

# Charakterisierung von Photomultipliertubes für die zukünftige Anwendung in der Intensitätsinterferometrie

Bachelorarbeit aus der Physik

Vorgelegt von  
**Paul Blaß**  
16. August 2024

Erlangen Centre for Astroparticle Physics  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

1. Supervisor/Betreuer: Prof. Dr. Stefan Funk
2. Supervisor/Betreuer: Dr. Alison Mitchell



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
2.1	Funktionsweise einer Photomultiplier Tube (PMT) . . . . .	3
2.1.1	Booster . . . . .	3
2.2	Einzelphotonenspektrum . . . . .	4
2.2.1	Poisson-Verteilung . . . . .	5
2.3	Zeitauflösung . . . . .	5
2.4	(Relative) Detektoreffizienz . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Messungen (Setup)</b>	<b>8</b>
3.1	Verwendete Photomultiplier Tubes . . . . .	8
3.2	Messaufbau . . . . .	8
3.3	Verstärker . . . . .	9
3.4	Digitalisierungskarte . . . . .	9
3.5	Aufgenommene Messungen . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>12</b>
4.1	Einzelne Events . . . . .	12
4.1.1	Erkennen eines Pulses . . . . .	13
4.2	Events mit mehr als einem Puls . . . . .	14
4.2.1	Position der Pulse . . . . .	14
4.2.2	Häufigkeit der Multipulse . . . . .	16
4.3	Pulsflächen und Gain . . . . .	18
4.3.1	Pulsflächen . . . . .	18
4.3.2	Dunkelmessung des PMT300 . . . . .	20
4.3.3	Fit des Einzelphotonenspektrums . . . . .	21
4.3.4	Gain . . . . .	23
4.4	Zeitauflösung . . . . .	25
4.5	Relative Detektoreffizienz . . . . .	28
4.6	Normierte Waveform der PMTs . . . . .	30
4.6.1	Rise- und Faltime . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit</b>	<b>34</b>
<b>A</b>	<b>Anhang A: Tabellen</b>	<b>37</b>
<b>B</b>	<b>Anhang B: Abbildungen</b>	<b>39</b>
	<b>Literatur</b>	<b>53</b>

# 1 Einleitung

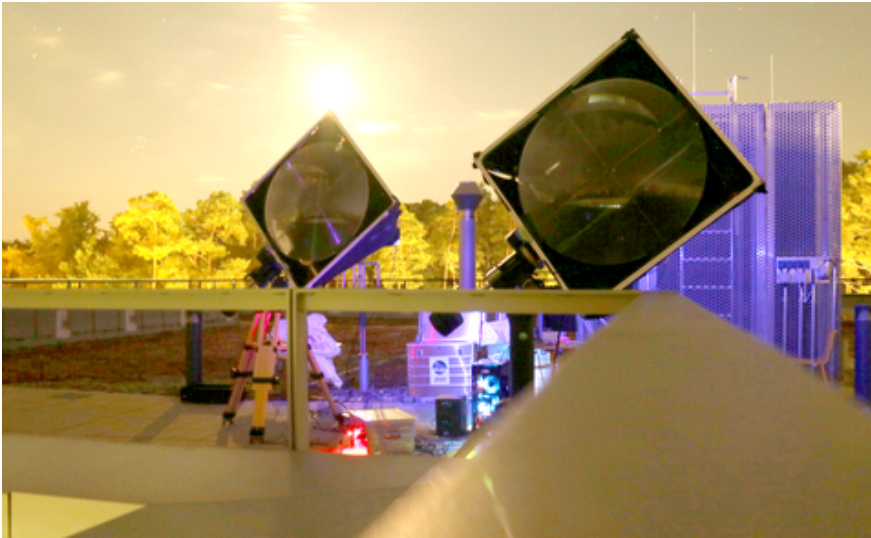
Die Astro Quantum Optics (AQO) Gruppe des Erlangen Centre for Astroparticle Physics (ECAP) strebt danach, mit Hilfe von Intensitätsinterferometrie (II), den Durchmesser von Sternen zu messen. In der Intensitätsinterferometrie werden zwei oder mehr Teleskope gleichzeitig auf ein Target ausgerichtet, um koinzidente Photonen zu messen. Aus dem resultierenden Photon Bunching Peak lässt sich dann mithilfe von mathematischen Sätzen der Durchmesser des Zielobjekts bestimmen (Vogel, 2020). Die ersten Anwender der Intensitätsinterferometrie waren Hanbury Brown und Twiss ab den späten 1950er Jahren (Brown u. a., 1967, Hanbury Brown u. a., 1974).

Momentan sind, im Rahmen des ECAPs, zwei Projekte für II in Gange. Das Erste findet am High Energy Stereoscopic System (H. E. S. S.) Teleskop in Namibia statt, wo in der Vergangenheit bereits Messungen für Intensitätsinterferometrie durchgeführt wurden (Zmija u. a., 2023). Zusätzlich dazu wird an einem „tragbaren“ Teleskop-Setup namens Mobile Intensity Interferometer for Stellar Observations (MI<sup>2</sup>SO) gearbeitet, welches Fresnel-Linsen verwendet (siehe Abbildung 1). In beiden Fällen ist das präzise Detektieren von Photonenratenschwankungen ein fundamentaler Bestandteil. Aus diesem Grund werden für die Photodetektion Photomultiplier Tubes (PMTs) verwendet, welche eine kurze Antwortzeit aufweisen (HAMAMATSU, 2017). In der Intensitätsinterferometrie wird mit sehr kleinen Photonensignalen gearbeitet, was dazu führt, dass das Signal-to-Noise (S/N) Verhältnis, insbesondere für kleine Teleskope, wie dem MI<sup>2</sup>SO Aufbau, zum limitierenden Faktor wird. Das Signal-to-Noise Verhältnis ist gegeben durch (Zmija u. a., 2020):

$$S/N = C \epsilon n(\nu) \sqrt{\frac{T}{\tau_e}} \quad (1)$$

Dabei beschreiben  $C$  die Sammelfläche des Teleskops,  $\epsilon$  die Transfer- und Photonendetektionseffizienz des Systems,  $n(\nu)$  den Photonenflux des Targets,  $T$  die Messdauer und  $\tau_e$  die Zeitauflösung des Systems. Besonders die Zeitauflösung und Detektionseffizienz hängen von der Wahl des PMTs ab. Die Verwendung eines geeigneten PMT-Modells ist daher ausschlaggebend. Das PMT-Modell H15461-40 besitzt eine stabilere Quanteneffizienz über einen großen Wellenlängenbereich, sowie eine höhere Quanteneffizienz für längere Wellenlängen, als die bisherig verwendeten R11265U-200 und R11265U-300 Modelle. Außerdem besitzt das neue Modell laut Herstellerangaben eine bessere Zeitauflösung. Die neuen PMTs versprechen mehr Variabilität bei der Wahl der Observationstargets durch die Erweiterung der möglichen Operationswellenlängen.

Aufgabe dieser Arbeit ist es, die neuen PMTs zusammen mit den bisherigen Modellen für Zeitauflösung und Detektoreffizienz, sowie weiterer Parameter, zu vermessen. Zu den weiteren Parametern zählen: Pulshäufigkeit, Gain und normierte Waveform.



**Abbildung 1:** Foto des Mobile Intensity Interferometer for Stellar Observations (MI<sup>2</sup>SO) Teleskops. Image credit: Christopher Ingenhütt.

## 2 Theorie

In diesem Kapitel wird ein vereinfachter Überblick von der Funktionsweise einer Photomultiplier Tube gegeben, sowie andere Bereiche erklärt, die für die Charakterisierung der Photomultiplier Tubes benötigt werden.

### 2.1 Funktionsweise einer Photomultiplier Tube (PMT)

Photoelektronenvervielfacher oder zu englisch Photomultiplier Tubes (PMTs), sind elektrische Messgeräte zur quantitativen Messung von optischen Photonen. Dies bewerkstelligen sie, indem sie sich den externen photoelektrischen Effekt zu nutze machen. Der externe photoelektrische Effekt beschreibt das Phänomen, dass Elektronen in einem Material durch die Absorption von eintreffenden Photonen mit ausreichender Energie aus diesem Material herausgelöst werden können. Werden diese Elektronen dann durch ein externes elektrisches Feld fokussiert und beschleunigt, und daraufhin als Strom bzw. Spannung ausgelesen, lässt sich das Eintreffen eines Photons nachweisen.

Konkret besteht ein PMT aus einer vakuumisierten Glasröhre, die eine Photokathode als Detektoroberfläche aufweist. Die von den Photonen ausgelösten Photoelektronen werden dann von einer Fokussierungselektrode beschleunigt und auf die erste Dynode fokussiert. Als Dynoden werden Elektroden bezeichnet, die mit speziellen Metallegierungen beschichtet sind, wodurch eintreffende Elektronen in der Lage sind eine Mehrzahl anderer Elektronen, sogenannter Sekundärelektronen, auszulösen. Diese werden dann wiederum auf eine weitere Dynode beschleunigt, um weitere Elektronen auszulösen. Mit einer Vielzahl an Dynoden entsteht dadurch ein Lawineneffekt, welcher den anfänglich mikroskopischen Einzelelektronenstrom der Photoelektronen in einen makroskopischen, messbaren Strom umwandelt.

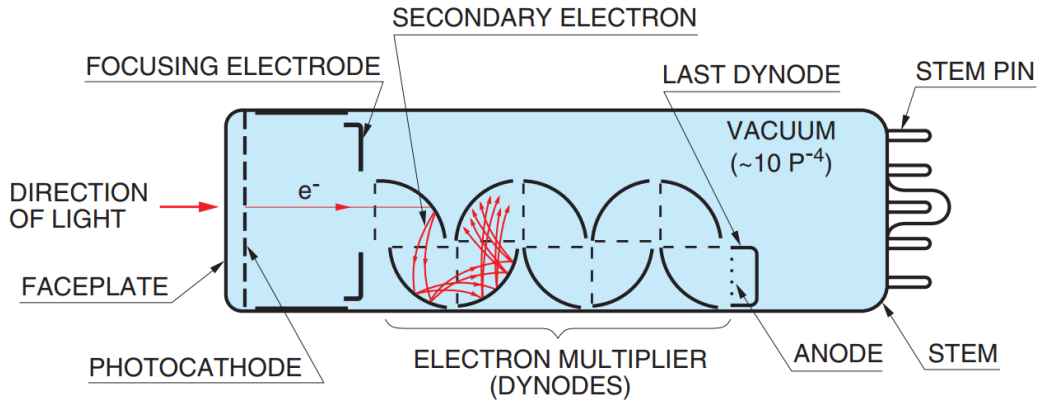
Der Verstärkungsfaktor oder auch Gain eines PMTs hängt davon ab wie viele Sekundärelektronen an einer Dynode pro eintreffendem Primärelektron ausgelöst werden. Diese Sekundäremissionsrate  $\delta$  ist abhängig von der angelegten Betriebsspannung (HAMAMATSU, 2017). Die Betriebsspannung kann je nach PMT-Typus zwischen Volt- und Kilovoltbereichen liegen. Besitzt ein PMT  $n$  Dynoden, so lässt sich der Gain  $\mu$  berechnen über:

$$\mu = \delta^n \tag{2}$$

Der so verstärkte Strom kann daraufhin an der Anode entweder direkt als Strom oder über einen bekannten Widerstand als Spannung abgegriffen werden. Eine grafische Darstellung der Funktionsweise eines PMT ist in Abbildung 2 zu sehen.

#### 2.1.1 Booster

Durch den exponentiell anwachsenden Charakter der Menge an Elektronen, die an einer Dynode ankommen, kann es vorkommen, dass das geeignete Spannungsverhältnis zwischen einzelnen Dynoden nicht ausreichend aufrecht erhalten werden, was sich negativ auf das Ausgabesignal auswirkt. Um dem vorzubeugen, kann eine Booster-Vorrichtung eingebaut werden, welche aus ein oder mehreren weiteren Versorgungsspannungen besteht, die die letzten paar Dynoden mit zusätzlicher Spannung versorgen (HAMAMATSU, 2017).



**Abbildung 2:** Funktionsweise eines PMT. Die an der Photokathode ausgelösten Elektronen werden durch die Dynoden multipliziert und an der Anode ausgelesen. Abbildung aus HAMAMATSU, 2017.

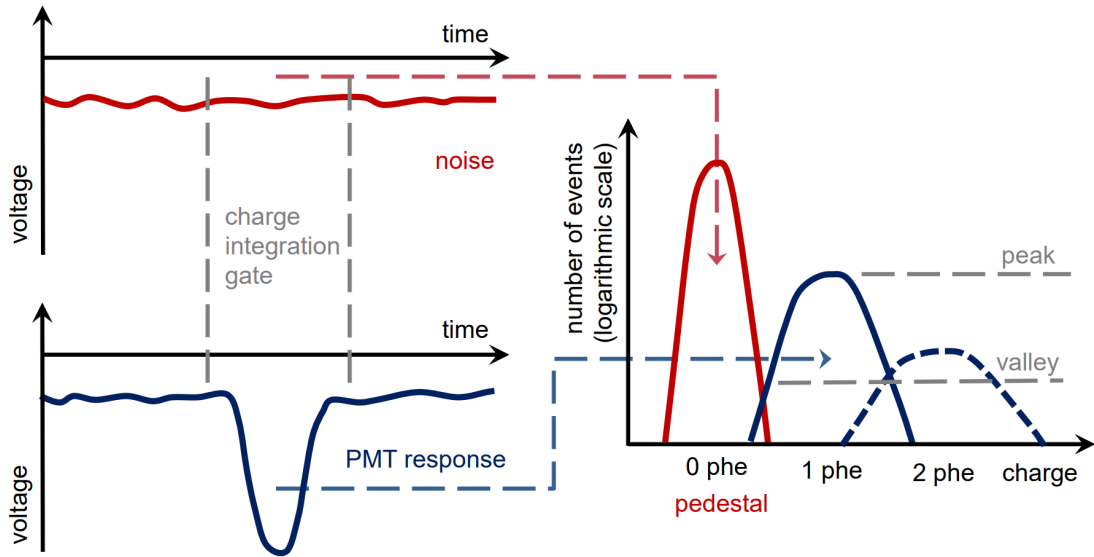
## 2.2 Einzelphotonenspektrum

Integriert man einzeln über die vom PMT ausgegebenen Spannungspulse, so erhält man ein Ladungsspektrum. Wurde der Hauptteil an Spannungspulsen durch jeweils ein einziges Photoelektron ausgelöst, spricht man von einem Einzelphotonenspektrum (SPE). Um dies zu bewerkstelligen, wird eine Lichtquelle benötigt, die in der Lage ist gepulst wenige bis einzelne Photonen auszusenden, wie zum Beispiel ein gepulster Laser mit passendem Neutraldichtefilter (ND-Filter), der die Laserpulse ausreichend abschwächt. Dadurch, dass in solch einem Fall die emittierte Photonenanzahl Poisson-verteilt ist (siehe Unterunterabschnitt 2.2.1), ist eine mittlere Anzahl von Photonen pro Laserpuls von weit unter eins (beispielsweise im Bereich von 0,1) vonnöten (Classen, 2017).

Was man unter diesen Voraussetzungen erhält, ist ein Spektrum, welches sich aus mehreren Gauß-Verteilungen zusammensetzt. In Abbildung 3 ist die systematische Zusammensetzung eines Einzelphotonenspektrums zu sehen. Enthält das PMT-Event keinen Spannungspuls, so ist es Teil des Pedestal (in rot zu sehen), dem prominentesten Teil des Spektrums. Die Breite des Pedestal ist durch zufällige oder systematische elektronisch verursachte Schwankungen der Baseline („Noise“) gegeben. Die Baseline bezeichnet den Wert der Signallinie im Idle-Zustand. Darauf gefolgt sind weitere Gauß-Formen zu sehen, wobei der Einzelphotonenpeak in blau zu sehen ist, welcher bei geeignet gewählter Photonenquelle alle anderen (mit Ausnahme des Pedestals) dominieren sollte. Er enthält alle Events mit Spannungspulsen, die von einem einzelnen Photoelektron ausgelöst wurden, womit aus seinem Maximum und dem des Pedestal sich der Gain des PMT wie folgt ausrechnen lässt (Classen, 2017):

$$\mu_{\text{Gain}} = \frac{Q_{1\text{phe}} - Q_{0\text{phe}}}{e} \quad (3)$$

Hierbei bezeichnen  $Q_{1\text{phe}}$  und  $Q_{0\text{phe}}$  die mittlere Ladung des Einzelphotonenpeaks bzw. des Pedestals, sowie  $e$  die Elementarladung.



**Abbildung 3:** Erstellung des Einzelphotonenspektrums (SPE)s. Durch uniformes festlegen der Integrationsgrenzen lassen sich Noisefluktuationen eindämmen. Bei geeigneter gewählter Photonenquelle erhält man ein Einzelphotonenspektrum mit Pedestal („0 phe“), Einzelphotonenpeak („1 phe“) und höheren Photonenzahlen („2 phe“). Abbildung aus Classen, 2017.

### 2.2.1 Poisson-Verteilung

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Event in einem Ladungsspektrum einen Puls enthält, der von keinem Photon, einem Photon oder mehreren Photonen ausgelöst wurde, folgt einer Poisson-Verteilung. Bei der Poisson-Verteilung handelt es sich um eine diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilung der Form:

$$P_{\lambda}(k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda} \quad (4)$$

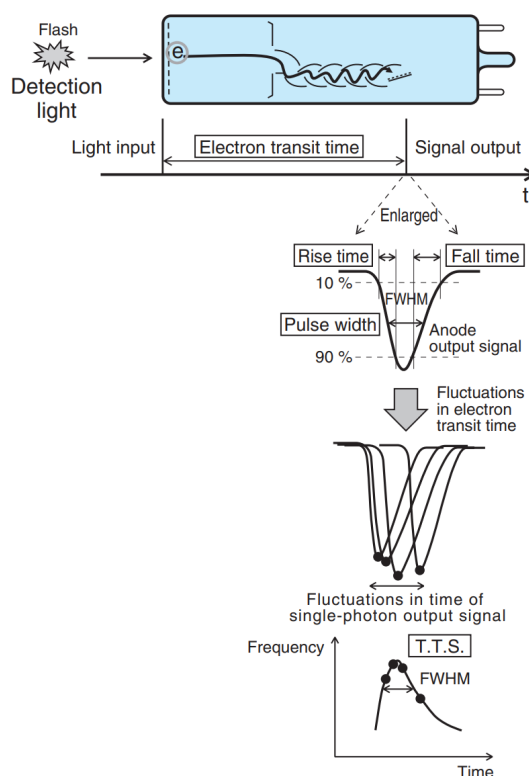
Wobei der Parameter  $\lambda > 0$  gleichzeitig Erwartungswert und Varianz der Verteilung darstellt, und  $k \in \mathbb{N}_0$  die Ereignisanzahl (hier Anzahl Photonen) beschreibt. Für ein Einzelphotonenspektrum wurde die mittlere Anzahl an Photonen  $\lambda$  so angepasst, dass  $P_{\lambda}(1) \gg P_{\lambda}(k > 1)$  gilt.

### 2.3 Zeitauflösung

Photomultiplier Tubes sind bekannt für ihre außerordentlich schnelle Antwortzeit, welche dadurch bestimmt wird, wie lange ein Elektron benötigt um nach dem Auslösen als Elektronenlawine an der Anode anzukommen. Der Zeitabschnitt vom Auslösen eines Elektrons an der Photokathode bis zum Pulsmaximum an der Anode wird Elektronentransitzeit (eng. Electron transit time) genannt (siehe Abbildung 4). Wichtig zu beachten ist dabei, dass die Electron transit time zwischen zwei Pulsen, je nach Betriebsspannung und PMT-Bauart, zwischen wenigen Zehntelnanosekunden und einigen Nanosekunden variieren kann (HAMAMATSU, 2017). Die Fluktuation der Electron transit time wird als Transit Time Spread (T. T. S.) bezeichnet, und ist definiert über



**Abbildung 4:** Konzept der Elektroden-  
transitzeit und des T. T. S. Die Zeit zwischen dem Auslösen eines Elektrons an der Photokathode und dem Pulsmaximum kann zwischen zwei Pulsen variieren. Diese Variation ist über den FWHM des Peaks im Electron transit time Histogramm charakterisiert. Abbildung aus HAMAMATSU, 2017.



die Halbwertsbreite (FWHM) des Peaks in einem Electron transit time Histogramm (HAMAMATSU, 2017).

## 2.4 (Relative) Detektoreffizienz

Als **absolute** Detektoreffizienz (DE) eines PMT bezeichnet man die Wahrscheinlichkeit, dass ein auf der Detektoroberfläche eintreffendes Photon einen Spannungspuls erzeugt. Sie setzt sich dabei multiplikativ aus der Quanteneffizienz (QE) der Photokathode, also der Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon einer bestimmten Wellenlänge bei Eintreffen ein Elektron auslöst, und der Sammeleffizienz (eng. collection efficiency (CE)) der ersten Dynode zusammen. Die Sammeleffizienz ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photoelektron die erste Dynode trifft, und ist von Bauart und Betriebsspannung des PMT abhängig, während die QE von der Wellenlänge der Photonen und dem Kathodenmaterial abhängt (HAMAMATSU, 2017). Da für die Bestimmung der absoluten Detektoreffizienz die tatsächliche Anzahl an eintreffenden Photonen bekannt sein muss, dies jedoch aufgrund der Poisson-verteilten Pulse einer gepulsten Quelle nur selten der Fall ist, wird in Fällen mit unbekannter Photonenzahl auf die relative Detektoreffizienz zurückgegriffen.

Bei der Aufnahme eines Einzelphotonenspektrums (siehe Unterabschnitt 2.2) lässt sich durch abziehen der Events innerhalb des Pedestal von der Gesamtzahl an Events der Anteil an Events mit detektierten Photonen bestimmen. Nimmt man nun diesen Anteil bei einer Messung mit bestimmten PMT und Betriebsspannung und normiert damit Messungen mit gleichen Bestrahlungsvoraussetzungen, aber anderen PMT-Typen und/oder Betriebsspannungen, so erhält man eine **relative** Detektoreffizienz. Hierbei

bedeuten Werte über Eins eine höhere Detektoreffizienz gegenüber der Vergleichsmessung bzw. eine niedrigere Detektoreffizienz bei Werten unter Eins.

### 3 Messungen (Setup)

In diesem Kapitel werden die verwendeten Photomultiplier Tubes genauer beschrieben, sowie die einzelnen, durchgeführten Messungen mitsamt Messaufbau erläutert.

#### 3.1 Verwendete Photomultiplier Tubes

Insgesamt wurden vier PMTs von drei verschiedenen Modellen der Firma HAMAMATSU vermessen. Bei den verwendeten Modellen handelt es sich um einen R11265U-200 (zur Vereinfachung im folgenden kurz PMT200 genannt), und einen R11265U-300 (im folgenden PMT300), sowie zwei baugleiche PMTs des Modells H15461-40. Die H15461-40 PMTs wurden zur Unterscheidung nummeriert und werden im folgenden PMT1 und PMT2 genannt.

##### R11265U-200 (PMT200)

Der PMT200 wurde zusammen mit zugehörigem Booster in einer 2" Aluminiumröhre verbaut und besitzt seinen eigenen Verstärker. Der PMT weist eine effektive Detektorfläche von  $(23 \times 23) \text{ mm}^2$  auf, sowie eine QE von 40 % bei einer Wellenlänge von 400 nm für eintreffende Photonen. Sein Gain beträgt laut Herstellerangaben  $1,2 \times 10^6$  bei einer Betriebsspannung von 900 V. Weiterhin beläuft sich der T. T. S. auf 0,27 ns (HAMAMATSU, 2019).

