

# Kalibrierung von Photomultipliern und Time over Threshold Messungen

BACHELORARBEIT AUS DER PHYSIK

Abgelegt von

Frederik Andersen

15.06.2023

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg



Prüfer: Prof. Ulrich Katz

Betreuer: Dr. Oleg Kalekin



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Neutrinos	11
1.2 KM3NeT	2
<b>2 Grundlagen von Photomultiplier Tubes</b>	<b>5</b>
2.1 Funktionsweise eines Photomultiplier Tubes	5
2.2 Gain Messungen	6
2.3 Time over Threshold	9
<b>3 Experimentelle Methoden und Ergebnisse der Gain-Messungen</b>	<b>13</b>
3.1 Aufbau	13
3.2 Gain-Messungen und Ergebnisse	14
<b>4 Experimentelle Methoden und Ergebnisse der Time over Threshold-Messungen</b>	<b>23</b>
4.1 Aufbau	23
4.2 Messungen der Time over Threshold und der Amplitude	24
4.3 Korrelation zwischen der Time over Threshold und der Amplitude	29
4.4 Partly Delayed Pulses	32
<b>5 Zusammenfassung</b>	<b>39</b>
<b>6 Quellenverzeichnis</b>	<b>41</b>
<b>7 Abbildungsverzeichnis</b>	<b>45</b>
<b>8 Appendix</b>	<b>47</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Neutrinos

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Kalibrierungen von Photomultiplier Tubes und Time over Threshold Messungen werden im Rahmen des KM3NeTs durchgeführt, einem Tiefseeteleskop zur Detektion von Neutrinos. Neutrinos sind subatomare Teilchen, die in der Teilchen- und Astroteilchenphysik von Interesse sind. Sie gehören zu den fundamentalen Bausteinen der Materie und haben die Besonderheit, dass sie keine elektrische Ladung besitzen und dadurch auch nicht mit Magnetfeldern interagieren. Neutrinos sind extrem schwer nachzuweisen, da sie schwach mit anderen Teilchen wechselwirken.

Die Existenz von Neutrinos wurde erstmals 1930 von Wolfgang Pauli postuliert, um bestimmte Beobachtungen bei radioaktiven Zerfällen zu erklären. Die erste experimentelle Bestätigung erfolgte jedoch erst 1956 durch Frederick Reines und Clyde Cowan [1]. Seitdem haben zahlreiche wissenschaftliche Experimente und Beobachtungen dazu beigetragen, unser Verständnis von Neutrinos zu erweitern.

Neutrinos entstehen in verschiedenen astrophysikalischen Prozessen, wie der Kernfusion in der Sonne oder Supernova-Explosionen. Sie treten in drei verschiedenen Arten auf, die als Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos bezeichnet werden. Ein bemerkenswerter Aspekt der Neutrinos ist ihre Fähigkeit, zwischen diesen Arten zu wechseln, was als Neutrino-Oszillationen bekannt ist. Dieses Phänomen deutet darauf hin, dass Neutrinos eine Masse haben müssen.

## 1.2 KM3NeT

Das KM3NeT ist ein großes internationales Forschungsprojekt, das darauf abzielt Neutrinos zu untersuchen. Das KM3NeT-Projekt besteht aus einem Netzwerk von Tiefseeteleskopen, die im Mittelmeer lokalisiert sind. Die Teleskope bestehen aus Detection Strings die, mit lichtempfindlichen Sensoren, genauer gesagt mit Photomultiplier Tubes, bestückt sind.

Die Hauptziele des KM3NeTs sind die Untersuchung der Eigenschaften von Neutrinos sowie die Suche nach astrophysikalischen Phänomenen wie Supernova-Explosionen, Neutronensternen und Schwarzen Löchern. Durch die Erfassung und Analyse der Neutrinodaten wird erhofft, neue Erkenntnisse über die Entstehung des Universums, die Neutrinophysik und möglicherweise sogar Hinweise auf bisher unbekannte physikalische Phänomene zu erlangen.

Die Installation und Inbetriebnahme der KM3NeT-Teleskope ist ein langfristiger Prozess, der in verschiedenen Phasen stattfindet. Derzeit besteht das Projekt aus zwei Detektor-Modulen: ARCA (Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss) und ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss). Der ARCA-Detektor ist in den Tiefen des Ionischen Meeres vor der Küste von Sizilien, Italien, lokalisiert. Die Detektionseinheiten von ARCA befinden sich in einer Tiefe von etwa 3500 Metern. ARCA zielt darauf ab, hochenergetische Neutrinos aus dem Universum zu detektieren. ORCA ist im Mittelmeer vor der Küste von Toulon, Frankreich, angesiedelt. Die Detektionseinheiten von ORCA sind in einer Tiefe von etwa 2500 Metern platziert. ORCA ist auf die Erforschung der Neutrinooszillation konzentriert.

Im KM3NeT-Projekt werden Detektionseinheiten als Detection Strings bezeichnet. Jeder Detection String besteht aus einer Reihe von Detektor-Modulen, die entlang eines langen Kabels angeordnet sind. Die Kabel werden vertikal im Meerwasser platziert und reichen vom Meeresboden bis zur Oberfläche.

Jedes Detektor-Modul innerhalb einer Detection String besteht aus einem Glasfaser-

kabel, das lichtempfindliche Sensoren enthält, die als Digital Optical Modules (DOMs) bezeichnet werden. Diese DOMs sind mit Photomultiplier Tubes (PMTs) ausgestattet, um Tscherenkow-Strahlung zu erfassen. Die hier betrachtete Tscherenkow-Strahlung entsteht, wenn Neutrinos mit Materie wechselwirken und dabei geladene Sekundärteilchen erzeugen, die sich schneller als die Lichtgeschwindigkeit im entsprechenden Medium bewegen.

Die Detektor-Module werden entlang der Detection Strings in bestimmten Abständen angebracht, um eine gleichmäßige Abdeckung des umgebenden Meereswassers zu gewährleisten. Die genaue Anzahl der Detektor-Module in einem Detection String kann variiert werden.

Die Daten von den DOMs in den Detection Strings werden gesammelt und analysiert, um wertvolle Erkenntnisse über Neutrinos und astrophysikalische Phänomene zu gewinnen. Durch das Verteilen der Detection Strings in einem Netzwerk über das Mittelmeer und die Kombination der Daten aus verschiedenen Teilen des KM3NeT-Systems kann eine umfassende Erfassung und Analyse von Neutrinoereignissen ermöglicht werden [2].



## 2 Grundlagen von Photomultiplier Tubes

### 2.1 Funktionsweise eines Photomultiplier Tubes

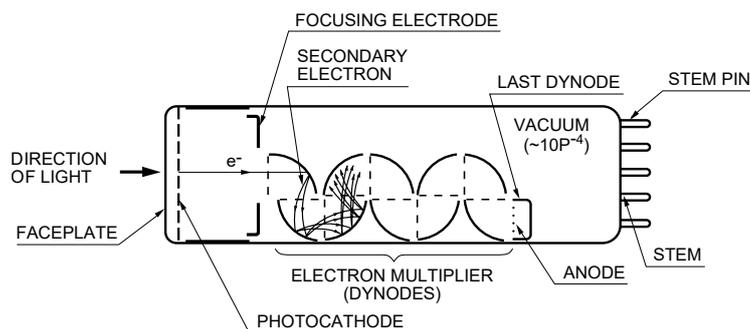


Abbildung 2.1: Aufbau eines PMTs. Dabei trifft das Photon auf die Photokathode, löst Elektronen aus und diese werden durch eine Reihe von Dynoden verstärkt, bevor sie an der Anode gesammelt werden, um ein Ausgangssignal zu erzeugen [3].

In dieser Arbeit werden Photomultiplier Tubes des Herstellers HAMAMATSU PHOTONICS K. K. vom Typ R12199 [4] untersucht, die im KM3NeT zum Einsatz kommen. Photomultiplier Tubes (PMT) dienen zur Verstärkung schwacher Photonensignale. Die ankommenden Photonen treffen auf eine negativ geladene Photokathode und durch den Photoeffekt werden Photoelektronen (Phe) emittiert. Die Kathode besteht aus einem Bialkalimetall, in dem die Valenzelektronen so gebunden sind, dass ein Photon im gewünschten Energiebereich Elektronen auslösen kann. Pro Photon wird maximal ein Elektron freigesetzt. Die Focusing Electrode konzentriert die freigesetzten Elektronen, die dann auf die Dynode beschleunigt werden. Beim Auftreffen auf die Dynode werden sekundäre Elektronen ausgelöst, die wiederum fokussiert und auf die nächste Dynode



Abbildung 2.2: Beispiele für PMTs des Herstellers Hamamatsu [3].

beschleunigt werden. Dieser Schritt wiederholt sich für jede Dynode. Schließlich werden die Sekundärelektronen, die von der letzten Dynode emittiert werden, durch die Anode gesammelt. Der Aufbau eines PMTs ist schematisch in [Abbildung 2.1](#) und Beispiele für PMTs der Firma HAMAMATSU PHOTONICS K. K. sind in [Abbildung 2.2](#) dargestellt. Bei PMTs handelt es sich um Vakuumröhren mit in einem realen Innendruck von circa  $\sim 10^{-4}$  Pa. Durch den erreichten Verstärkungsfaktor (Gain) von  $10^6 - 10^7$  können einzelne Photonen nachgewiesen werden. Trifft kein Photon auf die Photokathode ist oft trotzdem ein Dunkelstrom messbar, der unter anderem durch thermische Emission zustande kommt [3].

## 2.2 Gain Messungen

Zur Kalibrierung eines PMTs ist die Bestimmung des Gains essenziell. Der Gain errechnet sich durch das Verhältnis der Anzahl der gemessenen Elektronen  $n$  zur Anzahl der Photoelektronen  $n_0$ . Die Anzahl der gemessenen Elektronen ergibt sich durch das Integral

des Stroms  $I$  über die Zeit  $t$ , bzw. über das Ohmsche Gesetz mit einem Eingangswiderstand des Messinstruments  $R$ , einer gemessenen Spannung  $U$  und  $e$  als der Elementarladung.

$$n = \int_{t_0}^t dt' \frac{I(t')}{e} = \int_{t_0}^t dt' \frac{U(t')}{R \cdot e} \quad (2.1)$$

Ein PMT funktioniert über Elektronenmultiplikation. Der Parameter  $\delta_i$  beschreibt das Verhältnis der auf der  $i$ -ten Dynode absorbierten Elektronen  $n_i$  und emittierten Sekundärelektronen  $n_{i+1}$ .

$$\delta_i = \frac{n_{i+1}}{n_i} \quad (2.2)$$

Daraus ergibt sich der Gain ( $G$ ) bei  $N$  Dynoden zu

$$G = \frac{n}{n_0} = \prod_{i=1}^N \delta_i. \quad (2.3)$$

Sind alle Dynoden und das anliegende Potential identisch, so vereinfacht sich der Gain zu

$$G = \delta^N. \quad (2.4)$$

Wird die am PMT angelegte Spannung erhöht, so erhöht sich auch die Spannung an den Dynoden und damit die kinetische Energie der Elektronen. Durch die höhere kinetische Energie werden mehr Sekundärelektronen herausgelöst, wodurch sich der Gain verändert. Für  $\delta_i$  gilt hierbei mit  $E$  als dem Potentialunterschied an den Dynoden

$$\delta = a \cdot E^k. \quad (2.5)$$

Der Parameter  $a$  beschreibt hier eine Proportionalitätskonstante. Für den Parameter  $k$  gilt typischerweise  $0.7 \leq k \leq 0.8$ , allerdings für jeden PMT unterschiedlich. Für den Gain

## 2 Grundlagen von Photomultiplier Tubes

ergibt sich dadurch mit  $U$  als der am PMT anliegenden Spannung,

$$G = (a \cdot E^k)^N = a^N \cdot \left(\frac{U}{N+1}\right)^{kN} = A \cdot U^{kN} \quad (2.6)$$

$$\text{mit } A := \frac{a^N}{(N+1)^{kN}}, \quad (2.7)$$

wobei die Parameter  $A$  und  $k$  experimentell bestimmt werden müssen [\[3\]](#) [\[5\]](#).

Nachdem die untersuchten PMTs vom Typ R12199 zehn Dynoden haben werden Werte für  $k \cdot N$  im Bereich  $7 \leq k \leq 8$  erwartet. Das Ausgangssignal ist auch von der Anzahl der auftreffenden Photonen abhängig, die einer Poisson-Verteilung folgt. Hierbei stellt  $\lambda$  die durchschnittliche Anzahl der an der Photokathode ausgelösten Phe dar.

$$P(n, \lambda) = \lambda^n \frac{\exp(-\lambda)}{n!} \quad (2.8)$$

Die Verstärkung an jeder Dynode folgt auch einer Poisson-Verteilung. Die resultierende Ladungsverteilung von einem Phe auf der Anode kann durch eine Gaußverteilung beschrieben werden, wenn die Anzahl von Sekundärelektronen groß ( $4 < n$ ) ist. Die im KM3NeT eingesetzten PMTs haben typischerweise 8 – 10 Sekundärelektronen.

$$S(x, 1) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - Q_1)^2}{2\sigma_1^2}\right), \quad (2.9)$$

mit  $x$  als der Ladung,  $Q_1$  als dem Mittelwert des Ladungsausgangs des PMTs und  $\sigma_1$  als der Standardabweichung der Verteilung. Wird weiterhin angenommen, dass die Verstärkungsprozesse von  $n$  Photoelektronen unabhängig voneinander sind, ergibt sich mit einer  $n$ -fachen Faltung von [Gleichung 2.9](#)

$$S(x, n) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2n\pi}} \exp\left(-\frac{(x - n \cdot Q_1)^2}{2n\sigma_1^2}\right). \quad (2.10)$$

Die Antwortfunktion beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer mittleren Anzahl an

Photoelektronen (Nphe)  $\lambda$  eine spezifische Ladung gemessen wird. Um die Antwortfunktion zu erhalten muss [Gleichung 2.10](#) mit [Gleichung 2.8](#) nochmals gefaltet und über alle  $n$  summiert werden, wodurch sich [Gleichung 2.11](#) ergibt.

$$S(x, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \lambda^n \frac{\exp(-\lambda)}{n!} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\sigma_n^2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - Q_n)^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (2.11)$$

$$Q_n := Q_{ped} + n \cdot Q_{ch} \quad (2.12)$$

$$\sigma_n = \sqrt{\sigma_{ped}^2 + n \cdot \sigma_{ch}^2} \quad (2.13)$$

Wobei  $\mu_{ped}$  und  $\sigma_{ped}$  den Mittelwert und die Standardabweichung des Pedestals beschreiben. Als Pedestal wird die Spannung bezeichnet, die auftritt, wenn kein Event gemessen wird. Der Parameter  $Q_{ch}$  beschreibt die mittlere Verstärkung der Dynoden und damit den Gain. Der Gain ergibt sich zu

$$G = \frac{Q_{ch}}{e}, \quad (2.14)$$

mit der Elementarladung  $e$  [\[6\]](#). Das KM3NeT arbeitet mit einem Gain von  $3 \cdot 10^6$ , was als nomineller Gain bezeichnet wird.

