer vor der Messung in dem GUI einstellbar. Die zeitliche Auflösung wird anhand der Sampling-Frequenz von 120 MS/s bestimmt. Die maximale Eingangsspannung des 12-Bit-ADCs vom Typ AD9628 liegt bei 2 V, daher wird analog zum UUB-Web-Interface der Abstand zwischen den Bins mit 0,488 mV bemessen [25, 12]. Anhand der ersten 500 Samples wird ein Offset für den Nullpunkt der ADC-Werte bestimmt. Für jeden Messwert werden dann das Integral sowie die Halbwertsbreite (Full Width at Half Maximum, FWHM) berechnet. Außerdem werden die Mittelwerte und Standardabweichungen dieser über alle Messwerte bestimmt. Für die grafische Auswertung werden die Mittelwerte jedes Samples über alle Messwerte hinweg bestimmt. All diese Werte werden über ein Signal an das GUI gesendet und dem Nutzer als Grafik sowie im Textfeld ausgegeben (siehe Abbildung 4.4) und gespeichert (siehe Abbildung 4.3).

Die Hochspannung bleibt auch nach dem Messvorgang auf dem vom Nutzer eingestellten Wert. Damit diese nicht unabsichtlich nach Beendigung des Programms gesetzt bleibt,

wird sie beim Beenden des Programms ausgeschaltet. Beim Versuch das Programm zu beenden wird der Nutzer darüber informiert und gefragt, ob das Programm wirklich beendet werden soll (siehe Abschnitt 4.2.3)

4.2.2. Funktion: LINEARITY CHECK

Mit der Funktion mit dem Namen 'LINEARITY CHECK' kann eine Linearitätsmessung des SSD-PMTs vorgenommen werden. Für diese müssen mehrere Messungen bei verschiedenen DAC-Werten vorgenommen werden. Die Anzahl der Messungen pro Messpunkt und LED-Konfiguration wird, wie bei Abschnitt 4.2.1, durch die Einstellung 'Number of measurements' festgelegt. Die Helligkeit beider LEDs (LED 1 + LED 2) an den verschiedenen Messpunkten kann vor der Messung vom Nutzer durch ein Komma getrennt in dem GUI bei der Einstellung 'Linearity check LED values' eingestellt werden. Die Anzahl der Messpunkte wird durch die Anzahl der angegebenen Werte bestimmt und kann somit auch vom Nutzer gewählt werden.

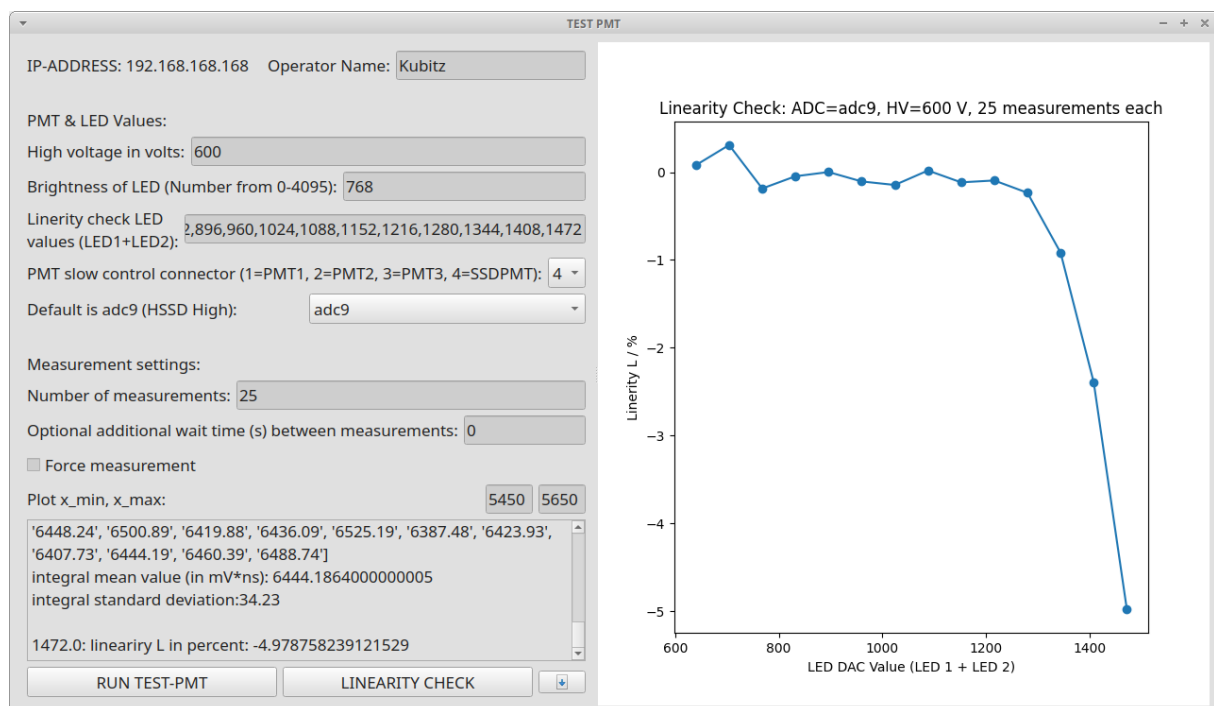


Abbildung 4.5.: Eine Linearitätsmessung wurde ausgeführt. Links sind die berechneten Messdaten zu sehen. Auf der rechten Seite wird die Messung grafisch dargestellt.

Analog zu Abschnitt 4.2.1 wird vor dem Messvorgang überprüft, ob eine Verbindung zum SSD-PMT besteht und ob die Hochspannung erfolgreich gesetzt werden kann. Auch der

Trigger wird auf dieselbe Weise wie in Abschnitt 4.2.1 gesetzt.

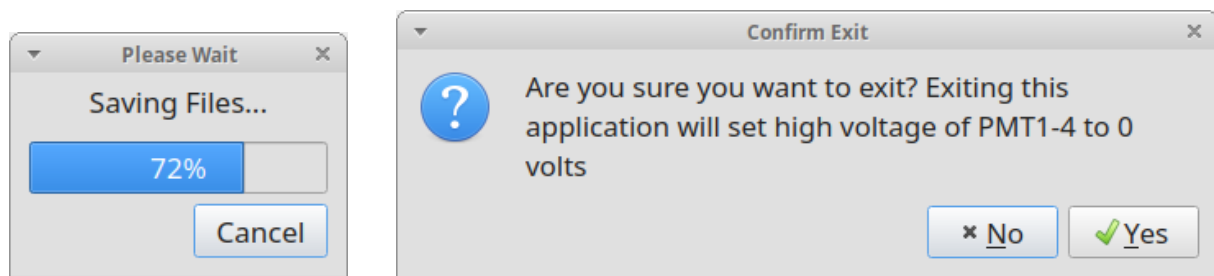
Danach werden für jeden DAC-Wert pro LED-Konfiguration (siehe Abschnitt 4.1.3) jeweils die vom Nutzer angegebene Anzahl an Messungen durchgeführt und analog zu Abschnitt 4.2.1 in JSON-Dateien überschrieben und anschließend über FTP auf den Laptop übertragen.

Die Berechnung der Integrale und der Mittelwerte erfolgt pro DAC-Wert und LED-Konfiguration. Auch dies geschieht analog zu Abschnitt 4.2.1. Dazu werden die Daten anhand der Benennung aufeinanderfolgend eingelesen und aus den Mittelwerten der Integrale wird pro Messpunkt die Linearität berechnet. Diese wird über ein Signal mit den berechneten Werten aller Messpunkte an das GUI gesendet, im Textfeld ausgegeben und grafisch dargestellt. Analog zu Abschnitt 4.2.1 bleibt die Hochspannung nach dem Messprozess auf dem vom Nutzer eingestellten Wert.

4.2.3. Weitere Funktionen

Die für die Messungen erzeugten JSON-Dateien haben jeweils eine Dateigröße von 311,5 kB und können somit schnell eine signifikante Menge Speicherplatz einnehmen. Damit die mit dieser Teststation erzeugte Datenmenge nicht zu groß wird, werden mit jedem neuen Messvorgang alte Messdaten desselben Typs gelöscht. Um dem Nutzer dennoch das permanente Speichern einzelner Messdaten zu erleichtern, wurde für diesen Zweck eine Funktion zum Speichern der Daten implementiert. Diese wird durch einen Button mit einem Speichersymbol ausgelöst, der sich rechts neben dem Button 'LINEARITY CHECK' befindet (siehe Abbildung 4.2). Bei dem Symbol handelt es sich um das Standard-Speichersymbol des Betriebssystems, welches somit vom verwendeten Systemthema abhängig ist.