##### R11265U-300 (PMT300)

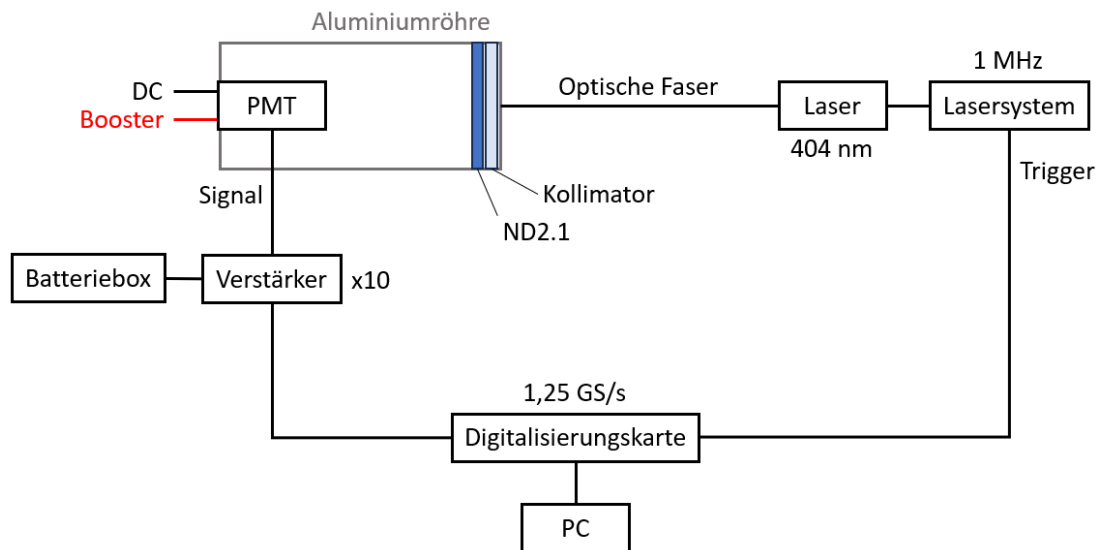
Der PMT300 wurde zusammen mit einem R11265 Booster in einer 2" Aluminiumröhre verbaut. Er besitzt eine effektive Detektorfläche von  $(23 \times 23) \text{ mm}^2$  mit einer QE von 39% bei einer Wellenlänge von 400 nm für eintreffende Photonen. Sein Gain beträgt laut Herstellerangaben  $1,2 \times 10^6$  bei einer Betriebsspannung von 900 V. Weiterhin beläuft sich der T. T. S. auf 0,27 ns (HAMAMATSU, 2019).

##### H15461-40 (PMT1 und PMT2)

Für die H15461-40 wurden eigens passgenaue 2" Aluminiumröhren, sowie Reglerboxen angefertigt. Die Reglerboxen erlauben durch Einstellen eines Potentiometers das Regeln der Betriebsspannung von 0 – 1 V in 10 mV-Schritten. Die effektive Detektoroberfläche beträgt  $(14 \times 14) \text{ mm}^2$  mit einer QE von  $\sim 34\%$  bei einer Wellenlänge von 400 nm für eintreffende Photonen. Der Gain beträgt laut Herstellerangaben  $9,0 \times 10^5$  bei einer Betriebsspannung von 0,9 V. Weiterhin beläuft sich der T. T. S. auf 0,19 ns (HAMAMATSU, 2023).

#### 3.2 Messaufbau

Die PMTs wurden für die Messung horizontal auf einem optischen Tisch befestigt und von dort mit Spannung und Boosterspannung (falls benötigt) versorgt. Zur Abschirmung vor Photonen von außerhalb wurde auf Seiten der Detektorfläche eine 2" Aluminiumröhre festgeschraubt, an deren Ende sich ein Kollimator und Filter befindet. Die zu messenden Photopulse kommen von einem Laser des Modells PiL040XSM mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 404 \text{ nm}$ . Gesteuert wurde der Laser von dem Pikosekunden



**Abbildung 5:** Übersicht des Messaufbaus. Nur PMT200 und PMT300 benötigen eine Boosterspannung.

Lasersystem „Pilas“, wobei eine Pulsrate von 1 MHz und ein Tune von 52 % eingestellt wurden. Die Pulse werden über eine optische Faser direkt in den Kollimator geleitet, und über einen ND2,1 Filter (Kombination aus ND0,6, ND0,5 und ND1,0 Filter) abgeschwächt. Für den Abschwächungsfaktor gilt  $10^{\text{ND}} = 10^{2,1}$ , was in diesem Fall einer Abschwächung von 99,2 % entspricht.

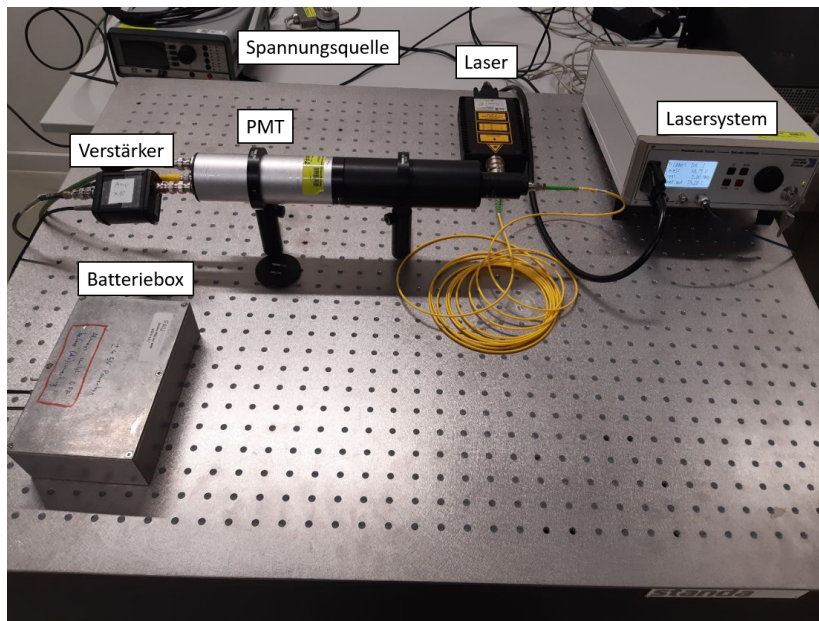
Das vom PMT ausgegebene Signal wird zuerst von einem Verstärker (siehe Unterabschnitt 3.3) verstärkt und anschließend zur Digitalisierungskarte (siehe Unterabschnitt 3.4) zur Digitalisierung geleitet. Als Trigger dient hierbei ein Rechtecksignal, welches vom Lasersystem bei jedem Pulsversuch direkt an die Digitalisierungskarte geleitet wird. Ein vereinfachtes Anschauungsbild des Messaufbaus ist in Abbildung 5 zu sehen, sowie ein Foto dessen in Abbildung 6.

### 3.3 Verstärker

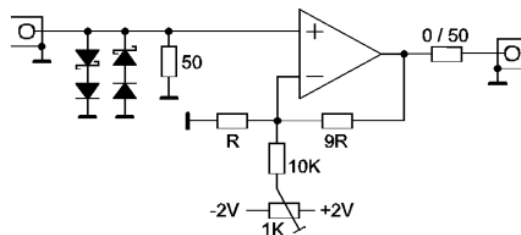
Für die Verstärkung des PMT-Signals wurde ein modifizierter Verstärker des Modells TA1000B-200 der Firma FAST verwendet (FAST, 2024). Dabei handelt es sich um einen schnellen Vorverstärker mit DC coupling und geringem Rauschen, der das Signal bis auf einen konstanten Offset (welcher auf Null gesetzt werden kann) nicht beeinflusst. Da der Verstärkungsfaktor von 200 für die verwendeten PMTs viel zu hoch wäre, wurde der Verstärker so modifiziert, dass er lediglich einen Verstärkungsfaktor von 10 aufweist (siehe Abbildung 7). Versorgt wurde der Verstärker über eine externe Batteriebox.

### 3.4 Digitalisierungskarte

Die Digitalisierungskarte M4i 2211-x8 der Firma SPECTRUM Instrumentation besitzt zwei Eingangskanäle zum Aufnehmen von Signalen, sowie zusätzliche Eingangskanäle für externe Trigger-Signale. Die maximale Sampling-Rate eines Kanals beträgt 1,25 GS/s mit einer maximalen Bandbreite von 500 MHz (SPECTRUM Instrumentation, 2024).



**Abbildung 6:** Fotografie des Messaufbaus für den PMT300. Laser und Lasersystem wurden während den Messungen, um Störungen zu vermeiden, so weit wie möglich von dem PMT weggestellt.



**Abbildung 7:** Vereinfachtes Schaltbild des verwendeten TA1000B-200 Verstärkers. Der Verstärker wurde so modifiziert, dass er lediglich einen Verstärkungsfaktor von 10 besitzt, was dem Schaltbild eines TA1000B-10 entspricht. Abbildung aus FAST, 2024.

Aus der Sampling-Rate folgt, dass zwischen zwei Segmenten ein Zeitabstand von 0,8 ns liegt. Die Karte ist mit dem Computer verbunden und kann über ein Programm namens „SBench 6“ angesteuert werden. In SBench werden die aufgenommenen Signale grafisch dargestellt, Parameter wie Anzahl der aufgenommenen Segmente pro Trigger und Ähnliches können eingestellt werden, und die gemessenen Signale können als im Binärformat abgespeichert werden. Dabei ist zu beachten, dass die Signalamplitude mit einem Analogue to Digital Converter (ADC) aufgenommen wird, welcher die Amplitude in der Einheit ADC Counts abspeichert, welche über den gesetzten Spannungsbereich in mV umgerechnet werden können. Unabhängig vom Spannungsbereich beträgt der Aufnahmebereich 127 ADC in positiver wie negativer Richtung. Dementsprechend ist der Umrechnungsfaktor  $V_{ADC \rightarrow mV}$  für 1 ADC für die Spannungsbereiche  $\pm 100$  mV und

$\pm 200$  mV wie folgt gegeben:

$$V_{\text{ADC} \rightarrow \text{mV}}^{\pm 100} = \frac{100 \text{ mV}}{127 \text{ ADC}} = 0,787 \frac{\text{mV}}{\text{ADC}} \quad (5)$$

$$V_{\text{ADC} \rightarrow \text{mV}}^{\pm 200} = \frac{200 \text{ mV}}{127 \text{ ADC}} = 1,579 \frac{\text{mV}}{\text{ADC}} \quad (6)$$

### 3.5 Aufgenommene Messungen

Zuerst einige Einstellungen, die für alle Messungen gleich sind:

Der vom PMT ausgegebene Strom wird über einen  $50 \Omega$  Widerstand als Spannung abgegriffen und auf einen Kanal der Digitalisierungskarte geleitet. Das Signal wird dort in einem Spannungsbereich von  $\pm 200$  mV digitalisiert und mit einem Offset von 194 mV versehen. Da die Pulse nach unten gerichtet sind, ermöglicht ein positiver Offset das Aufnehmen von größeren Pulsen. Bei jedem Trigger wird ein Event, bestehend aus 256 Segmenten, aufgenommen. Dabei sind die ersten 32 Segmente der Zeitabschnitt vor dem Trigger, die restlichen 224 Segmente der Zeitabschnitt nach dem Trigger. Für jede Betriebsspannung der PMTs wurden je  $5 \cdot 10^6$  Events aufgenommen.

Für die einzelnen PMTs:

Für den PMT200 und PMT300 wurden zum einen Messreihen aufgenommen, bei denen das Trigger-Signal des Lasersystems auf den externen Triggerkanal der Digitalisierungskarte gelegt wurde, und zum anderen Messreihen, bei denen das Trigger-Signal auf den zweiten Kanal der Digitalisierungskarte gelegt, und als eigenständiges Signal (Spannungsbereich  $\pm 100$  mV, kein Offset) aufgenommen wurde. Das Verhältnis von Booster- zu Betriebsspannung betrug  $1 : 3,34$ . Gemessen wurde bei jeder Triggereinstellung für Betriebsspannungen von 700 V bis 950 V in 50 V-Schritten. Weiterhin wurde lediglich für den PMT300 eine Dunkelmessung für jede aufgenommene Betriebsspannung durchgeführt. Hierbei wurde die optische Faser vom Ende der Aluminiumröhre abgeschraubt, und diese anschließend verschlossen.

Für den PMT1 und PMT2 wurde das Trigger-Signal auf den zweiten Kanal der Digitalisierungskarte gelegt, und als eigenständiges Signal aufgenommen (Einstellungen analog zu PMT200 und PMT300). Gemessen wurde für Betriebsspannungen von 0,7 V bis 1 V in 0,1 V-Schritten. Da diese beiden PMTs zu groß für reguläre 2" Aluminiumröhren sind und die passgenauen Aluminiumröhren erst einige Zeit nach Beginn der Messungen fertiggestellt wurden, wurden auch Messungen für den PMT1, lediglich eingewickelt in Kupferklebeband und Aluminiumfolie, aufgenommen. Die vermessenen Betriebsspannungen waren dabei die gleichen, und das Trigger-Signal wurde auf den externen Triggerkanal der Digitalisierungskarte gelegt.

Die zeitliche Reihenfolge der Aufnahme der Messungen, mit mindestens einem Tag dazwischen, ist folgende:

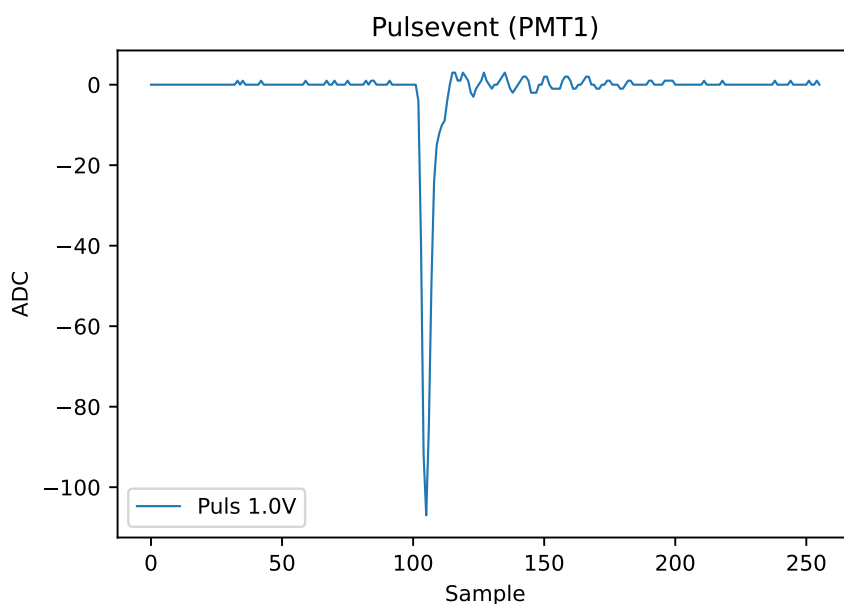
Messreihen des PMT300 ohne Aufnahme der Trigger-Signale. Messreihen des PMT200 und des PMT1 ohne Aluminiumröhre (beide ohne Aufnahme der Trigger-Signale). Messreihen des PMT1 und PMT2, beide mit Aluminiumröhre und Aufnahme der Trigger-Signale. Messreihen des PMT200 und PMT300 mit Aufnahme der Trigger-Signale.

## 4 Auswertung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Auswertung der in Abschnitt 3 aufgenommenen Messungen präsentiert. Es wird erklärt, wie ein einzelnes Event einer Messung aussieht. Außerdem wird die Relevanz von Events mit mehr als einem Puls besprochen, gefolgt von den Pulsflächenhistogrammen der PMTs mit zugehöriger Gainberechnung. Weiterhin wird für jede PMT/Betriebsspannung-Kombination der zugehörige T. T. S., die relative Detektoreffizienz, sowie eine mittlere, normierte Waveform mit Rise- und Falltime bestimmt. Die Auswertung wurde in Python durchgeführt.

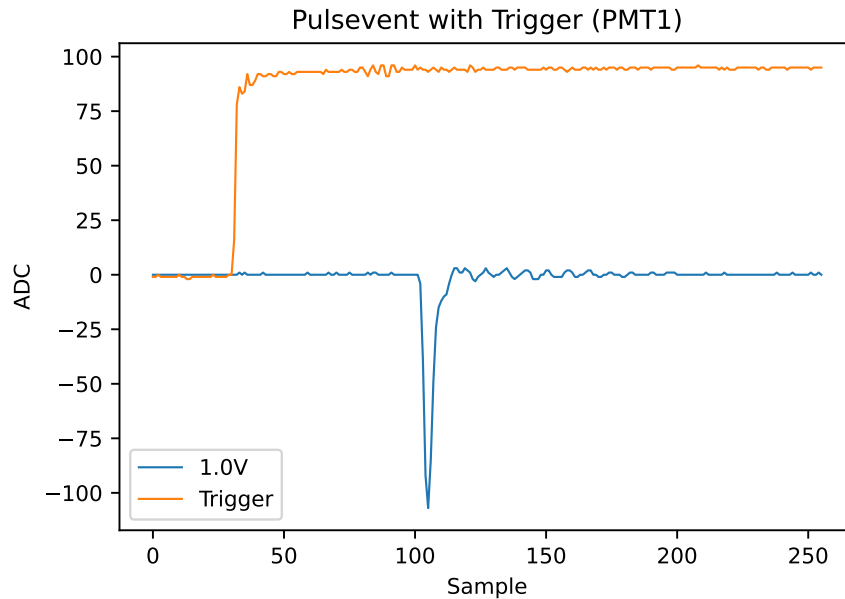
### 4.1 Einzelne Events

Wie bereits in Unterabschnitt 3.5 beschrieben, wurden für jede PMT/Betriebsspannung-Kombination  $5 \cdot 10^6$  Events aufgenommen. Ein Event besteht dabei aus 256 Segmenten wobei zwischen zwei Segmenten ein Zeitabstand von 0,8 ns liegt. Somit umfasst ein Event einen Zeitabschnitt von 204 ns. Sollte innerhalb eines Events eine Elektronenlawine an der Anode registriert werden, so ist dies als spitz zulaufender, nach unten gerichteter Puls zu sehen (siehe Abbildung 8). Dieser ist in ADC aufgenommen, welcher über Gleichung 6 in mV umgerechnet werden kann. Aufgrund des in SBench eingestellten Offsets wurden alle Datensätze um einen konstanten Wert von 124 ADC nach unten verschoben, sodass die Baseline des Signals auf 0 ADC liegt. Dementsprechend ist der größte, vollständig aufnehmbare Puls einer mit einem Minimum von  $-252$  ADC.



**Abbildung 8:** Aufnahme eines einzelnen Pulsevents des PMT1 (in Aluminiumröhre verbaut) bei einer Betriebsspannung von 1,0 V.

Bei Messreihen, in denen das Trigger-Signal des Lasersystems ebenfalls von der Digitalisierungskarte aufgenommen wurde, erhält man für jedes Event ein weiteres Signal mit gleicher Segmentanzahl, welches ein Rechtecksignal darstellt, das um Segment Nummer 32 steil ansteigt (siehe Abbildung 9). Aufgrund des anderen Messbereiches



**Abbildung 9:** Aufnahme eines einzelnen Pulsevents mit dazugehörigem Trigger-Signal des PMT1 (in Aluminiumröhre verbaut) bei einer Betriebsspannung von 1,0 V. Das Trigger-Signal besteht aus einem Rechtecksignal, welches um Segment Nummer 32 steil ansteigt.

lässt sich dieses mit Gleichung 5 von ADC in mV umrechnen. Die Aufnahme des Trigger-Signals ist notwendig zur Bestimmung des T. T. S. einer Messreihe.

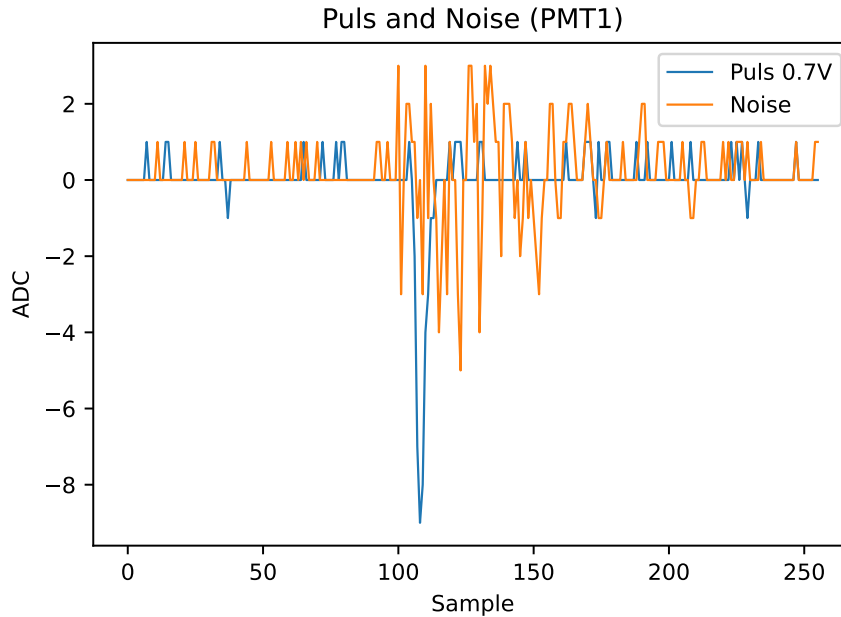
#### 4.1.1 Erkennen eines Pulses

Um herauszufinden, ob sich ein oder mehr Pulse/Peaks in einem Event befinden, wurde die Python-Funktion `signal.find_peaks` aus dem `ScyPy` Paket verwendet. Diese `ScyPy` Funktion findet lokale Maxima durch den Vergleich von benachbarten Werten. Hierfür wurde das negative Vorzeichen des Signals in ein positives umgewandelt, und die Parameter für benötigte Pulshöhe und Pulsprominenz für jede Messreihe so eingestellt, dass Schwankungen im Rauschen der Baseline nicht als zusätzliche Pulse registriert werden. Mit dieser Methode lassen sich alle Events in Events ohne Peaks, Events mit einem Peak, Events mit zwei Peaks oder Events mit mehr als zwei Peaks unterteilen. Auf das Verhältnis von Events mit unterschiedlichen Peakanzahlen wird in Unterabschnitt 4.2 genauer eingegangen.

#### Außergewöhnliche Störung bei Messungen des PMT1/PMT2

In den Messreihen des PMT1 und PMT2 konnte in wenigen Events ein hochfrequentes Störsignal mit beträchtlicher Amplitude festgestellt werden (siehe Abbildung 10). Die wahrscheinlichste Ursache dafür ist das verwendete Netzteil für die HV Versorgung der PMTs, da die anderen PMTs ein anderes benötigen. Mit Sicherheit lässt sich dies jedoch nicht sagen, da keine Vergleichsmessung mit einem anderen Netzteil durchgeführt wurde. Da die Peaks dieser Störung für Betriebsspannungen 0,7 V und 0,8 V zu groß und





**Abbildung 10:** Event mit außergewöhnlicher Störung in der Messung des PMT1. Zum Vergleich wurde es zusammen mit einem, für seine Verhältnisse, großem Puls bei einer Betriebsspannung von 0,7 V geplotet. Etwa  $\sim 0,01\%$  der Events einer Messreihe des PMT1/PMT2 enthalten diese Störung.