## 2.3 Time over Threshold

Als Time over Threshold (ToT) wird die Zeit bezeichnet, in der ein Signal über einem festgelegten Threshold liegt. Der PMT wird für ToT-Messungen an eine aktive Basis angelötet. Die aktive Basis verstärkt das Signal, sodass die Amplitude vom analogen Signal proportional zur ausgesendeten Ladung des PMTs ist. Diese aktive Basis bestimmt außerdem die Zeitdifferenz zwischen dem Überschreiten des Thresholds der aufsteigenden Flanke und dem Unterschreiten des Thresholds der absteigenden Flanke des Signals in Form eines digitalen Signals, aus dem die ToT messbar ist. Das für KM3NeT verwendete nominelle Threshold liegt bei 0.3 Photoelektronen. Ein Beispiel für ein Analog- und

## Waveforms of 1.12315

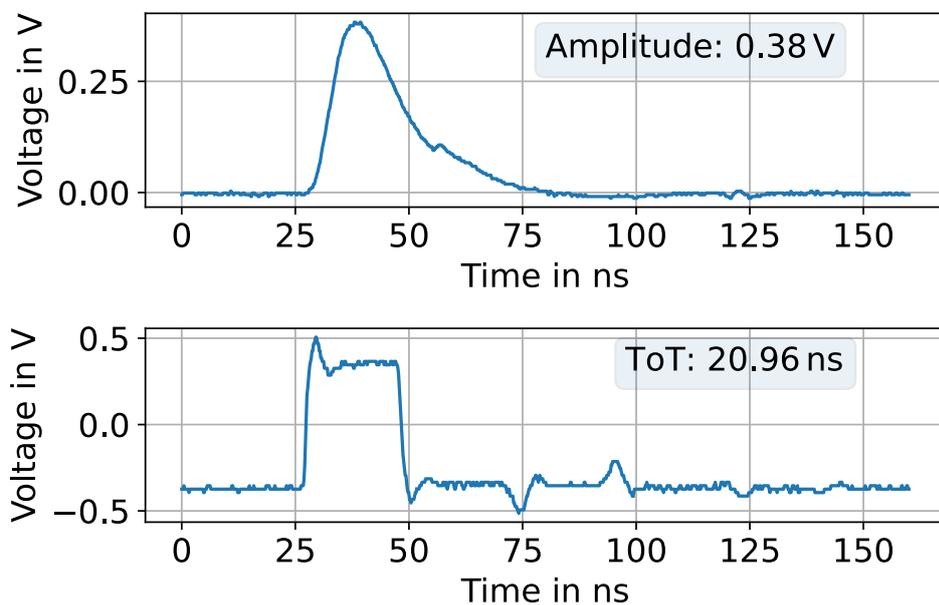


Abbildung 2.3: Oben: Ein Beispiel für ein Analogsignal des PMTs mit der Seriennummer 1.12315 mit einer maximalen Amplitude von 0.38 V. Unten: Ein Beispiel für ein ToT Signal mit einer ToT von 20.96 ns. Die Spannung ist in Volt und die Zeit in Nanosekunden angegeben. Beide Signale kamen als differenzielle Signal an, und wurden zu einem zusammengefügt.

ein ToT Signal ist zu sehen in [Abbildung 2.3](#). Durch die Messung der ToT kann das Signal charakterisiert werden. Dies kann Hinweise auf die Art des detektierten Ereignisses liefern, beispielsweise, ob es sich um ein einzelnes Photon oder um eine mehrere Photonen handelt.

Die Spannungskurve eines PMT-Signals kann durch eine modifizierte Landauverteilung mit langsam abfallendem Signal approximiert werden [\[7\]](#). In einer Landauverteilung zeichnet sich das Signal durch eine langsame Abklingzeit im Vergleich zu einer schnellen Anstiegszeit aus. Dies bedeutet, dass die Dauer des Signals proportional zur Amplitude ist. Daher gilt insgesamt, dass die ToT proportional zur Ladung ist. Wenn die Anstiegszeit des Signals klein ist und der Maximalbereich des Signals vernachlässigbar ist, verhält

sich die ToT in Abhängigkeit von der Amplitude logarithmisch proportional. Dies liegt an der exponentiellen Abklingzeit des Landauverteilung. [8].

$$\text{ToT} = \text{Risetime} + \tau \times \ln\left(\frac{\text{Amplitude}}{\text{Threshold}}\right) \quad (2.15)$$

Der Parameter  $\tau$  entspricht der Decay Time, also der Zeit, die das Signal braucht, um auf das  $e^{-1}$ -fache abzusinken. Threshold entspricht der minimalen Spannung, die gemessen wird und Risetime beschreibt die Zeit, die das Signal braucht, um das Maximum zu erreichen [9] [10].

Zuerst soll der Gain von 28 PMTs kalibriert werden, anschließend die Peak-ToT und Peak-Amplitude. Schließlich soll noch die Korrelation zwischen der Amplitude und der ToT untersucht werden. Ziel dieser Arbeit, ist es bekannte Streuungen dieser Werte, mit einer höheren Anzahl von PMTs und somit mit einer größeren Statistik, zu analysieren.



# 3 Experimentelle Methoden und Ergebnisse der Gain-Messungen

## 3.1 Aufbau

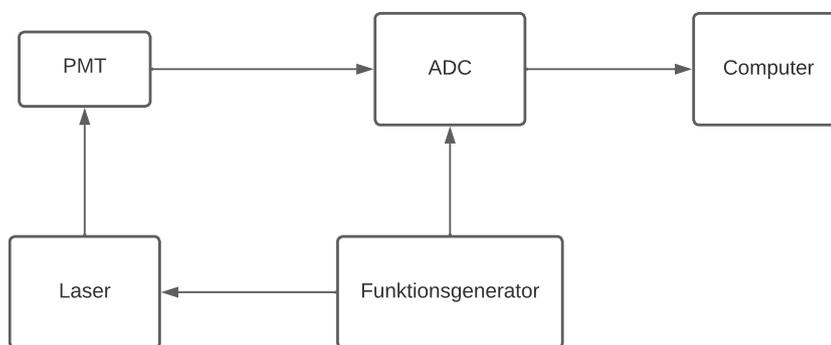


Abbildung 3.1: Experimenteller Aufbau für Gain-Messungen nach dem Beispiel von Bellamy et. al. [6]. Hierbei dient der Funktionsgenerator als Trigger für den Laser und das Oszilloskop (ADC). Der Laser beschießt den PMT und das Oszilloskop nimmt die Signale auf, die an den Computer gesendet werden.

Der Aufbau der Messungen folgt dem Vorschlag von Bellamy et al. [6] und ist in [Abbildung 3.1](#) schematisch dargestellt. Ein Foto findet sich in [Abbildung 3.2](#). Der PMT befindet sich hierbei in einer Dunkelkammer, in einer weiteren lichtisolierten Box, damit kein ungewolltes Licht die Messung stört. Bei diesem Experiment wird der PMT von einer Hochspannungsquelle über eine passive Basis versorgt. Die passive Basis fungiert als Spannungsteiler um die Kathode und die Dynoden mit der richtigen Spannung zu versorgen. Der PMT wird mit einem Pikosekundenlaser (PicoQuant PDL 800-D [11]) beschossen und die Spannung am PMT wird mit einem Oszilloskop gemessen. Für das

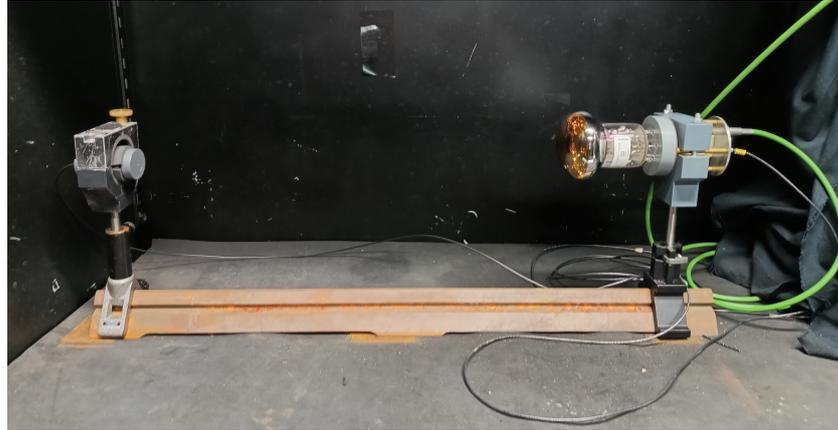


Abbildung 3.2: Bild des Aufbaus für die Gain-Messungen. Rechts der PMT angeschlossen und die passive Basis, links die Halterung für die optische Faser. In der Halterung ist auch ein Milchglas verbaut, um den Laser aufzufächern.

Experiment wurden ein SHR [12] Hochspannungsnetzgerät von der Firma iseg und ein Rigol DG 1022 [13] Funktionsgenerator verwendet. Der Funktionsgenerator fungiert als Trigger für das Oszilloskop und den Laser. Als Oszilloskop wurde ein Textronix MSO64B [14] mit einem Eingangswiderstand von  $50\ \Omega$  verwendet. Der Laser sendet Pulse mit einer Pulsweite von 55 ps und einer Frequenz von 1 kHz aus. Das Laserlicht wird durch eine optische Faser in die Kammer geleitet und anschließend durch ein Milchglas aufgefächert, bevor er auf den PMT trifft. Zur Steuerung der Instrumente und zur Aufzeichnung der Messwerte wurde ein selbst geschriebenes Python-Modul namens `inst_controll.py` [15] und das Programm `messung.py` [15] genutzt.

## 3.2 Gain-Messungen und Ergebnisse

Der nominelle Gain bezieht sich auf den angestrebten Gain von  $3 \cdot 10^6$  mit dem das KM3NeT arbeitet, während die nominelle Spannung die Spannung bezeichnet, bei der der nominelle Gain erreicht wird. Zur Analyse wurde zu Beginn der Laser so eingestellt, dass der PMT sich im Single Photon Mode befindet, also im Mittel weniger als ein Phe pro Event ausgelöst wird. Hierfür wurde die Leistung des Lasers nach und nach

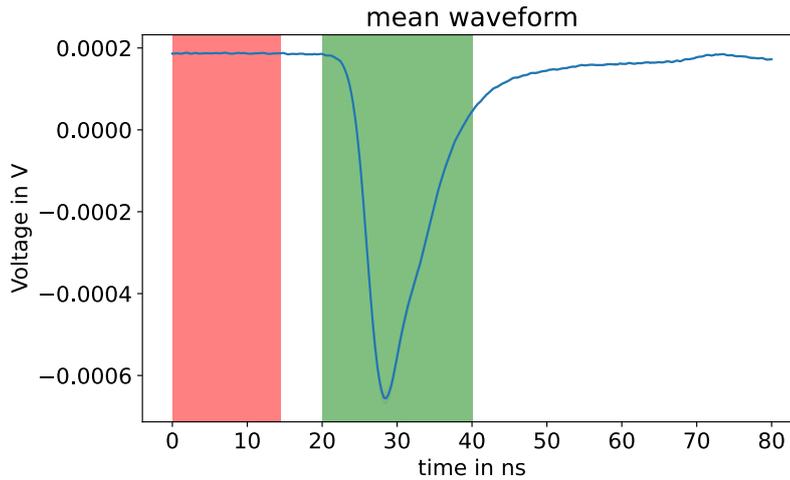


Abbildung 3.3: Plot der Mittelwerte der gemessenen Events des PMTs 2.15919 bei einer Spannung von 1000 V, wobei Kurven ohne Photoelektron nicht berücksichtigt sind. Der rote Bereich ist der Pedestal und in Grün die Integrationsgrenzen zur Erstellung des Histogramms. Die Zeit ist in Nanosekunden und die Spannung in Volt angegeben.

reduziert, bis die gewünschte mittlere Anzahl Phes vorlag. Anschließend wurden bei fünf bis sieben verschiedenen Spannungen je 10000 Events aufgezeichnet. Ein Beispiel für die aufgenommenen Signale findet sich in [Abbildung 3.3](#). Bei dieser Grafik handelt es sich um die gemittelten Spannungskurven des PMTs mit der Seriennummer PMTs 2.15919 bei einer Spannung von 1000 V. Um die Antwortfunktion des PMTs zu erhalten, muss die gemessene Spannung über die Zeit integriert werden und anschließend daraus ein Histogramm erstellt werden. Das Integral wurde numerisch ermittelt mit

$$\text{Ladung} = \int_{t_0}^{t_1} \frac{U(t)}{R} dt = \frac{1}{R} \sum_k \Delta t_{k,k+1} U_k \quad (3.1)$$

Die Parameter  $t_0$ ,  $t_1$  beschreiben die Zeitpunkte ab dem, bzw. bis wann die ToT gemessen wurde,  $\Delta t_{k,k+1}$  beschreibt den zeitlichen Abstand zwischen zwei Messpunkten  $t_k$  und  $t_{k+1}$  und  $U_k$  die gemessene Spannung zum Zeitpunkt  $t_k$ .  $R$  Beschreibt den Eingangswiderstand des Oszilloskops. Nun kann [Gleichung 2.11](#) an das Histogramm angefügt werden und

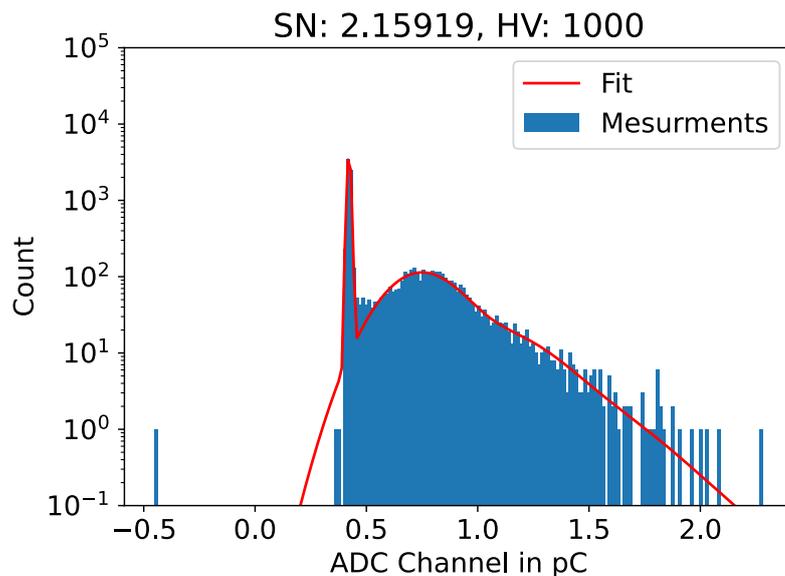


Abbildung 3.4: Histogramm über den ADC-Channel des PMTs 1.12315 bei einer Spannung von 1000 V, mit angefitteter [Gleichung 2.11](#). Der ADC-Channel entspricht der Ladung eines Signals. Der gemessene Gain beträgt  $(1.802 \pm 0.019) \cdot 10^6$ . Der linke Peak beschreibt den Pedestal und der rechte eine Überlagerung Events mit einem oder mehr Photoelektronen.

der Gain bei einer gewählten Hochspannung bestimmt werden. Ein Beispiel für ein Histogramm mit angefitteter [Gleichung 2.11](#) findet sich in [Abbildung 3.4](#). Es darf nicht über das komplette Zeitfenster integriert werden, um mögliche Afterpulses zu vermeiden und den Einfluss des Rauschens gering zu halten. Um die optimalen Integrationsgrenzen zu bestimmen wurden, die diese variiert und in einen Farbplot die resultierenden Gain-Werte, die Fehler auf den Gain und die Nphe aufgetragen. In [Abbildung 3.5](#) wurde in der ersten Grafik der Gain in Abhängigkeit der Integrationsgrenzen, in der zweiten der Fehler auf den Gain, in der dritten die Nphe aufgetragen. Zu erkennen ist hier, dass die linke Integrationsgrenze keinen starken Einfluss hat. Die rechte Integrationsgrenze muss groß genug gewählt werden, um das komplette Signal zu integrieren, allerdings steigt auch der Gain bei einer Erweiterung des Integrationsbereiches, zu sehen in [Abbildung 3.6](#) in der oberen Grafik. Unabhängig von den Integrationsgrenzen ist der Fehler auf den Gain

klein. Auch das Resultat für die mittlere Anzahl an Photoelektronen ändert sich kaum. Nach der Variation der Integrationsgrenzen wurde als Start der Integration 20 ns und als Ende 40 ns festgelegt, was einer Integrationszeit von 20 ns entspricht. Die [Gleichung 2.6](#) kann in doppellogarithmischer Darstellung angegeben werden

$$\log_{10}(G) = kn \cdot \log_{10}(U) + \log_{10}(A). \quad (3.2)$$

Nachdem der Gain bei mehreren Spannungen berechnet wurde, kann an die Ergebnisse [Gleichung 3.2](#) angefitet werden und aus dem Fit der nominelle Gain berechnet werden. Ein Beispiel hierfür ist in [Abbildung 3.7](#) zu sehen. Zur Auswertung der Messergebnisse wurde ein selbstgeschriebenes Python-Modul namens `pmt` und dessen Submodul `gain\_analysis` [\[15\]](#) verwendet, welches auf dem von Jonas Reubelt, Johannes Schumann und Tamas Gal entwickeltem und von mir erweitertem Python-Modul `PeeEmTee` [\[16\]](#) aufbaut. Die Fitparameter und nominellen Hochspannungen der 28 gemessenen PMTs sind in [Tabelle 8.1](#) gelistet und die nominellen Hochspannungen [Abbildung 3.8](#) als Histogramm dargestellt. Insgesamt konnten alle nominellen Hochspannungen mit einem Fehler von weniger als 2 V bestimmt werden. Auch die Parameter für  $kn$  liegen im erwarteten Bereich und insgesamt weisen die Fitparameter wenig Streuung und einen geringen Fehler auf, was allerdings aufgrund der exponentiellen Abhängigkeit des Gains zur Spannung zu sehr unterschiedlichen Hochspannungen führt. Histogramme über die Fitparameter sind in [Abbildung 3.9](#) und [Abbildung 3.10](#) zu finden. Der PMT 2.10149 ist hier ein Ausreißer mit der größten nominellen Spannung von 1312 V, und dem größten Wert für  $\log_{10}(A)$ , sowie dem kleinsten für  $kn$ .