Wenn die Funktion zum Speichern der Daten verwendet wird, öffnet sich der Standard-Dateimanager des Betriebssystems und der Nutzer kann den Ordner auswählen, in dem die Daten gespeichert werden sollen. Danach beginnt der Speicherprozess und es werden alle Dateien beider Messfunktionen in den ausgewählten Ordner kopiert. Da dies je nach Datenträger und Datenmenge einige wenige Minuten in Anspruch nehmen kann und das GUI in diesem Zeitraum nicht auf Benutzereingaben reagiert, erscheint ein Fenster, das über die PySide Funktion 'QProgressDialog' implementiert ist, mit dem der Nutzer eine Rückmeldung über den Fortschritt der abgespeicherten Daten erhält (siehe Abbildung 4.6a).



- (a) Es werden Messdaten gespeichert. Der Speicherort wurde zuvor mit dem Dateimanager ausgewählt.
- (b) Diese Meldung erscheint, damit verhindert wird, dass die Hochspannung nach Beendigung des Programms eingeschaltet bleibt.

Abbildung 4.6.: Beispiele für Meldungsfenster des Programms.

Mit dem Auslösen einer Messfunktion wird die Hochspannung über die Slow Control auf den vom Nutzer gewählten Wert gesetzt und das Programm wartet, bis diese circa 90% des angegebenen Wertes erreicht hat. Damit dies nicht bei jedem weiteren Messprozess wiederholt werden muss, bleibt die Hochspannung nach dem erfolgreichen Beenden des Messprozesses auf dem eingestellten Wert. Um nun allerdings zu verhindern, dass sie nach dem Beenden des Programms eingeschaltet bleibt, wird diese in diesem Fall automatisch ausgeschaltet und es erscheint beim Schließen des Programms eine Meldung, die den Nutzer darüber informiert, dass dies das Ausschalten der Hochspannung aller mit dem UUB verbundenen PMTs verursacht (siehe Abbildung 4.6b). Hier hat der Nutzer die Möglichkeit, das Beenden des Programms abubrechen.

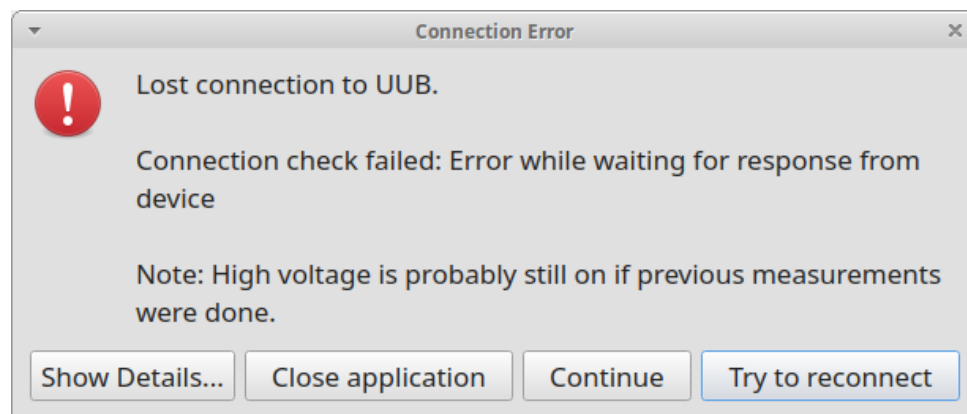


Abbildung 4.7.: Diese Fehlermeldung wird dem Nutzer beispielsweise angezeigt, wenn keine Verbindung zwischen dem UUB und dem Laptop mehr besteht. In diesem Fall wurde das Kabel aus dem RJ-45-Anschluss gezogen und ein Messvorgang gestartet. Mit dem Button 'Try to reconnect' kann ein neuer Verbindungsaufbau gestartet werden, sofern möglich.

Sollte es zu Fehlern kommen, werden diese über das Python-Exception-Handling und Traceback abgefangen und als Fehlermeldung dem Nutzer im GUI angezeigt. Fehlermeldungen bei den Messvorgängen werden für gewöhnlich im Textfeld ausgegeben. Vereinzelt Fehlermeldungen werden dem Nutzer über ein Meldungsfenster angezeigt. Zum Beispiel wird vor dem Start jeder Messfunktion die Telnet-Verbindung zwischen dem Laptop und dem UUB überprüft. Falls diese Überprüfung eine Fehlermeldung ausgibt, wird der Nutzer in einem Meldungsfenster, in welchem unter anderem auch die Ausgabe der 'Exception' wiedergegeben wird (siehe Abbildung 4.7), darüber informiert. Eine detailliertere Ausgabe der Fehlermeldung bekommt der Nutzer über den 'Traceback' zu sehen, der durch Klicken des Buttons 'Show Details' angezeigt wird. Durch den Button 'Try to reconnect' kann eine neue Verbindung zum UUB hergestellt werden.

5. Messungen mit der Teststation

In diesem Kapitel wird auf die ersten Testmessungen eingegangen, die mit der Teststation und der dazugehörigen Software an einem SSD-PMT durchgeführt werden konnten. Zuerst werden die generellen Funktionalitätsmessungen betrachtet, die mit der Funktion 'RUN TEST-PMT' durchgeführt wurden. Im Anschluss wird auf die ersten durchgeführten Linearitätsmessungen eingegangen. Abschließend werden mögliche Verbesserungen der Teststation und der Software diskutiert, die anhand der ersten Messungen als sinnvoll erachtet werden.

5.1. Messungen zum Testen der Photomultiplier-Module auf ihre Funktionalität

In Abbildung 5.1 ist beispielhaft die grafische Auswertung zu sehen, die im Rahmen eines Messvorgangs in das GUI eingebettet und abgespeichert wurde. Für dieses Messbeispiel wurde die Hochspannung auf einen Wert von 600 V gesetzt und die LED-Flasher mit einem DAC-Wert von 768 betrieben. Die grafische Darstellung entstand dabei anhand des Mittelwertes jedes der 2048 Samples über alle 100 Messwerte hinweg.

Die vom UUB gemessenen Werte des ADC sind in eine Spannung mit einem Abstand zwischen den Bins von 0,488 mV umgewandelt worden. Der zeitliche Abstand zwischen den Samples wurde mit circa 8,33 ns bemessen. Der für die Auswertung verwendete ADC-Kanal, die Helligkeit des verwendeten LED-Flashers und die Anzahl der Messungen kann der Nutzer der Grafik entnehmen. Weitere Werte sind in der Ausgabe zu sehen, die dem Nutzer nach einer Messung im Textfeld angezeigt wird (siehe Abbildung 5.2). Die dort enthaltenen Informationen sind:

1. Datum, Uhrzeit und der Name des Benutzers
2. Integrale der einzelnen Messungen

3. Mittelwert der Integrale
4. Standardabweichung der Integrale
5. Halbwertsbreite der einzelnen Messungen
6. Mittelwert der Halbwertsbreiten
7. Standardabweichung der Halbwertsbreiten
8. Ausgabe, ob die Werte der Slow Control im Erwartungsbereich liegen
9. Ausgelesene, sowie gesetzte Hochspannung
10. Ausgelesene Temperatur des Temperatursensors im SSD-PMT

Der Mittelwert des Integrals liegt in diesem Beispiel also bei (11350 ± 140) mV · ns und die FWHM bei $(15,76 \pm 0,07)$ ns. Aus der gegebenen Impedanz von 50Ω des verwendeten Koaxialkabels können aus den berechneten Integralen auch die dazugehörigen Ladungen berechnet werden. Dies ist in der Software noch nicht implementiert worden.