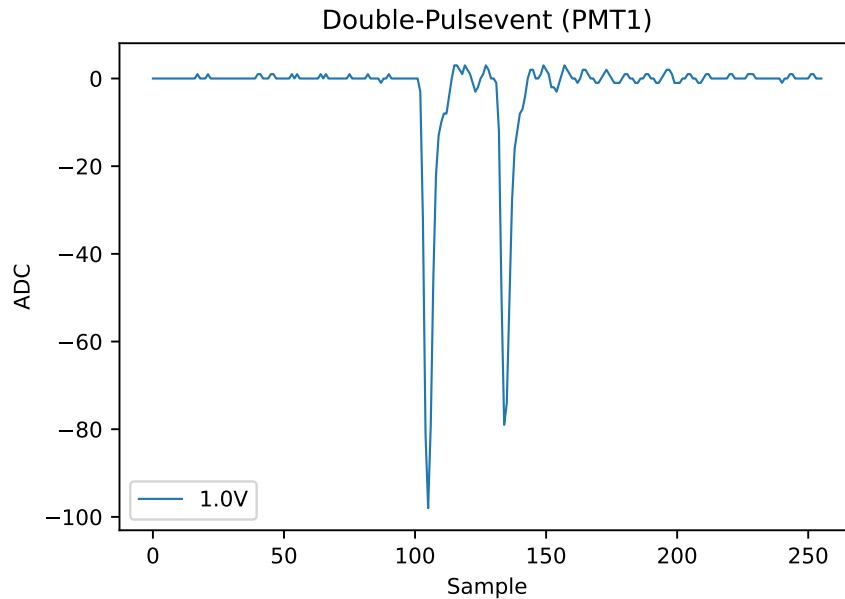
prominent sind um tatsächliche PMT-Pulse aus dem betroffenen Event herauszufiltern, wurden diese Events verworfen. Dies sollte sich jedoch nicht weiter negativ auf die Statistik auswirken, da nur  $\sim 0,01\%$  aller Events einer Messreihe die Störung aufweisen.

## 4.2 Events mit mehr als einem Puls

Wie bereits in Unterabschnitt 4.1 beschrieben, enthalten die aufgenommenen Messreihen Events in denen mehr als ein Spannungspuls registriert wurden. Ein Beispiel für ein Event mit zwei detektierten Pulsen ist in Abbildung 11 zu sehen. Bei dem gezeigten Event handelt es sich um einen Ausschnitt der Messung des PMT1, wobei der zweite Puls etwas kleiner als der Erste ausfällt. Dies ist nicht für alle Events dieser Art gegeben, da auch Events auftreten, bei denen die nachfolgenden Pulse größer ausfallen als der erste.

### 4.2.1 Position der Pulse

Für die restliche Auswertung und spätere Verwendung der PMTs stellt sich nun die Frage, wie häufig und an welchen Stellen im Signal diese zusätzlichen Pulse auftreten. Für die Zeitauflösung (siehe Unterabschnitt 4.4) und normierte Waveform (siehe Unterabschnitt 4.6) werden lediglich Events benötigt, die exakt einen Puls enthalten. Weiterhin muss für die Berechnung des Gains die Fläche der Pulse bestimmt werden (siehe Unterabschnitt 4.3.1). Mehrere Pulse in einem Event würden die Fläche verzerren, was durch die Wahl von geeigneten Integrationsgrenzen verhindert werden kann. Die Position der Grenzen sollten so gewählt werden, dass ein erheblicher Großteil

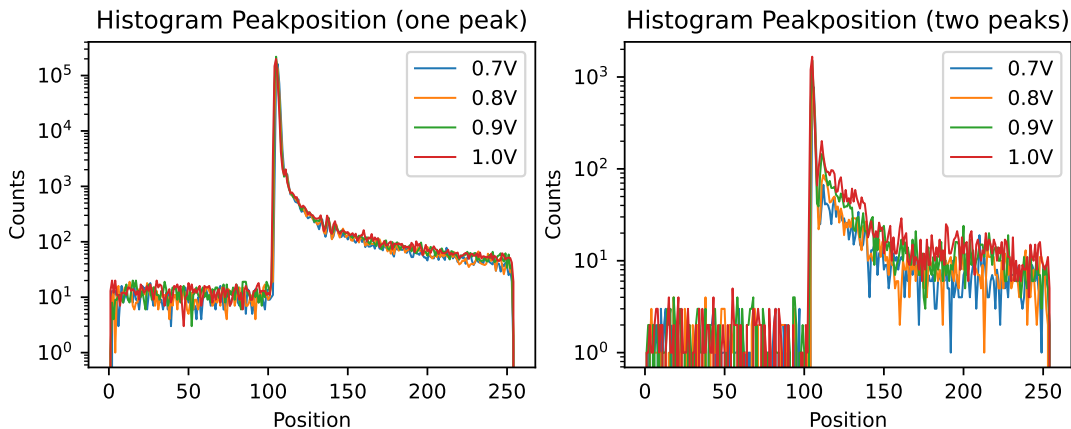


**Abbildung 11:** Einzelnes Event des PMT1 (in Aluminiumröhre verbaut) bei dem zwei Pulse detektiert wurden.

der einzelnen Pulse sich innerhalb derer befindet. Um alle benötigten Informationen zu erhalten, wurden die Events mit gefundenen Pulsen in drei Kategorien unterteilt: Events mit genau einem registrierten Puls (*one peak*), Events mit genau zwei Pulsen (*two peaks*) und Events mit drei oder mehr Pulsen (*3+ peaks*).

Die Positionen der Pulse der *one peak* und *two peaks* Kategorie wurden daraufhin separat für jede PMT/Betriebsspannung-Kombination histogrammiert. Als Position gilt dabei das Segment an dem der Puls sein Minimum erreicht. In das Histogramm der *two peaks* Events wurden beide Pulse des Events miteinbezogen. In Abbildung 12 sind die Histogramme der Messungen des PMT1 (in Aluminiumröhre verbaut), sowie die Anzahl der Events der einzelnen Kategorien, zu sehen. Die anderen PMTs sind im Anhang zu finden, für PMT200/PMT300 wurden die Messreihen ohne die Aufnahme des Trigger-Signals verwendet.

Direkt aus den Histogrammen zu erkennen ist, dass sich der Großteil der Pulse auf einen sehr kleinen Bereich ( $\sim 5$  Segmente in Breite) wiederfinden lässt. Dies wird sich als nützlich erweisen, wenn in Unterunterabschnitt 4.3.1 die Fläche der Pulse bestimmt wird. Dieser Bereich wird im folgenden „Erwarteter Pulsbereich“ genannt, und Pulse, die in diesem Bereich auftreten, „Erwartete Pulse“. Nach dem Erwarteten Pulsbereich nehmen die Pulsanzahlen für steigende Segmente rapide ab, bleiben jedoch im Durchschnitt 10 mal höher als für Segmente vor dem Erwarteten Pulsbereich. Die Eigenheit, dass die Pulsanzahlen auf eine kontinuierliche Weise abfallen, anstatt rapide wieder auf den Wert der Pulszahlen vor dem Erwarteten Bereich, lässt darauf schließen, dass es sich bei dem Großteil der Pulse hinter dem Erwarteten Bereich ebenfalls um Pulse ausgelöst durch Photonen an der Photokathode handelt, und nicht um Afterpulsing. Afterpulsing beschreibt das Auftreten von zusätzlichen Pulsen, hervorgerufen durch Gasionen, die durch die Photoelektronen positiv ionisiert wurden, und durch Ionen Feedback an der Photokathode weitere Photoelektronen erzeugen (HAMAMATSU,



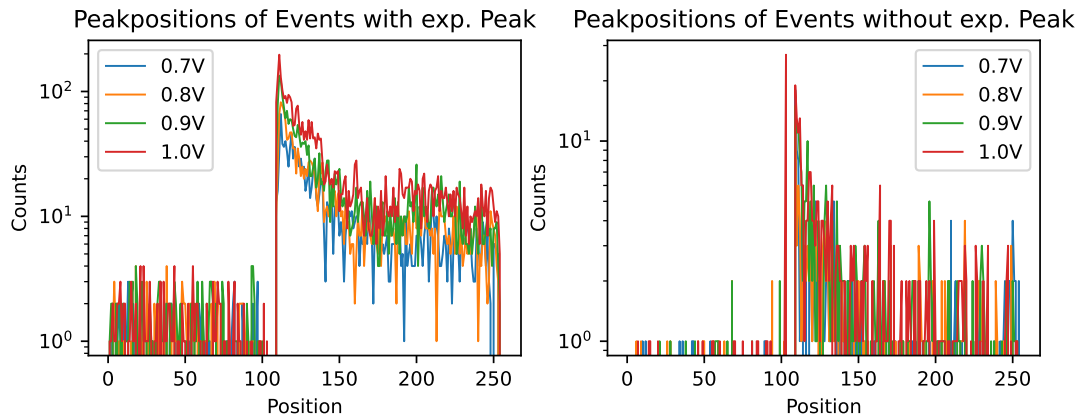
**Abbildung 12:** Histogramme der Pulspositionen des PMT1 (in Aluminiumröhre verbaut) für alle Betriebsspannungen. **(Links)** Histogramm der Position der Pulse aus Events in denen genau ein Puls registriert wurde. **(Rechts)** Histogramm der Position der Pulse aus Events in denen genau zwei Pulse registriert wurden, beide Pulse eines Events gehen in das Histogramm ein. Für die Position eines Pulses wurde das Segment, an dem er sein Minimum erreicht, gewählt.

2017). Der zeitliche Abstand für solche Afterpulse reicht von einigen 100 ns bis zu mehr als ein paar Mikro-Sekunden, und ist somit mit den in dieser Arbeit aufgenommenen 204,8 ns Events nicht nachverfolgbar.

Von weiterem Interesse sind Events, die mehr als einen Puls enthalten, und keiner der Pulse im Erwarteten Bereich liegen. Zu deren Untersuchung wurden die Events der *two peaks* Kategorie erneut in zwei Arten unterteilt. Einmal in Events mit Erwarteten Puls und einmal in Events ohne Erwarteten Puls. Beide Unterteilungen wurden erneut, einzeln histogrammiert, wobei **nur** Pulse außerhalb des Erwarteten Bereichs in die Histogramme eingingen. Für PMT1/PMT2 wurde Segment 104 bis einschließlich 108 als Erwarteter Bereich festgelegt, für den PMT200 sind es Segmente 97–101 und für den PMT300 Segmente 128–132. In Abbildung 13 sind die Histogramme des PMT1 (in Aluminiumröhre verbaut) zu sehen. Die anderen PMTs sind im Anhang zu finden. Aus den Histogrammen ist zu erkennen, dass die Pulse aus Events ohne Erwartetem Puls nur einen kleinen Teil der *two peaks* Events ausmachen. Außerdem weisen beide Histogramme immer noch die gleiche Form auf, nämlich mit ihren Maxima nahe der Grenzen des Erwarteten Pulsbereichs. Dies lässt vermuten, dass der Erwartete Pulsbereich noch größer gewählt werden könnte, da Pulse nahe dieses Bereichs das gleiche Verhalten aufweisen wie Pulse innerhalb dessen.

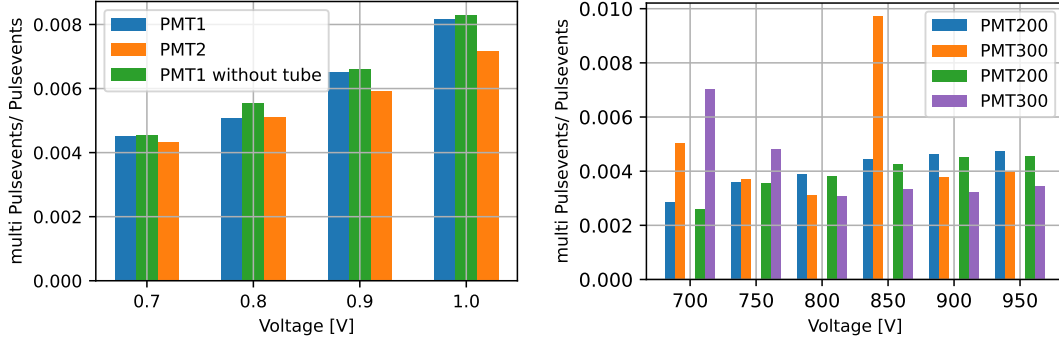
#### 4.2.2 Häufigkeit der Multipulse

Noch zu klären bleibt, wie häufig mehrere Pulse in Pulsevents auftauchen. Um dies herauszufinden, wurde für jede PMT/Betriebsspannung-Kombination die Anzahl der Events mit mehr als einem Puls durch die Anzahl Events mit mindestens einem Puls geteilt. Die resultierenden Werte wurden in Abbildung 14 geplottet. Im oberen Graphen sind die Messungen des PMT1 (Messungen mit und ohne Röhre) und des PMT2 zu sehen, im unteren Graphen sind zweimal zu sehen die Kombination PMT200 und



**Abbildung 13:** Histogramme der Pulspositionen für Events des PMT1 (in Aluminiumröhre verbaut), die genau zwei Pulse enthalten. Die Events wurden unterteilt in Events mit Erwartetem Puls (Events with exp. Peak, **Links**) und Events ohne Erwartetem Puls (Events without exp. Peak, **Rechts**). Nur Pulse außerhalb des Erwarteten Bereichs wurden in die Histogramme aufgenommen. Der Erwartete Bereich wurde für den PMT1 als Segmente 104–108 definiert.

PMT300, wobei einmal für beide PMTs die Messreihen ohne Trigger-Signal verwendet wurden und einmal für beide die Messreihen mit Trigger-Signal. Grundsätzlich fällt erstmals auf, dass die Menge an Events mit Multipulsen jeder Messung weniger als ein Prozent der Pulsevents ausmachen. Die absoluten Werte der einzelnen Kategorien sind im Anhang grafisch dargestellt. Herausstechend ist dabei die Messung des PMT300 für 850 V ohne Trigger-Signal. Der Messwert beschreibt den höchsten Wert aller Messungen, und fällt stark aus dem Schema der restlichen Werte des PMT heraus. Für die analoge Messung, bei der das Trigger-Signal mit aufgenommen wurde, ist der Wert hingegen nicht einmal halb so hoch, was darauf schließen lässt, dass es sich hier um einen statistischen Einzelfall handelt. Auch ist der PMT300 der einzige PMT, bei dem die Werte nicht für steigende Spannungen stetig zunehmen. Stattdessen liegt sein Maximum bei 700 V, gefolgt von einem rapiden Abfall, der ab 800 V in einen eher konstanten Wert übergehen zu sein scheint. Für die anderen PMTs ist noch zu sehen, dass der PMT2 für höhere Spannungswerte zunehmend weniger Multipulsevents pro Pulsevents als der PMT1 aufweist, die Werte beider PMTs jedoch sehr dicht beieinander liegen. Auch sind für den PMT1 die Werte von mit/ohne Röhre nahezu identisch, wenn auch für alle vier Messungen mit Röhre niedriger. Mit der niedrigen Messreihenanzahl lässt sich jedoch keine sichere Aussage treffen, ob die Aluminiumröhre um den PMT wirklich Multipulsevents reduziert.



**Abbildung 14:** Anzahl der Events mit mehr als einem Puls geteilt durch die Anzahl Events mit mindestens einem Puls, für alle aufgenommenen Messreihen. **(Links)** Messreihen des PMT1 (mit Aluminiumröhre und ohne Aluminiumröhre) und PMT2. **(Rechts)** Messreihen des PMT200 und PMT300, aufgeteilt in erst Messungen ohne Aufnahme des Trigger-Signals (blau, orange), gefolgt von Messungen mit Aufnahme des Trigger-Signals (grün, violett).

### 4.3 Pulsflächen und Gain

#### 4.3.1 Pulsflächen

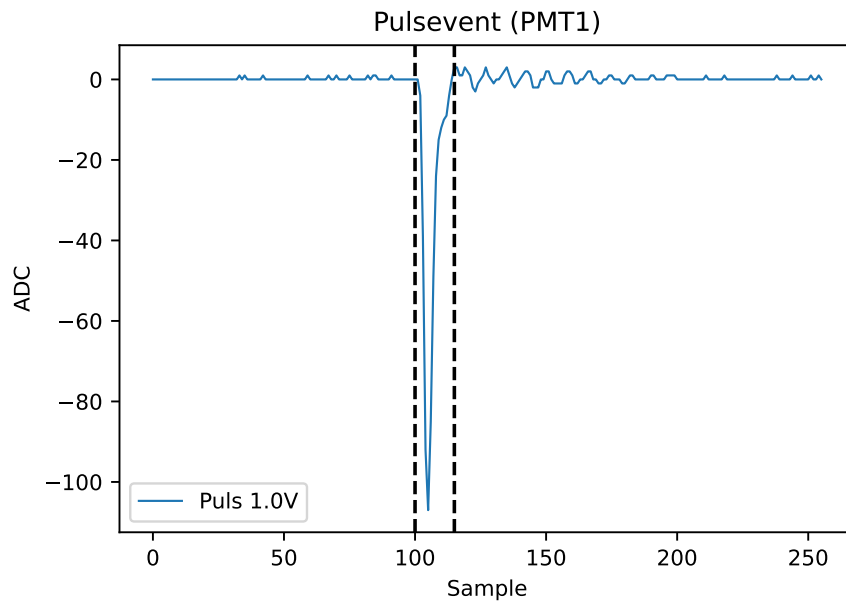
Die Fläche eines Pulses  $A_{\text{Puls}}$  ist proportional zu seiner enthaltenen Ladung. Man erhält sie durch numerische Integration über die aufgenommenen ADC-Werte  $U_{\text{ADC}}$ :

$$A_{\text{Puls}} = \int_{S_1}^{S_2} -U_{\text{ADC}}(S) dS \quad (7)$$

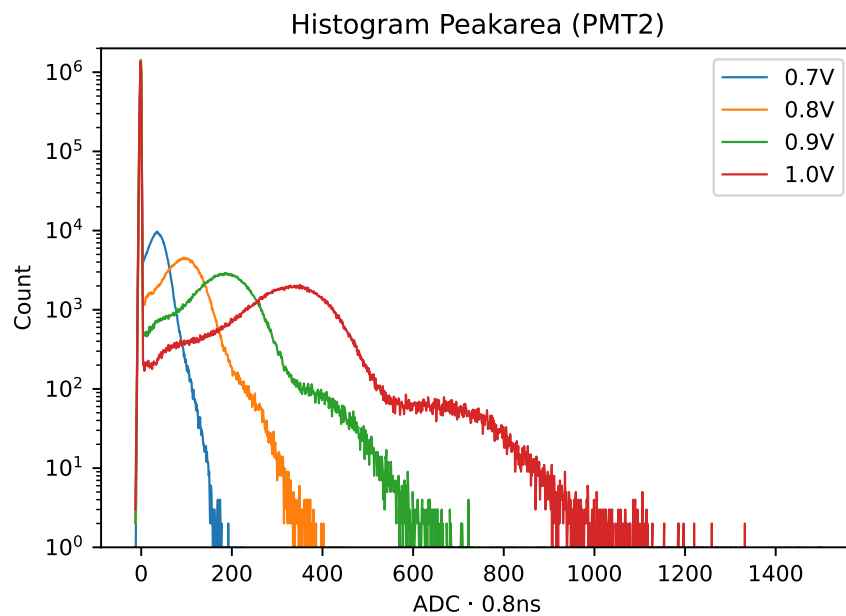
Die Segmente  $S_1$  und  $S_2$  bezeichnen dabei das Anfangs- und Endsegment über die integriert wird. Das Umdrehen des Vorzeichens ist eine Konvention, damit die Pulsfläche größtenteils positiv bleibt.

Die wahrscheinlichste Position der Pulse, sowie deren maximale Breite wurde für jeden PMT bestimmt, indem Events mit genau einem Puls im Erwarteten Bereich (siehe Unterunterabschnitt 4.2.1) untersucht wurden. Die Integrationsgrenzen wurden dementsprechend gewählt (siehe Abbildung 15). Hierbei ist anzumerken, dass die Grenzen sich nicht für verschiedene Betriebsspannungen unterscheiden, sondern lediglich für verschiedene PMT-Modelle. Die verwendeten Messreihen sind: Die Messreihe des PMT200 und des PMT300, bei denen das Trigger-Signal nicht mit aufgenommen wurde, die Messreihen des PMT1 (eine mit dem PMT in der Aluminiumröhre verbaut, eine ohne Aluminiumröhre) und die Messreihe des PMT2.

Mit den bestimmten Grenzen wurde dann über alle Events integriert und die erhaltenen Flächen anschließend histogrammiert (siehe Abbildung 16, restliche Histogramme im Anhang). Wie in Unterabschnitt 2.2 beschrieben ist im Histogramm das Pedestal und der Einzelphotonenpeak zu erkennen. Erwartungsgemäß ist das Pedestal für alle Betriebsspannungen an der gleichen Stelle und variiert kaum in Größe und Breite, da dieses lediglich vom Rauschen der Baseline bestimmt wird. Ebenfalls wie erwartet, wandert der Einzelphotonenpeak mit steigender Betriebsspannung in Richtung größerer Flächen, wobei gleichzeitig seine Breite zunimmt. Dies liegt an der steigenden Elektronenanzahl, die bei hohen Betriebsspannungen an jeder Dynode stärker variieren kann.



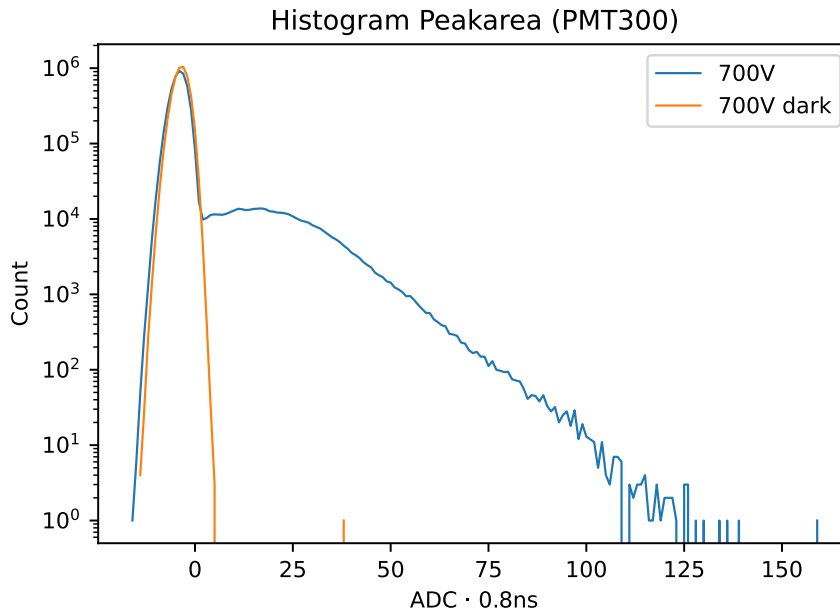
**Abbildung 15:** Pulsevent des PMT1 mit eingezeichneten Integrationsgrenzen. Für jedes Event wird über die Werte zwischen den gestrichelten Linien integriert, und die Ergebnisse anschließend histogrammiert.



**Abbildung 16:** Histogramm der Pulsflächen des PMT2. Zu erkennen ist das Pedestal und die Einzelphotonenpeaks.

### 4.3.2 Dunkelmessung des PMT300

Um sicherzustellen, dass der für die Messungen verwendete Aufbau eine ausreichende Abschirmung gegenüber Photonen von außerhalb besitzt, wurden als Test Dunkelmessungen für den PMT300 aufgenommen. Dabei wurde die optische Faser vom Ende der Aluminiumröhre entfernt und die Röhre mit einem Aluminiumdeckel verschlossen. Die so aufgenommenen Events wurden, wie in Unterunterabschnitt 4.3.1 beschrieben, histogrammiert und zum Vergleich mit der vom Laser beleuchteten Messung gemeinsam geplottet (siehe Abbildung 17, restliche im Anhang). Zu erkennen ist, dass das Histogramm der Dunkelmessung praktisch ausschließlich aus einem Pedestal besteht, welches in Position und Breite fast deckungsgleich mit dem der beleuchteten Messung ist. Daraus lässt sich schließen, dass die verwendete Abschirmungsmethode funktioniert, und so gut wie keine Photonen von außerhalb des Lasers die Messung beeinflussen.