### 3 Experimentelle Methoden und Ergebnisse der Gain-Messungen

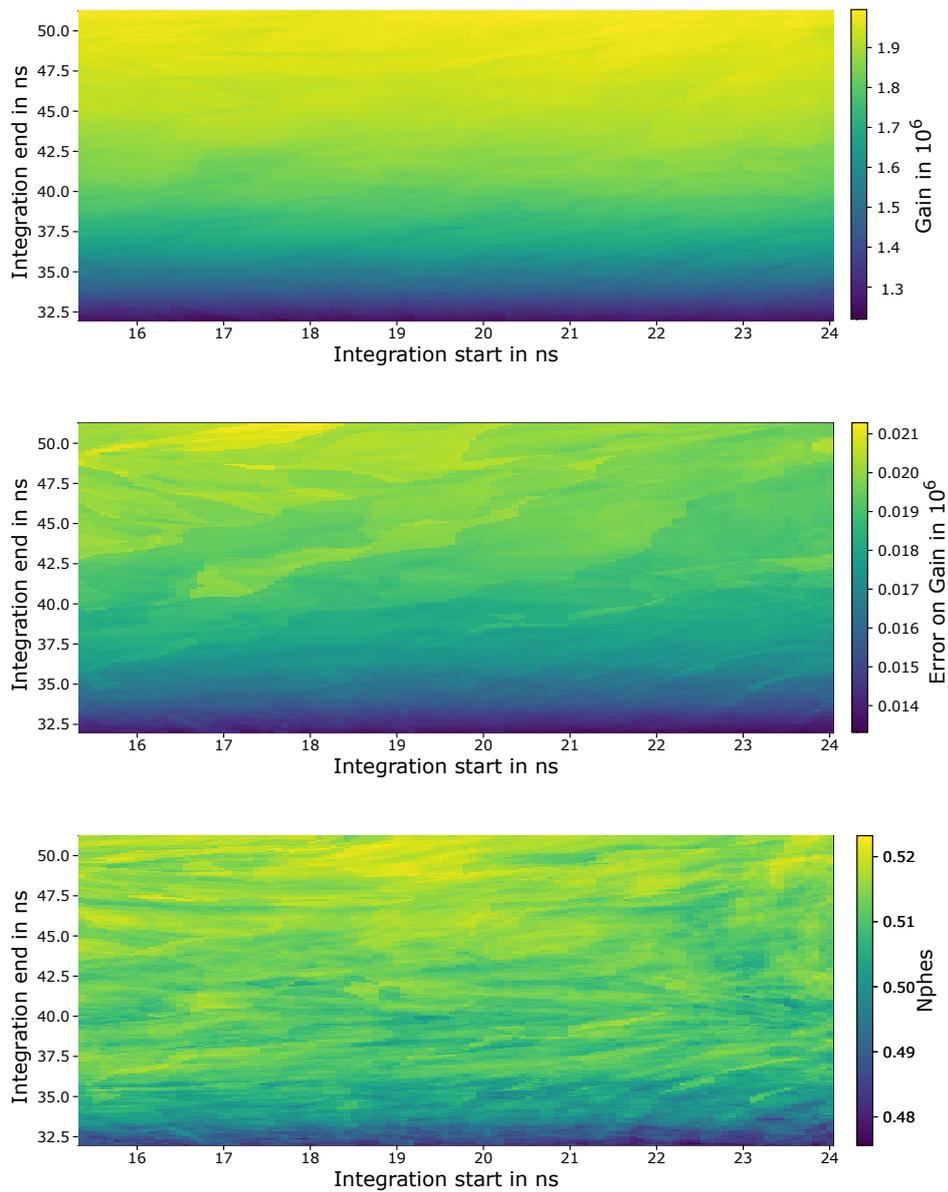


Abbildung 3.5: Ein Beispiel für die Variation der Integrationsgrenzen für den PMT mit Seriennummer 2.151919 bei einer Spannung von 1000 V. Die Abbildung oben zeigt den errechneten Gain, mit der linken Integrationsgrenze auf der x-Achse und der rechten Integrationsgrenze auf der y-Achse. In der mittleren Grafik ist der errechnete Fehler auf den Gain zu sehen und in der unteren Grafik die errechnete mittlere Anzahl der Photoelektronen. Die Zeit ist hier in Nanosekunden angegeben.

### 3.2 Gain-Messungen und Ergebnisse

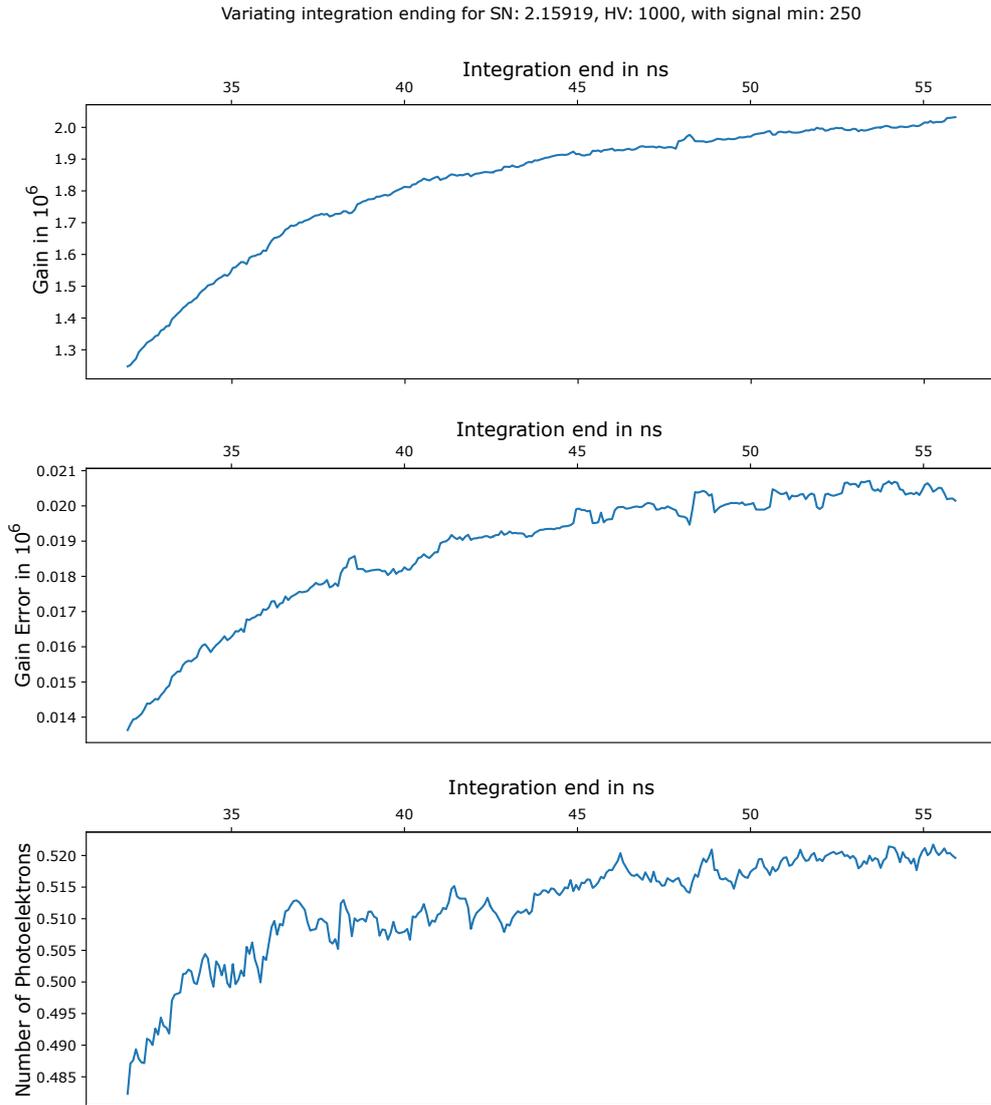


Abbildung 3.6: Ein Beispiel für die Variation der Integrationsgrenzen wie in [Abbildung 3.5](#), nur dass hier die rechte Integrationsgrenze fest ist und die linke Integrationsgrenze variiert wurde. Die Abbildung oben zeigt den errechneten Gain, mit der rechten Integrationsgrenze auf der x-Achse und dem resultierenden Gain auf der y-Achse. In der mittleren Grafik ist der errechnete Fehler auf den Gain zu sehen und in der unteren Grafik die errechnete mittlere Anzahl der Photoelektronen. Die Zeit ist hier in Nanosekunden angegeben.

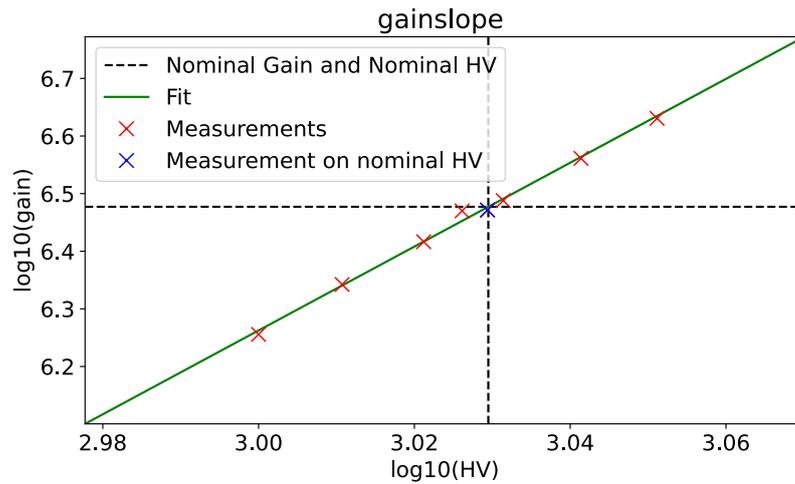


Abbildung 3.7: Spannung gegen Gain in doppellogarithmischer Darstellung mit linearem Fit des PMTs 2.15919. Die waagerechte, gestrichelte Linie beschreibt den nominellen Gain von  $3 \cdot 10^6$  und die horizontale Linie die errechnete nominelle Spannung. Die rote Punkte beschreiben Messungen zur Berechnung des nominellen Gain, der blaue die Messung bei der errechneten nominellen Spannung. Die grüne Linie beschreibt den Linearen Fit nach Gleichung 3.2

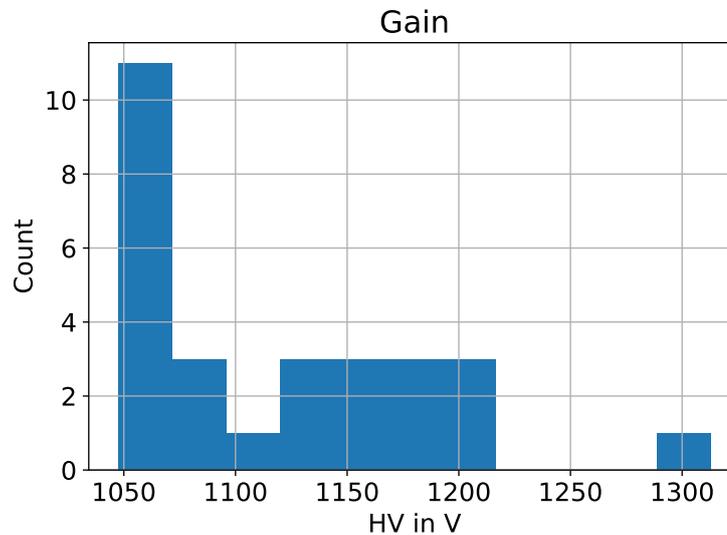


Abbildung 3.8: Histogramm über die Ergebnisse der Gain-Kalibrierungen für die nominelle Spannung. Insgesamt brauchen die meisten PMTs eine nominelle Spannung im Bereich von 1050 V bis 1100, nur ein PMT braucht eine nominelle Spannung von über 1300 V.

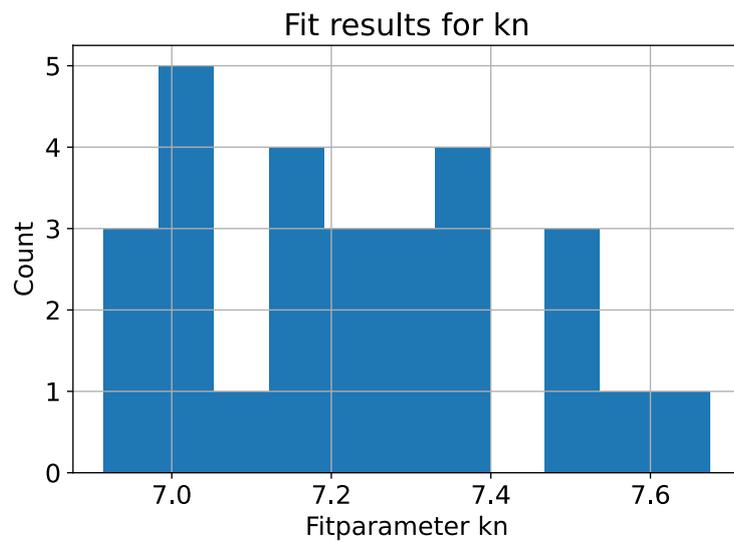


Abbildung 3.9: Histogramm über die Ergebnisse der Gain-Kalibrierungen für den Parameter  $kn$  aus Gleichung 3.2.