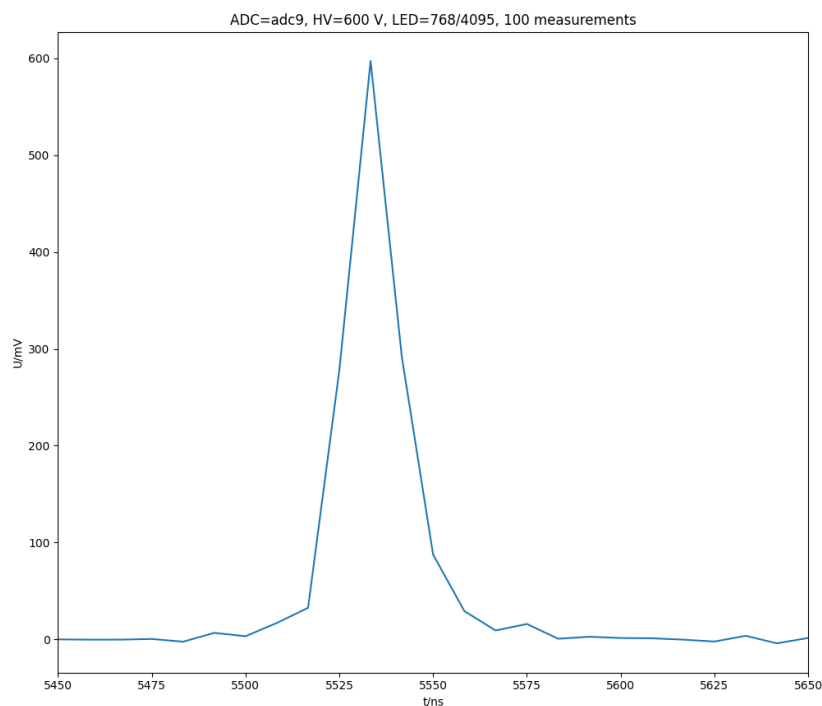


Abbildung 5.1.: Eine in der Teststation durch die Funktion 'RUN TEST-PMT' durchgeführte Messung an einem SSD-PMT.

```

2025-09-08 -- 18:41 -- Kubitz

integral values (in mV*ns):
['11426.18', '11393.78', '11276.31', '11337.07', '11414.03', '11434.28',
 '11422.13', '11357.32', '11353.27', '11365.42', '11434.28',
 11450.48', '11377.57', '11442.38', '11312.77', '11377.57', '11377.57',
 '11438.33', '11393.78', '11389.72', '11462.63', '10927.98',
 11409.98', '11357.32', '11377.57', '11004.94', '11373.52', '11365.42',
 '11247.96', '11369.47', '11365.42', '11333.02', '11438.33',
 11361.37', '11381.62', '11381.62', '11426.18', '11373.52', '11393.78',
 '11373.52', '11414.03', '11405.93', '11397.83', '10830.77',
 11454.53', '10871.27', '11466.68', '11065.69', '11385.67', '11377.57',
 '11292.52', '11438.33', '11381.62', '11142.65', '11361.37',
 11414.03', '11381.62', '11320.87', '11446.43', '11422.13', '11345.17',
 '11418.08', '11409.98', '11369.47', '11442.38', '11373.52',
 11430.23', '11414.03', '11385.67', '10770.01', '11369.47', '11373.52',
 '11004.94', '11438.33', '11434.28', '11357.32', '11430.23',
 11389.72', '11175.05', '11239.86', '11377.57', '11466.68', '11414.03',
 '11418.08', '11405.93', '11434.28', '11393.78', '11405.93',
 11422.13', '11438.33', '11458.58', '11470.73', '11349.22', '11446.43',
 '11361.37', '11409.98', '11397.83', '10984.68', '11466.68',
 11434.28']
integral mean value (in mV*ns): 11352.99
integral standard deviation:138.03

full width half maximum values:
fwhm values (in ns): ['15.77', '15.84', '15.70', '15.89', '15.70',
 15.71', '15.79', '15.85', '15.75', '15.85', '15.90', '15.67', '15.77',
 '15.90', '15.90', '15.79', '15.71', '15.89', '15.80', '15.75',
 15.66', '15.67', '15.79', '15.79', '15.70', '15.73', '15.75', '15.69',
 '15.73', '15.57', '15.81', '15.75', '15.81', '15.63', '15.77',
 15.67', '15.80', '15.78', '15.79', '15.70', '15.84', '15.79', '15.78',
 '15.68', '15.76', '15.79', '15.81', '15.67', '15.76', '15.80',
 15.74', '15.69', '15.77', '15.77', '15.76', '15.78', '15.79', '15.69',
 '15.77', '15.67', '15.60', '15.73', '15.80', '15.74', '15.73',
 15.79', '15.83', '15.76', '15.76', '15.72', '15.77', '15.85', '15.76',
 '15.76', '15.78', '15.75', '15.67', '15.82', '15.80', '15.57',
 15.92', '15.81', '15.82', '15.79', '15.80', '15.81', '15.86', '15.69',
 '15.71', '15.75', '15.87', '15.65', '15.76', '15.79', '15.88',
 15.83', '15.64', '15.78', '15.89', '15.78']
fwhm mean value (in ns): 15.76
fwhm standard deviation: 0.07

Slow control values OK::
high voltage: 574.40 V (set to 600 V)
temperature: 304.52 K (expected: > 50 K)

```

Abbildung 5.2.: Die zu Abbildung 5.1 dazugehörige Ausgabe im Textfeld bei einer beispielhaften Funktionalitätsmessung.

5.2. Linearitätsmessungen

Durch die Verwendung beider LED-Flasher können Linearitätsmessungen an den SSD-PMTs vorgenommen werden. Dazu werden von beiden LEDs die DAC-Werte und damit die Lichtintensitäten $I(A + B)$ über den Dynamikbereich des PMTs variiert, wobei $A = \text{LED1}$ und $B = \text{LED2}$ bezeichnet. Die DAC-Werte der einzelnen LEDs werden dabei gleichgesetzt, $\text{DAC}(A) = \text{DAC}(B)$.

Nun wird mit dem PMT eine vom Nutzer festgelegte Anzahl an Werten bei den ver-

schiedenen Lichtintensitäten $I(A)$, $I(B)$ und $I(A + B)$ gemessen und die dazugehörigen Integrale $f(A)$, $f(B)$ und $f(A + B)$ berechnet. Mit dem Mittelwert der Integrale wird dann die Linearität $L = (f(A + B) - f(A) - f(B))/(f(A) + f(B))$ für jeden Messpunkt berechnet und in einer grafischen Darstellung gegen die DAC-Werte ($A + B$) aufgetragen und im GUI angezeigt [26, 13].

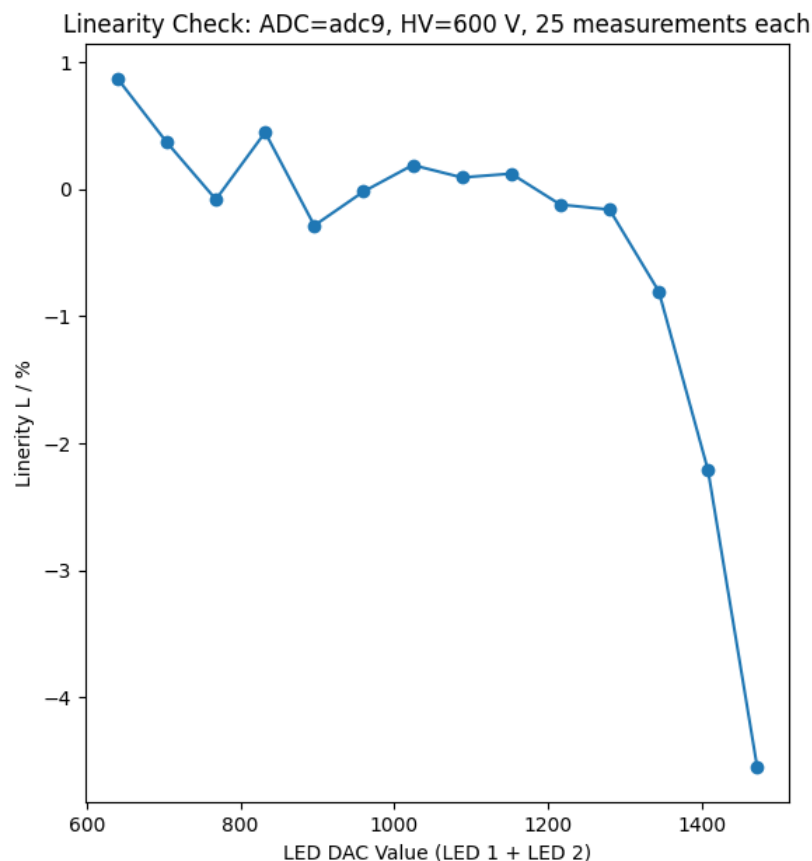


Abbildung 5.3.: Eine Linearitätsmessung mit der Teststation. Der verwendete ADC-Kanal ist in diesem Fall der High-Gain-Kanal des SSD-PMTs (ADC9).