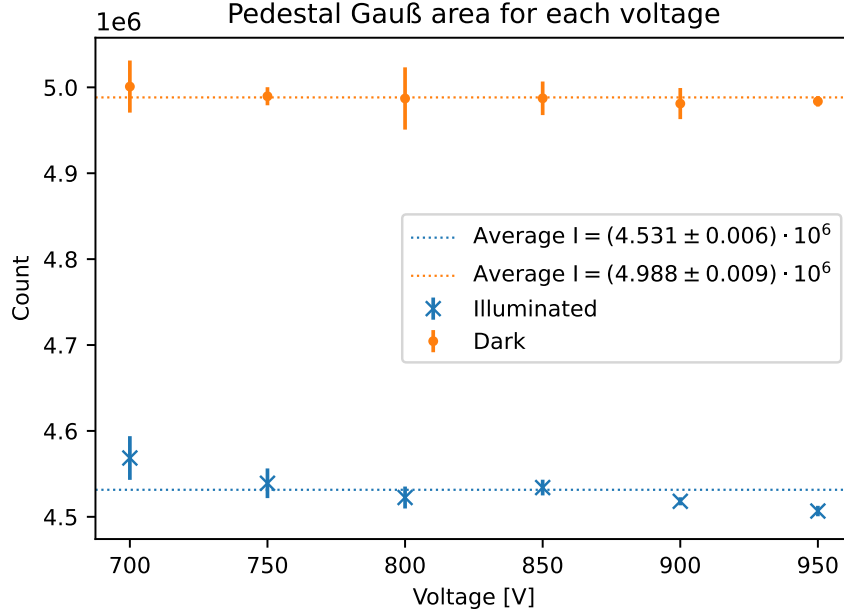


**Abbildung 17:** (Blau) Pulsflächenhistogramm des PMT300 bei 700 V Betriebsspannung. (Orange) Pulsflächenhistogramm der Dunkelmessung des PMT300 bei 700 V Betriebsspannung, bestehend ausschließlich aus dem Pedestal und einem Dark Count.

Für einen Vergleichswert, wie viele Events in den jeweiligen Pedestals enthalten sind, wurde eine Gauß-Verteilung der Form

$$g(x) = \frac{I}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

an die Pedestals gefittet. Hierbei bilden die Parameter den Erwartungswert  $\mu$ , die Standardabweichung  $\sigma$  und die Fläche des Gaußes  $I$  ab. Die Fläche  $I$  ist mit der Anzahl der Events im Pedestal gleichbedeutend. Die Fits der Dunkelmessung und die Fits der beleuchteten Messung sind im Anhang zu finden. Für die bestimmten Eventmengen wurde für jeden Messaufbau das arithmetische Mittel über alle Betriebsspannungen bestimmt. In Abbildung 18 wurden alle Gauß-Flächen mit zugehörigem, aus dem Fit bestimmten, Fehler, über die Betriebsspannung aufgezeichnet. Im Durchschnitt



**Abbildung 18:** Flächen der Pedestal Gaußfits der beleuchteten Messung und Dunkelmessung des PMT300 für alle Betriebsspannungen. Im Durchschnitt enthält das Pedestal einer beleuchteten Messung  $4,5 \cdot 10^5$  weniger Events.

enthält das Pedestal einer beleuchteten Messung  $4,5 \cdot 10^5$  weniger Events, als das einer Dunkelmessung.

### 4.3.3 Fit des Einzelphotonenspektrums

Mit den in Unterunterabschnitt 4.3.1 erstellten Pulsflächenhistogrammen gilt es nun den Einzelphotonenpeak zu bestimmen, um aus dessen Parametern den Gain (siehe Unterunterabschnitt 4.3.4) und die relative Detektoreffizienz (siehe Unterabschnitt 4.5) der jeweiligen PMTs zu ermitteln. Hierfür wird über alle Werte des Pulsflächenhistogrammes gefittet.

Für den Fit wurde das Python-Paket *spefit* verwendet (Watson, 2023). Das Paket findet für gegebene Spektren die dazugehörige Wahrscheinlichkeitsdichte (PDF), welche sich zusammensetzt aus einer Summe von Gauß-Verteilungen, deren Flächenwerte einer Poisson-Verteilung folgen (siehe Unterunterabschnitt 2.2.1):

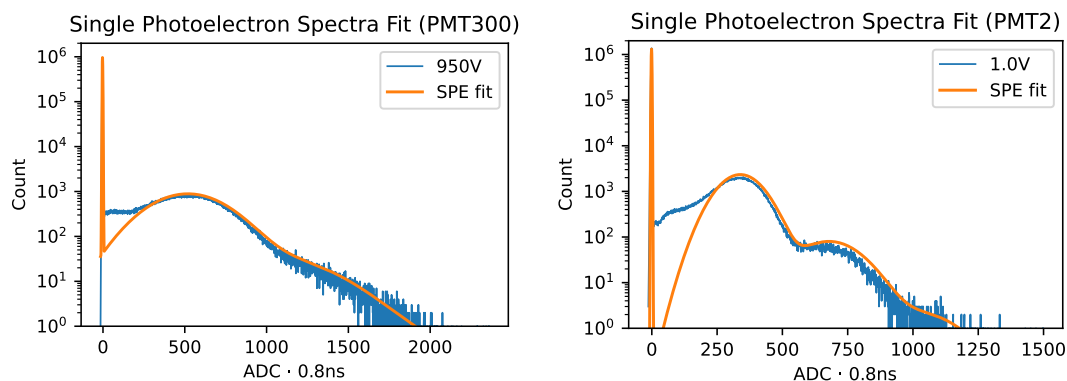
$$\text{PDF}(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{P_{\lambda}(k)}{\sqrt{2\pi}(k \cdot \sigma^2 + \sigma_0^2)} \exp\left(-\frac{(x - (k \cdot \mu + \mu_0))^2}{2(k \cdot \sigma^2 + \sigma_0^2)}\right) \quad (9)$$

Die einzelnen Terme dieser PDF beschreiben dabei unterschiedliche Teile des Spektrums. Für ein Einzelphotonenspektrum sind Pedestal und Einzelphotonenpeak wichtig, dementsprechend kann Gleichung 9 folgendermaßen betrachtet werden:

$$\text{PDF}(x) = \frac{P_{\lambda}(0)}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \exp\left(-\frac{(x - \mu_0)^2}{2\sigma_0^2}\right) + \frac{P_{\lambda}(1)}{\sqrt{2\pi}(\sigma^2 + \sigma_0^2)} \exp\left(-\frac{(x - (\mu + \mu_0))^2}{2(\sigma^2 + \sigma_0^2)}\right) + O(k > 1) \quad (10)$$



Der erste Term beschreibt hierbei die Gauß-Verteilung des Pedestals, mit seinem Maximum  $\mu_0$  und seiner Standardabweichung  $\sigma_0$ .  $P_\lambda$  ist dabei die Poisson-Wahrscheinlichkeit, für ein Event mit  $k$  Photonen, bei einer mittleren Photonenzahl  $\lambda$  pro Event. Der Einzelphotonenpeak, mit seinem Maximum  $\mu$  und seiner Standardabweichung  $\sigma$  wird durch den zweiten Term beschrieben. Im dritten Term sind alle Ordnungen von  $k > 1$  zusammengefasst. Da bei einem Einzelphotonenspektrum die Photonenbeleuchtung so gewählt wird, dass der Einzelphotonenpeak dominiert, kann  $O(k > 1)$  bei den in dieser Arbeit betrachteten Spektren vernachlässigt werden. Das Fit-Paket besitzt dafür einen Cut-off, der die Summe automatisch abbricht, sobald die Terme einen gewissen Wahrscheinlichkeitsbeitrag unterschreiten. Multipliziert man die aus dem Fit erhaltene PDF mit der Eventanzahl von  $5 \cdot 10^6$ , so erhält man den Fit für das Pulsflächenhistogramm. In Abbildung 19 sind zwei Einzelphotonenspektrum-Fits zu sehen. Einmal für den PMT300 bei einer Betriebsspannung von 950 V, und einmal für den PMT2 bei einer Betriebsspannung von 1,0 V (die restlichen Fits sind im Anhang zu finden). Für den PMT300 konnte der Einzelphotonenpeak mitsamt seiner Breite ohne großes Beschränken der Parameter bestimmt werden. Für die anderen PMTs konnte der Peak nur durch Einstellen eines Mindestwerts für  $\mu$  an die richtige Stelle „gezwungen“ werden, wobei die Breite  $\sigma$  gleichzeitig durch einen Maximalwert beschränkt werden musste. Dies führt dazu, dass sich die Fitkurve im hinteren Teil des Histogramms von den Messwerten abhebt, wie im Fit des PMT2 in Abbildung 19 zu sehen.



**Abbildung 19: (Links)** Pulsflächenhistogramm des PMT300 mit zugehörigen Einzelphotonenspektrum-Fit (SPE), bei 950 V Betriebsspannung. **(Rechts)** Pulsflächenhistogramm des PMT2 mit zugehörigen Einzelphotonenspektrum-Fit (SPE), bei 1,0 V Betriebsspannung. Der Bereich zwischen Pedestal und Einzelphotonenpeak weicht stark von den Messwerten ab.

Von weiterem Interesse ist der Bereich zwischen Pedestal und Einzelphotonenpeak. Für Messwerte mit Betriebsspannungen von 800 V bzw. 0,8 V und höher findet sich dort eine Vielzahl an Events, die den Bereich „auffüllen“. Ihre Existenz lässt auf weitere auftretende Effekte schließen, die von der Fit-Gleichung nicht beschrieben werden. Diese dürften auch der Grund sein, weshalb der Fit für höhere Betriebsspannungen schlechter an die Messdaten angepasst werden kann. Ohne eine geeignete Modellierung lässt sich nur schwer sagen, was in diesem Zwischenbereich vorgeht. Ein möglicher Effekt könnte sein, dass Elektronen an der ersten Dynode von Photonen ausgelöst wurden, anstatt wie gewöhnlich an der Photokathode. Dies würde bedeuten, dass bei solch einem Event

der Verstärkungsfaktor einer Dynode verloren gehen würde, was zu dem auftretenden Ladungsverlust führen könnte. Eine Anwendung, die solche Effekte miteinbezieht, wäre für zukünftige Projekte zur Vermessung von PMTs von großem Nutzen.

#### 4.3.4 Gain

Mit den in Unterunterabschnitt 4.3.3 bestimmten Maxima von Pedestal und Einzelphotonenpeak lässt sich der Gain des PMT bei der jeweiligen Betriebsspannung berechnen. Um aus der Fläche eines Pulses seine Ladung zu bestimmen, müssen lediglich die in ihm enthaltenen ADC-Werte mit dem in Gleichung 6 bestimmten Umrechnungsfaktor  $V_{\text{ADC} \rightarrow \text{mV}}^{\pm 200}$  in mV umgerechnet, und durch den Lastwiderstand  $R = 50 \Omega$  geteilt werden:

$$Q_{\text{Puls}} = \frac{V_{\text{ADC} \rightarrow \text{mV}}^{\pm 200} \cdot A_{\text{Puls}}}{R} \quad (11)$$

Um den Gain zu berechnen, werden die Flächenwerte über Gleichung 11 in die zugehörige Ladung umgewandelt und daraufhin durch den Faktor 10 geteilt, um die Verstärkung des Verstärkers herauszurechnen. Mit Gleichung 3 kann dann der Gain berechnet werden. In einer Gleichung ausgedrückt bedeutet das:

$$\mu_{\text{Gain}} = \frac{1}{10} \frac{V_{\text{ADC} \rightarrow \text{mV}}^{\pm 200} \cdot (\mu - \mu_0)}{R \cdot e} \quad (12)$$

Folgende Gain-Werte wurden bestimmt:

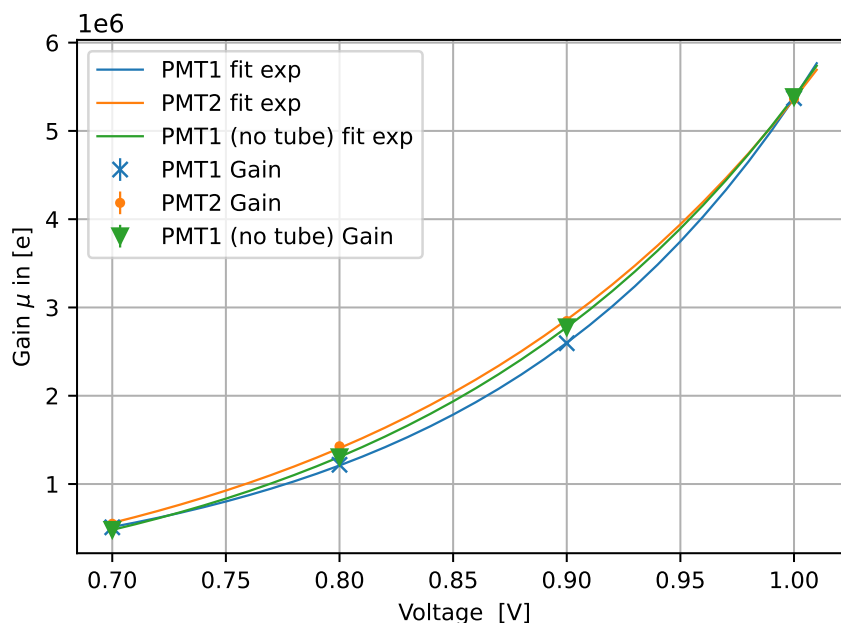
	0,7 V	0,8 V	0,9 V	1,0 V
PMT1	$0,51 \cdot 10^6$	$1,22 \cdot 10^6$	$2,59 \cdot 10^6$	$5,37 \cdot 10^6$
PMT1 (ohne Röhre)	$0,46 \cdot 10^6$	$1,30 \cdot 10^6$	$2,78 \cdot 10^6$	$5,38 \cdot 10^6$
PMT2	$0,55 \cdot 10^6$	$1,43 \cdot 10^6$	$2,85 \cdot 10^6$	$5,36 \cdot 10^6$
Datenblatt	$0,15 \cdot 10^6$	$0,40 \cdot 10^6$	$0,90 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^6$

**Tabelle 1:** Berechnete Gain-Werte der Messreihen von PMT1 (eine Messung mit abschirmender Aluminiumröhre und eine ohne) und PMT2. In der Zeile Datenblatt sind die Werte des „Typical gain“ gegeben (HAMAMATSU, 2023). Die gemessenen Werte sind im Durchschnitt 3 mal größer.

	700 V	750 V	800 V	850 V	900 V	950 V
PMT200	$0,21 \cdot 10^6$	$0,62 \cdot 10^6$	$1,25 \cdot 10^6$	$2,35 \cdot 10^6$	$3,92 \cdot 10^6$	$6,44 \cdot 10^6$
PMT300	$0,39 \cdot 10^6$	$0,73 \cdot 10^6$	$1,34 \cdot 10^6$	$2,34 \cdot 10^6$	$4,54 \cdot 10^6$	$8,23 \cdot 10^6$
Datenblatt	$0,10 \cdot 10^6$	$0,20 \cdot 10^6$	$0,40 \cdot 10^6$	$0,70 \cdot 10^6$	$1,25 \cdot 10^6$	$2,0 \cdot 10^6$

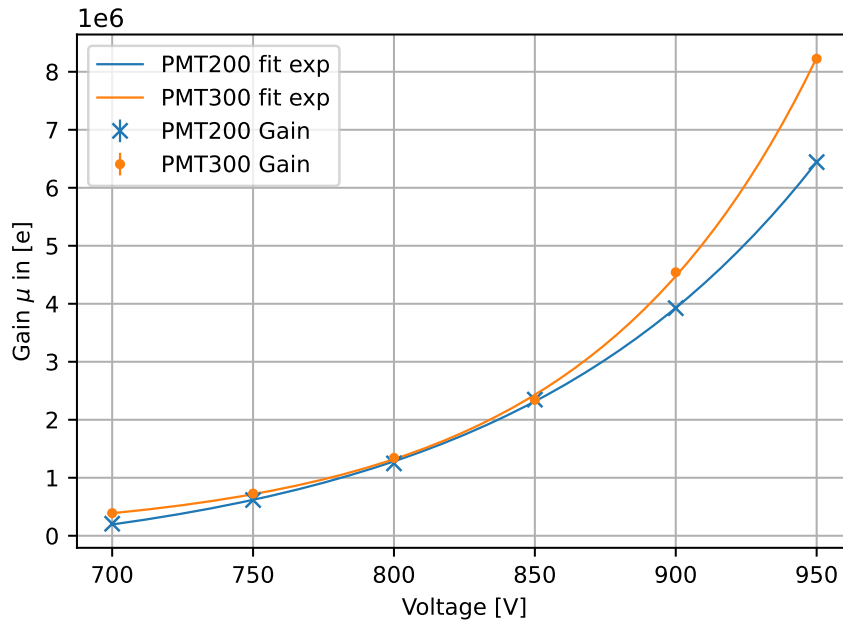
**Tabelle 2:** Berechnete Gain-Werte der Messreihen von PMT200 und PMT300. In der Zeile Datenblatt sind die Werte des „Typical gain“ gegeben (HAMAMATSU, 2019). Die gemessenen Werte sind im Durchschnitt 3 bis 4 mal größer.

In Abbildung 20 sind die Gain-Werte für PMT1 (mit und ohne Röhre) und PMT2 über die jeweilige Betriebsspannung aufgetragen. Der Gain steigt exponentiell mit der Betriebsspannung, was durch den Fit einer Exponentialfunktion an die Daten veranschaulicht wird. Für Spannungen von 0,7 V und 1,0 V liegen die Werte aller drei Messreihen so gut wie aufeinander, und für 0,8 V und 0,9 V gibt es nur verhältnismäßig geringe Abweichungen. Daraus lässt sich schließen, dass beide PMTs in etwa den gleichen Gain besitzen, was vorteilhaft für die angestrebte Verwendung in der Intensitätsinterferometrie ist. Weiterhin ist anzumerken, dass die gemessenen Gain-Werte in etwa um einen Faktor  $\sim 3$  größer sind als die im Datenblatt als „Typical gain“ angegebenen Werte (HAMAMATSU, 2023).



**Abbildung 20:** Berechnete Gain-Werte für den PMT1 (einmal mit Aluminiumröhre, und einmal ohne) und den PMT2 für alle Betriebsspannungen. Der Gain steigt exponentiell mit der angelegten Spannung. Die Fehlerbalken sind zu klein, um erkennbar zu sein.

Analog sind in Abbildung 21 die Gain-Werte für den PMT200 und PMT300 zu sehen. Auch hier ist ein exponentieller Verlauf zu erkennen. Während jedoch die ersten vier Messwerte für beide PMTs dicht bei einander liegen, steigt der Gain des PMT300 für höhere Spannungen schneller an als der des PMT200. Auch hier sind die gemessenen Werte etwa um einen Faktor 3 bis 4 mal größer als der „Typical gain“ des Datenblattes (HAMAMATSU, 2019).



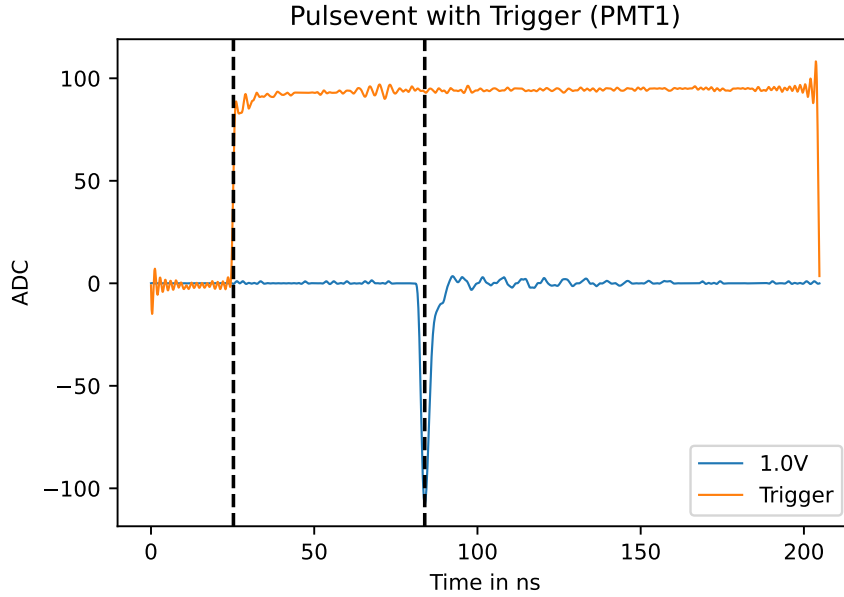
**Abbildung 21:** Berechnete Gain-Werte für den PMT200 und den PMT300 für alle Betriebsspannungen. Der Gain steigt exponentiell mit der angelegten Spannung. Die Fehlerbalken sind zu klein, um erkennbar zu sein.

Es ist leider nicht genauer spezifiziert, unter welchen Bedingungen der „Typical gain“ der PMTs von HAMAMATSU bestimmt wird, was es schwierig macht die Ursache dieser hohen Gain-Werte zu bestimmen. Zumindest für den PMT200 und PMT300 konnte aus einem mitgelieferten Testprotokoll entnommen werden, dass diese expliziten PMTs über eine höhere Anoden Lumineszenz verfügen, als im Datenblatt angegeben (siehe HAMAMATSU, 2019), was die erhöhten Gain-Werte erklären könnte.

#### 4.4 Zeitauflösung

Wie in Unterabschnitt 2.3 beschrieben, lässt sich der Transit Time Spread (T. T. S.) durch das Histogrammieren der Elektronentransitzeit einzelner Events berechnen. Die Elektronentransitzeit lässt sich jedoch nicht aus den Aufnahmen der Events entnehmen. Was sich allerdings aus den Events, bei denen das Trigger-Signal mit aufgenommen wurde, entnehmen lässt, ist der Zeitabschnitt, beginnend mit dem Aussenden des Laserpulses bis zum Minimum des Spannungspulses, welcher proportional zur Elektronentransitzeit ausfällt. Ein Histogramm dieser Zeitspanne, im Folgenden Trigger-zu-Puls-Zeit genannt, besitzt somit den gleichen FWHM. Dementsprechend kann damit der T. T. S. bestimmt werden. In Abbildung 22 ist der Zeitabschnitt visualisiert.

Der T. T. S. wurde für alle Messreihen der PMTs, bei denen das Trigger-Signal mit aufgenommen wurde, bestimmt. Hierfür wurden für jede Messung  $10^5$  Events mit genau einem Puls herausgesucht. Auf die Pulse und zugehörigen Trigger-Signale wurde die Python-Funktion `scipy.signal.resample` angewendet. Die Funktion erzeugt, durch Verwendung von Fourier Methoden, zusätzliche Datenpunkte zwischen den eigentlichen Messwerten. Die Events wurden auf die 16-fache Segmentanzahl „geresampled“, womit zwischen zwei Segmenten nun 50 ps anstatt 0,8 ns liegen. Anzumerken ist, dass durch die



**Abbildung 22:** Zufälliges Pulsevent mit zugehörigem Trigger-Signal des PMT1 bei 1,0 V Betriebsspannung. Der Zeitabschnitt zwischen den schwarzen Linien wurde verwendet um den T. T. S. des PMT zu bestimmen. Die erste schwarze Linie ist der Zeitpunkt, an dem das Trigger-Signal 50 ADC erreicht, die zweite Linie ist am Minimum des Spannungspulses positioniert. Die Events wurden durch eine Python-Funktion bearbeitet, was zusätzliche Schwingungsphänomene erzeugt.

Funktion zusätzliche Artefakte, in Form von Schwingungen, in die Daten eingebracht werden, welche sich allerdings aufgrund ihrer Position nicht negativ auf die Auswertung auswirken.