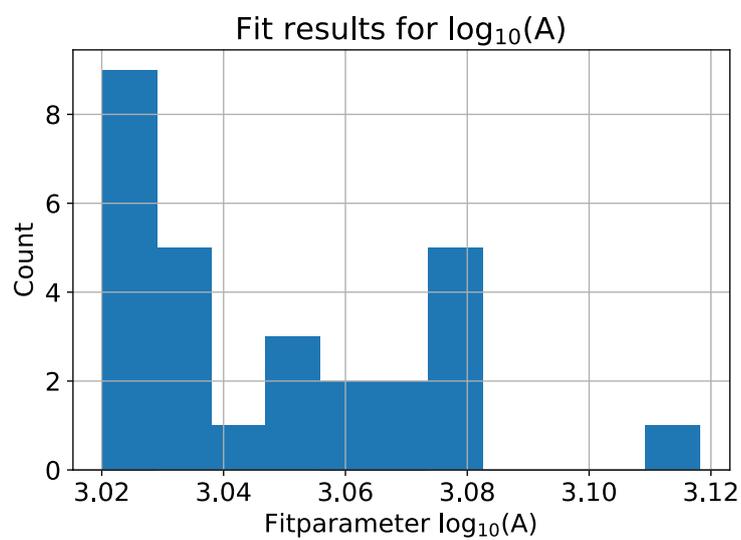


Abbildung 3.10: Histogramm über die Ergebnisse der Gain-Kalibrierungen für den Parameter  $\log_{10}(A)$  aus Gleichung 3.2.



# 4 Experimentelle Methoden und Ergebnisse

## der Time over Threshold-Messungen

### 4.1 Aufbau

Im Anschluss an die Gain-Messungen wurde die aktive Basis an den PMT angelötet, und die überstehenden Drähte gekürzt. Die aktive Basis besteht aus zwei Teilen, einem Front-End-Mixed-Signal-ASIC (PROMiS), das für die Auslesung des PMT zuständig ist, und einem Analog-ASIC (CoCo). Die PROMiS-Schaltung verstärkt die Eingangsla-



Abbildung 4.1: Foto des Aufbaus für die ToT Messungen. Links befindet sich der PMT, angeschlossen an die aktive Basis und rechts die Halterung für die optische Faser. In der Halterung ist auch ein Milchglas verbaut um den Laser aufzufächern.

dung, wandelt sie in eine Impulsdauer um und übermittelt die Informationen über eine differenzielle Signalübertragung mit niedriger Spannung (LVDS). Diese LVDS-Signale tragen Informationen über die Ankunftszeit und die ToT. Ein PROM-Block bietet dem Chip eine eindeutige Identifikation. Der Chip kommuniziert über einen I2C-Bus mit der Steuerelektronik. CoCo regelt über einen weiteren Schaltkreis die Spannungsversorgung für den PMT [10]. Die aktive Basis wird von einer Spannungsquelle mit 3,3 V versorgt. Zur Messung wird die aktive Basis an einem Adapter angeschlossen, der wiederum mit vier Kanälen des Oszilloskops verbunden ist. Da die aktive Basis differenzielle Signale sendet, müssen diese erst zu einem Signal zusammengefügt werden. Ein Beispiel für das Analog- und das Digitalsignal ist in [Abbildung 2.3](#) zu sehen. Ein Foto des Versuchsaufbaus findet sich in [Abbildung 4.1](#), dessen schematischer Aufbau der selbe ist wie in [Abbildung 3.1](#). Für die Messung wurde das gleiche Equipment wie in [Abschnitt 3.1](#) genutzt, sowie dasselbe Pythonmodul.

## 4.2 Messungen der Time over Threshold und der Amplitude

Zu jedem PMT wurden 240000 Events aufgenommen. Für die Analyse der ToT wurde aus dem Pythonmodul `pmt` die Klasse `tot` [15] genutzt. Der Laser wurde zu Beginn so eingestellt, dass weniger als 0.08 Nphe vorlagen. Für sehr kleine Nphes kann diese als die Anzahl der Ereignisse mit ToT, geteilt durch die Gesamtzahl der aufgenommenen Ereignisse, approximiert werden. Für die am PMT anliegende Hochspannung wird die in [Abschnitt 3.1](#) gefundene Spannung genutzt. Um die mittlere ToT eines PMTs zu bestimmen, wurde für jedes Ereignis die ToT berechnet und anschließend ein Histogramm gebildet, während Ereignisse ohne Signal ignoriert wurden. Ein Beispiel ist zu sehen in [Abbildung 4.2](#). Anschließend wurde an den Peak eine Gaußfunktion wie in [Gleichung 4.1](#) angefitet. Für die maximale Amplitude wurde der höchste Amplitudenwert innerhalb

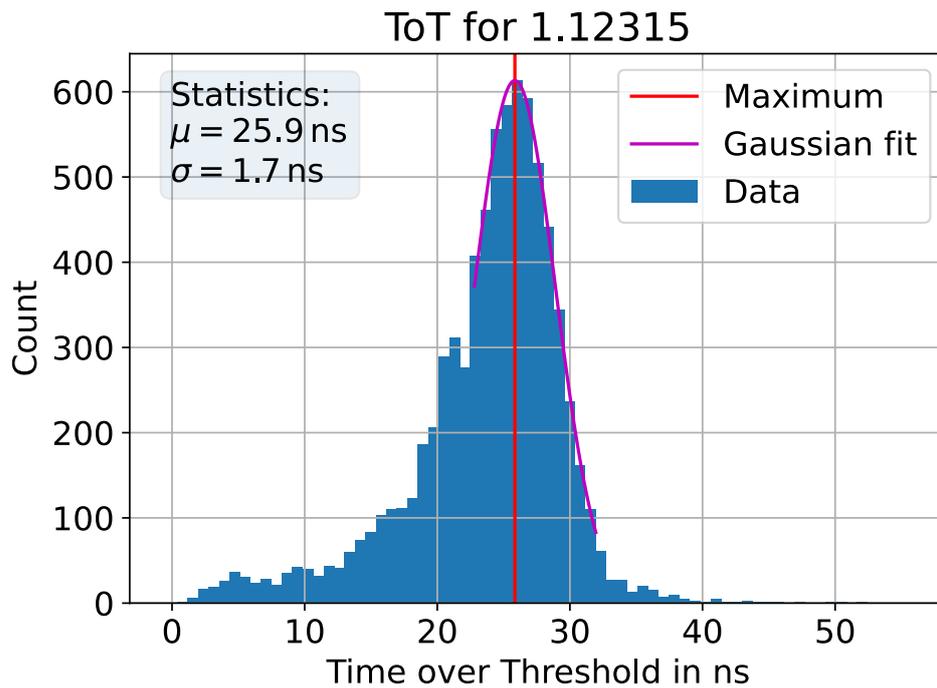


Abbildung 4.2: Beispiel für ein ToT-Histogramm mit Gaußfit des PMTs 1.12315. Aus dem Gaußfit ergibt sich eine Peak-ToT von 25.9 ns mit einer Standardabweichung von 1.7 ns.

der ToT ermittelt und anschließend ein Histogramm mit einem Gaußfit erstellt

$$\frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (4.1)$$

Der Parameter  $\mu$  beschreibt hierbei die Peak-ToT, bzw. Peak-Amplitude und  $\sigma$  die Standardabweichung. Ein Beispiel für ein Amplitudenhistogramm findet sich in [Abbildung 4.3](#). Schlussendlich wurde die Peak-ToT und die Peak-Amplitude aller PMTs ermittelt, indem wieder jeweils ein Histogramm mit anschließendem Gaußfit erstellt wurde. Um die Qualität der Messdaten beurteilen zu können, wurde überprüft, ob die ToT und die Hochspannung unabhängig voneinander sind, zu sehen in [Abbildung 4.4](#). Es ist keine Korrelation erkennbar.

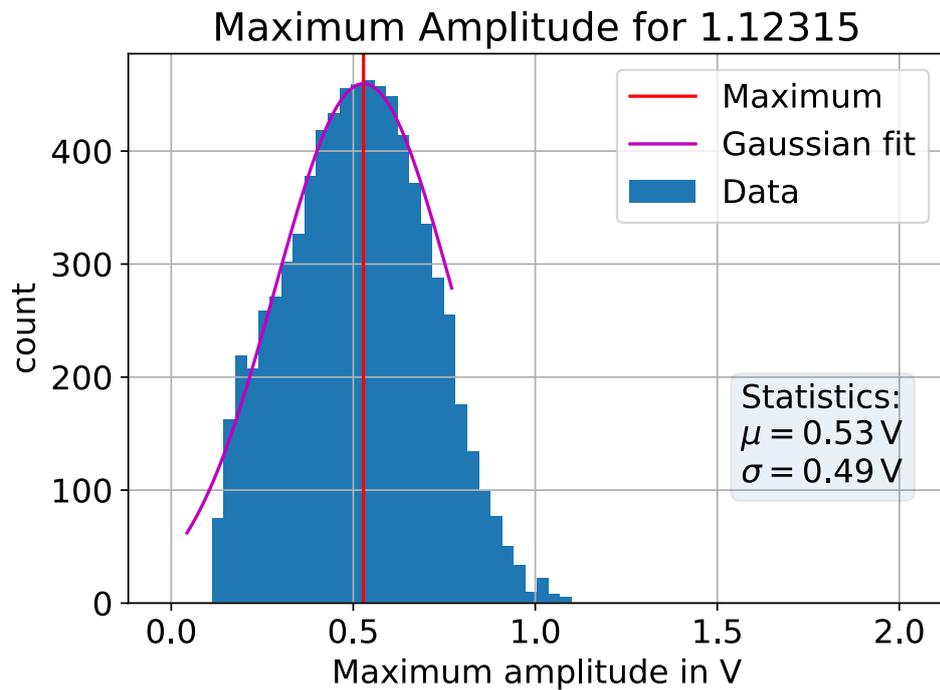


Abbildung 4.3: Beispiel für ein Amplituden-Histogramm mit Gaußfit des PMTs 1.12315. Die maximale Amplitude wurde im Bereich der ToT gesucht. Aus dem Gaußfit ergibt sich eine Peak-Amplitude von 0.52 V mit einer Standardabweichung von 0.47 V.

Anschließend wurde die Peak-ToT aller PMTs in ein Histogramm aufgetragen und eine Gaußfunktion angefitet, um die Mittlere Peak-ToT und deren Standardabweichung zu erhalten, zu sehen in [Abbildung 4.5](#). Der Mittelwert der Peak-Tot beträgt 26.8 ns, mit einer Standardabweichung von 1.2 ns, was nur einen kleinen Unterschied zur nominellen ToT des KM3NeTs von 26.4 ns darstellt [\[17\]](#). Das Histogramm über die Peak-Amplitude aller PMTs ist zu sehen in [Abbildung 4.6](#). Hier beträgt das arithmetische Mittel 0.65 V mit einer Standardabweichung von 0.12 V. Als Thresholdspannung wurde der zweite Bin des Amplitudenhistogramms identifiziert. Bei den Thresholdspannungen wurden unterschiedliche Werte festgestellt, die sich jedoch nur geringfügig voneinander unterscheiden. Dies kann auf Hintergrundrauschen des Signals, Binningeffekte des Histogramms oder auf

#### 4.2 Messungen der Time over Threshold und der Amplitude

Unterschiede in den aktiven Basen zurückzuführen sein. Die Tabelle mit den Peak-ToTs, Peak-Amplituden und minimalen Amplituden, nach Seriennummer aufgeschlüsselt, ist in [Tabelle 8.2](#) zu finden.

Das für KM3NeT verwendete nominelle Threshold liegt bei 0.3 Photoelektronen, was bedeutet, dass die Thresholdspannung dem 0.3-fachen der mittleren Peak-Amplitude entsprechen sollte [17](#). Wenn wir die erhaltenen Werte für die mittlere Peak-Amplitude von 0.654 V und 0.159 V für die Thresholdspannung einsetzen, ergibt sich ein Threshold, der dem 0.2-fachen der mittleren Peak-Amplitude entspricht.

Obwohl eine gute Übereinstimmung mit der nominellen ToT des KM3NeTs festgestellt wurde, variieren die Werte für die Peak-ToT im Bereich von 25 ns bis 29 ns. Eine der

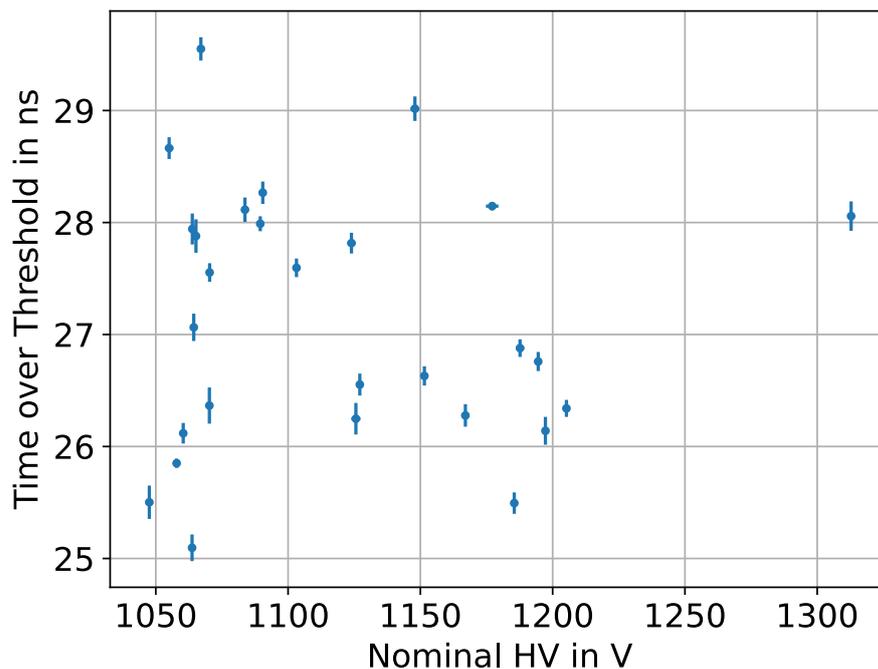


Abbildung 4.4: Vergleich der Peak-ToT und der nominellen Hochspannung. Die Fehlerbalken entlang der y-Richtung repräsentieren die Fehler der Peak-ToT, während die Fehlerbalken entlang der x-Richtung den Fehler in Bezug auf die Hochspannung anzeigen.

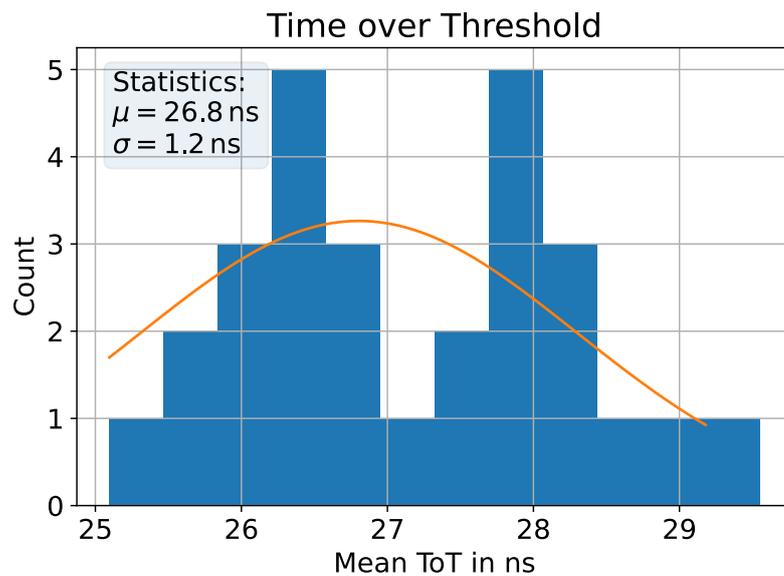


Abbildung 4.5: Peak-ToT Histogramm für alle PMTs mit Gaußfit. Insgesamt ergibt sich durch den Gaußfit eine mittlere ToT von 26.8 ns mit einer Standardabweichung von 1.2 ns.