In Abbildung 5.3 ist eine solche Grafik einer Linearitätsmessung mit der Teststation für den High-Gain-Kanal des SSD-PMTs dargestellt. Da für jeden Messpunkt und jede LED-Konfiguration die Integrale mit den dazugehörigen Mittelwerten und Standardabweichungen berechnet werden, fällt die Ausgabe im Textfeld bei der Linearitätsmessung vergleichsweise lang aus. Anstelle der kompletten Ausgabe des Textfeldes, wird im Folgenden jeweils eine gekürzte Fassung mit den für jeden DAC-Wert ($A + B$) der LED-Flasher berechneten Linearitäten aufgelistet. Aufgrund eines Tippfehlers im Wort 'linearity' wurden diese auch nachträglich bearbeitet. Die zu Abbildung 5.3 dazugehörigen berechneten Lineari-

täten sehen wie folgt aus:

2025-09-08 -- 17:35 -- Kubitz

```

640.0: linearity L in percent: 0.8718529953278881
704.0: linearity L in percent: 0.3701896180262226
768.0: linearity L in percent: -0.08037426450998868
832.0: linearity L in percent: 0.44794780968050113
896.0: linearity L in percent: -0.28567306305004964
960.0: linearity L in percent: -0.018150647070574358
1024.0: linearity L in percent: 0.19039308874691036
1088.0: linearity L in percent: 0.09275609377769257
1152.0: linearity L in percent: 0.12266537710758281
1216.0: linearity L in percent: -0.1209846128638677
1280.0: linearity L in percent: -0.16006069614418628
1344.0: linearity L in percent: -0.803812656273611
1408.0: linearity L in percent: -2.2115484621276225
1472.0: linearity L in percent: -4.55157151429055

```

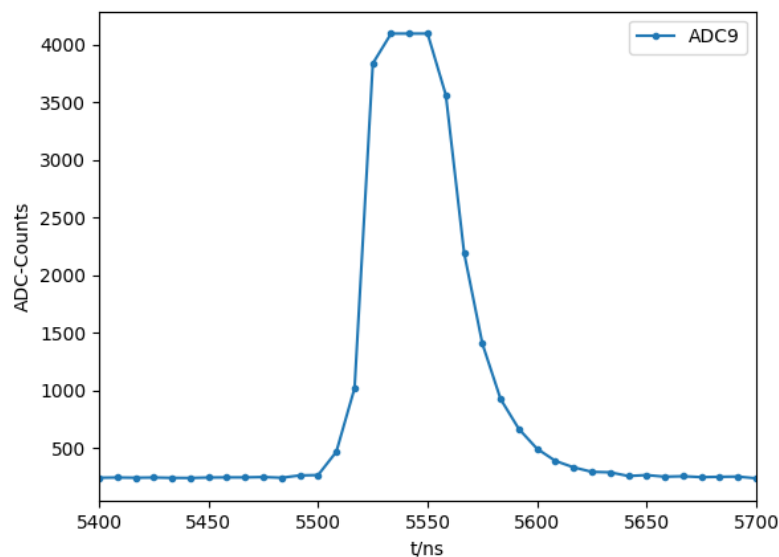


Abbildung 5.4.: Einzelne Messung im High-Gain-Kanal mit einer LED-Konfiguration von 3, einem LED-Helligkeits-DAC-Wert ($A + B$) von 960 und einer Hochspannung von 600 V. Beim maximalen ADC-Wert von 4095 ist ein beginnender Cutoff zu sehen.

Der Cutoff bei der Linearitätsmessung im High-Gain-Kanal erfolgt bei einem ADC-Wert von 4095 und ist demnach durch den ADC bedingt. Dies ist in Abbildung 5.4 anhand einer einzelnen Messung aus der hier diskutierten Linearitätsmessung zu sehen. Von größerem Interesse ist daher eine Linearitätsmessung im Low-Gain-Kanal. Ein Beispiel für eine solche Linearitätsmessung ist in Abbildung 5.5 zu sehen. Die Hochspannung wurde in diesem Fall auf 800 V gesetzt.

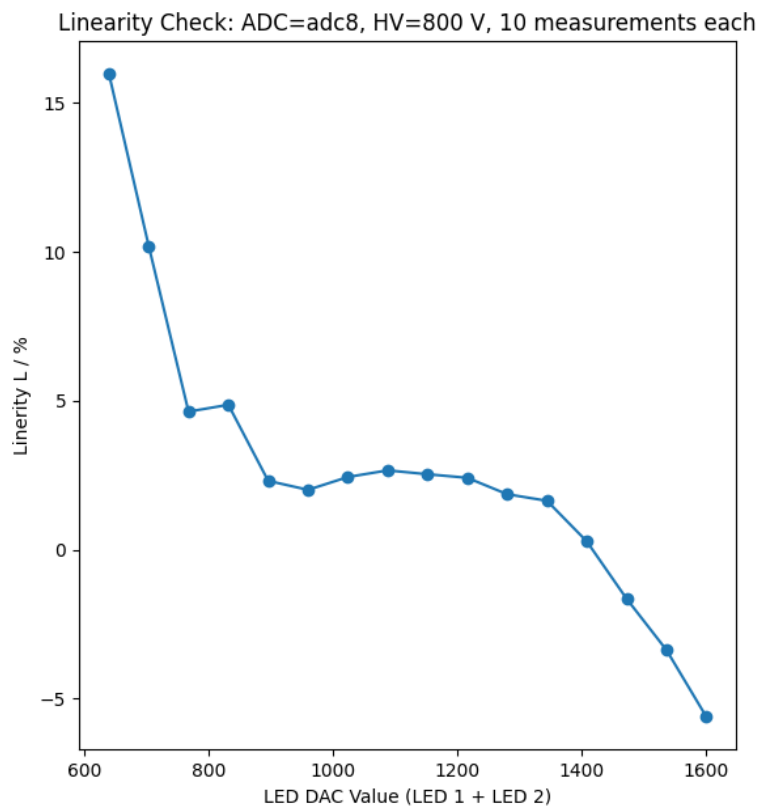


Abbildung 5.5.: Eine Linearitätsmessung mit der Teststation im Low-Gain-Kanal des SSD-PMTs (ADC8).

Für diese Messung sehen die Linearitäten dann wie folgt aus:

2025-09-15 -- 20:06 -- Kubitz

```

640.0: linearity L in percent: 15.985879979828548
704.0: linearity L in percent: 10.19891500904157
768.0: linearity L in percent: 4.634250677313573
832.0: linearity L in percent: 4.86361296963459
896.0: linearity L in percent: 2.3109243697479003
960.0: linearity L in percent: 2.0090450513132656
1024.0: linearity L in percent: 2.439430522021488
1088.0: linearity L in percent: 2.6627454097448533
1152.0: linearity L in percent: 2.53276295240037
1216.0: linearity L in percent: 2.412744579587509
1280.0: linearity L in percent: 1.8618295019156874
1344.0: linearity L in percent: 1.6416676508798904
1408.0: linearity L in percent: 0.27625835681529926
1472.0: linearity L in percent: -1.6496080139372886
1536.0: linearity L in percent: -3.3691067328741795
1600.0: linearity L in percent: -5.6074278858692645

```

Insbesondere bei geringen Helligkeiten der LED-Flasher im Low-Gain-Kanal fällt auf, dass die Linearitäten stark von den gewählten Integrationsgrenzen abhängig sind. Diese können in der INI-Datei eingestellt werden. Die gewählten Grenzen für die aus den Abbildungen 5.3 und 5.5 berechneten und abgebildeten Ereignisse befinden sich bei den Samples 650 (circa 5417 ns) und 690 (circa 5750 ns). Diese sind demnach mit großem Abstand gewählt. Für ein Beispiel von enger gewählten Grenzen wurden die Linearitäten des in Abbildung 5.5 dargestellten Ereignisses ('2025-09-15 – 20:06 – Kubitz') mit den Grenzen 655 und 680 anhand der gespeicherten JSON-Dateien neu berechnet. Diese sehen dann wie folgt aus:

```
LED_DAC []: L [%]
640: 8.372978116079928
704: 6.078499478985745
768: 3.133822699040112
832: 3.1425651507409382
896: 1.450983948490099
960: 1.0897768552153748
1024: 1.3916500994036025
1088: 1.5835312747426724
1152: 1.6257959626066951
1216: 1.589709762532978
1280: 1.0587390836224266
1344: 0.7249366417162846
1408: -0.5015985007165744
1472: -2.284690942638499
1536: -3.8664323374340963
1600: -6.212247448448234
```

5.3. Ausblick

Anhand der Testmessungen konnten weitere sinnvolle Ergänzungen für die Software festgelegt werden. Manche dieser Ergänzungen wurden bereits implementiert. Die Tippfehler bei den Linearitätsmessungen in der grafischen Darstellung sowie im Textfeld wurden mit der Version 5.6.0 des Testing Tools behoben. Außerdem werden nun zusätzlich die Integrationsgrenzen im Textfeld ausgegeben und zusammen mit den anderen Daten gespeichert. Eine weitere nützliche Ergänzung für eine spätere Version der Software könnte darin bestehen, dem Nutzer die Möglichkeit zu geben, die Ausgabe der Messung zwischen Bin und Spannung in der INI-Datei umzustellen. Da für die Verbindung zwischen dem PMT und dem UUB ein Koaxialkabel mit einer Impedanz von 50Ω verwendet wird, könnte die Ausgabe der Messdaten auch in Strom erfolgen. So könnten die berechneten Integrale auch als Ladungen ausgegeben werden. Analog dazu wäre die Möglichkeit für eine Umstellung der Zeit in Samples eine sinnvolle Ergänzung.

6. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Bachelor-Thesis wurde eine Teststation entwickelt, mit der die Photomultiplier-Module vom Typ Hamamatsu R9420, welche in den Oberflächen-Szintillations-Detektoren am Pierre-Auger-Observatorium betrieben werden, auf ihre Funktionalität überprüft werden können. Außerdem wurde durch den Einbau zweier Leuchtdioden die Möglichkeit geschaffen, Linearitätsmessungen an den Photomultipliern vorzunehmen.

Die mechanische Integration der Teststation erfolgte in einer Zarges Box XS. Wesentliche Merkmale der Teststation sind die an der Außenseite angebrachten Anschlüsse für die Spannungsversorgung und die Datenübertragung, ein eigens entwickelter Haltemechanismus für die zu testenden Photomultiplier und die elektrischen Komponenten, sowie die Reduzierung von Lichtreflexionen durch ein schwarzes Innenleben. Der Haltemechanismus wurde in Form von Step-Dateien eigens für diese Teststation modelliert und die Herstellung, die im 3D-Druckverfahren sowie aus einer Aluminiumplatte erfolgte, wurde in Auftrag gegeben.

Als Herzstück der Teststation dient ein Upgraded Unified Board, welches als zentrale elektronische Komponente fungiert. Bei diesem handelt es sich ursprünglich um eine Platine, die in den einzelnen Bodenstationen des Oberflächendetektors am Pierre-Auger-Observatorium eingesetzt wird. Als Lichtquelle dienen zwei LED-Flasher, welche auch ursprünglich für den Einsatz in den Bodenstationen konzipiert worden sind. Das Upgraded Unified Board vereinigt alle zum Testen der Photomultiplier benötigten Funktionen und wird in dieser Teststation für die Steuerung der Hochspannung, zur Steuerung der LED-Flasher, zum Setzen des Triggers, zum Messen der Daten sowie zur Datenübertragung verwendet.

Zur Verwendung der Teststation für Funktionalitätsprüfungen und Linearitätsmessungen an den Photomultipliern, wurde eigens eine Software entwickelt, die auf einem Linux Betriebssystem verwendet werden kann und mit dem Upgraded Unified Board kommuniziert. Diese besitzt ein Graphical User Interface und sie verwendet die Protokolle FTP und Telnet für die Kommunikation und für die Datenübertragung. In dieser Software

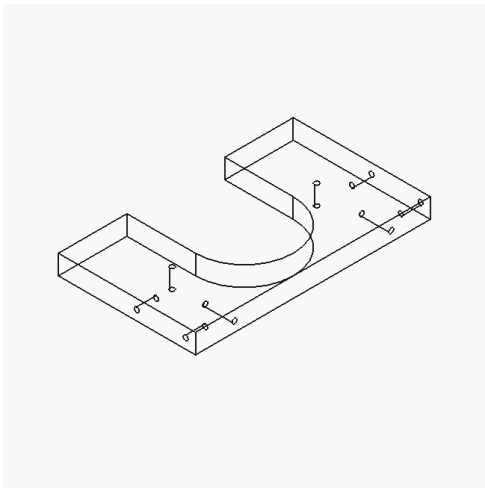
sind die Funktionalitäten zum Testen der Photomultiplier und zum Messen der Linearität implementiert worden.

Abschließend wurden erste Testmessungen anhand von beispielhaften Ergebnissen präsentiert, die mit der Teststation und der dazugehörigen Software an einem Photomultiplier des Typs Hamamatsu R9420 vorgenommen wurden. Anhand dessen wurden weitere mögliche Verbesserungen für die Software festgestellt.

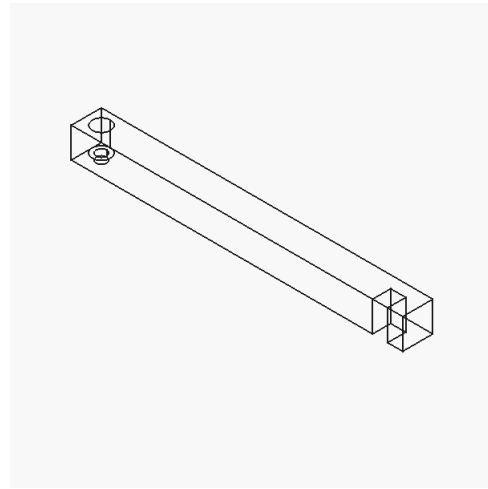
A. Anhang

	Bezeichnung	Hersteller	EAN/GTIN
1	ZARGES-Box XS	ZARGES	4003866408603
2	Upgraded Unified Board		
3	LED-Flasher		
4	Keystone bracket	LOGILINK	4052792055481
5	Cat.6 Snap-In Adapter	TTL NETWORK	9900002515308
6	USB2.0 Snap-In Adapter A/B Buchse	EFB-ELEKTRONIK	4049759064037
7	Keystone Module DC 5.5 x 2.1 mm	DELOCK	4043619868490
8	Plug-in power supply 24 V, 1.5 A	MEAN WELL	4021087028592
9	M12, angled 4-pin cable socket	BELDEN	4002044200138
10	Kabel Zwillingslitze		
11	div. Schrauben (M2.5, M3)		
12	div. Distanzbolzen (M2.5)		

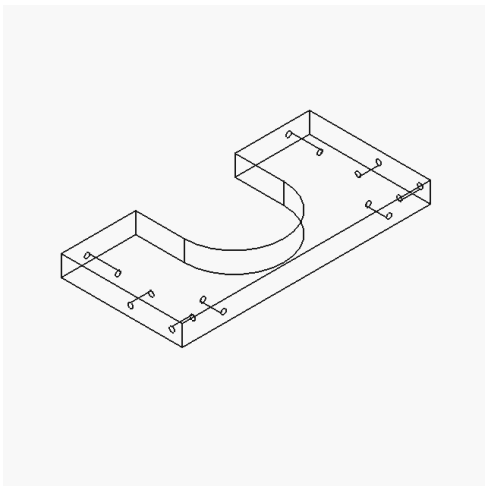
Tabelle A.1.: In der Teststation fest verbaute Bauteile.



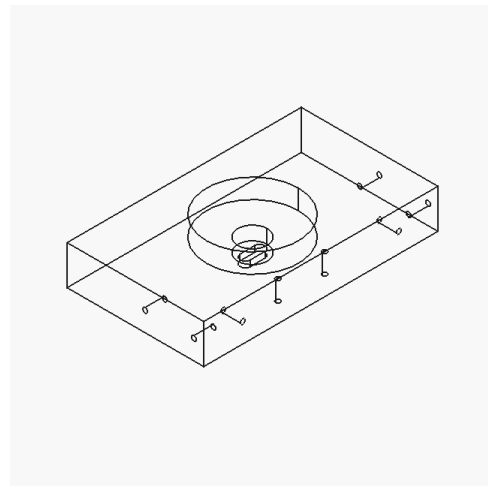
(a) PMT-Halterung Anschlussseite (1x)



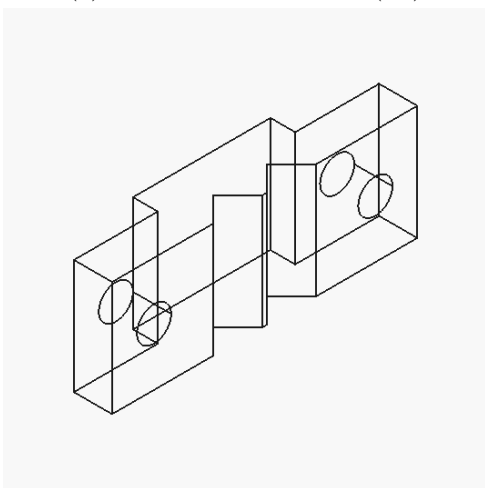
(b) Drehhalterung (1x)