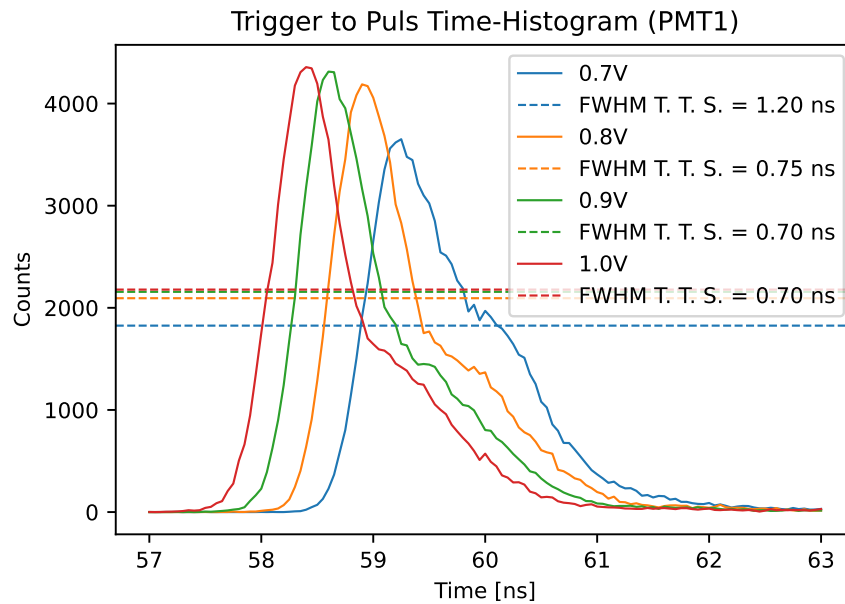
Konkret wurde die Trigger-zu-Puls-Zeit, als der Zeitunterschied zwischen dem Datenpunkt, an dem das Trigger-Signal zum ersten mal die 50 ADC Marke erreicht, und dem Datenpunkt, an dem der Puls sein Minimum hat, festgelegt. Die gewonnenen Zeitabschnitte werden histogrammiert, und der T. T. S. aus der Halbwertsbreite des entstehenden Peaks bestimmt. In Abbildung 23 sind die Histogramme für den PMT1 zu sehen, sowie in Abbildung 24 die des PMT300. Die anderen PMTs sind im Anhang zu finden. Folgende T. T. S. Zeiten konnten bestimmt werden:

	0,7 V	0,8 V	0,9 V	1,0 V
PMT1	1,20 ns	0,75 ns	0,70 ns	0,70 ns
PMT2	0,65 ns	0,70 ns	0,70 ns	0,65 ns

**Tabelle 3:** Werte des Transit Time Spread (T. T. S.) von PMT1 und PMT2 für alle Betriebsspannungen. Laut Datenblatt sollte der T. T. S. bei 0,19 ns liegen (HAMAMAT-SU, 2023).

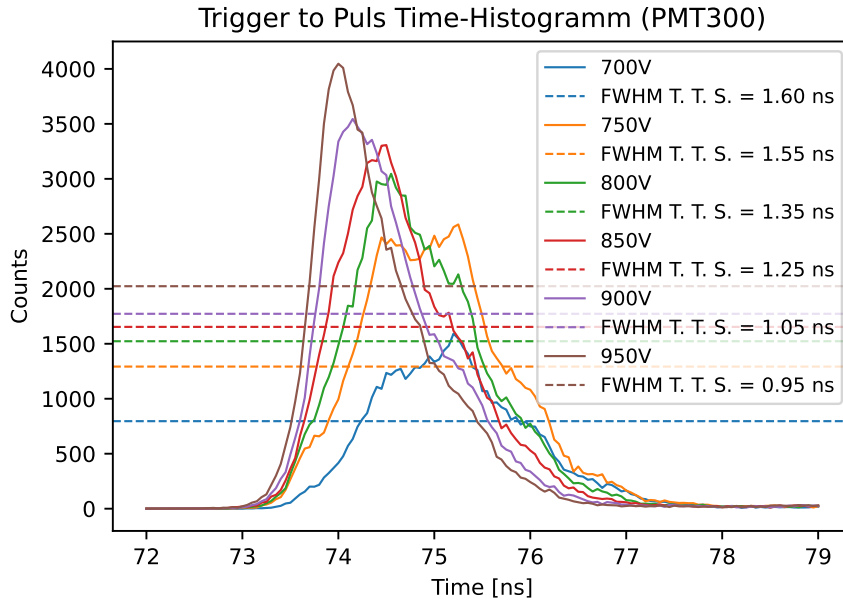
	700 V	750 V	800 V	850 V	900 V	950 V
PMT200	1,10 ns	1,15 ns	0,90 ns	0,85 ns	0,75 ns	0,70 ns
PMT300	1,60 ns	1,55 ns	1,35 ns	1,25 ns	1,05 ns	0,95 ns

**Tabelle 4:** Werte des Transit Time Spread (T. T. S.) von PMT200 und PMT300 für alle Betriebsspannungen. Laut Datenblatt sollte der T. T. S. bei 0,27 ns liegen (HAMAMATSU, 2019).



**Abbildung 23:** Histogramm der Trigger-zu-Puls-Zeiten des PMT1. Die gestrichelten Linien sind auf halber Höhe ihrer farblich zugehörigen Peaks. Der vom Graphen eingeschlossene Zeitabschnitt beschreibt den T. T. S. der jeweiligen Betriebsspannung. Der zugehörige Zahlenwert ist in der Legende gegeben.

Der im den Histogramm entstehende Peak wandert für steigende Betriebsspannungen immer weiter in Richtung niedrigerer Zeiten. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da bei steigender Spannung die Elektronen stärker beschleunigt werden, und folglich schneller an der Anode zum Auslesen ankommen. Was sich für verschiedene Betriebsspannungen jedoch nicht verändern sollte, ist die Breite des Peaks. In den aufgenommenen Messungen des PMT1, PMT200 und PMT300 nimmt der FWHM der Peaks mit sinkender Betriebsspannung zu. Auch die Form des Peaks wird besonders für den PMT300 für niedrige Betriebsspannungen fortlaufend verzerrter. Für den PMT300 könnte der Grund dafür beim Verstärker liegen, der für die Messreihen mit Trigger-Signal verwendet wurde. Die in diesem Unterabschnitt verwendeten Messreihen des PMT300 wurden an einem anderen Tag als die restlichen aufgenommen. Einige Zeit nach dem Abschließen der Messarbeiten stellte sich heraus, dass einer der modifizierten TA1000B-200 Verstärker in seiner Bandbreite defekt ist, ob dieser für die Messungen des PMT300 verwendet wurde lässt sich leider im Nachhinein nicht mit Sicherheit sagen. Für den PMT1 tritt



**Abbildung 24:** Histogramm der Trigger-zu-Puls-Zeiten des PMT300. Die gestrichelten Linien sind auf halber Höhe ihrer farblich zugehörigen Peaks. Der vom Graphen eingeschlossene Zeitabschnitt beschreibt den T. T. S. der jeweiligen Betriebsspannung. Der zugehörige Zahlenwert ist in der Legende gegeben.

eine wesentliche Abweichung nur für die Messung bei 0,7 V Betriebsspannung auf, was nahelegt, dass es sich hier nur um einen statistischen Einzelfall handelt.

Betrachtet man nun die T. T. S. Werte aller PMTs für ihre höchste Betriebsspannung, und vergleicht diese mit dem im jeweiligen Datenblatt gegebenen Wert, so stellt man fest, dass die gemessenen Werte etwa 2,5 bis 3,5 mal so groß sind. Für PMT1/PMT2 ist der T. T. S. laut Datenblatt 0,19 ns (HAMAMATSU, 2023) und für PMT200/PMT300 0,27 ns (HAMAMATSU, 2019). Lässt man den PMT300 außen vor, liegen die niedrigsten T. T. S. Werte aller PMTs bei  $\sim 0,70$  ns. Dadurch, dass die drei PMTs die gleiche Zeit aufweisen, könnte der Grund für die zu großen Zeiten darin liegen, dass der Jitter des Lasers, also die zeitliche Varianz des Laserpulses zum Trigger-Signal für einzelne Photonen wesentlich breiter ist als die im Handbuch angegebenen 2,4 ps (NKT Photonics, 2023). Eine zukünftige Untersuchung des Timing Jitters könnte weitere Erkenntnisse liefern, ob dies der Fall ist. Ein weiterer Faktor der mit in die hohen Werte hineinspielt, ist die Tatsache, dass die Messwerte nur mit einer Samplingrate von 0,8 ns aufgenommen wurden. Das resampling ist ein Versuch die Position des Pulses genauer zu bestimmen, jedoch kann es vorkommen, dass das erzeugte Pulsminimum sich um Zehntelnanosekunden vom „wahren“ Pulsminimum unterscheidet, was im Histogramm zu einem ausgeschmierten Peak führt.

#### 4.5 Relative Detektoreffizienz

Wie bereits in Unterabschnitt 2.4 beschrieben, wird zur Berechnung der relativen Detektoreffizienz (DE) der Anteil an Events der Messung benötigt, die Photonen enthalten. Der einfachste Weg diesen zu berechnen, ist über sein Gegenereignis, also

dem Anteil der Events ohne Photonen in einer Messung. Da die Anzahl an Photonen in einem Event Poisson-Verteilt ist, lässt sich der Anteil an Events mit Photonen  $n$  wie folgt berechnen:

$$n = 1 - P_\lambda(0) = 1 - e^{-\lambda} \quad (13)$$

Wobei die mittlere Anzahl an Photonen  $\lambda$  bereits als Parameter des Fits des Einzelphotonenspektrums in Unterunterabschnitt 4.3.3 für alle PMT/Betriebsspannung-Kombinationen bestimmt wurde. Um aus Gleichung 13 die relative DE zu berechnen, muss diese noch durch den Eventanteil einer Messung einheitlich normiert werden. Gewählt wurde die Messung des PMT1 (in Aluminiumröhre verbaut) bei 0,9 V Betriebsspannung. Diese wurde gewählt, da der PMT1 der einzige PMT des H15461-40 Modells ist, für den zwei Messreihen existieren, die auch noch einen Unterschied in ihrem Messaufbau aufweisen. Die Betriebsspannung von 0,9 V wird dabei als wahrscheinlichste Operationsspannung für spätere Messungen mit dem PMT angesehen. Dementsprechend wurde die relative Detektoreffizienz  $DE_{\text{PMT},V}$  eines PMT bei Betriebsspannung  $V$  berechnet als:

$$DE_{\text{PMT},V} = \frac{n_{\text{PMT},V}}{n_{\text{PMT1},0,9V}} \quad (14)$$

Folgende Werte wurden für die relative DE bestimmt (für PMT200 und PMT300 wurden die Messreihen ohne Trigger-Signal verwendet):

	0,7 V	0,8 V	0,9 V	1,0 V
PMT1	1,01	1,01	1,00	0,98
PMT1 (ohne Röhre)	0,98	0,99	0,98	0,96
PMT2	0,98	0,97	0,95	0,95

**Tabelle 5:** Berechnete Werte der relativen DE für PMT1 und PMT2. Zur Normierung der Werte wurde die Messung des PMT1 in Röhre, bei einer Betriebsspannung von 0,9 V verwendet. Die PMTs haben eine QE von  $\sim 34\%$  für die verwendete Wellenlänge (HAMAMATSU, 2023).

	700 V	750 V	800 V	850 V	900 V	950 V
PMT200	1,51	1,23	1,16	1,11	1,09	1,07
PMT300	0,99	1,04	1,06	1,05	1,03	1,01

**Tabelle 6:** Berechnete Werte der relativen DE für PMT200 (QE = 40%) und PMT300 (QE = 39%) (HAMAMATSU, 2019). Zur Normierung der Werte wurde die Messung des PMT1 in Röhre, bei einer Betriebsspannung von 0,9 V verwendet. Die angegebene QE ist für die verwendete Wellenlänge von 404 nm.

Direkt zu erkennen ist, dass PMT200 und PMT300 eine höhere Detektoreffizienz als PMT1 und PMT2 besitzen. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da das Modell H15461-40 eine niedrigere QE für die verwendete Photonenwellenlänge von 404 nm besitzt. Die Werte des PMT200 sind allerdings deutlich höher als die des PMT300,

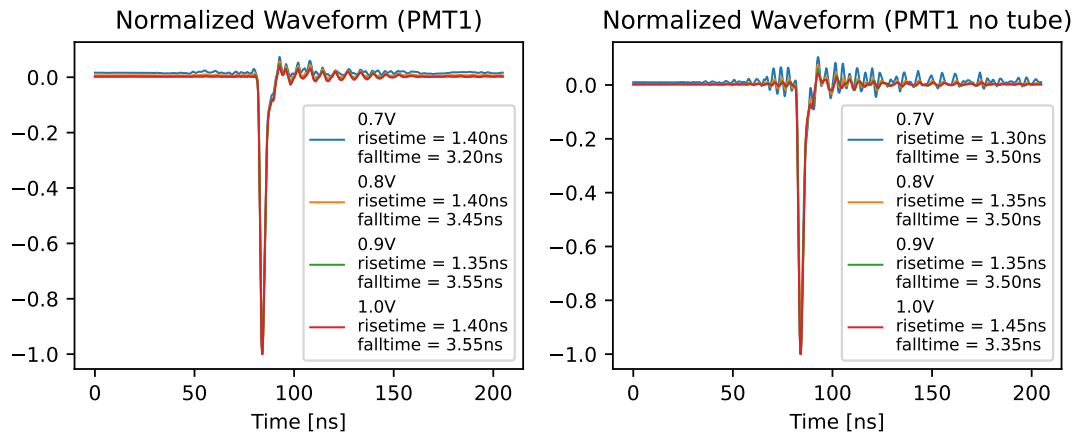


wobei der Unterschied in der QE nur 1% beträgt. Grund hierfür liegt im Fit der Einzelphotonenspektren des PMT200, da Dieser die Messwerte des Pedestals nicht vollständig abdeckt. Dementsprechend fällt der Anteil an Events mit Photonen höher aus, was nach Gleichung 14 zu einer höheren relativen DE führt. Auf der Kehrseite sind die Werte für den PMT2 und die Messung des PMT1 ohne Röhre durchgehend unter eins. Besonders für die Messung des PMT1 ohne Röhre ist dies unerwartet, da das Einbauen des PMT in eine Aluminiumröhre diesen vor Streuphotonen in der Umgebung abschirmen sollte. Dementsprechend sollten weniger Photonen in den Messungen mit Röhre enthalten sein, was wiederum zu einer höheren relativen DE für die Messungen ohne Röhre führen sollte. Die statistischen Fehler der Messwerte liegen bei etwa 0,2% und sind dementsprechend zu klein um den Unterschied der Werte zu erklären. Folglich sind in den Messungen tatsächlich unterschiedliche Photonenmengen enthalten, was daran liegt, dass der Laser in der Menge an Photonen die er aussendet variiert. Wie stark diese Varianz ausfällt ist leider nicht bekannt. Die Tendenz, dass die DE mit sinkender Betriebsspannung zunimmt, könnte ebenfalls im Fit der Einzelphotonenspektren liegen. Mit sinkender Betriebsspannung überlappt der Einzelphotonenpeak immer mehr mit dem Pedestal, wodurch der Fit immer mehr Events Photonen zuschreibt, obwohl sie keine enthalten, und damit die mittlere Anzahl an Photonen pro Event zunimmt.

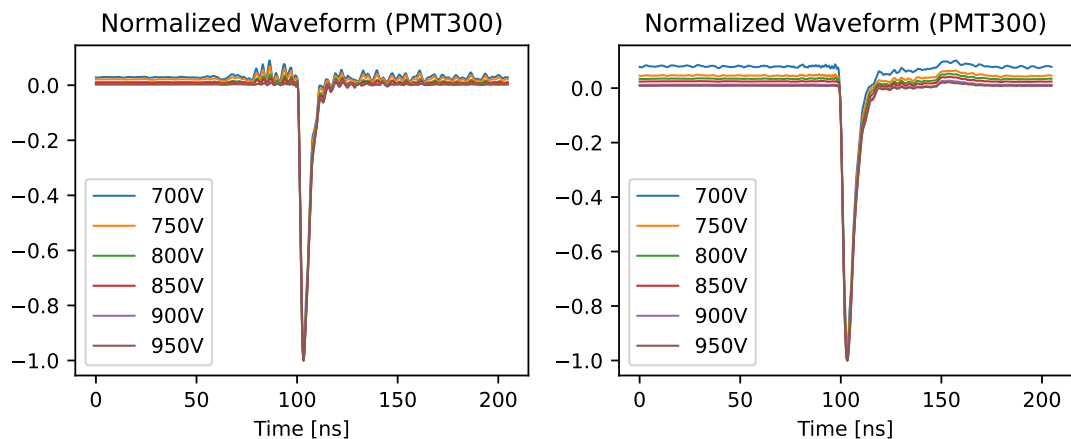
## 4.6 Normierte Waveform der PMTs

Als letzten Teil der Auswertung wird die normierte Waveform der jeweiligen PMTs für alle Betriebsspannungen betrachtet. Die normierte Waveform beschreibt die mittlere Pulsform eines einzelnen Spannungspulses mit normierter Höhe. Mit ihr lässt sich die mittlere Rise- und Falltime der PMT-Pulse einfach bestimmen. Weiterhin enthält sie wichtige Informationen für Korrelationsmessungen, die in der Intensitätsinterferometrie verwendet werden (Vogel, 2020).

Zur Erstellung der normierten Waveformen werden die modifizierten Pulsevents aus Unterabschnitt 4.4 verwendet, sowie analog weitere erstellt für die Messreihen ohne aufgenommenes Trigger-Signal, welche nicht in Unterabschnitt 4.4 behandelt wurden. Die Daten jedes Events wurden daraufhin in der Horizontale verschoben, sodass sich das Pulsminimum für alle Pulse eines PMTs einheitlich an einer Position befindet. Weiterhin wurden die Segmente der einzelnen Events mit dem Minimum des jeweils im Event enthaltenen Pulses normiert. Dies lässt die Pulsform intakt, und normiert die Höhe bzw. Tiefe aller Pulse einheitlich auf  $-1$ . Mit den normierten Pulsen wurde, für jede PMT/Betriebsspannung-Kombination, die normierte Waveform bestimmt, indem der Mittelwert jedes Segments einzeln berechnet wurde. In Abbildung 25 sind die Ergebnisse der beiden Messungen des PMT1 zu sehen, und in Abbildung 26 die des PMT300. Die restlichen normierten Waveformen sind im Anhang zu finden.



**Abbildung 25:** Normierte Waveformen der Messungen des PMT1, zusammen mit den jeweiligen Rise- und Falltimes in der Legende. **(Links)** Messungen mit dem PMT1 eingebaut in die Aluminiumröhre. **(Rechts)** Messungen des PMT1 ohne abschirmende Aluminiumröhre.



**Abbildung 26:** Normierte Waveformen der Messungen des PMT300. **(Links)** Messungen bei denen das Trigger-Signal **nicht** mit aufgenommen wurde. **(Rechts)** Messungen bei denen das Trigger-Signal mit aufgenommen wurde.

Besonders fällt die Waveform des PMT1 ohne Aluminiumröhre bei 0,7 V auf. Sie enthält ein hochfrequentes Artefakt, welches sowohl direkt vor, als auch direkt nach dem Puls auftritt. Für steigende Betriebsspannung nimmt das Artefakt in seiner Amplitude ab. Solche Störungen werden im Allgemeinen als Ringing bezeichnet (HAMAMATSU, 2017). Für die Messungen des PMT1 in der Aluminiumröhre scheint das hochfrequente, beidseitige Ringing fast gänzlich verschwunden zu sein. An seiner Stelle ist ein Ringing mit niedrigerer Frequenz zu finden, welches ausschließlich am Ende des Pulses auftritt, und zudem ähnlich stark für alle Betriebsspannungen ausfällt. Da dieses weder in den vorherigen Messungen ohne Aluminiumröhre, noch in den Messungen des PMT2 auftaucht, könnte der Ursprung der Störung im Einbau des PMT in die Aluminiumröhre liegen.

Auch für die Messungen des PMT300 ohne Aufnahme des Trigger-Signals ist ein hochfrequentes Ringing an beiden Seiten des Pulses zu finden. Weiterhin wandert die Baseline des Signals für sinkende Betriebsspannungen fortlaufend ins Positive. Für die Messreihen mit aufgenommenem Trigger-Signal fällt dieser Effekt noch deutlich stärker aus, zudem ist die Waveform für alle Spannungen breiter. In Unterabschnitt 4.4 wurde bereits die Vermutung aufgestellt, dass für die Messungen des PMT300 mit der Aufnahme des Trigger-Signals ein defekter Verstärker verwendet wurde. Die stärkere Schwankung der Baseline und die breitere Waveform sind weitere Indizien dafür.

Für die Messungen des PMT200 ohne Aufnahme des Trigger-Signals fallen die Waveformen für alle Betriebsspannungen fast identisch aus. Für die Messungen mit Aufnahme des Trigger-Signals wandert die Baseline mit sinkender Betriebsspannung leicht ins negative.

#### 4.6.1 Rise- und Falltime

Mit den normierten Waveformen lassen sich auch die durchschnittliche Rise- und Falltime der Pulse berechnen. In ihrem Handbuch zu PMTs (HAMAMATSU, 2017) definiert HAMAMATSU die Risetime als den Zeitabschnitt, in dem das Signal von 10 % zu 90 % der maximalen Amplitude ansteigt. Analog ist die Falltime der Zeitabschnitt, in dem das Signal von 90 % auf 10 % abfällt. Im Datenblatt des PMT200/PMT300 ist für diese eine Risetime von 1,3 ns und eine Falltime von 5,8 ns angegeben (HAMAMATSU, 2019). PMT1/PMT2 haben laut Datenblatt eine Risetime von 1,1 ns und eine Falltime von 2,0 ns (HAMAMATSU, 2023). Folgende Zeiten wurden für die normierten Waveforms bestimmt:

	0,7 V	0,8 V	0,9 V	1,0 V
Risetime				
PMT1	1,40 ns	1,40 ns	1,35 ns	1,40 ns
PMT1 (ohne Röhre)	1,30 ns	1,35 ns	1,35 ns	1,45 ns
PMT2	1,40 ns	1,40 ns	1,40 ns	1,45 ns
Falltime				
PMT1	3,20 ns	3,45 ns	3,55 ns	3,55 ns
PMT1 (ohne Röhre)	3,50 ns	3,50 ns	3,50 ns	3,35 ns
PMT2	3,10 ns	3,20 ns	3,25 ns	3,25 ns

**Tabelle 7:** Ermittelte Werte der Risetime und Falltime der normierten Waveform der Messreihen des PMT1 und PMT2, sowie der Messungen des PMT1 ohne Aluminiumröhre. Im Datenblatt ist die Output Waveform mit 1,1 ns Risetime und 2,0 ns Falltime gegeben (HAMAMATSU, 2023).

	700 V	750 V	800 V	850 V	900 V	950 V
Risetime						
PMT200	2,05 ns	1,90 ns	1,75 ns	1,65 ns	1,65 ns	1,65 ns
PMT200 (mit Trigger)	2,10 ns	1,95 ns	1,80 ns	1,70 ns	1,70 ns	1,70 ns
PMT300	1,90 ns	1,80 ns	1,70 ns	1,70 ns	1,70 ns	1,70 ns
PMT300 (mit Trigger)	2,55 ns	2,55 ns	2,40 ns	2,30 ns	2,20 ns	2,15 ns
Falltime						
PMT200	5,90 ns	6,00 ns	5,90 ns	5,85 ns	5,80 ns	5,80 ns
PMT200 (mit Trigger)	6,80 ns	6,45 ns	6,25 ns	6,10 ns	5,95 ns	5,90 ns
PMT300	6,15 ns	6,25 ns	6,30 ns	6,25 ns	6,35 ns	6,30 ns
PMT300 (mit Trigger)	6,65 ns	7,20 ns	7,75 ns	8,00 ns	8,35 ns	8,45 ns

**Tabelle 8:** Ermittelte Werte der Risetime und Falltime der normierten Waveform der Messreihen des PMT200 und PMT300. Im Datenblatt ist die Output Waveform mit 1,3 ns Risetime und 5,8 ns Falltime gegeben (HAMAMATSU, 2019).

Die Risetimes der Messungen des PMT1/PMT2 liegen allesamt zwischen 1,30 ns und 1,45 ns und sind damit ca. 0,30 ns über dem Datenblattwert. Im Vergleich dazu sind die Falltimes des PMT2 kontinuierlich 0,10–0,30 ns unter denen des PMT1, jedoch sind alle Werte 0,10–0,15 ns über dem Datenblattwert. Zwischen den Werten der beiden Messreihen des PMT1 ist kein nennenswerter Unterschied zu erkennen, was auch nicht anders zu erwarten war.