Ursachen dafür ist die Variation in der Peak-Amplitude, die einen Bereich von 0.48 V bis 0.95 V abdeckt. Weitere Faktoren, die zu dieser Variation beitragen könnten, werden im nächsten Abschnitt untersucht.

### 4.3 Korrelation zwischen der Time over Threshold und der Amplitude

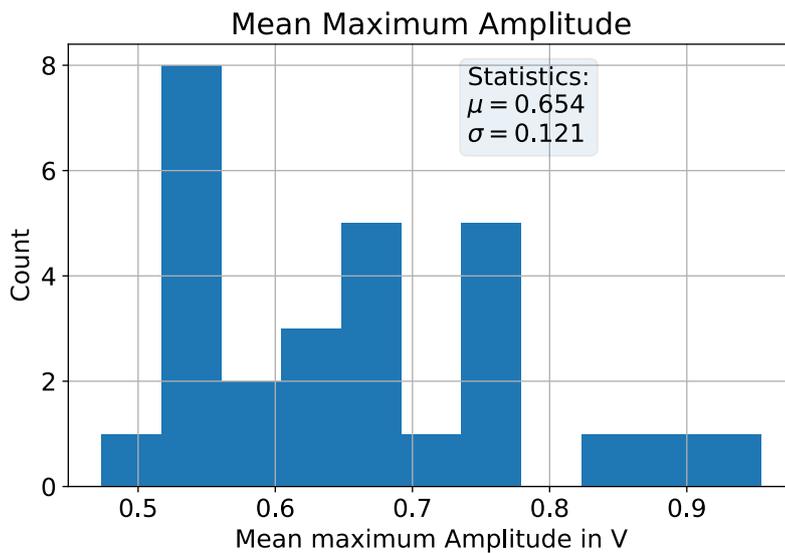


Abbildung 4.6: Histogramm über die Peak-Amplitude aller PMTs. Es ergibt sich ein arithmetischer Mittelwert von 0.65 V mit einer Standardabweichung von 0.12 V.

### 4.3 Korrelation zwischen der Time over Threshold und der Amplitude

Zur weiteren Charakterisierung der PMTs soll die Korrelation der ToT zur Amplitude werden, um die Hauptsequenz zu ermitteln. Als Hauptsequenz wird der Bereich des Graphen bezeichnet, der der Relation aus [Gleichung 2.15](#) genügt. Zuerst soll der Zusammenhang zwischen der ToT und der maximalen Amplitude im Bereich der ToT untersucht werden. Ein Beispiel ist zu sehen in [Abbildung 4.7](#). Hierfür wurde die Amplitude gegen die ToT geplottet und ein 2D Histogramm erstellt. Allerdings werden die Parameter aus [Gleichung 2.15](#) bei der Untersuchung nicht bestimmt, sondern eine Funktion der Form

$$\text{ToT} = a + b \ln(x) \quad (4.2)$$

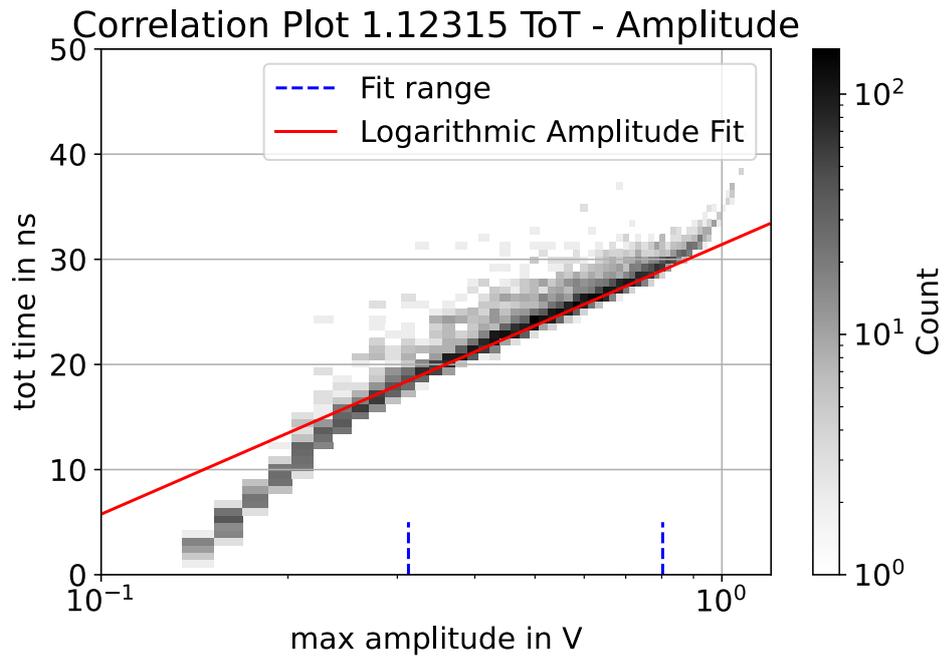


Abbildung 4.7: Ein Beispiel für ein Korrelationshistogramm mit logarithmischem Fit von der Amplitude zur ToT des PMTs 1.12315 in logarithmischer Darstellung der x-Achse.

angefittet, die jedoch die gleichen Proportionalitäten aufweist. Der Fitparameter  $b$  entspricht  $\tau$  aus [Gleichung 2.15](#) während  $a$  einer Kombination aus den anderen entspricht.

$$a = \text{Risetime} - \tau \ln(\text{Threshold}) \quad (4.3)$$

Der Parameter Threshold kann aus den Amplituden abgelesen werden, da die kleinste gemessene Amplitude der Thresholdspannung entspricht. Um [Gleichung 4.2](#) an die Messdaten anzufitten, wurden zunächst an jede Spalte des Histogramms Gaußkurven angefitet und anschließend erfolgte die Anpassung von [Gleichung 4.2](#) an die Mittelwerte der Gaußkurven aller Spalten. Die Proportionalität kann in einem mittleren Bereich nachgewiesen werden. Im Bereich hoher Amplituden wird der Sättigungsbereich der aktiven Basis erreicht, wodurch die Amplitude nicht größer werden kann. Daher ist eine

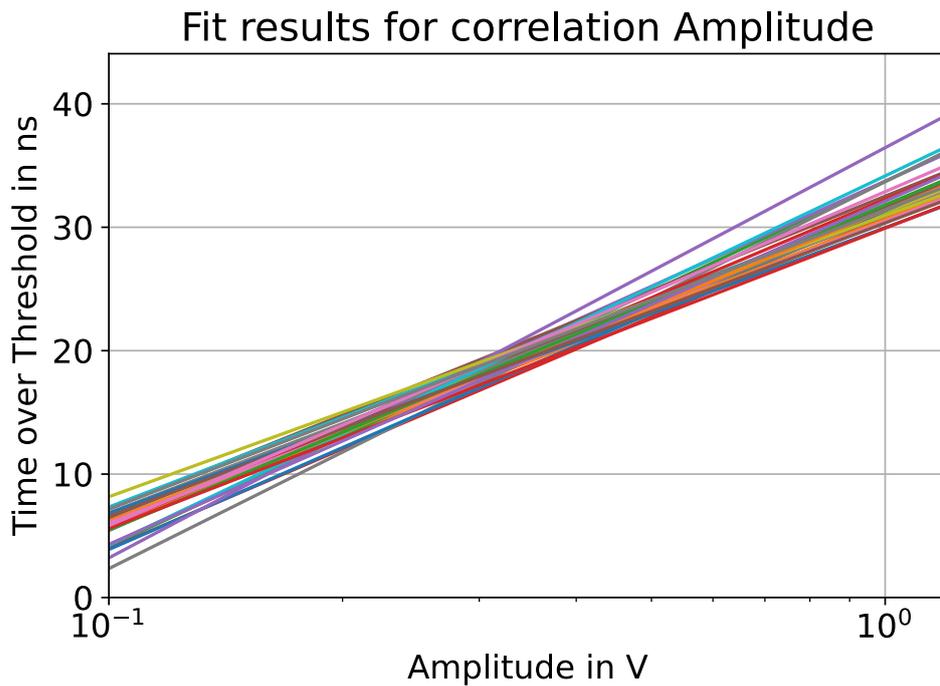


Abbildung 4.8: Vergleich der Fitergebnisse der Korrelation der ToT zur Amplitude in logarithmischer Darstellung der x-Achse. Zu sehen ist, dass die Kurven sich unterscheiden, was auf Unterschiede in den PMTs und in den aktiven Basen hindeutet.

maximale Amplitude erreicht, während die ToT noch länger werden kann. Die ToT ist dennoch proportional zur ursprünglichen Ladung. Im Bereich kleiner Amplituden kann der Maximalbereich nicht mehr vernachlässigt werden, weshalb die Approximation von [Gleichung 2.15](#) nicht mehr gültig ist. In [Tabelle 8.4](#) sind die Fitergebnisse gelistet, und ein Vergleich der Kurven zwischen allen PMTs ist in [Abbildung 4.8](#) zu finden. Die Unterschiede in den Fitparametern für  $a$  aus [Gleichung 2.15](#) deuten auf unterschiedliche Decayzeiten hin. Die Unterschiede im Parameter  $b$  ist auf Unterschiede in der Risetime und  $\tau$  zurückzuführen, sowie auf die zwei verschiedenen Thresholdspannungen. Der Zusammenhang der Parameter zu  $b$  ist in [Gleichung 4.3](#) dargestellt. Eine weitere Möglichkeit zur Untersuchung der Hauptsequenzen besteht darin, die Peak-Amplitude

und die erhaltenen Fitwerte in die Amplituden-Korrelation mit der ToT einzusetzen. Hier liegt der Mittelwert geringfügig höher als bei der gemessenen ToT, bei 26.8 ns. Zusätzlich streuen die Werte auch stärker, der minimale Wert liegt bei 23.5 ns und der maximale bei 32.7 ns. Die Streuung hier ist auf unterschiedliche Fitparameter und die Streuung der Peak-Amplituden zurückzuführen. Wird die mittlere Peak-Amplitude von 0.654 V eingesetzt so reichen die Werte von 25.4 ns bis 30.3 ns. Die Streuungen hier deuten auch wieder auf Unterschiede in den PMTs und in den aktiven Basen hin. Die Werte finden sich in [Tabelle 8.7](#).

#### 4.4 Partly Delayed Pulses

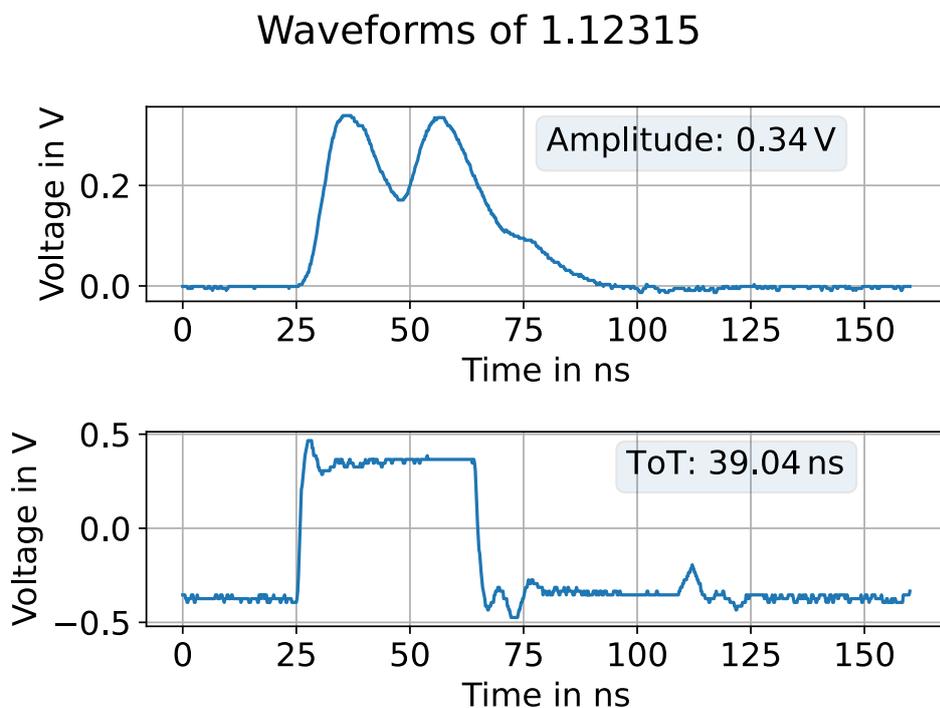


Abbildung 4.9: Oben: Ein Beispiel für das Analogsignal eines PDPs. Das Signal ist aufgespalten in zwei überlagerte Pulse. Unten: Ein Beispiel für das ToT Signal eines PDPs. Das Signal hat eine große ToT für eine relativ kleine Amplitude.

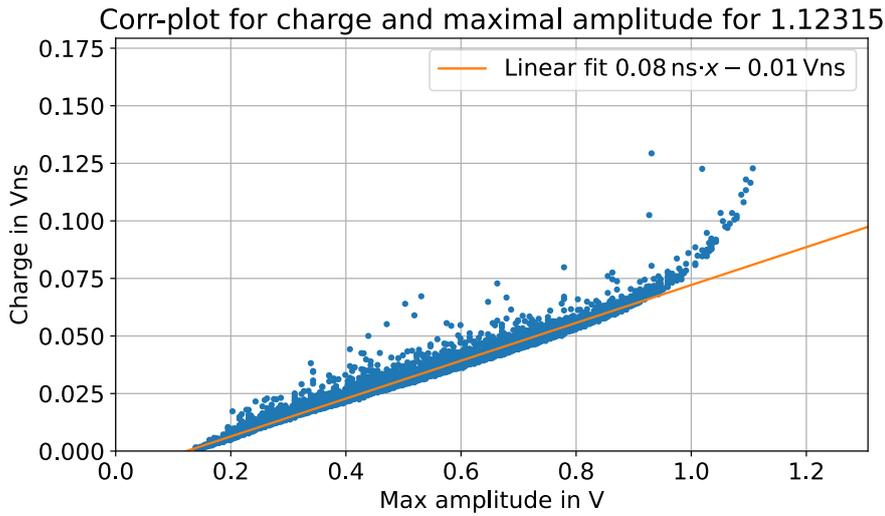


Abbildung 4.10: Korrelationsplot von Charge zur maximalen Amplitude mit linearen Fit des PMTs 1.12315

In [Abbildung 4.7](#) ist eine Streuung um die Hauptsequenz vor allem bei mittleren Amplituden zu sehen. Diese können durch Partly delayed Pulses (PDPs) erklärt werden. PDPs beziehen sich auf das Auftreten von mehreren überlagerten Pulsen nach einem einzigen Photoelektron. Diese zeigen sich durch eine geringe Amplitude bei großer ToT, da das Signal über einen längeren Zeitraum ankommt [\[9\]](#) [\[18\]](#) [\[19\]](#). In [Abbildung 4.9](#) ist ein Beispiel eines Signales eines PDPs zu sehen. Zur Charakterisierung der PDPs wurde erst das Integral der Spannung über die Zeit, im weiteren als „Charge“ bezeichnet, gebildet und dessen Korrelation zur ToT bestimmt. Das Integral der Spannung über die Zeit ist proportional zu der Amplitude, die das Signal eigentlich haben sollte. Das Integral wurde numerisch ermittelt über

$$Ch = \int_{t_0}^{t_1} U(t) dt = \sum_k \Delta t_{k,k+1} U_k \quad (4.4)$$

Die Parameter  $t_0$ ,  $t_1$  beschreiben die Zeitpunkte ab dem, bzw. bis wann die ToT gemessen wurde,  $\Delta t_{k,k+1}$  beschreibt den zeitlichen Abstand zwischen zwei Messpunkten  $t_k$  und  $t_{k+1}$