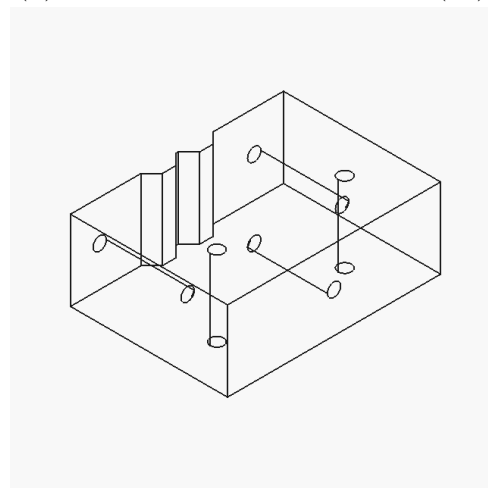
(c) PMT Auflagefläche (2x)



(d) PMT-Halterung Fensterseite (1x)

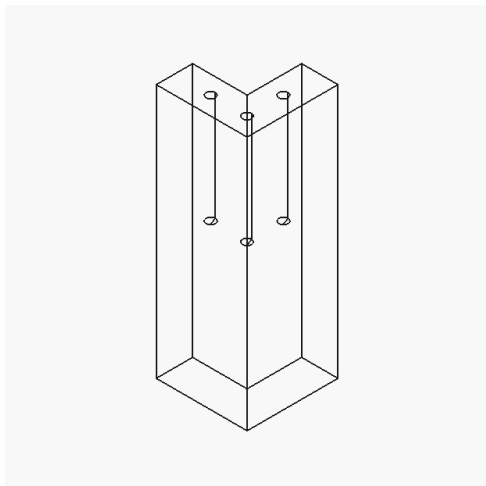


(e) LED-Halterung oben (1x)

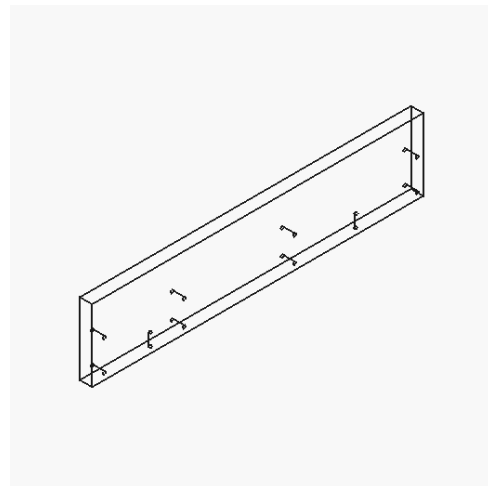


(f) LED-Halterung unten (1x)

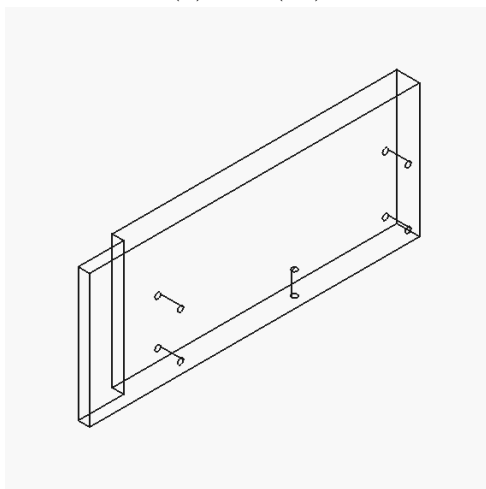
Abbildung A.1.: Sechs der Step-Dateien des gedruckten Haltemechanismus in FreeCAD. In der Klammer zu sehen, wie oft dieses Teil verbaut wurde.



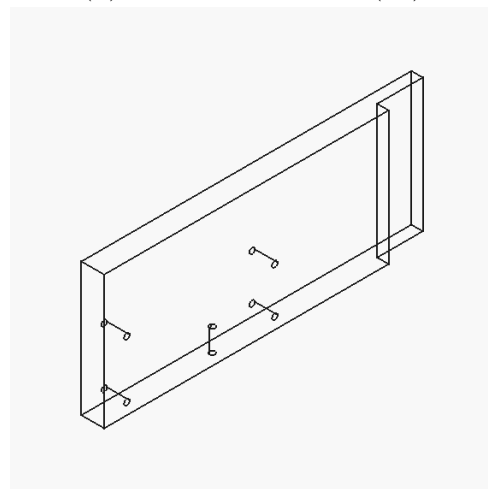
(a) Fuß (4x)



(b) Verstärkungswand (0x)



(c) Geteilte Verstärkungswand A (2x)



(d) Geteilte Verstärkungswand B (2x)

Abbildung A.2.: Vier der Step-Dateien des gedruckten Haltemechanismus in FreeCAD. In der Klammer zu sehen, wie oft dieses Teil verbaut wurde. Die Verstärkungswände mussten aufgrund der Größe des 3D-Druckers in zwei Teilen gedruckt werden.

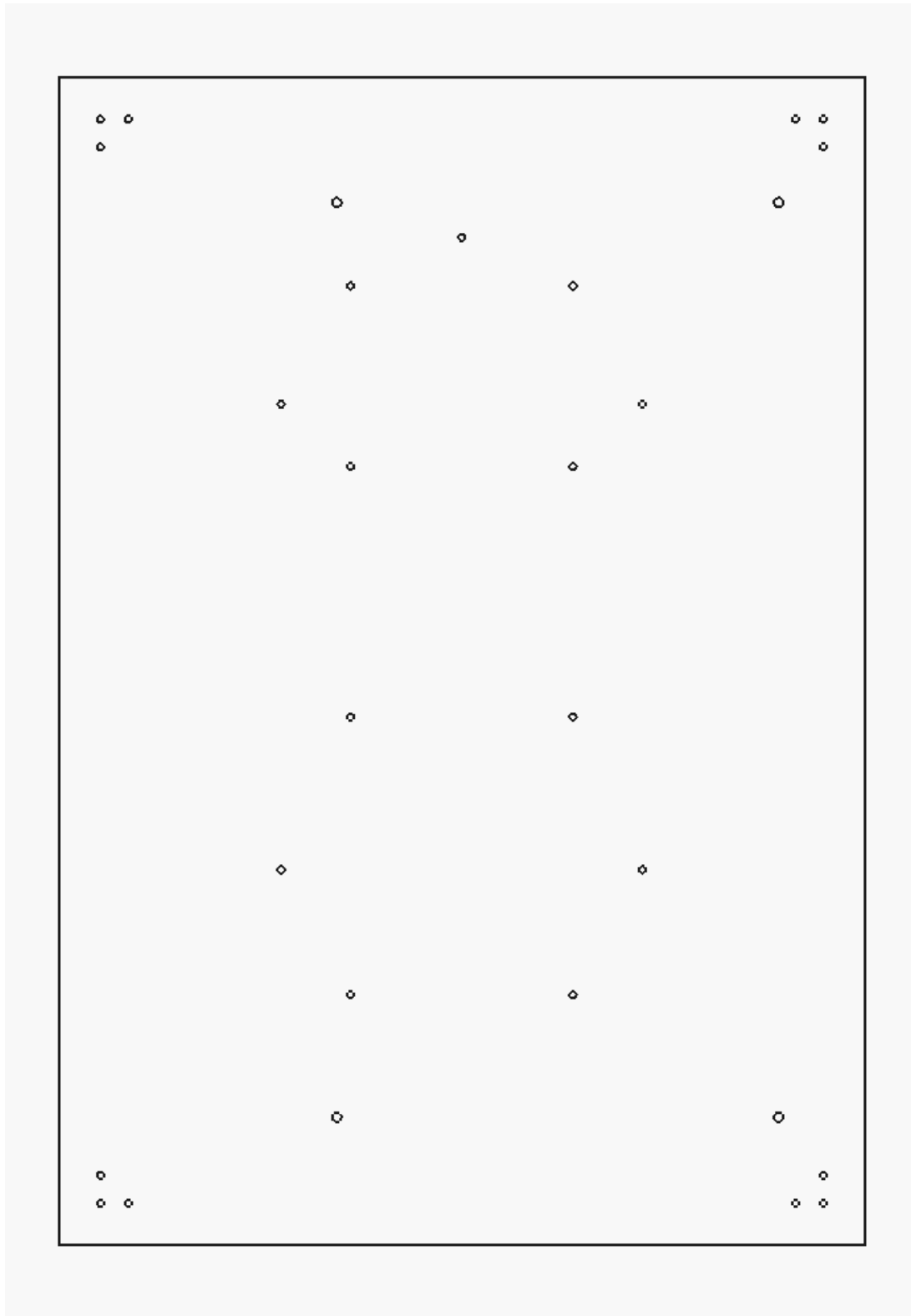
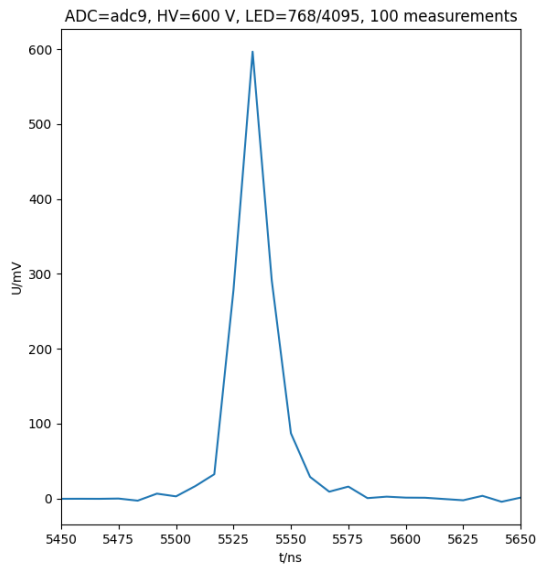