Für die Messreihen des PMT200 und PMT300 fällt direkt auf, dass die Werte der Messreihen mit aufgenommenem Trigger-Signal allesamt größer sind als die der Messungen ohne Trigger-Signal. Für den PMT200 sind es größtenteils nur wenige Zehntelnanosekunden, während für den PMT300 die Unterschiede zwischen einer halben und mehr als zwei Nanosekunden liegen. Auch nimmt die Falltime der Messung des PMT300 mit Trigger-Signal für steigende Betriebsspannung zu, wobei der maximale Wert einen Unterschied von 2,15 ns zum Wert der Messung ohne Trigger-Signal aufweist.

Die Risetimes der Messreihen der PMT200 und PMT300 Messungen ohne Trigger-Signal nehmen für steigende Betriebsspannung für beide PMTs ab, und enden ca. 0,4 ns über dem Datenblattwert. Die korrespondierenden Falltimes sind für den PMT200, bis auf wenigen Zehntelnanosekunden Unterschied, fast genau auf dem Datenblattwert von 5,8 ns, wohingegen die Werte des PMT300 ca. 0,5 ns darüber liegen.

## 5 Zusammenfassung und Fazit

In dieser Arbeit wurden vier PMTs von drei verschiedenen Modelltypen für verschiedene Betriebsspannungen vermessen. Es wurden zwei PMTs des Modells H15461-40, sowie jeweils ein PMT der Modelle R11265U-200 und R11265U-300 verwendet. Die aufgenommenen Daten wurden in einzelne Events unterteilt, welche im Idealfall genau einen Spannungspuls des PMTs enthalten.

Die Untersuchung der Pulsevents zeigte, dass die Menge an Events mit mehr als einem Puls nur einen sehr kleinen Anteil ( $< 1\%$ ) der Events mit Pulsen ausmacht. Mit Hilfe der Pulsflächen-Spektren wurde der Gain der PMTs berechnet, wobei die berechneten Werte für alle PMTs etwa 3 bis 4 mal höher waren als der im Datenblatt gegebene „Typical gain“. Ebenfalls bestimmt wurde der T.T.S. der PMTs. Die gemessenen Werte waren dabei deutlich größer als im Datenblatt angegeben, und drei der vier PMTs weisen die gleiche Zeit auf. Lediglich der R11265U-300 fällt, mit einem höheren Wert, aus der Reihe, was an einer potenziell schlechteren Qualität der Messung liegen könnte. Außerdem wurde die relative Detektoreffizienz der PMTs berechnet, wobei eine Messung des PMT1 bei 0,9 V Betriebsspannung als Referenz verwendet wurde. Wie zu erwarten wiesen die R11265U Modelle für die verwendete Wellenlänge eine höhere DE auf. Die Detektoreffizienz des PMT2 liegt für sämtliche Messungen unter der des PMT1. Weiterhin wurde eine normierte Waveform für jede Messung erstellt, und an dieser die Rise- und Falltime der PMT-Pulse bestimmt. Auch hier sind die gemessenen Zeiten höher als im jeweiligen Datenblatt angegeben. Erneut stechen die besonders großen Zeiten des R11265U-300 Modells für die Messreihen, in denen das Trigger-Signal des Lasers mit aufgenommen wurde, heraus.

Zum Abschluss bleibt noch die Frage welches PMT-Modell sich am besten für die Anwendung im MI<sup>2</sup>SO Setup eignet. Ziel ist es ein möglichst gutes S/N Verhältnis bei ausreichend großem Gain zu erhalten. Das Signal-to-Noise Verhältnis lässt sich über Gleichung 1 bestimmen. Wichtig sind dabei Detektoreffizienz und Zeitauflösung, welche von dem Transit Time Spread des PMTs dominiert wird. Als aussagekräftigste Messung des PMT1 und PMT2 wurde die jeweilige Messung für 0,9 V empfunden, da dies die wahrscheinlichste Operationsspannung sein wird. Für den PMT200 und PMT300 wäre, aufgrund des Gains, die jeweilige Messung mit 900 V damit vergleichbar. Folgende Werte wurden bestimmt (T.T.S. in ns):

	PMT1	PMT2	PMT200	PMT300
$\frac{DE}{\sqrt{T.T.S.}}$	1,20	1,14	1,26	1,01

Unerwartet schneidet der PMT300 am schlechtesten ab, obwohl dieser für die aufgenommene Wellenlänge eine höhere QE als PMT1 und PMT2 besitzt. Dies liegt an der schlechten Qualität der aufgenommenen T. T. S. Messung. Am besten schneidet der PMT200 ab, was daran liegen dürfte, dass sämtliche Messungen bei einer Wellenlänge von 404 nm aufgenommen wurden. Vertraut man der angegebenen QE, so sollten PMT1 und PMT2 ab einer Wellenlänge von  $\sim 450$  nm den PMT200 übertreffen. Für das MI<sup>2</sup>SO Teleskop sollte also, je nach dominanter Wellenlänge des Targets entweder das H15461-40 Modell oder R11265U-200 Modell verwendet werden. Da H. E. S. S. einen

größeren Lichtkegel besitzt, der auf den PMT trifft, und das R11265U-200 Modell eine größere Photokathodenfläche aufweist, sollte dort das R11265U-200 Modell verwendet werden.

## Akronyme

**ADC** Analogue to Digital Converter. 10, 11, 12, 13, 18, 23, 26

**AQO** Astro Quantum Optics. 1

**CE** collection efficiency. 6

**DE** Detektoreffizienz. 6, 21, 28, 29, 30, 34, 37, 38

**ECAP** Erlangen Centre for Astroparticle Physics. 1

**FWHM** Halbwertsbreite. 6, 25, 26, 27

**H. E. S. S.** High Energy Stereoscopic System. 1, 34

**HV** Hochspannung. 13

**II** Intensitätsinterferometrie. 1, 24, 30

**MI<sup>2</sup>SO** Mobile Intensity Interferometer for Stellar Observations. 1, 2, 34

**ND-Filter** Neutraldichtefilter. 4

**PDF** Wahrscheinlichkeitsdichte. 21, 22

**PMT** Photomultiplier Tube. 1, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 23, 26, 29, 30, 31, 34, 35

**PMT1** H15461-40. 1, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 37, 38, 39, 42, 43, 48

**PMT2** H15461-40. 8, 11, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 24, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 38, 40, 42, 49, 50, 51

**PMT200** R11265U-200. 1, 8, 9, 11, 15, 16, 18, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 37, 41, 42, 43, 46, 50, 51

**PMT300** R11265U-300. 1, 8, 9, 10, 11, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 37, 42, 43, 44, 45, 47

**PMTs** Photomultiplier Tubes. 1, 3, 5, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 37

**QE** Quanteneffizienz. 1, 6, 8, 29, 30, 34

**S/N** Signal-to-Noise. 1, 34

**SPE** Einzelphotonenspektrum. 4, 5, 6, 21, 22, 46, 47, 48, 49

**T. T. S.** Transit Time Spread. 5, 6, 8, 12, 13, 25, 26, 27, 28, 34, 37, 38, 50

## A Anhang A: Tabellen

Dieser Anhang enthält alle Ergebnisse der Messungen von Abschnitt 4, sortiert nach den jeweiligen PMTs.

PMT200	700 V	750 V	800 V	850 V	900 V	950 V
Gain	$0,21 \cdot 10^6$	$0,62 \cdot 10^6$	$1,25 \cdot 10^6$	$2,35 \cdot 10^6$	$3,92 \cdot 10^6$	$6,44 \cdot 10^6$
T. T. S.	1,10 ns	1,15 ns	0,90 ns	0,85 ns	0,75 ns	0,70 ns
relative DE	1,51	1,23	1,16	1,11	1,09	1,07
Risetime	2,05 ns	1,90 ns	1,75 ns	1,65 ns	1,65 ns	1,65 ns
(mit Trigger)	2,10 ns	1,95 ns	1,80 ns	1,70 ns	1,70 ns	1,70 ns
Falltime	5,90 ns	6,00 ns	5,90 ns	5,85 ns	5,80 ns	5,80 ns
(mit Trigger)	6,80 ns	6,45 ns	6,25 ns	6,10 ns	5,95 ns	5,90 ns

**Tabelle 9:** Ergebnisse der Messungen des PMT200 für jede Betriebsspannung. Rise- und Falltime wurden sowohl für Messungen ohne Trigger-Signal, als auch für Messungen mit Trigger-Signal (als mit Trigger beschrieben) bestimmt. Als Normierung für die relative DE wurde die Messung des PMT1 in Röhre, bei einer Betriebsspannung von 0,9 V verwendet.

PMT300	700 V	750 V	800 V	850 V	900 V	950 V
Gain	$0,39 \cdot 10^6$	$0,73 \cdot 10^6$	$1,34 \cdot 10^6$	$2,34 \cdot 10^6$	$4,54 \cdot 10^6$	$8,23 \cdot 10^6$
T. T. S.	1,60 ns	1,55 ns	1,35 ns	1,25 ns	1,05 ns	0,95 ns
relative DE	0,99	1,04	1,06	1,05	1,03	1,01
Risetime	1,90 ns	1,80 ns	1,70 ns	1,70 ns	1,70 ns	1,70 ns
(mit Trigger)	2,55 ns	2,55 ns	2,40 ns	2,30 ns	2,20 ns	2,15 ns
Falltime	6,15 ns	6,25 ns	6,30 ns	6,25 ns	6,35 ns	6,30 ns
(mit Trigger)	6,65 ns	7,20 ns	7,75 ns	8,00 ns	8,35 ns	8,45 ns

**Tabelle 10:** Ergebnisse der Messungen des PMT300 für jede Betriebsspannung. Rise- und Falltime wurden sowohl für Messungen ohne Trigger-Signal, als auch für Messungen mit Trigger-Signal (als mit Trigger beschrieben) bestimmt. Als Normierung für die relative DE wurde die Messung des PMT1 in Röhre, bei einer Betriebsspannung von 0,9 V verwendet.



PMT1	0,7 V	0,8 V	0,9 V	1,0 V
Messung mit Aluminiumröhre				
Gain	$0,51 \cdot 10^6$	$1,22 \cdot 10^6$	$2,59 \cdot 10^6$	$5,37 \cdot 10^6$
T. T. S.	1,20 ns	0,75 ns	0,70 ns	0,70 ns
relative DE	1,01	1,01	1,00	0,98
Risetime	1,40 ns	1,40 ns	1,35 ns	1,40 ns
Falltime	3,20 ns	3,45 ns	3,55 ns	3,55 ns
Messung ohne Aluminiumröhre				
Gain	$0,46 \cdot 10^6$	$1,30 \cdot 10^6$	$2,78 \cdot 10^6$	$5,38 \cdot 10^6$
relative DE	0,98	0,99	0,98	0,96
Risetime	1,30 ns	1,35 ns	1,35 ns	1,45 ns
Falltime	3,50 ns	3,50 ns	3,50 ns	3,35 ns

**Tabelle 11:** Ergebnisse der Messungen des PMT1 in der Aluminiumröhre, und ohne Aluminiumröhre, für jede Betriebsspannung. Als Normierung für die relative DE wurde die Messung des PMT1 in Röhre, bei einer Betriebsspannung von 0,9 V verwendet.

PMT2	0,7 V	0,8 V	0,9 V	1,0 V
Gain	$0,55 \cdot 10^6$	$1,43 \cdot 10^6$	$2,85 \cdot 10^6$	$5,36 \cdot 10^6$
T. T. S.	0,65 ns	0,70 ns	0,70 ns	0,65 ns
relative DE	0,98	0,97	0,95	0,95
Risetime	1,40 ns	1,40 ns	1,40 ns	1,45 ns
Falltime	3,10 ns	3,20 ns	3,25 ns	3,25 ns

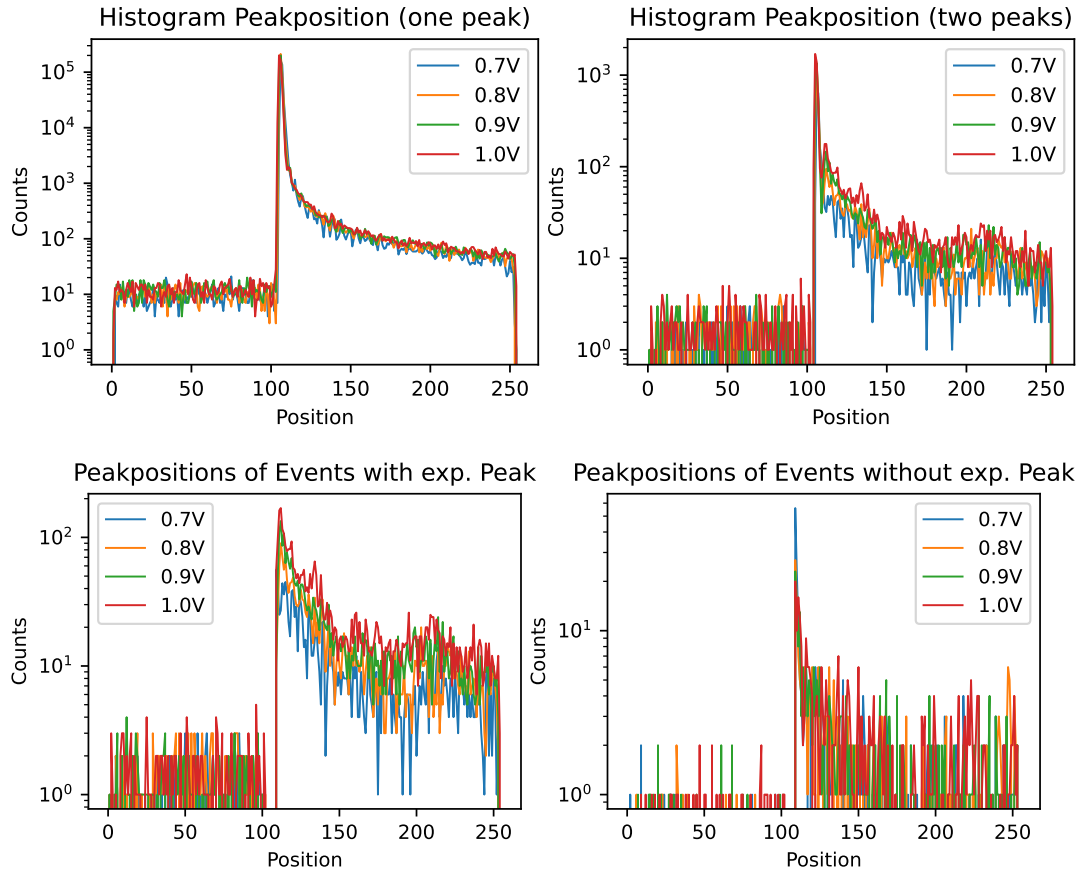
**Tabelle 12:** Ergebnisse der Messungen des PMT2 für jede Betriebsspannung. Als Normierung für die relative DE wurde die Messung des PMT1 in Röhre, bei einer Betriebsspannung von 0,9 V verwendet.

## B Anhang B: Abbildungen

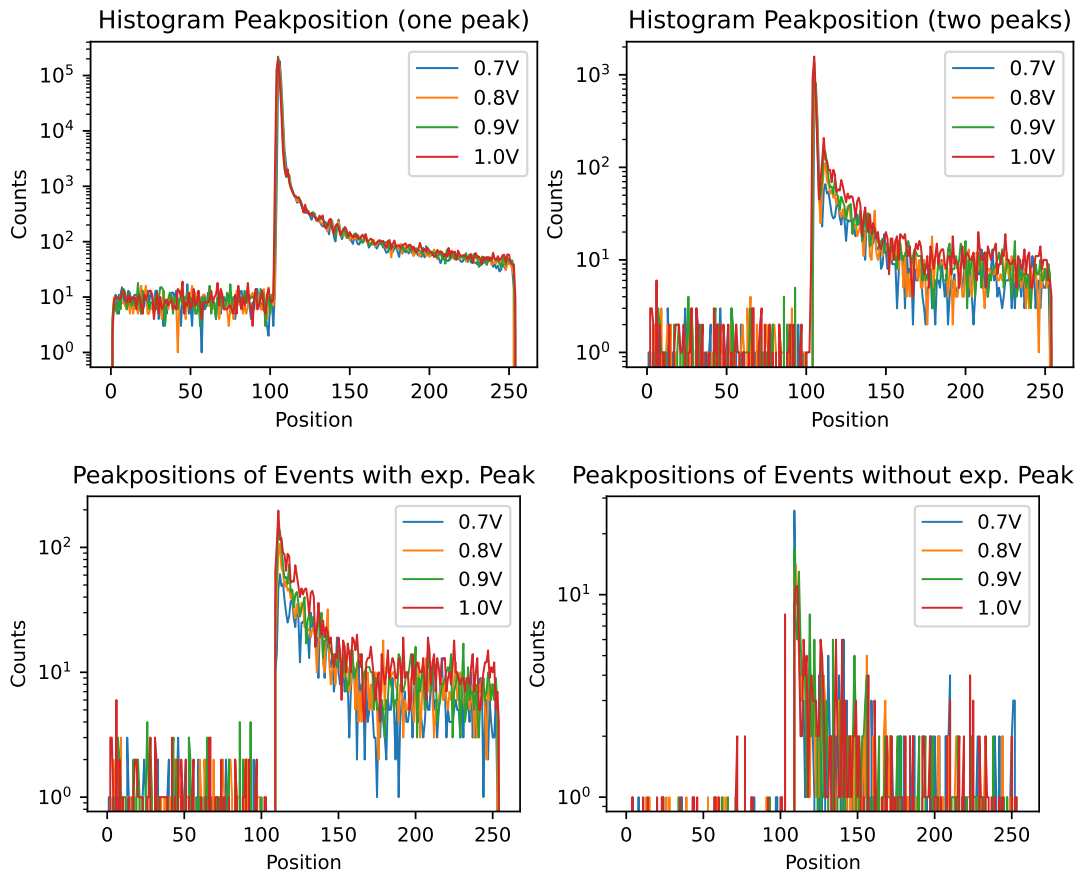
Dieser Anhang enthält die Abbildungen der restlichen Messwerte, welche aus Platzgründen nicht in Abschnitt 4 enthalten sind. Die Titel der Unterkapitel sind analog zu denen in Abschnitt 4.

### B.1 Events mit mehreren Pulsen

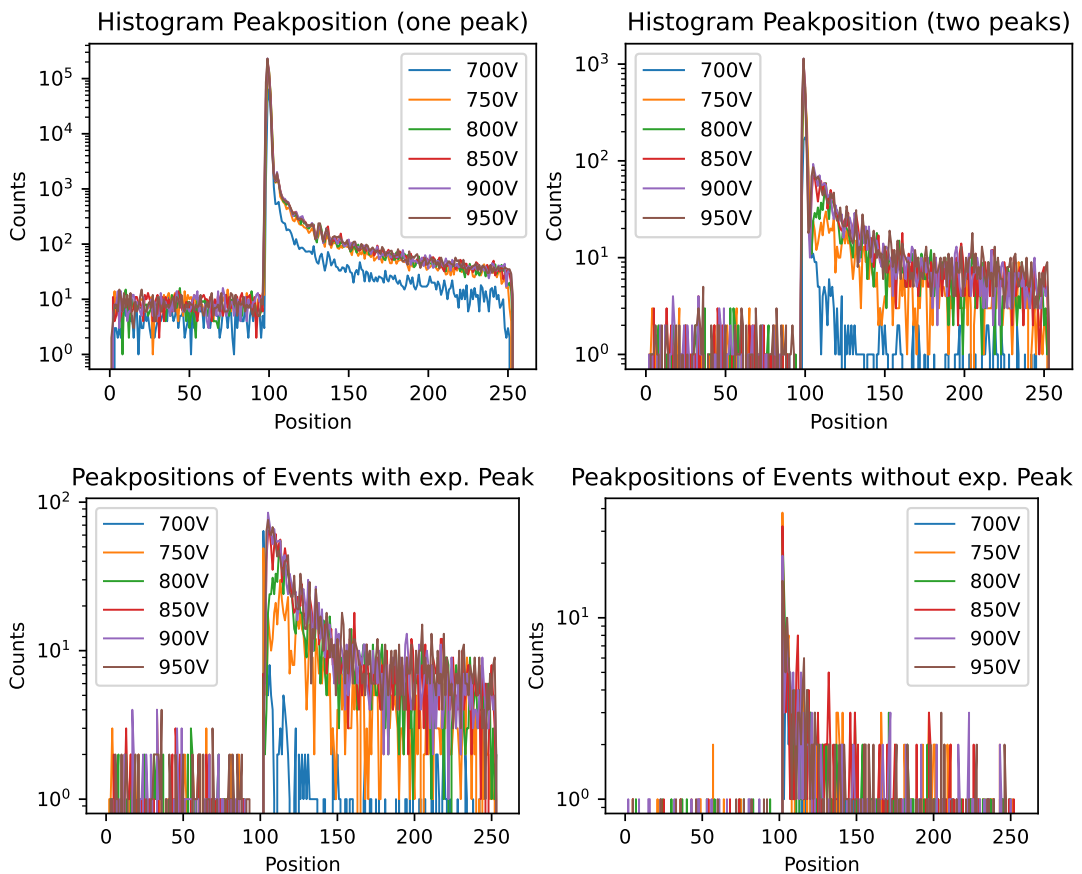
Hier werden die restlichen, der in Unterunterabschnitt 4.2.1 erstellten, Pulspositionenhistogramme aufgelistet. Außerdem sind in Abbildung 31 die absoluten Eventzahlen der Pulsevents, für alle Messungen, zu sehen.



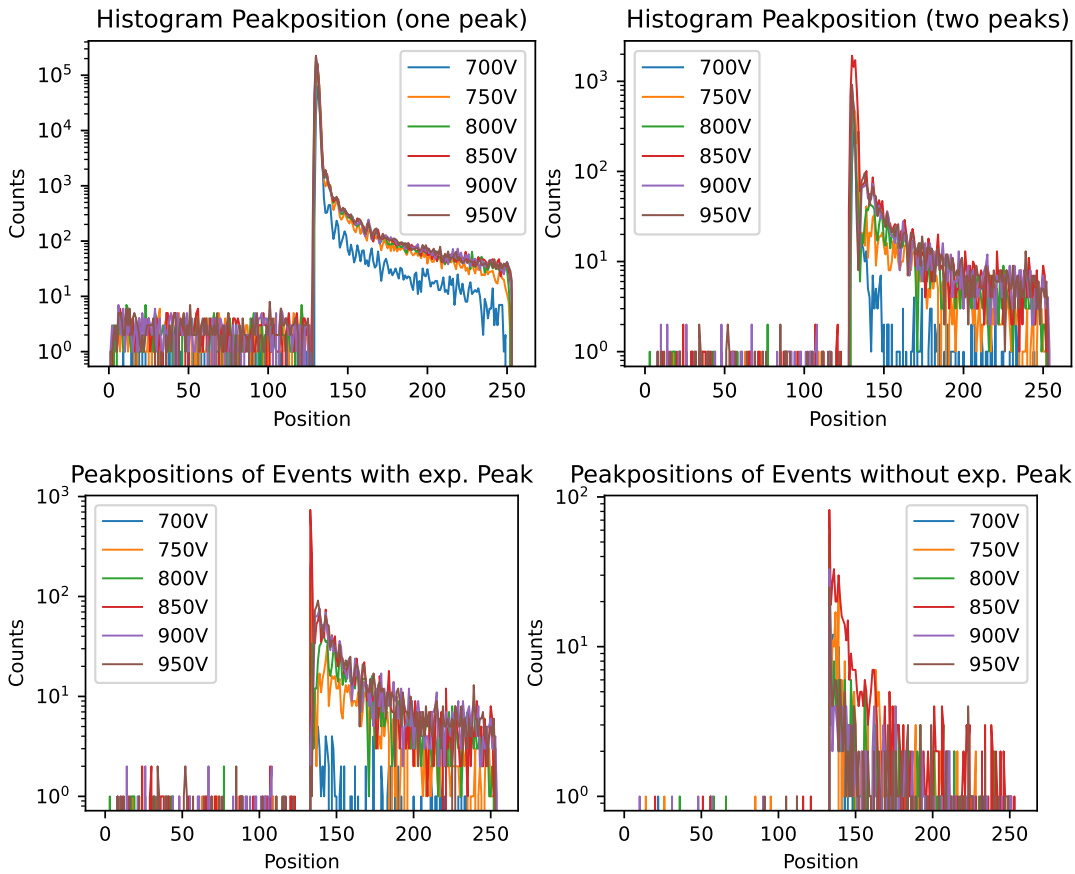
**Abbildung 27:** Histogramme der Pulspositionen des PMT1 (ohne Aluminiumröhre) für alle Betriebsspannungen. (**Oben Links**) Histogramm der Position der Pulse aus Events in denen genau ein Puls registriert wurde. (**Oben Rechts**) Histogramm der Position der Pulse aus Events in denen genau zwei Pulse registriert wurden. Die Events mit genau zwei Pulsen wurden unterteilt in Events mit Erwartetem Puls (Events with exp. Peak, **Unten Links**) und Events ohne Erwartetem Puls (Events without exp. Peak, **Unten Rechts**). Nur Pulse außerhalb des Erwarteten Bereichs wurden in die Histogramme aufgenommen. Der Erwartete Bereich wurde für den PMT1 als Segmente 104–108 definiert.