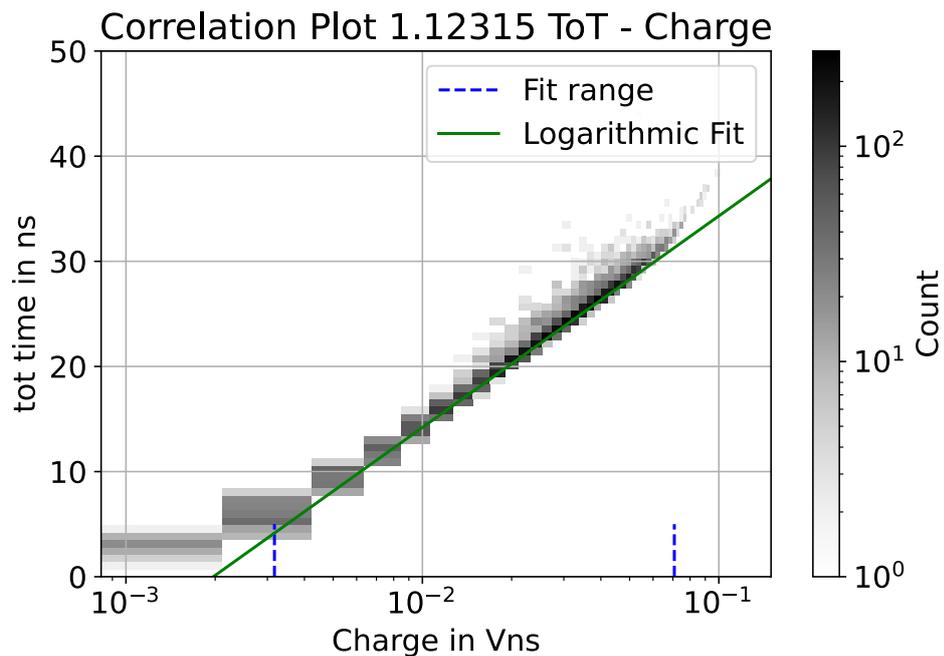


Abbildung 4.11: Ein Beispiel für ein Korrelationshistogramm mit logarithmischen Fit von Charge zur ToT des PMTs 1.12315 in logarithmischer Darstellung der x-Achse.

und  $U_k$  die gemessene Spannung zum Zeitpunkt  $t_k$ . Die Beziehung zwischen der maximalen Amplitude und dem Charge verhält sich linear [7], ein Beispiel ist in [Abbildung 4.10](#) aufgetragen. In [Tabelle 8.3](#) sind die Fitparameter des linearen Fits aufgeführt. Bei allen PMTs ist zu erkennen, dass die Werte weniger um die Hauptsequenz streuen, als bei der Amplitudenkorrelation. Durch die lineare Abhängigkeit des Charge und der maximalen Amplitude kann aus den Werten für Charge mithilfe des linearen Fits die effektive Amplitude berechnet werden.

Um die Abhängigkeit des Charge zur ToT zu bestimmen, wurde auch ein 2D-Histogramm gebildet und ebenfalls eine Funktion der Form von [Gleichung 4.2](#) angefitet. Ein Beispiel hierfür ist zu sehen in [Abbildung 4.11](#). Die Charge beschreibt das Verhalten der ToT genauer als die Amplitude, da das Integral über die Zeit bei aufgespaltenen Pulsen einen Wert ergibt, der näher an der Hauptsequenz liegt.

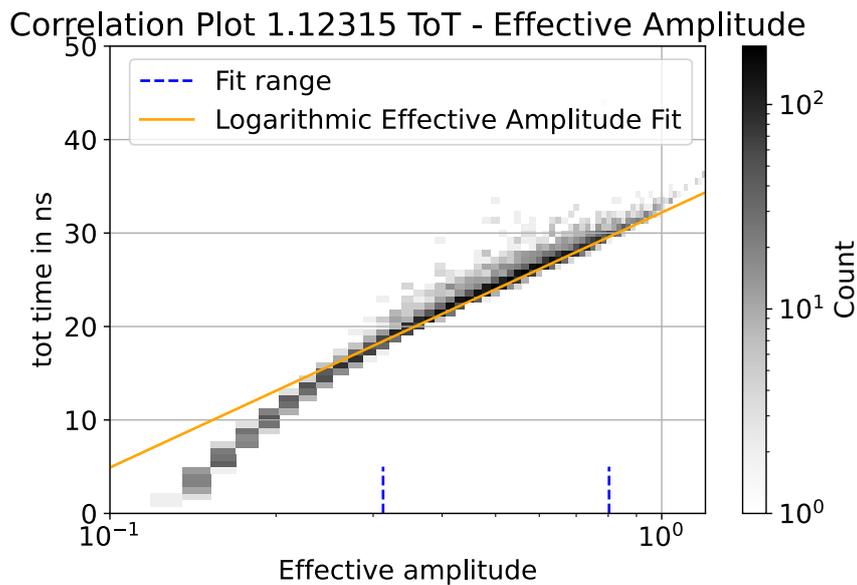


Abbildung 4.12: Ein Beispiel für ein Korrelationshistogramm mit logarithmischem Fit von der effektiven Amplitude zur ToT des PMTs 1.12315 in logarithmischer Darstellung der x-Achse.

Die effektive Amplitude beschreibt die Amplitude, die ein Signal bei einer Charge haben sollte. Um die effektive Amplitude zu bestimmen, wurde Charge über den linearen Zusammenhang umgerechnet. Hier wurde auch wieder ein 2D Histogramm erstellt und eine Funktion der Form von [Gleichung 4.2](#) angefitet. Ein Beispiel findet sich in [Abbildung 4.12](#). Die Fitparameter für die Korrelation der ToT zur effektiven Amplitude sind in [Tabelle 8.6](#) aufgelistet. Insgesamt ist zu erkennen, dass die ToT-Werte für mittlere Amplituden bei Verwendung der effektiven Amplitude weniger streuen als bei Verwendung der ursprünglichen Amplitude. Dies liegt daran, dass nun den PDPs die Amplitude zugeordnet wird, die das Signal eigentlich haben sollte. Dennoch liegen die ToT-Werte immer noch nicht genau auf der Hauptsequenz, da sie immer noch größer sind als bei nicht-PDPs.

Ein Vergleich der Fitkurven für den PMT 1.12315 ist in [Abbildung 4.13](#) zu sehen. Bei allen untersuchten PMTs ist zu erkennen, dass die Charge-Kurve die Hauptsequenz am besten charakterisiert. Die Kurve für Charge erscheint in logarithmischer Darstellung

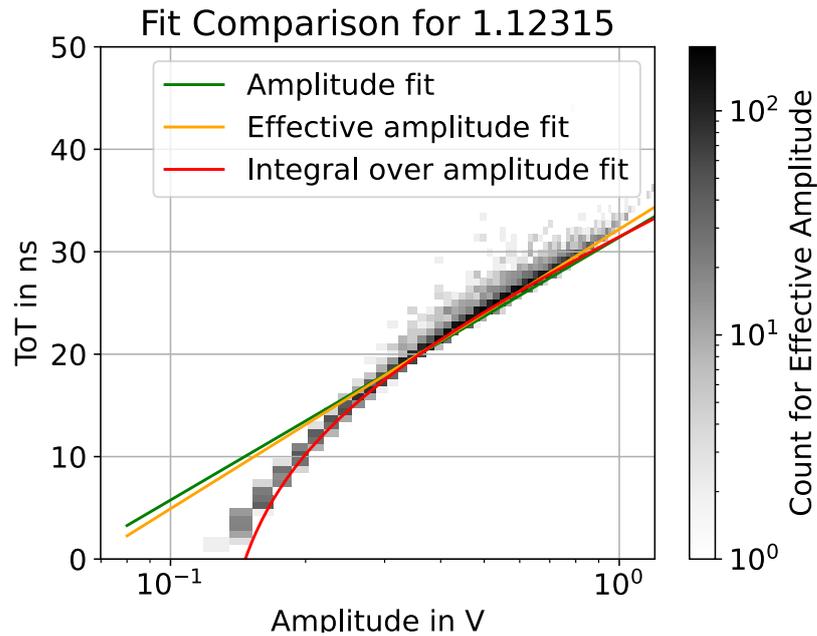


Abbildung 4.13: Ein Beispiel für den Vergleich der Amplituden-, Charge- und effektiven Amplitudenkurve des PMTs 1.12315 über dem 2D Histogramm der effektiven Amplitude in logarithmischer Darstellung der x-Achse.

nicht linear, da die x-Werte erst umgerechnet werden müssen und daher die geplottete Funktion die Form

$$\text{ToT} = a + b \cdot \ln(m \cdot x + t) \quad (4.5)$$

annimmt. Die Parameter  $m$  und  $t$  stammen aus der Umrechnung der Spannung in Charge, während  $a$  und  $b$  aus dem Korrelation-Fit zur ToT stammen. Bei allen PMTs finden sich im Fall kleiner Amplituden und kleiner effektiver Amplituden Abweichungen von der Hauptsequenz, da die Fitergebnisse nah bei einander liegen.

Um den Anteil an PDP zu ermitteln, wurde die über den logarithmischen Fit ermittelte Hauptsequenz abgezogen, sodass sich mit Gleichung 4.2

$$\Delta t = \text{ToT} - (a + b \cdot \ln(x)) \quad (4.6)$$

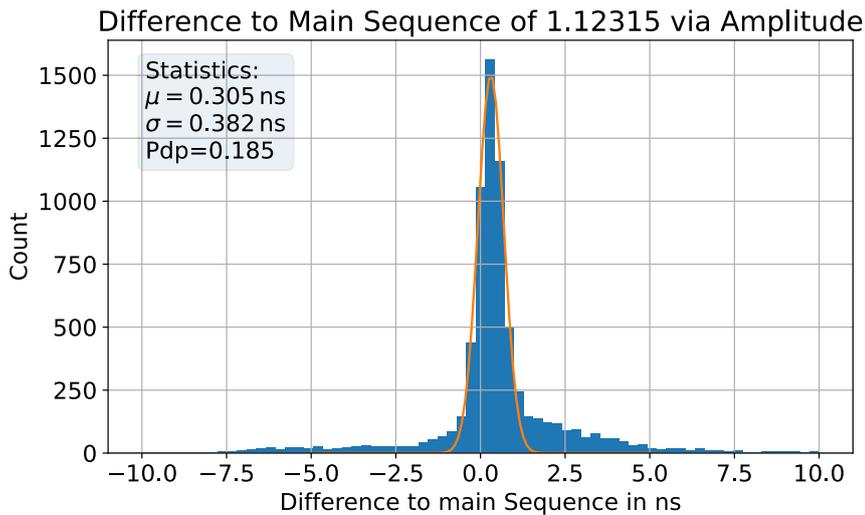


Abbildung 4.14: Ein Beispiel für ein zentriertes Histogramm des PMTs 1.12315.

ergibt mit,  $x$  als der gemessenen Amplitude. Anschließend wurde erneut ein Histogramm gebildet und eine Gaußkurve angefitet. Der Anteil der Pulse, der weiter als  $2\sigma$  von der Hauptsequenz entfernt liegt, wird als PDP identifiziert. Hier wurde die natürliche Streuung berücksichtigt, indem der Wert des Integrals für  $2\sigma < x$  der angefiteten Gaußfunktion abgezogen wurde.

In [Abbildung 4.15](#) ist der Peak Abstand der ToT zur Hauptsequenz zu sehen, der bei allen PMTs zwischen 0.25 ns und 0.5 ns liegt. Die Fitparameter und der Anteil an PDPs nach Seriennummer für die Korrelation der ToT zur Amplitude sind in [Tabelle 8.4](#) zu finden.

In [Abbildung 4.16](#) ist ein Histogramm über den Anteil der PDPs zu sehen. Alle PMTs haben einen Anteil an PDPs zwischen 11 % und 21 %, mit einem Mittelwert von 18 %. Dieser Wert liegt höher als der Anteil an Afterpulses von 7 % [\[5\]](#).

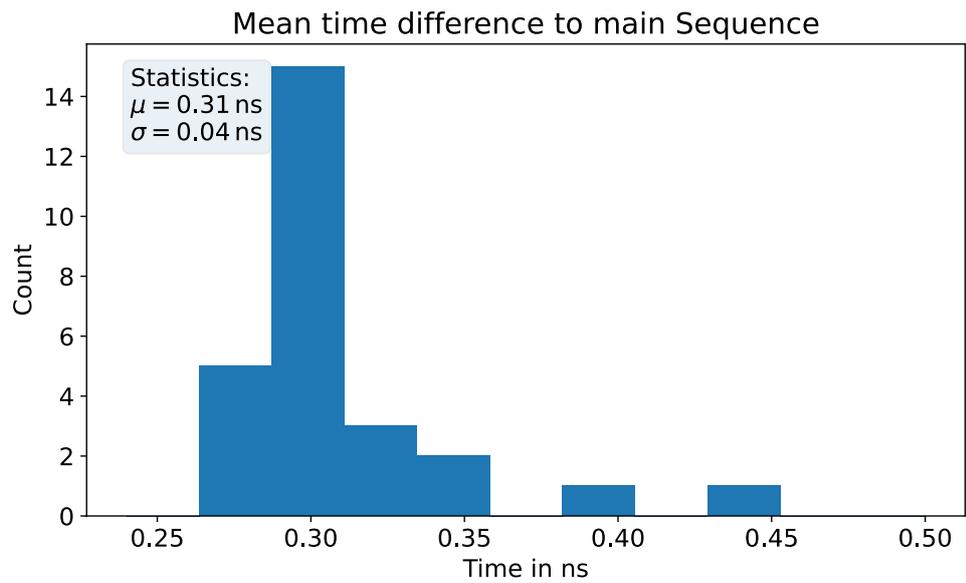


Abbildung 4.15: Histogramm über den mittleren Abstand der ToT zur Hauptsequenz.

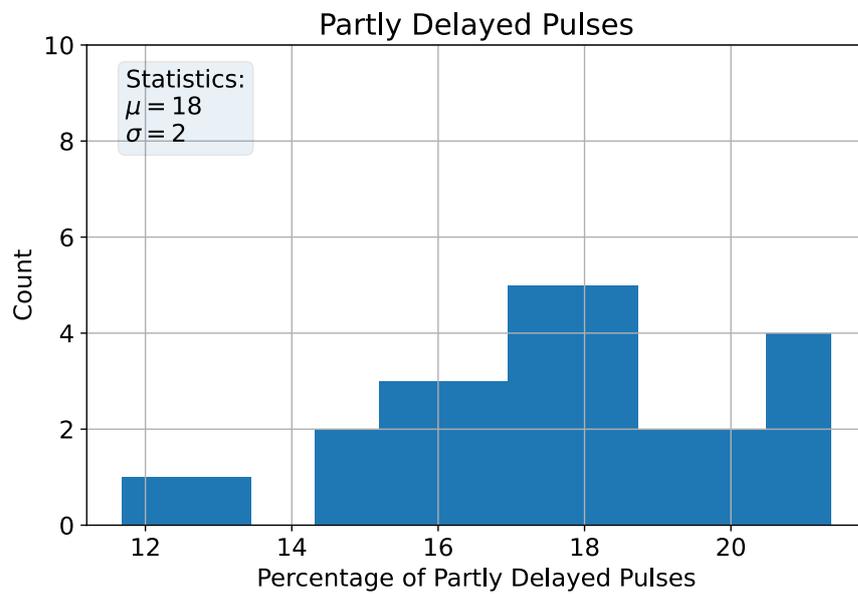


Abbildung 4.16: Histogramm Anteil der PDPs. Der mittlere Anteil an PDPs beträgt 18% bei einer Standardabweichung von 2%

## 5 Zusammenfassung

Zu Beginn wurde die nominelle Spannung für jede Photomultiplier Tube (PMT) bestimmt. Anschließend wurden die aktiven Basen angelötet, die Peak-Time over Threshold (ToT), Peak-maximale Amplitude, sowie die minimal auftretende Amplitude mit ToT bestimmt. Desweiteren wurden Korrelationen der ToT zur Amplitude untersucht und anschließend die Korrelation der ToT zum Integral der Spannung über die Zeit und zur effektiven Amplitude. Schlussendlich wurde noch der Anteil der Partly delayed Pulses (PdPs) bestimmt.