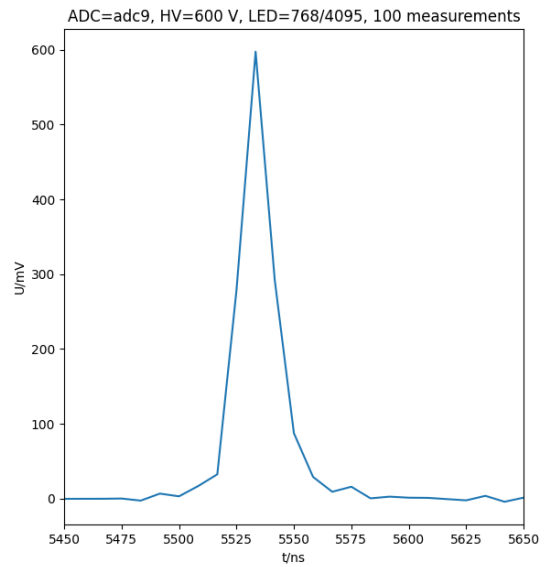
Abbildung A.3.: In FreeCAD dargestellte Step-Datei der in der Werkstatt aus Aluminium gefertigten Grundplatte.

```
1 [application_settings]
2 ; font size:
3 font_size = 13
4 ; timeout in seconds for Telnet and FTP connection
5 timeout = 15
6 ; language of application, en for english, es for spanish
7 language = en
8 ; choose where data is stored on this device
9 localdata = ~/pmtdata
10
11 [login]
12 ; IP-address of the UUB
13 ip = 192.168.168.168
14 ; Username for the UUB
15 username =
16 ; Password for the UUB
17 password =
18
19 [pmt_settings]
20 ; High voltage of PMT in volts:
21 hv = 600
22 ; Set amount of measurements:
23 measurement_counts = 10
24 ; Brightness value of both LEDs. (12-bit Number from 0-4095):
25 led_brightness_dac = 768
26 ; Choose D-Sub PMT Slow control connector (1=PMT1, 2=PMT2, 3=PMT3, 4=
    SSDPMT):
27 pmtno = 4
28 ; force_measurement: False by default, set to True to measure even if hv
    doesn't set.:
29 force_measurement = False
30 ; Adds additional wait time between measurements, can be a float.
    Default is 0:
31 waittime = 0
32 ; Possible Options: adc0-adc9. Default is adc9 (HSSD High):
33 adc_choice = adc9
34 ; Left integration boundary:
35 lb = 650
36 ; Right integration boundary:
37 rb = 690
38 ; left x-axis limit of plot
39 x_min = 5450
40 ; right x-axis limit of plot
41 x_max = 5650
42 ; Specify path where measurements are being stored on UUB
43 path = /var/volatile/pmtdata
44
45 [linearity_check_settings]
46 ; DAC values of LED1+LED2 for linearity check
47 dac_values =
    640,704,768,832,896,960,1024,1088,1152,1216,1280,1344,1408,1472
```

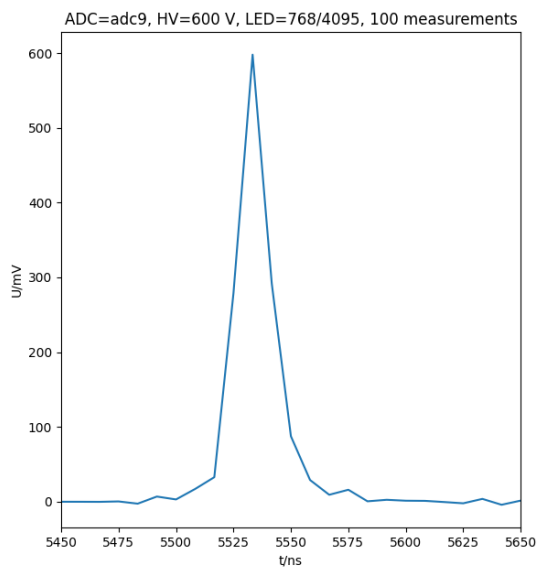
Abbildung A.4.: Ein Beispiel für die INI-Datei des Testing Tools



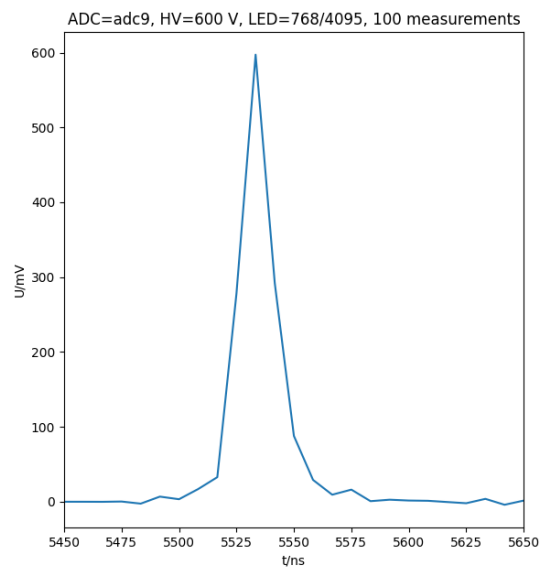
(a) Messung 1



(b) Messung 3

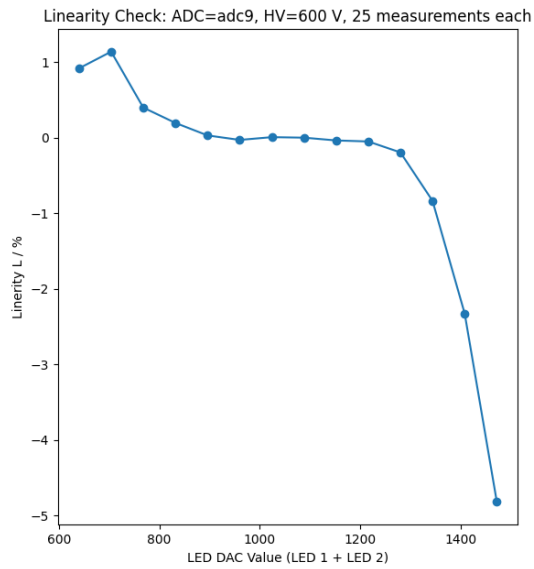


(c) Messung 4

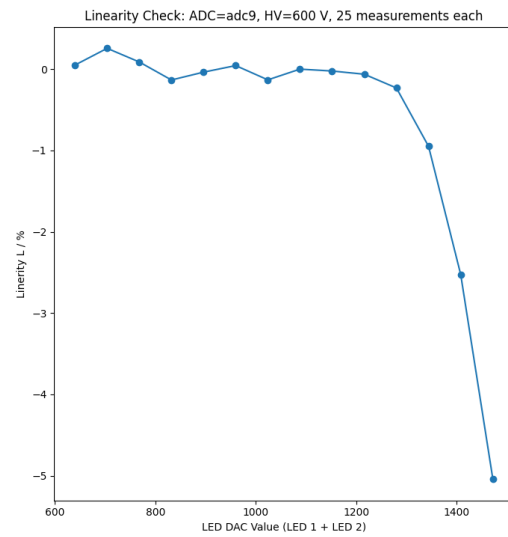


(d) Messung 5

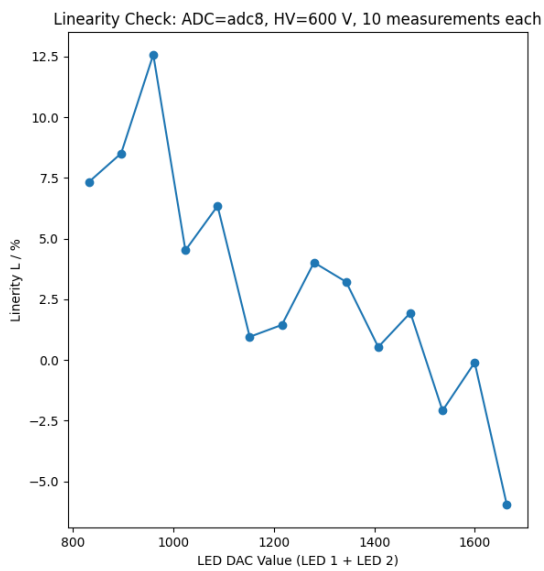
Abbildung A.5.: Grafiken der Funktionalitätsmessungen mit der Teststation.