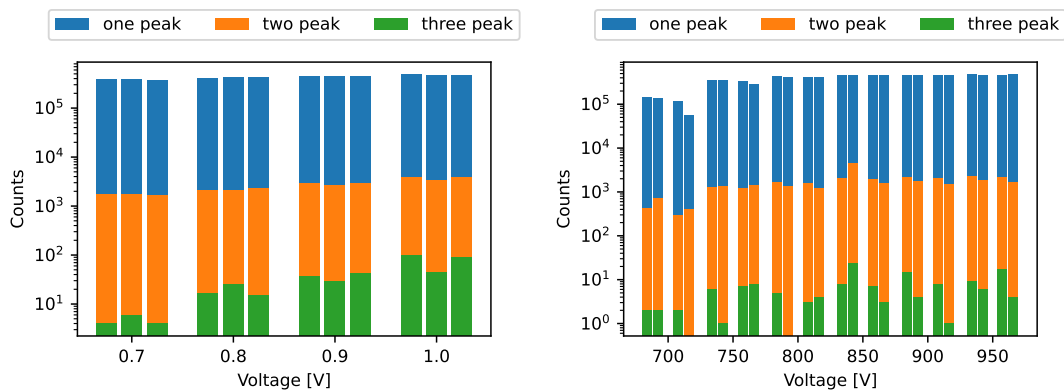
**Abbildung 28:** Histogramme der Pulspositionen des PMT2 für alle Betriebsspannungen. **(Oben Links)** Histogramm der Position der Pulse aus Events in denen genau ein Puls registriert wurde. **(Oben Rechts)** Histogramm der Position der Pulse aus Events in denen genau zwei Pulse registriert wurden. Die Events mit genau zwei Pulsen wurden unterteilt in Events mit Erwartetem Puls (Events with exp. Peak, **Unten Links**) und Events ohne Erwartetem Puls (Events without exp. Peak, **Unten Rechts**). Nur Pulse außerhalb des Erwarteten Bereichs wurden in die Histogramme aufgenommen. Der Erwartete Bereich wurde für den PMT2 als Segmente 104–108 definiert.



**Abbildung 29:** Histogramme der Pulspositionen des PMT200 für alle Betriebsspannungen. **(Oben Links)** Histogramm der Position der Pulse aus Events in denen genau ein Puls registriert wurde. **(Oben Rechts)** Histogramm der Position der Pulse aus Events in denen genau zwei Pulse registriert wurden. Die Events mit genau zwei Pulsen wurden unterteilt in Events mit Erwartetem Puls (Events with exp. Peak, **Unten Links**) und Events ohne Erwartetem Puls (Events without exp. Peak, **Unten Rechts**). Nur Pulse außerhalb des Erwarteten Bereichs wurden in die Histogramme aufgenommen. Der Erwartete Bereich wurde für den PMT200 als Segmente 97–101 definiert.



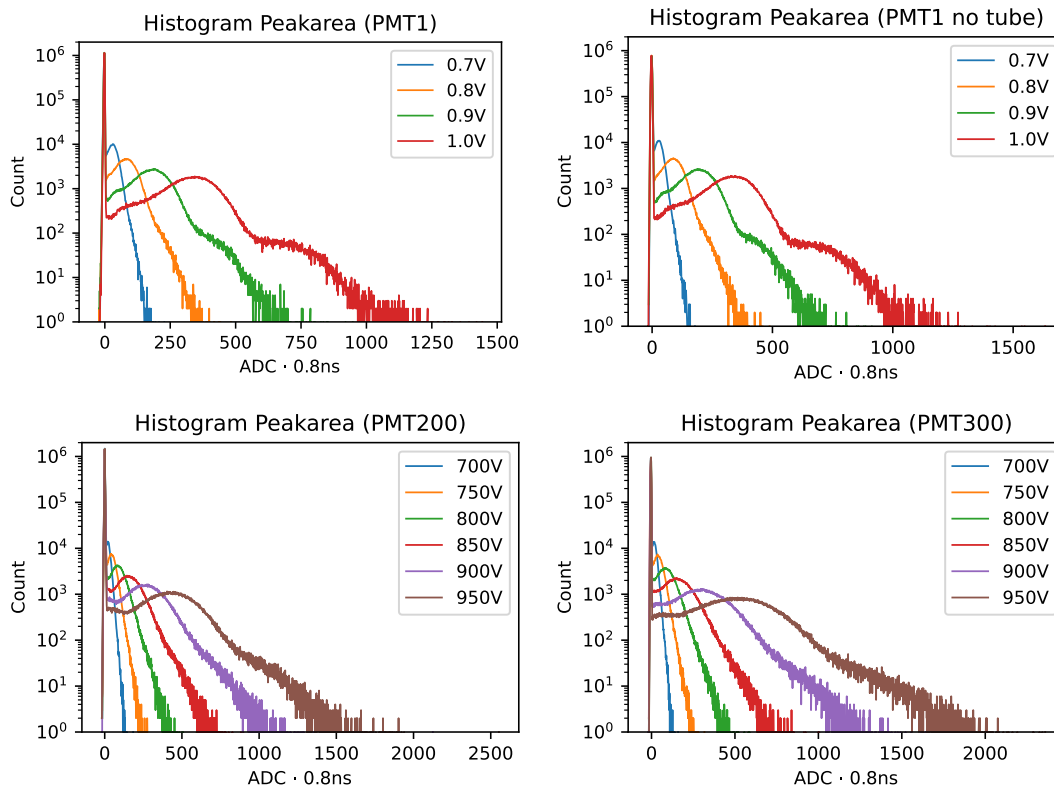
**Abbildung 30:** Histogramme der Pulspositionen des PMT300 für alle Betriebsspannungen. **(Oben Links)** Histogramm der Position der Pulse aus Events in denen genau ein Puls registriert wurde. **(Oben Rechts)** Histogramm der Position der Pulse aus Events in denen genau zwei Pulse registriert wurden. Die Events mit genau zwei Pulsen wurden unterteilt in Events mit Erwartetem Puls (Events with exp. Peak, **Unten Links**) und Events ohne Erwartetem Puls (Events without exp. Peak, **Unten Rechts**). Nur Pulse außerhalb des Erwarteten Bereichs wurden in die Histogramme aufgenommen. Der Erwartete Bereich wurde für den PMT300 als Segmente 128–132 definiert.



**Abbildung 31:** Absolute Eventzahlen der Pulsevents. **(Links)** In Reihenfolge: PMT1 ohne Röhre, PMT2, PMT1 mit Röhre. **(Rechts)** In Reihenfolge: PMT200, PMT300. Das erstes Zweierpaar sind Messungen ohne Trigger-Signal, zweites Zweierpaar sind Messungen mit Trigger-Signal.

## B.2 Pulsflächenhistogramme

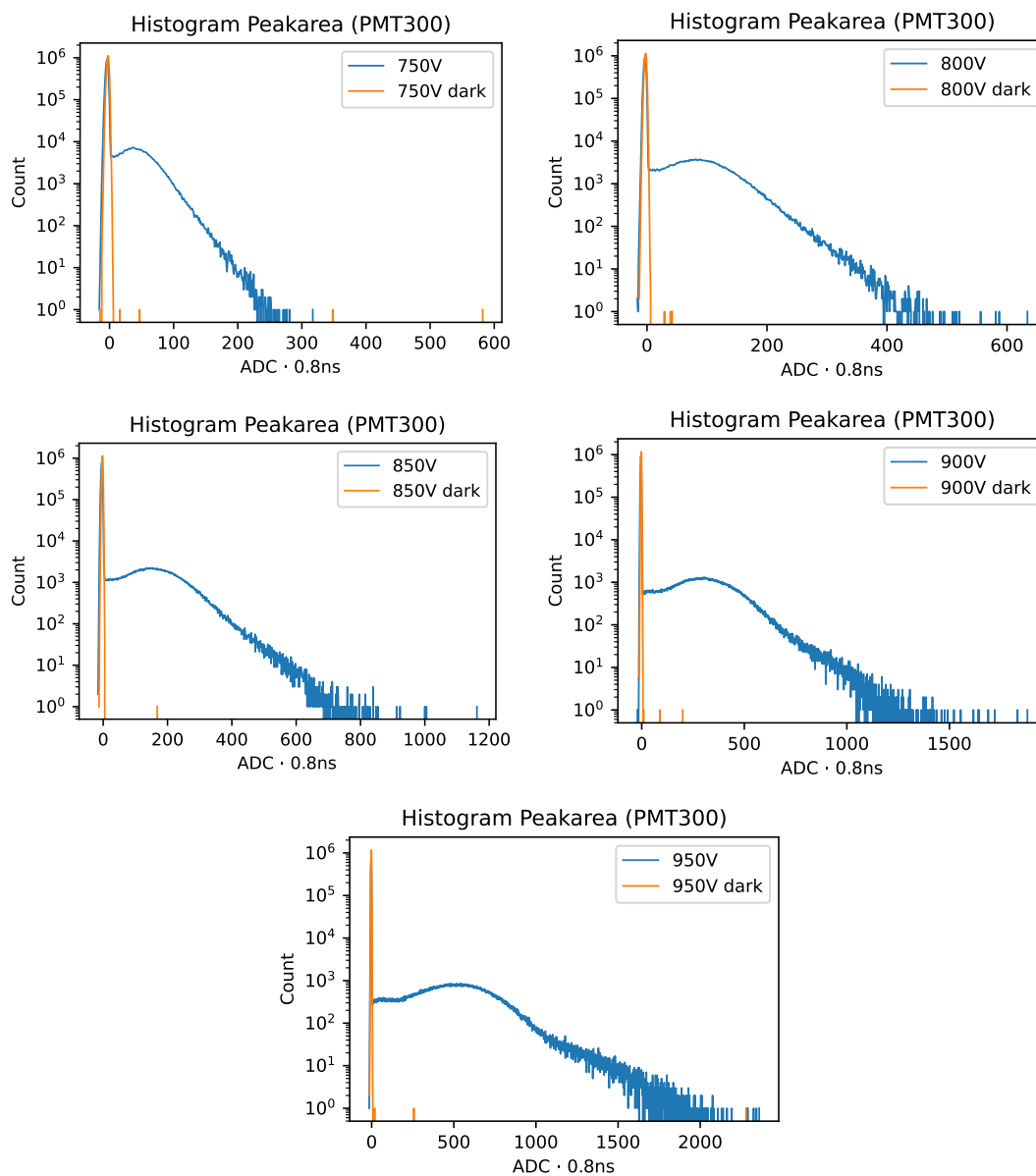
Hier werden die restlichen, der in Unterunterabschnitt 4.3.1 erstellten, Pulsflächenhistogramme aufgelistet.



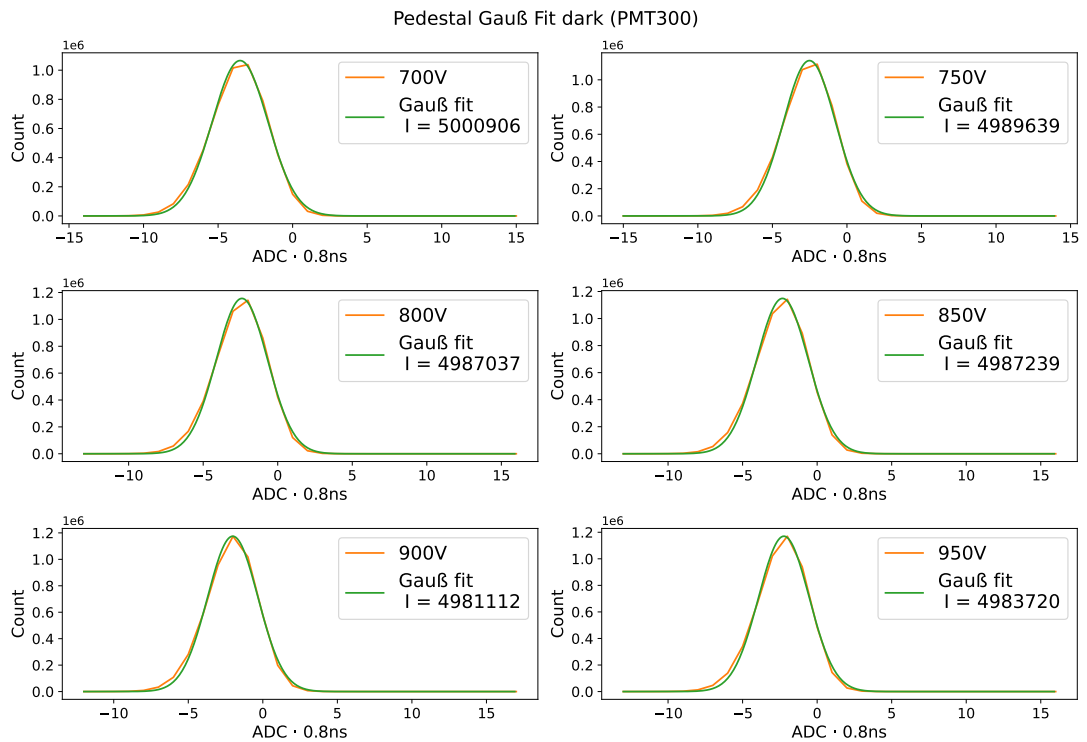
**Abbildung 32:** Histogramm der Pulsflächen. (**Oben Links**) PMT1 (mit Röhre). (**Oben Rechts**) PMT1 (ohne Röhre). (**Unten Links**) PMT200. (**Unten Rechts**) PMT300.

### B.3 Dunkelmessung des PMT300

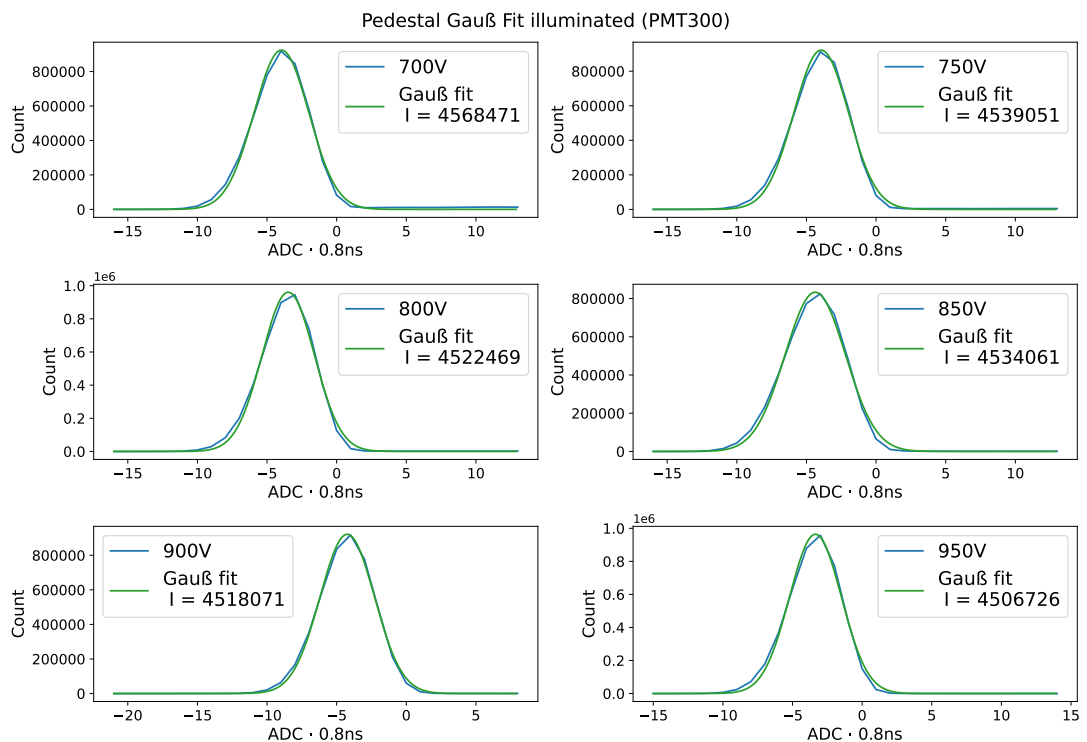
Die restlichen Pulsflächenhistogramme der Dunkelmessung und die Gauß-Fits an die Pedestals der beleuchteten Messungen des PMT300 sind hier aufgelistet.



**Abbildung 33:** Pulsflächenhistogramme des PMT300 mit darübergelegten Pulsflächenhistogrammen der dazugehörigen Dunkelmessungen.



**Abbildung 34:** Fit der Gauß-Verteilungen an die Pedestals der Dunkelmessungen des PMT300. Der Parameter  $I$  gibt die Anzahl an enthaltenen Events an.