Insgesamt war die Kalibrierung der PMTs erfolgreich. Die nominelle Hochspannung für einen Gain von  $3 \cdot 10^6$  konnte mit einem Fehler von weniger als 2 V bestimmt werden und auch alle Parameter liegen im erwarteten Bereich. Auch die mittlere Peak-ToT von 26.8 ns und mittlere Peak-Amplitude von 0.654 V konnte ermittelt werden. Die mittlere Peak-ToT fällt um 0.4 ns länger aus als die nominelle ToT des KM3NeTs von 26.4 ns. Auch das tatsächliche Threshold von 0.2 Photoelektronen ist geringer als das vom KM3NeT genutzte nominelle Threshold von 0.3 Photoelektronen. Aus den Korrelationsuntersuchen wurde ersichtlich, dass die Korrelation der ToT zu Charge durch eine logarithmische Kurve in einem größeren Bereich beschrieben werden kann als die Korrelation zur Amplitude oder zur effektiven Amplitude. Die effektive Amplitude eignet sich gut um die Streuung um die Hauptsequenz zu reduzieren. Auch ist es gelungen den Anteil der PDPs zu bestimmen, der höher ausfällt als der Anteil an Afterpulses. Um die Auswirkungen der PDPs auf die ToT besser zu verstehen, bedarf es weiterer Forschung.

Die Streuung der ToT-Werte kann insgesamt durch eine Kombination verschiedener Parameter erklärt werden. Es wurde festgestellt, dass es eine unterschiedliche Amplituden-

## *5 Zusammenfassung*

verteilung gibt und auch der Anteil an PDPs variiert. Weitere mögliche Faktoren könnten Unterschiede in den aktiven Basen sein, wodurch die PMTs nicht mit der gewünschten nominellen Hochspannung betrieben werden und somit nicht den nominellen Gain erreichen. Unterschiede in den Vorverstärkern können ebenfalls eine Rolle spielen. Um diese Zusammenhänge genauer zu verstehen, sind weitere Untersuchungen erforderlich.

## 6 Quellenverzeichnis

- [1] C. L. Cowan u. a. „Detection of the Free Neutrino: a Confirmation“. In: *Science* 124.3212 (1956), S. 103–104. DOI: [10.1126/science.124.3212.103](https://doi.org/10.1126/science.124.3212.103).
- [2] S Adrián-Martínez u. a. „Letter of intent for KM3NeT 2.0“. In: *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* 43.8 (Juni 2016), S. 084001. DOI: [10.1088/0954-3899/43/8/084001](https://doi.org/10.1088/0954-3899/43/8/084001).
- [3] Hamamatsu Photonics K. K. *Photomultiplier Tubes - Basics and Applications*. Bd. Edition 4. Online. stand 15.06.2023. 2007. URL: [https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99\\_SALES\\_LIBRARY/etd/PMT\\_handbook\\_v4E.pdf](https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/PMT_handbook_v4E.pdf).
- [4] Hamamatsu Photonics K. K. *R12199 Datenblatt*. Online. stand 15.06.2023. 2015. URL: <https://www.semiee.com/file/backup2/HAMAMATSU-R12199.pdf>.
- [5] S. Aiello u. a. „Characterisation of the Hamamatsu photomultipliers for the KM3NeT Neutrino Telescope“. In: *Journal of Instrumentation* 13.05 (Mai 2018), P05035. DOI: [10.1088/1748-0221/13/05/P05035](https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/05/P05035).
- [6] E.H. Bellamy u. a. „Absolute calibration and monitoring of a spectrometric channel using a photomultiplier“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 339.3 (1994), S. 468–476. ISSN: 0168-9002. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(94\)90183-X](https://doi.org/10.1016/0168-9002(94)90183-X).
- [7] Wu Jin-Jie u. a. „A study of time over threshold (TOT) technique for plastic scintillator counter\*“. In: *Chinese Physics C* 32.3 (März 2008), S. 186. DOI: [10](https://doi.org/10.1088/1674-1137/32/3/018).

- [1088/1674-1137/32/3/005](https://dx.doi.org/10.1088/1674-1137/32/3/005). URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1674-1137/32/3/005>.
- [8] D. Gajanana et. al. „KM3NeT Meeting“. In: (). Private Communication.
- [9] G. Bourlis, A.G. Tsirigotis und S.E. Tzamarias. „Time over threshold electronics for an underwater neutrino telescope“. In: (2009). DOI: [10.1109/IWASI.2009.5184796](https://doi.org/10.1109/IWASI.2009.5184796).
- [10] D Gajanana, V Gromov und P Timmer. „ASIC design in the KM3NeT detector“. In: *Journal of Instrumentation* 8.02 (Feb. 2013), S. C02030. DOI: [10.1088/1748-0221/8/02/C02030](https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/02/C02030).
- [11] PicoQuant. *PDL 800-D Datenblatt*. Online Stand 15.06.2023. URL: <https://www.picoquant.com/images/uploads/downloads/pdl800-d.pdf>.
- [12] iseg. *Technical documentation*. Online Stand 15.06.2023. URL: [https://iseg-hv.com/files/media/docitems\\_file\\_20220930091737.pdf](https://iseg-hv.com/files/media/docitems_file_20220930091737.pdf).
- [13] RIGOL. *Data Sheet*. Online Stand 15.06.2023. URL: [https://rigol.eu/Public/Uploads/uploadfile/files/20201109/20201109215420\\_5fa94a0cb2392.pdf](https://rigol.eu/Public/Uploads/uploadfile/files/20201109/20201109215420_5fa94a0cb2392.pdf).
- [14] Tektronix. *Data Sheet*. Online Stand 15.06.2023. URL: <https://download.tek.com/datasheet/MS06B-Datasheet-EN-US-48W-61716-09.pdf>.
- [15] Frederik Andersen. Online: Stand 15.06.2023. URL: <https://git.ecap.work/AndersenFred/pmt>.
- [16] Jonas Reubelt u. a. Online. stand 15.06.2023. URL: <https://github.com/JonasReubelt/PeeEmTee>.
- [17] Oleg Kalekin. *ToT calibration*. Private Communication.
- [18] G. A. Morton, H. M. Smith und R. Wasserman. „Afterpulses in Photomultipliers“. In: *IEEE Transactions on Nuclear Science* 14.1 (1967), S. 443–448. DOI: [10.1109/TNS.1967.4324452](https://doi.org/10.1109/TNS.1967.4324452).

- [19] K. Lung u. a. „Characterization of the Hamamatsu R11410-10 3-in. photomultiplier tube for liquid xenon dark matter direct detection experiments“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 696 (2012), S. 32–39. ISSN: 0168-9002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.08.052>.



# 7 Abbildungsverzeichnis

2.1 Aufbau eines PMTs	5
2.2 Beispiel für PMTs	6
2.3 Beispiel für Analog und ToT Signal	10
3.1 Schematischer Aufbau der Gain-Messungen	13
3.2 Bild des Teststandes für die Gain-Messungen	14
3.3 Mittelwertplot der aufgenommenen Messwerte	15
3.4 Histogramm zur Gain-Berechnung mit Fit	16
3.5 Variation der Integrationsgrenzen	18
3.6 Variation der rechten Integrationsgreze	19
3.7 Spannung gegen Gain in doppellogarithmischer Darstellung mit linearem Fit	20
3.8 Histogramm über die Ergebnisse der Gain-Kalibrierungen	20
3.9 Fitergebnisse aus Gain-Fit für $kn$	21
3.10 Fitergebnisse aus Gain-Fit für $\log_{10}(A)$	21
4.1 Foto des Teststandes für die ToT-Messungen	23
4.2 ToT-Histogramm mit Gaußfit des PMTs 1.12315	25
4.3 Amplituden-Histogramm mit Gaußfit des PMTs 1.12315.	26
4.4 Vergleich der Peak-ToT und der nominellen Hochspannung	27
4.5 Histogramm über die Peak-ToT für alle PMTs mit Gaußfit	28
4.6 Histogramm über die Peak-Amplitude aller PMTs	29
4.7 Ein Beispiel für ein Korrelationshistogramm mit logarithmischen Fit von der Amplitude zur ToT	30
4.8 Vergleich der Fitergebnisse der Korrelation der ToT zur Amplitude	31

4.9 Beispiel für ein Signal mit PDP	32
4.10 Korrelationsplot von Charge zur maximalen Amplitude mit linearen Fit des PMTs 1.1231	33
4.11 Beispiel für ein Korrelationshistogramm mit logarithmischen Fit von Charge zur ToT	34
4.12 Beispiel für ein Korrelationshistogramm mit logarithmischen Fit von der effektiven Amplitude zur ToT	35
4.13 Ein Beispiel für den Vergleich der Amplituden-, Charge- und effektiven Amplitudenkurve	36
4.14 Ein Beispiel für ein zentriertes Histogramm des PMTs 1.12315	37
4.15 Histogramm über den mittleren Abstand der ToT zur Hauptsequenz	38
4.16 Histogramm Anteil der PDPs	38

=

## 8 Appendix

Seriennummer (SN)	Hochspannung in V	$kn$	$\log_{10}(A)$
1.12315	1057.88 ± 1.06	7.3698 ± 0.1240	3.0244 ± 0.0004
2.10149	1312.82 ± 1.08	6.9801 ± 0.0428	3.1182 ± 0.0004
2.10170	1065.20 ± 1.17	6.9976 ± 0.2298	3.0274 ± 0.0005
2.10182	1055.05 ± 1.62	7.1378 ± 0.3849	3.0233 ± 0.0007
2.10198	1090.43 ± 1.40	7.2757 ± 0.3085	3.0376 ± 0.0006
2.10200	1147.95 ± 1.68	7.0772 ± 0.2995	3.0599 ± 0.0006
2.10221	1167.02 ± 1.51	6.9792 ± 0.3137	3.0671 ± 0.0006
2.10228	1127.12 ± 0.48	7.3486 ± 0.0840	3.0520 ± 0.0002
2.13513	1197.27 ± 0.85	7.1851 ± 0.1143	3.0782 ± 0.0003
2.13830	1123.96 ± 1.54	7.6752 ± 0.3439	3.0507 ± 0.0006
2.13950	1187.67 ± 1.56	7.2324 ± 0.2501	3.0747 ± 0.0006
2.14100	1047.55 ± 1.42	7.0355 ± 0.3424	3.0202 ± 0.0006
2.15913	1151.52 ± 1.41	7.0472 ± 0.3365	3.0613 ± 0.0005
2.15914	1089.49 ± 1.09	7.1276 ± 0.1698	3.0372 ± 0.0004
2.15915	1067.05 ± 0.45	7.2908 ± 0.0974	3.0282 ± 0.0002
2.15916	1070.35 ± 1.35	7.2373 ± 0.2750	3.0295 ± 0.0005
2.15917	1125.63 ± 1.70	7.1388 ± 0.2872	3.0514 ± 0.0007
2.15918	1177.14 ± 2.37	7.3452 ± 0.4137	3.0708 ± 0.0009
2.15919	1070.26 ± 1.08	7.2774 ± 0.2083	3.0295 ± 0.0004
2.15920	1063.81 ± 0.58	7.5099 ± 0.1336	3.0269 ± 0.0002
2.15921	1063.71 ± 0.94	7.2265 ± 0.1922	3.0268 ± 0.0004
2.15922	1083.71 ± 0.75	7.3293 ± 0.1640	3.0349 ± 0.0003
2.15923	1103.18 ± 1.20	7.0354 ± 0.2133	3.0426 ± 0.0005
2.15924	1205.21 ± 1.37	7.4764 ± 0.1636	3.0811 ± 0.0005
2.15928	1194.54 ± 0.66	7.5519 ± 0.1000	3.0772 ± 0.0002
2.15933	1185.50 ± 0.71	7.0416 ± 0.1144	3.0739 ± 0.0003
2.15938	1060.38 ± 0.76	7.4765 ± 0.1474	3.0255 ± 0.0003
2.9060	1064.36 ± 1.26	6.9142 ± 0.2227	3.0271 ± 0.0005

Tabelle 8.1: Tabelle der Ergebnisse der Gain-Kalibrierungen mit resultierender Hochspannung für einen Gain von  $3 \cdot 10^6$  und Fitergebnissen nach Gleichung 3.2.

SN	Peak-ToT in ns	Peak-Amplitude in V	Thresholdspannung
1.12315	$25.85 \pm 0.04$	$0.528 \pm 0.009$	0.159
2.10149	$28.06 \pm 0.13$	$0.892 \pm 0.010$	0.128
2.10170	$27.88 \pm 0.15$	$0.668 \pm 0.028$	0.159
2.10182	$28.66 \pm 0.10$	$0.954 \pm 0.048$	0.159
2.10198	$28.27 \pm 0.10$	$0.709 \pm 0.038$	0.128
2.10200	$29.02 \pm 0.11$	$0.863 \pm 0.097$	0.159
2.10221	$26.28 \pm 0.10$	$0.540 \pm 0.023$	0.159
2.10228	$26.55 \pm 0.10$	$0.628 \pm 0.035$	0.159
2.13513	$26.14 \pm 0.12$	$0.522 \pm 0.018$	0.128
2.13830	$27.82 \pm 0.09$	$0.625 \pm 0.028$	0.159
2.13950	$26.88 \pm 0.08$	$0.659 \pm 0.027$	0.159
2.14100	$25.50 \pm 0.15$	$0.521 \pm 0.016$	0.159
2.15913	$26.63 \pm 0.09$	$0.662 \pm 0.071$	0.159
2.15914	$27.99 \pm 0.07$	$0.675 \pm 0.021$	0.159
2.15915	$29.55 \pm 0.10$	$0.770 \pm 0.037$	0.128
2.15916	$27.55 \pm 0.08$	$0.656 \pm 0.020$	0.159
2.15917	$26.25 \pm 0.14$	$0.736 \pm 0.013$	0.159
2.15918	$28.15 \pm 0.04$	$0.769 \pm 0.029$	0.159
2.15919	$26.37 \pm 0.16$	$0.473 \pm 0.013$	0.128
2.15920	$27.94 \pm 0.14$	$0.570 \pm 0.025$	0.159
2.15921	$25.10 \pm 0.12$	$0.526 \pm 0.020$	0.159
2.15922	$28.11 \pm 0.11$	$0.748 \pm 0.022$	0.159
2.15923	$27.60 \pm 0.08$	$0.769 \pm 0.064$	0.159
2.15924	$26.34 \pm 0.08$	$0.595 \pm 0.023$	0.159
2.15928	$26.76 \pm 0.09$	$0.624 \pm 0.034$	0.159
2.15933	$25.49 \pm 0.10$	$0.550 \pm 0.019$	0.159
2.15938	$26.12 \pm 0.09$	$0.530 \pm 0.026$	0.159
2.9060	$27.06 \pm 0.12$	$0.552 \pm 0.016$	0.159

Tabelle 8.2: Tabelle mit den Peak-ToTs in Nanosekunden, den Peak-Amplituden in Volt, deren Fehlern und den minimalen Amplituden in Volt, aufgeschlüsselt nach Seriennummer des PMTs. Die Minimale Amplitude entspricht der Thresholdspannung.