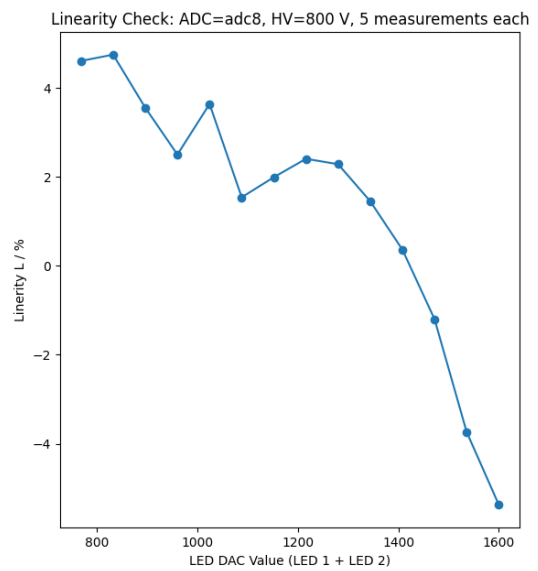
(a) Messung 1



(b) Messung 2



(c) Messung 3



(d) Messung 4

Abbildung A.6.: Testmessungen der Linearitätsmessungen mit der Teststation.

Literatur

- [1] The Pierre Auger Collaboration. “The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 798 (2015), S. 172–213. DOI: 10.1016/j.nima.2015.06.058.
- [2] The Pierre Auger Collaboration. *The Pierre Auger Observatory Upgrade - Preliminary Design Report*. 2016. arXiv: 1604.03637.
- [3] A. Abdul Halim u. a. “The scintillator surface detector of the Pierre Auger observatory”. In: *Journal of Instrumentation* 20.08 (2025). DOI: 10.1088/1748-0221/20/08/p08002.
- [4] A. Abdul Halim u. a. “AugerPrime surface detector electronics”. In: *Journal of Instrumentation* 18.10 (2023). DOI: 10.1088/1748-0221/18/10/P10016.
- [5] Hamamatsu Photonics K.K. Editorial Committee. *Photomultiplier Tubes: Basics and Applications*. 4. Aufl. Hamamatsu: Hamamatsu Photonics K.K. Electron Tube Division, 2017.
- [6] Hamamatsu Photonics K.K. Editorial Committee. *Photomultiplier Tubes and Related Products*. 2020. URL: https://hub.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/PMT_TPMZ0002E.pdf (besucht am 21.07.2025).
- [7] Hamamatsu Photonics K.K. Editorial Committee. *Photomultiplier Tube R9420*. 2014. URL: https://hub.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/R9420_TPMH1296E.pdf (besucht am 21.07.2025).
- [8] Julian Rautenberg u. a. “Development of bases and qualification tests of Photomultiplier Tubes for the AugerPrime scintillation detectors”. In: *Proceedings of 37th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2021)*. Bd. 395. 2021, S. 265. DOI: 10.22323/1.395.0265.

-
- [9] ZARGES GmbH. *ZARGES-Box Datenblatt*. 2025. URL: https://pim.zarges.com/datasheets/zarges/de_DE/ZARGES_1_00000004 (besucht am 07.08.2025).
- [10] Delock, Tragant Handels- und Beteiligungs GmbH. *Keystone - Das modulare Anschlussystem*. 2016. URL: <https://www.delock.de/infothek/keystone/keystone.html> (besucht am 05.09.2025).
- [11] Visit Argentina, Secretaría de Turismo, Ambiente y Deportes de la Nación. *What plug is used in Argentina: Voltage and adapters for your phone*. 2025. URL: <https://www.argentina.travel/en/news/what-plug-is-used-in-argentina-voltage-and-adapters-for-your-phone> (besucht am 07.08.2025).
- [12] R. Assiro. *UUB Embedded Web Server*. Web Interface - UUB Oscilloscope. I.N.F.N. Lecce. 2019.
- [13] V. Ayunutdinov u. a. “The Pierre Auger Surface Detector Led Flashers and Their Use for Monitoring and Calibration”. In: *28th International Cosmic Ray Conference (ICRC)* (2003).
- [14] Roberto Assiro. *Upgraded Unified Board - Operative System and firmware upgrading - User and developer manual*. I.N.F.N. Lecce. 2019.
- [15] V.M. Aynutdinov u. a. *Tests of pre-production LED flashers*. GAP2002_030. 2002.
- [16] Analog Devices, Inc. *AD5306/AD5316/AD5326 2.5 V to 5.5 V, 400 microA, 2-Wire Interface, Quad Voltage Output, 8-/10-/12-Bit DACs Data Sheet (Rev. F)*. 2025. URL: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5306_5316_5326.pdf (besucht am 11.09.2025).
- [17] Python Software Foundation. *Python*. 2025. URL: <https://www.python.org/> (besucht am 20.08.2025).
- [18] The Qt Company Ltd. *Qt for Python*. 2025. URL: <https://doc.qt.io/qtforpython-6/> (besucht am 20.08.2025).
- [19] Charles R. Harris u. a. “Array programming with NumPy”. In: *Nature* 585.7825 (2020), S. 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.
- [20] Pauli Virtanen u. a. “SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python”. In: *Nature Methods* 17 (2020), S. 261–272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2.
- [21] Samuel Abels. *Exscript*. 2025. URL: <https://github.com/knipknap/exscript/> (besucht am 20.08.2025).

-
- [22] J. D. Hunter. “Matplotlib: A 2D graphics environment”. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. DOI: 10.1109/MCSE.2007.55.
- [23] Python Software Foundation. *The Python Standard Library*. 2025. URL: <https://docs.python.org/3/library/index.html> (besucht am 20.08.2025).
- [24] DeepL SE. *DeepL Translate*. 2025. URL: <https://www.deepl.com/en/translator> (besucht am 15.09.2025).
- [25] Analog Devices, Inc. *AD9628 (Rev. C)*. 2015. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9628.pdf> (besucht am 16.09.2025).
- [26] Dr. Julian Rautenberg: Private Kommunikation.

Danksagung

Zuallererst möchte ich mich bei Prof. Dr. Karl-Heinz Kampert dafür bedanken, mir die Möglichkeit gegeben zu haben, die Bachelorarbeit in seiner Arbeitsgruppe anfertigen zu können. Mein Dank gilt auch Prof. Dr. Stefan Ulmer, der sich als Zweitgutachter zur Verfügung gestellt hat.

Außerdem bedanke ich mich bei Dr. Julian Rautenberg, für die Betreuung der Arbeit und die vielen hilfreichen Ratschläge. Des Weiteren möchte ich Dennis Pfeifer, der die Bauteile gedruckt hat und mir viele hilfreiche Hinweise zum Aufbau geliefert hat, sowie Dr. Sven Querchfeld, der immer für Fragen zur Verfügung stand, danken. Ebenso bedanke ich mich bei der gesamten Arbeitsgruppe für ihre Hilfsbereitschaft.

Zum Schluss bedanke ich mich bei meinen Freunden, meiner Familie und meinen Kommilitonen, ohne die das Schreiben dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Besonders unterstützt wurde ich in dieser Zeit von (in keiner Reihenfolge): Meiner Schwester Mira, Dennis, meiner Mutter, Sarah, Ischa, Otto und Carina sowie meinen Arbeitskollegen.