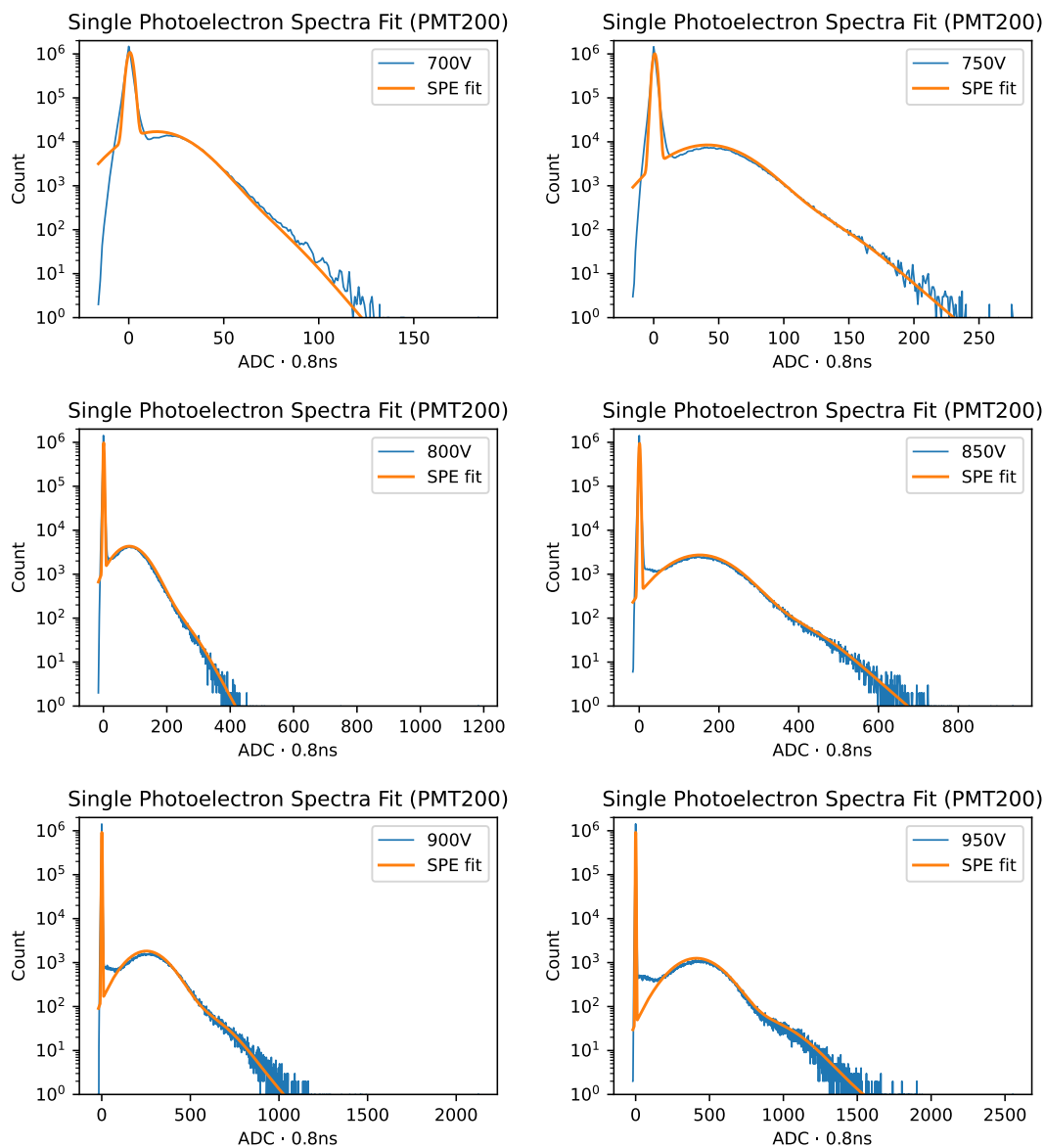


**Abbildung 35:** Fit der Gauß-Verteilungen an die Pedestals der beleuchteten Messungen des PMT300.

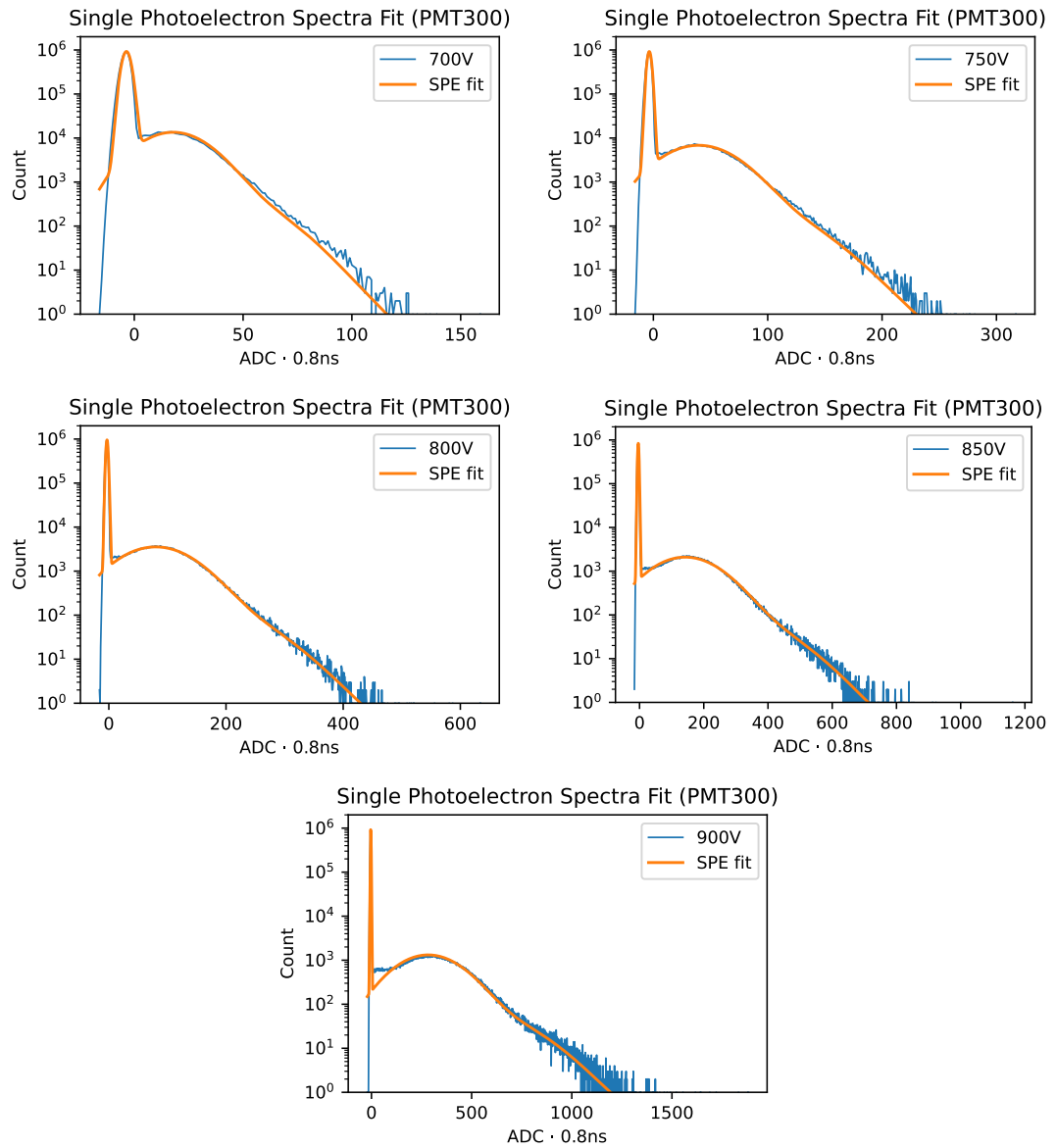


## B.4 Fit des Einzelphotonenspektrums

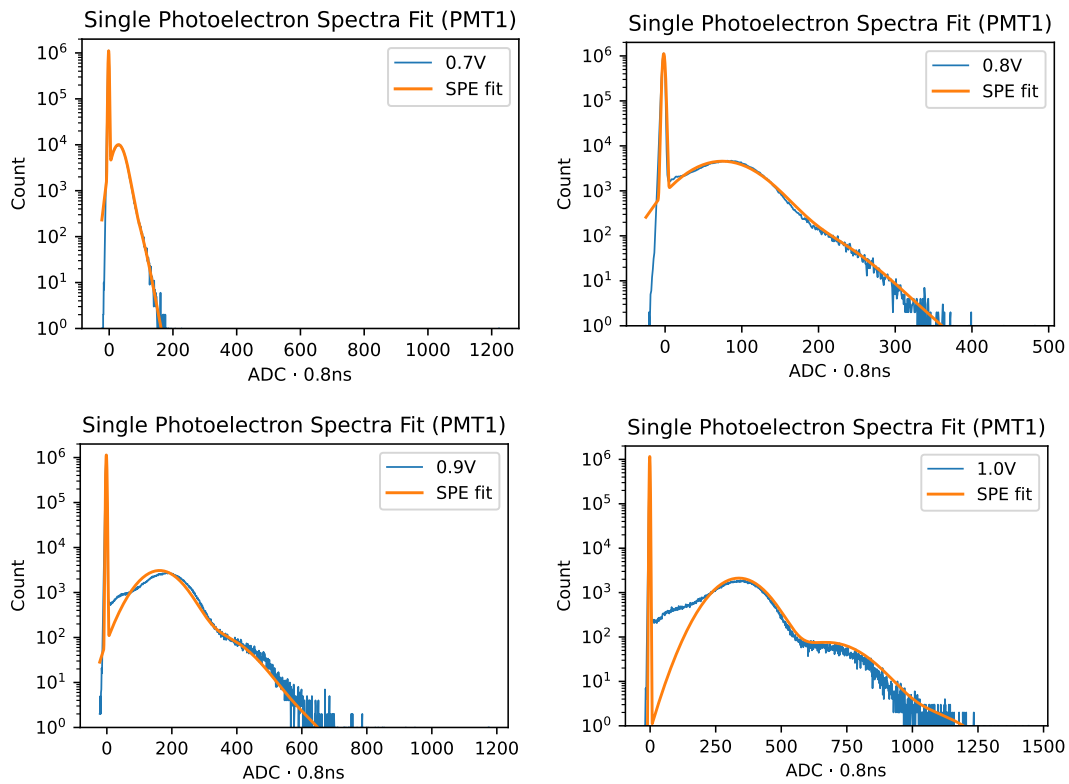
Hier sind die restlichen Einzelphotonenspektrum-Fits von Unterunterabschnitt 4.3.3 zu finden.



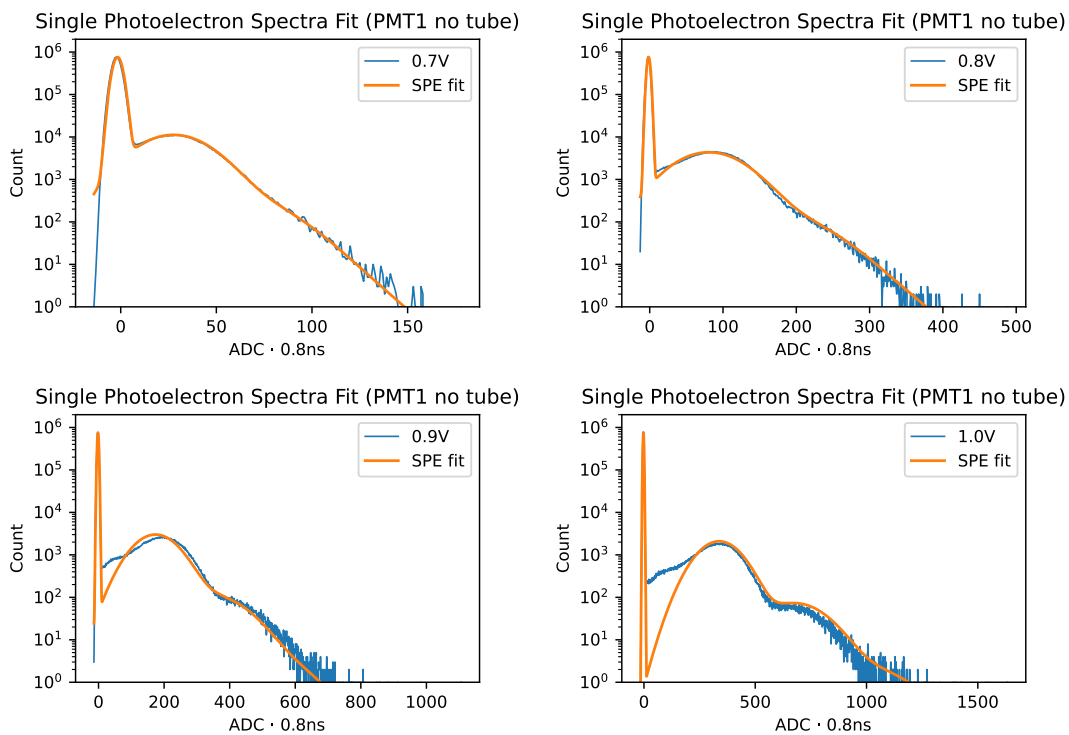
**Abbildung 36:** Pulsflächenhistogramme des PMT200 mit zugehörigen Einzelphotonenspektrum-Fit (SPE).



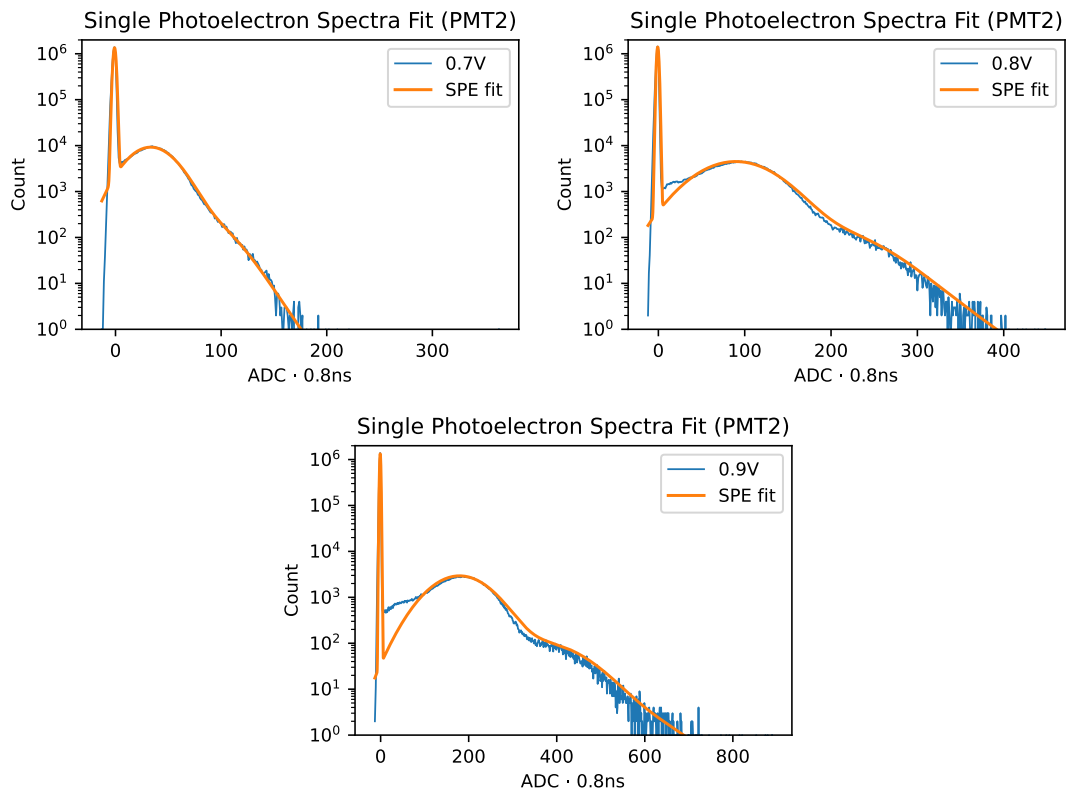
**Abbildung 37:** Pulsflächenhistogramme des PMT300 mit zugehörigen Einzelphotonenspektrum-Fit (SPE).



**Abbildung 38:** Pulsflächenhistogramme des PMT1 (in Aluminiumröhre verbaut) mit zugehörigen Einzelphotonenspektrum-Fit (SPE).



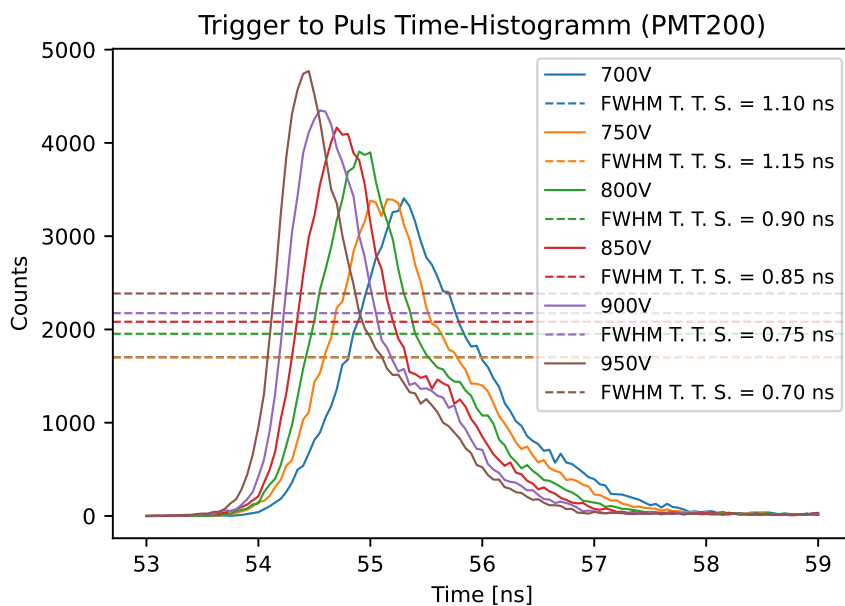
**Abbildung 39:** Pulsflächenhistogramme des PMT1 (ohne Aluminiumröhre) mit zugehörigen Einzelphotonenspektrum-Fit (SPE).



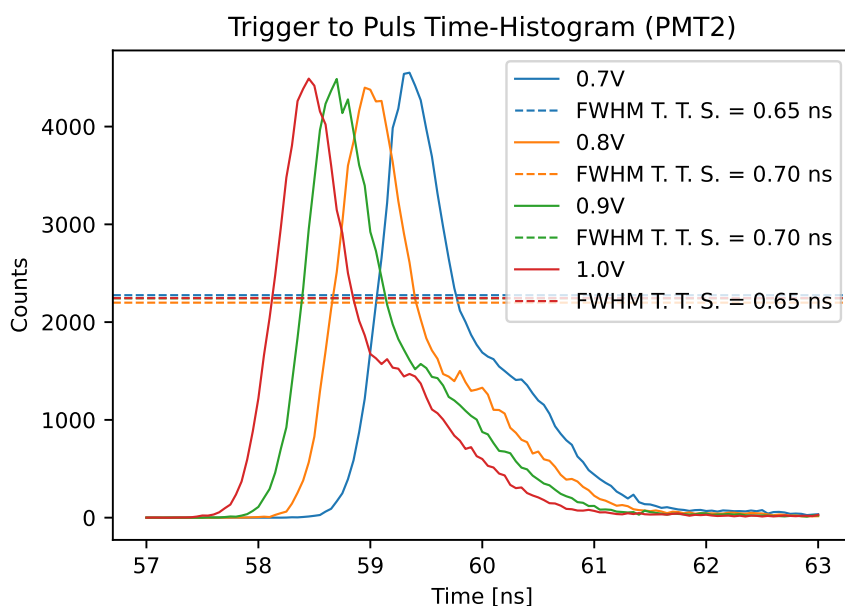
**Abbildung 40:** Pulsflächenhistogramme des PMT2 mit zugehörigen Einzelphotonenspektrum-Fit (SPE).

## B.5 Zeitauflösung

Hier sind die Trigger zu Puls Zeit Histogramme, wie in Unterabschnitt 4.4 beschrieben, für den PMT200 und PMT2 aufgelistet.



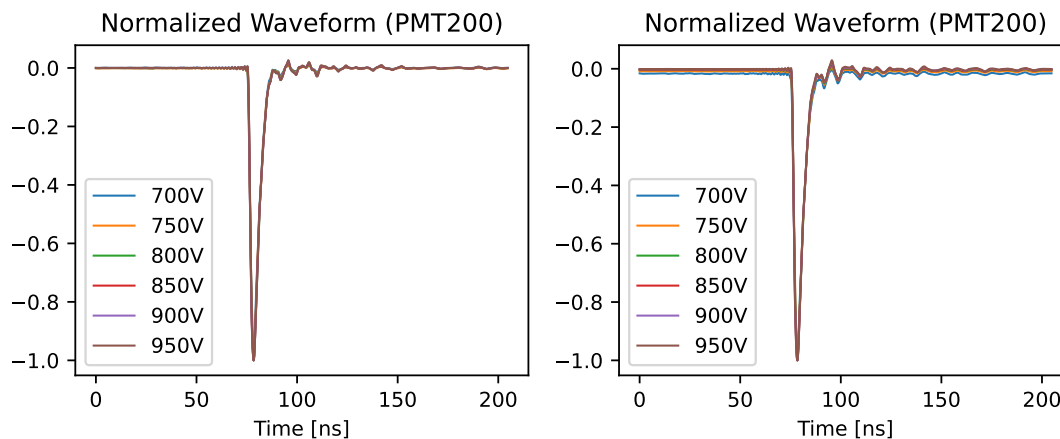
**Abbildung 41:** Histogramm der Trigger zu Puls Zeiten des PMT200. Die gestrichelten Linien sind auf halber Höhe ihrer farblich zugehörigen Peaks. Der T. T. S. der jeweiligen Betriebsspannung ist in der Legende gegeben.



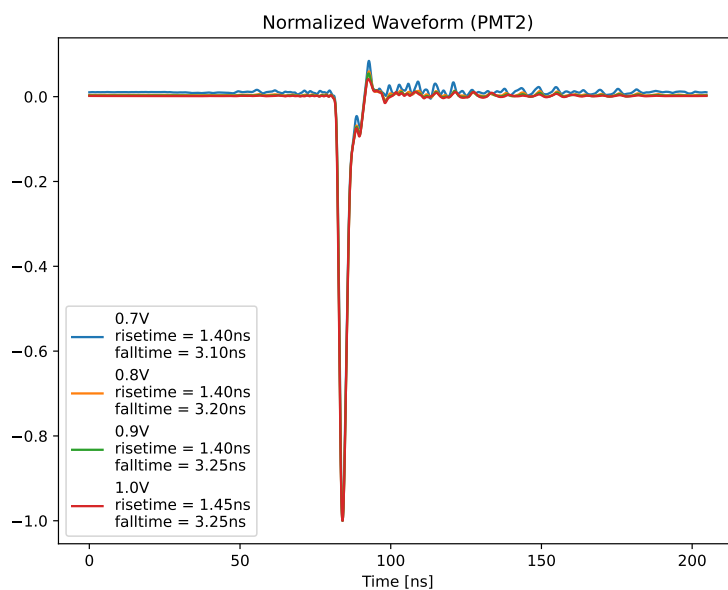
**Abbildung 42:** Histogramm der Trigger zu Puls Zeiten des PMT2. Die gestrichelten Linien sind auf halber Höhe ihrer farblich zugehörigen Peaks. Der T. T. S. der jeweiligen Betriebsspannung ist in der Legende gegeben.

## B.6 Normierte Waveform der PMTs

Hier sind die normierten Waveforms der beiden Messungen des PMT200 und der Messung des PMT2 aufgelistet.



**Abbildung 43:** Normierte Waveformen der Messungen des PMT200. (**Links**) Messungen bei denen das Trigger-Signal **nicht** mit aufgenommen wurde. (**Rechts**) Messungen bei denen das Trigger-Signal mit aufgenommen wurde.



**Abbildung 44:** Normierte Waveform der Messung des PMT2, zusammen mit den jeweiligen Rise- und Falltimes in der Legende.



## Literatur

- Brown, R H, J Davis und L R Allen (Dez. 1967). „The stellar interferometer at narrabri observatory–I: A description of the instrument and the observational procedure“. In: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 137.4, S. 375–392.
- Classen, Lew (2017). „The mDOM – a multi-PMT digital optical module for the IceCube-Gen2 neutrino telescope“. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
- FAST (2024). *Datasheet TA1000B Timing Amplifier*. <https://www.fastcomtec.com/ta1000-timing-amplifier>. [Zuletzt aufgerufen Juni 2024].
- HAMAMATSU (2017). *Photomultiplier Tubes Basics and Applications*. [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). [Zuletzt aufgerufen Juni 2024].
- (2019). *Datasheet R11265U SERIES / H11934 SERIES*. [https://www.hamamatsu.com/us/en/product/optical-sensors/pmt/pmt\\_tube-alone/metal-package-type/R11265U-200.html](https://www.hamamatsu.com/us/en/product/optical-sensors/pmt/pmt_tube-alone/metal-package-type/R11265U-200.html). [Zuletzt aufgerufen Juni 2024].
- (2023). *Datasheet H15460 SERIES / H15461 SERIES*. <https://www.hamamatsu.com/us/en/product/optical-sensors/pmt/pmt-module/voltage-output-type/H15460-40.html>. [Zuletzt aufgerufen Juni 2024].
- Hanbury Brown, R, J Davis und L R Allen (Apr. 1974). „The angular diameters of 32 stars“. In: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 167.1, S. 121–136.
- NKT Photonics (2023). *PILAS Manual Sample EU*. <https://www.nktphotonics.com/products/pulsed-diode-lasers/pilas/>. [Zuletzt aufgerufen Juli 2024].
- SPECTRUM Instrumentation (2024). *Datasheet M4i.2211-x8 - 8 bit Digitizer*. [https://spectrum-instrumentation.com/products/families/22xx\\_m4i\\_pci.php](https://spectrum-instrumentation.com/products/families/22xx_m4i_pci.php). [Zuletzt aufgerufen Juni 2024].
- SCI, Semiconductor Components Industries (2021). *Silicon Photomultipliers (SiPM), High PDE and Timing Resolution Sensors in a TSV Package J-Series SiPM Sensors*. [https://www.mouser.de/datasheet/2/308/1/MICROJ\\_SERIES\\_D-1811589.pdf](https://www.mouser.de/datasheet/2/308/1/MICROJ_SERIES_D-1811589.pdf). [Online; accessed 22-December-2022].
- Vogel, Naomi (2020). „Calibration of Photomultiplier Tubes for Intensity Interferometry at H.E.S.S.“ Magisterarb. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
- Watson, Jason J (2023). *spefit*. <https://gitlab.cta-observatory.org/cta-consortium/aswg/tools/spefit>. [Zuletzt aufgerufen Juli 2024].
- Wohlleben, Frederik (2022). „Multidimensional Optimizations of Photon Flux by Alignment of the H.E.S.S. Astro Quantum Optics Setup“. Magisterarb. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
- Zmija, Andreas, Peter Deiml, Dmitry Malyshev, Adrian Zink u. a. (Feb. 2020). „LED as laboratory test source for astronomical intensity interferometry“. en. In: *Opt. Express* 28.4, S. 5248–5256.



Zmija, Andreas, Naomi Vogel, Frederik Wohlleben, Gisela Anton u. a. (Dez. 2023). „First intensity interferometry measurements with the H.E.S.S. telescopes“. en. In: *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 527.4, S. 12243–12252.



## Acknowledgments

Here I want to thank my colleges and members of the working group. Since not everybody listed here is fluent in German, it will be written in English.

Special thanks to:

- **Naomi Vogel** and **Andreas Zmija** for supervising me during my work, there help on coming up with a topic and a measuring setup, there guidance and feedback on my analysis and writing, proofreading the theses and helping me finding litterateur.
- **Adrian Zink** for his help regarding the measuring setup and my python code, installing the PMTs into the aluminum tubes, and his feedback on my analysis.
- **Christopher Ingenhütt** for designing the aluminum tubes for the PMTs, providing photos of the MI<sup>2</sup>SO Setup, and his feedback and help regarding on my analysis.
- **Pedro Silva Batista** for for supervising me during my work, helping me finding litterateur, and his feedback on my analysis.
- **Stephen Weybrecht** for his feedback on my analysis and writing.
- **Gisela Anton** for her feedback on my analysis.
- **Alison Mitchell** for her feedback on my analysis, and supervising my theses.
- **Stefan Funk** for supervising my theses and letting me be part of the working group.



## Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, Paul Blaß (22820541), die vorgelegte Arbeit selbstständig und ohne unzulässige Hilfe Dritter sowie ohne die Hinzuziehung nicht offengelegter und insbesondere nicht zugelassener Hilfsmittel angefertigt zu haben. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen und wurde auch von keiner anderen Prüfungsbehörde bereits als Teil einer Prüfung angenommen.

Die Stellen der Arbeit, die anderen Quellen im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind durch Angaben der Herkunft kenntlich gemacht. Dies gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie für Quellen aus dem Internet.

Mir ist insbesondere bewusst, dass die Nutzung künstlicher Intelligenz verboten ist, sofern diese nicht ausdrücklich als Hilfsmittel von dem Prüfungsleiter bzw. der Prüfungsleiterin zugelassen wurde. Dies gilt insbesondere für Chatbots (insbesondere ChatGPT) bzw. allgemein solche Programme, die anstelle meiner Person die Aufgabenstellung der Prüfung bzw. Teile derselben bearbeiten könnten.

Erlangen, 16.08.2024

Ort, Datum

Paul Blaß

Unterschrift