SN	Fitparameter $a$ in ns	Fitparameter $b$ in Vns
1.12315	$0.08225 \pm 0.00018$	$-0.01010 \pm 0.00010$
2.10149	$0.10025 \pm 0.00032$	$-0.01977 \pm 0.00023$
2.10170	$0.09943 \pm 0.00040$	$-0.01604 \pm 0.00025$
2.10182	$0.09956 \pm 0.00036$	$-0.01913 \pm 0.00026$
2.10198	$0.09517 \pm 0.00026$	$-0.01446 \pm 0.00016$
2.10200	$0.09022 \pm 0.00035$	$-0.01235 \pm 0.00023$
2.10221	$0.09054 \pm 0.00077$	$-0.01449 \pm 0.00046$
2.10228	$0.09498 \pm 0.00031$	$-0.01477 \pm 0.00017$
2.13513	$0.08397 \pm 0.00027$	$-0.01112 \pm 0.00016$
2.13830	$0.08492 \pm 0.00024$	$-0.01085 \pm 0.00016$
2.13950	$0.09137 \pm 0.00036$	$-0.01480 \pm 0.00023$
2.14100	$0.07979 \pm 0.00017$	$-0.00942 \pm 0.00010$
2.15913	$0.08617 \pm 0.00032$	$-0.01165 \pm 0.00018$
2.15914	$0.09134 \pm 0.00019$	$-0.01352 \pm 0.00012$
2.15915	$0.10522 \pm 0.00037$	$-0.01683 \pm 0.00022$
2.15916	$0.09303 \pm 0.00070$	$-0.01522 \pm 0.00045$
2.15917	$0.08103 \pm 0.00026$	$-0.01030 \pm 0.00016$
2.15918	$0.08606 \pm 0.00020$	$-0.01239 \pm 0.00014$
2.15919	$0.09001 \pm 0.00081$	$-0.01324 \pm 0.00047$
2.15920	$0.09585 \pm 0.00048$	$-0.01439 \pm 0.00028$
2.15921	$0.07795 \pm 0.00015$	$-0.00865 \pm 0.00009$
2.15922	$0.08936 \pm 0.00027$	$-0.01349 \pm 0.00018$
2.15923	$0.09285 \pm 0.00033$	$-0.01471 \pm 0.00021$
2.15924	$0.08376 \pm 0.00034$	$-0.01197 \pm 0.00022$
2.15928	$0.09075 \pm 0.00029$	$-0.01376 \pm 0.00018$
2.15933	$0.08118 \pm 0.00034$	$-0.01043 \pm 0.00019$
2.15938	$0.08814 \pm 0.00029$	$-0.01121 \pm 0.00015$
2.9060	$0.08344 \pm 0.00026$	$-0.01051 \pm 0.00017$

Tabelle 8.3: Fitparameter aus dem linearen Fit zum Zusammenhang zwischen der Amplitude und Charge, aufgeschlüsselt nach Seriennummer des PMTs. Der Parameter  $a$  ist in Nanosekunden und  $b$  in Volt-Nanosekunden angegeben.

SN	Fitparameter $a$ in ns $\ln(V)^{-1}$	Fitparameter $b$ in ns	PdPs
1.12315	$11.14 \pm 0.06$	$31.41 \pm 0.04$	0.185
2.10149	$10.75 \pm 0.08$	$30.46 \pm 0.04$	0.161
2.10170	$12.85 \pm 0.21$	$33.71 \pm 0.12$	0.165
2.10182	$11.67 \pm 0.07$	$30.83 \pm 0.03$	0.203
2.10198	$12.30 \pm 0.16$	$33.74 \pm 0.10$	0.152
2.10200	$11.02 \pm 0.07$	$32.52 \pm 0.04$	0.206
2.10221	$10.90 \pm 0.08$	$31.06 \pm 0.05$	0.159
2.10228	$13.62 \pm 0.26$	$33.69 \pm 0.17$	0.171
2.13513	$10.88 \pm 0.06$	$31.21 \pm 0.04$	0.160
2.13830	$10.49 \pm 0.07$	$31.49 \pm 0.04$	0.183
2.13950	$11.92 \pm 0.10$	$31.33 \pm 0.07$	0.144
2.14100	$10.62 \pm 0.07$	$30.65 \pm 0.05$	0.177
2.15913	$11.37 \pm 0.15$	$31.72 \pm 0.08$	0.152
2.15914	$11.51 \pm 0.07$	$32.27 \pm 0.04$	0.177
2.15915	$14.43 \pm 0.36$	$36.45 \pm 0.24$	0.117
2.15916	$10.92 \pm 0.08$	$31.62 \pm 0.04$	0.205
2.15917	$10.62 \pm 0.09$	$30.49 \pm 0.06$	0.183
2.15918	$10.46 \pm 0.05$	$30.94 \pm 0.03$	0.214
2.15919	$9.90 \pm 0.11$	$30.95 \pm 0.07$	0.132
2.15920	$13.00 \pm 0.13$	$34.16 \pm 0.08$	0.201
2.15921	$10.05 \pm 0.09$	$29.97 \pm 0.06$	0.184
2.15922	$11.21 \pm 0.07$	$31.39 \pm 0.04$	0.193
2.15923	$11.45 \pm 0.10$	$31.81 \pm 0.06$	0.186
2.15924	$10.56 \pm 0.10$	$29.93 \pm 0.06$	0.174
2.15928	$12.07 \pm 0.13$	$32.11 \pm 0.08$	0.188
2.15933	$10.32 \pm 0.10$	$30.35 \pm 0.06$	0.207
2.15938	$11.75 \pm 0.08$	$32.88 \pm 0.07$	0.161
2.9060	$10.53 \pm 0.05$	$31.40 \pm 0.03$	0.176

Tabelle 8.4: Ergebnisse für Fitparameter aus dem Fit zur Korrelation zwischen der Amplitude und der ToT nach [Gleichung 4.2](#) und der Anteil an PdPs, aufgeschlüsselt nach Seriennummer des PMTs. Der Parameter  $a$  ist in Nanosekunden  $\ln(\text{Volt})$  und  $b$  in Nanosekunden angegeben.

SN	Fitparameter $a$ in ns $\ln(V_{ns})^{-1}$	Fitparameter $b$ in ns
1.12315	$8.74 \pm 0.03$	$8.74 \pm 0.13$
2.10149	$8.88 \pm 0.10$	$8.88 \pm 0.34$
2.10170	$10.01 \pm 0.13$	$10.01 \pm 0.43$
2.10182	$9.22 \pm 0.10$	$9.22 \pm 0.30$
2.10198	$9.67 \pm 0.14$	$9.67 \pm 0.48$
2.10200	$9.09 \pm 0.05$	$9.09 \pm 0.18$
2.10221	$8.77 \pm 0.06$	$8.77 \pm 0.21$
2.10228	$9.58 \pm 0.12$	$9.58 \pm 0.44$
2.13513	$8.78 \pm 0.05$	$8.78 \pm 0.17$
2.13830	$8.69 \pm 0.03$	$8.69 \pm 0.11$
2.13950	$8.87 \pm 0.07$	$8.87 \pm 0.25$
2.14100	$8.49 \pm 0.02$	$8.49 \pm 0.07$
2.15913	$8.77 \pm 0.07$	$8.77 \pm 0.24$
2.15914	$9.24 \pm 0.07$	$9.24 \pm 0.24$
2.15915	$9.76 \pm 0.12$	$9.76 \pm 0.41$
2.15916	$8.84 \pm 0.05$	$8.84 \pm 0.16$
2.15917	$8.55 \pm 0.02$	$8.55 \pm 0.07$
2.15918	$8.80 \pm 0.06$	$8.80 \pm 0.19$
2.15919	$8.24 \pm 0.03$	$8.24 \pm 0.11$
2.15920	$9.79 \pm 0.09$	$9.79 \pm 0.30$
2.15921	$8.34 \pm 0.03$	$8.34 \pm 0.12$
2.15922	$8.99 \pm 0.06$	$8.99 \pm 0.21$
2.15923	$9.21 \pm 0.11$	$9.21 \pm 0.35$
2.15924	$8.47 \pm 0.02$	$8.47 \pm 0.08$
2.15928	$9.19 \pm 0.10$	$9.19 \pm 0.34$
2.15933	$8.41 \pm 0.03$	$8.41 \pm 0.10$
2.15938	$8.84 \pm 0.02$	$8.84 \pm 0.10$
2.9060	$8.69 \pm 0.04$	$8.69 \pm 0.13$

Tabelle 8.5: Ergebnisse für Fitparameter aus dem Fit zur Korrelation zwischen Charge und der ToT nach [Gleichung 4.2](#) und der Anteil an PdPs, aufgeschlüsselt nach Seriennummer des PMTs. Der Parameter  $a$  ist in Nanosekunden  $\ln(\text{Volt Nanosekunden})$  und  $b$  in Nanosekunden angegeben.

SN	Fitparameter $a$ in ns $\ln(V)^{-1}$	Fitparameter $b$ in ns
1.12315	$11.85 \pm 0.08$	$32.19 \pm 0.57$
2.10149	$14.39 \pm 0.20$	$33.13 \pm 0.13$
2.10170	$14.47 \pm 0.10$	$35.25 \pm 0.69$
2.10182	$14.71 \pm 0.18$	$33.02 \pm 0.11$
2.10198	$13.81 \pm 0.08$	$35.26 \pm 0.56$
2.10200	$12.29 \pm 0.08$	$33.68 \pm 0.47$
2.10221	$13.27 \pm 0.14$	$33.01 \pm 0.10$
2.10228	$14.61 \pm 0.08$	$34.98 \pm 0.61$
2.13513	$12.08 \pm 0.09$	$32.35 \pm 0.69$
2.13830	$11.62 \pm 0.10$	$32.50 \pm 0.69$
2.13950	$13.73 \pm 0.13$	$32.91 \pm 0.94$
2.14100	$11.33 \pm 0.06$	$31.37 \pm 0.52$
2.15913	$12.20 \pm 0.06$	$32.63 \pm 0.38$
2.15914	$13.01 \pm 0.10$	$33.58 \pm 0.69$
2.15915	$15.11 \pm 0.09$	$37.54 \pm 0.61$
2.15916	$13.10 \pm 0.16$	$33.30 \pm 0.95$
2.15917	$11.59 \pm 0.13$	$31.39 \pm 0.10$
2.15918	$11.88 \pm 0.10$	$32.11 \pm 0.53$
2.15919	$12.23 \pm 0.14$	$32.79 \pm 0.11$
2.15920	$14.38 \pm 0.07$	$35.64 \pm 0.45$
2.15921	$10.84 \pm 0.10$	$30.70 \pm 0.79$
2.15922	$12.69 \pm 0.09$	$32.66 \pm 0.51$
2.15923	$13.30 \pm 0.11$	$33.37 \pm 0.66$
2.15924	$12.17 \pm 0.15$	$31.14 \pm 0.11$
2.15928	$13.43 \pm 0.11$	$33.49 \pm 0.71$
2.15933	$11.47 \pm 0.13$	$31.36 \pm 0.87$
2.15938	$12.70 \pm 0.10$	$33.98 \pm 0.84$
2.9060	$11.79 \pm 0.10$	$32.55 \pm 0.71$

Tabelle 8.6: Ergebnisse für Fitparameter aus dem Fit zur Korrelation zwischen der effektiven Amplitude und der ToT nach [Gleichung 4.2](#) aufgeschlüsselt nach Seriennummer des PMTs. Der Parameter  $a$  ist in Nanosekunden  $\ln(\text{Volt})$  und  $b$  in Nanosekunden angegeben.

SN	Gemessene ToT in ns	ToT bei Peak-Ampl. in ns	ToT bei 0.654 V in ns
1.12315	25.85 ± 0.04	24.3 ± 2.5	26.7 ± 2.0
2.10149	28.06 ± 0.13	29.2 ± 1.5	25.9 ± 2.1
2.10170	27.88 ± 0.15	28.5 ± 6.2	28.2 ± 6.3
2.10182	28.66 ± 0.10	30.3 ± 1.1	25.9 ± 1.6
2.10198	28.27 ± 0.10	29.5 ± 5.0	28.5 ± 5.4
2.10200	29.02 ± 0.11	30.9 ± 1.5	27.8 ± 2.0
2.10221	26.28 ± 0.10	24.3 ± 3.1	26.4 ± 2.5
2.10228	26.55 ± 0.10	27.4 ± 9.2	27.9 ± 8.8
2.13513	26.14 ± 0.12	24.1 ± 2.3	26.6 ± 1.9
2.13830	27.82 ± 0.09	26.6 ± 2.2	27.0 ± 2.1
2.13950	26.88 ± 0.08	26.4 ± 3.2	26.3 ± 3.2
2.14100	25.50 ± 0.15	23.7 ± 2.7	26.1 ± 2.2
2.15913	26.63 ± 0.09	27.0 ± 3.9	26.9 ± 4.0
2.15914	27.99 ± 0.07	27.7 ± 1.9	27.4 ± 1.9
2.15915	29.55 ± 0.10	32.7 ± 11.3	30.3 ± 13.3
2.15916	27.55 ± 0.08	27.0 ± 2.1	27.0 ± 2.2
2.15917	26.25 ± 0.14	27.2 ± 2.7	26.0 ± 3.0
2.15918	28.15 ± 0.04	28.2 ± 1.1	26.5 ± 1.3
2.15919	26.37 ± 0.16	23.5 ± 4.8	26.7 ± 3.5
2.15920	27.94 ± 0.14	26.9 ± 5.1	28.6 ± 4.4
2.15921	25.10 ± 0.12	23.5 ± 3.3	25.7 ± 2.6
2.15922	28.11 ± 0.11	28.1 ± 1.5	26.6 ± 1.7
2.15923	27.60 ± 0.08	28.8 ± 2.4	27.0 ± 2.8
2.15924	26.34 ± 0.08	24.4 ± 3.2	25.4 ± 2.9
2.15928	26.76 ± 0.09	26.4 ± 4.1	27.0 ± 3.9
2.15933	25.49 ± 0.10	24.2 ± 3.1	26.0 ± 2.6
2.15938	26.12 ± 0.09	25.4 ± 4.0	27.9 ± 3.3
2.9060	27.06 ± 0.12	25.1 ± 1.9	26.9 ± 1.6

Tabelle 8.7: Die errechnete ToT wird durch Einsetzen der Peak-Amplitude in die Ergebnisse des Korrelationsfits zwischen Amplitude und ToT ermittelt. Ebenso kann die errechnete ToT durch Einsetzen der durchschnittlichen Peak-Amplitude von 0.654 V in die Fitergebnisse bestimmt werden. Die ToTs sind in Nanosekunden angegeben.



# Danksagung

Ich möchte meinen Betreuern Prof. Uli Katz und Dr. Oleg Kalekin meinen Dank aussprechen, die mir ermöglicht haben, diese Arbeit durchzuführen und mich während des gesamten Prozesses betreut haben. Ihr Engagement und ihre Unterstützung waren von unschätzbarem Wert.

Ein besonderer Dank geht auch an Dr. Jonas Reubelt, Dr. Adrian Zink und Dr. Kay Graf für ihre technische Unterstützung in Hard- und Softwarefragen. Ihre Hilfe hat maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Zuletzt möchte ich mich auch bei allen bedanken, die sich die Zeit genommen haben, diese Arbeit Korrektur zu lesen und wertvolles Feedback zu geben. Ihre Anmerkungen haben zur Verbesserung dieser Arbeit beigetragen.

