

Die Vermessung der Antwortfunktion von PMT und Elektronik für die MainzTPC, im Zusammenhang mit den XENON Dunkle Materie Experimenten

von

David Maksimovic

Bachelorarbeit in der Physik
vorgelegt dem Fachbereich Physik, Mathematik und Informatik (FB 08)
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
am 31. Mai 2017

1. Gutachter: Prof. Dr. Uwe Gerd Oberlack
2. Gutachter: Dr. Patrick Achenbach

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Mainz, den 31.05.2017

David Maksimovic
ETAP / Xenon
Institut für Physik
Staudingerweg 7
Johannes Gutenberg-Universität D-55128 Mainz
dmaksimo@students.uni-mainz.de

Inhaltsverzeichnis

I. Einführung	1
II. Theoretische Grundlagen	5
1. Photomultiplier Tubes (PMTs)	7
1.1. Funktionsweise	7
1.2. Einzelphotoelektronenspektrum	11
1.3. Zustandekommen der Signal-Funktion	11
2. Picosekunden-Laser	13
III. Versuchsaufbau	15
1. Aufbau	17
1.1. Kernaspekt	17
1.2. Positionierung	17
1.3. DAQ und Elektronikette	20
2. Schaltplan	25
IV. Analysemethoden	27
1. Feststellung des Signalverlaufs	29
2. Superposition digitalisierter Signalformen	33
V. Auswertung	35
1. Zeitverhalten der Signalform	37
1.1. Jitter	37
1.2. Oberfläche des PMTs	41
1.3. Einfluss der Elektronikette auf das Zeitverhalten	45
1.3.1. Signalformänderung durch die Elektronikette	45
1.3.2. Einzelphotoelektronen (SPE)	52

Inhaltsverzeichnis

VI. Zusammenfassung und Ausblick	55
A. Anhang	59
B. Literaturverzeichnis	71
C. Danksagung	79

Teil I.

Einführung

Photomultiplier Tubes (PMTs) haben durch ihre Fähigkeit schwaches Licht zu detektieren, bis hin zu einzelnen Photonen, eine signifikante Rolle in physikalischen Experimenten erlangt, vorwiegend in der Kern- und Hochenergie-Physik. Die MainzTPC ist eine zweiphasige Zeitprojektionskammer mit flüssigem und gasförmigem Xenon, welche zwei PMTs nutzt, um Szintillationslicht von Xe^* -Excimern zu detektieren. Diese entstehen durch Stöße von diversen Strahlungsarten an Xenon. Die gewonnenen Informationen über die Anregestärke der Strahlungsarten wird wiederum genutzt, um Ausschlusskurven für die Suche nach Dunkler Materie durch die XENON100- und XENON1T-Experimente am LNGS in Gran Sasso zu bilden. Die Untersuchung des Verhaltens von PMTs und deren Ausleselektronik ist also ein wichtiger Aspekt, um eindeutige Aussagen über das detektierte Szintillationslicht zu treffen.

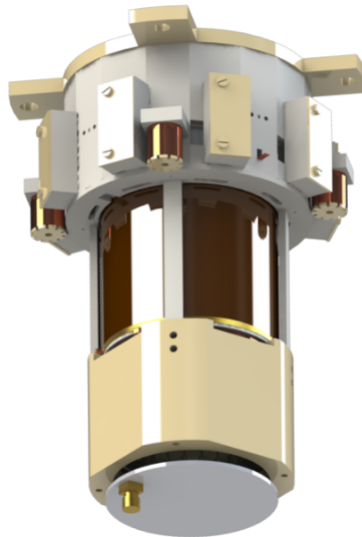


Abbildung 1.: Eine computergenerierte Darstellung der MainzTPC. Die Photomultiplier sind in dieser jeweils oben und unten an der Zeitprojektionskammer montiert [1].

Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit dem PMT Modell R6041-406 von HAMAMTSU [2], das für die MainzTPC konstruiert und dort eingesetzt worden ist.

Teil II.

Theoretische Grundlagen

1. Photomultiplier Tubes (PMTs)

Die theoretischen Grundlagen und Hintergründe von Photomultipliern orientieren sich an dem Buch *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments* von W.R.Leo [3].

1.1. Funktionsweise

PMTs kommen in vielen Formen und Varianten vor. Der typische Aufbau eines PMTs beginnt meistens mit einer lichtdurchlässigen Oberfläche vorne, deren Innenseite mit photosensitivem Material ausgekleidet ist und die Funktion einer Kathode übernimmt. Im Inneren eines PMTs befinden sich leiterförmig angeordnete Dynoden in einem Vakuum, welche das Elektronen-Vervielfach-System bilden. Dieses System erzeugt aus einem zunächst schwachen Photostrom mit Hilfe einer Kette von sekundären Emissions-Elektroden, den Dynoden, ein messbares Signal an der Anode, die den Schlussteil eines PMTs bildet. Das Prinzip, nach dem eine solche Anordnung arbeitet, ist der Kaskaden-Effekt: Löst ein Photon durch den photoelektrischen Effekt ein Elektron aus dem Kathodenmaterial heraus, wird dieses durch eine angelegte Spannung in Richtung der ersten Dynode beschleunigt, wo es durch das Auftreffen weitere Elektronen herauslöst. Da zwischen den Dynoden Spannungsdifferenzen herrschen, ergibt sich so ein Kaskaden-Effekt. In der schematischen Zeichnung wird das Arbeitsprinzips eines PMTs nochmal verdeutlicht [Abbildung 2].

Betrachtet man die Bauelemente genauer, ergeben sich verschiedene Qualitätsfaktoren, die entscheidend für die Effizienz der Photomultiplier sind. Die Photokathoden bestehen oft aus halbleitendem Material. Die PMT-Fenster bestehen meistens aus Quarz oder Glas. Die Ausbeute an tatsächlich ausgelösten Elektronen beim Auftreffen der Photonen auf die aktive Schicht, wird durch die Quantenausbeute (**quantum efficiency** (QE)) mit $\eta(\lambda)$ gekennzeichnet. Dieses gibt das Verhältnis von der Anzahl der ausgelösten Photoelektronen zur Anzahl der eingestrahnten Photonen wieder, wobei λ der Wellenlänge des eingestrahnten Lichtes entspricht. Für das Modell R6041-406 von Hamamtsu mit einer Bialkali-Beschichtung als Photokathode nimmt die QE für 25°C im Durchschnitt Werte von $\eta = 30\%$ an [2]. Allgemein weisen Bialkali-Photokathoden eine große Sensitivität für Licht des Ultraviolett-Blau-Spektrums auf und sind weniger sensitiv bei Wellenlängenbereichen ab 600 nm.

Das untersuchte Modell ist nach Herstellerinformationen auf Reaktionen für den Wellenlängenbereich von 160 bis 650 nm ausgelegt [2]. Zum Vergleich dazu strahlen

1. Photomultiplier Tubes (PMTs)

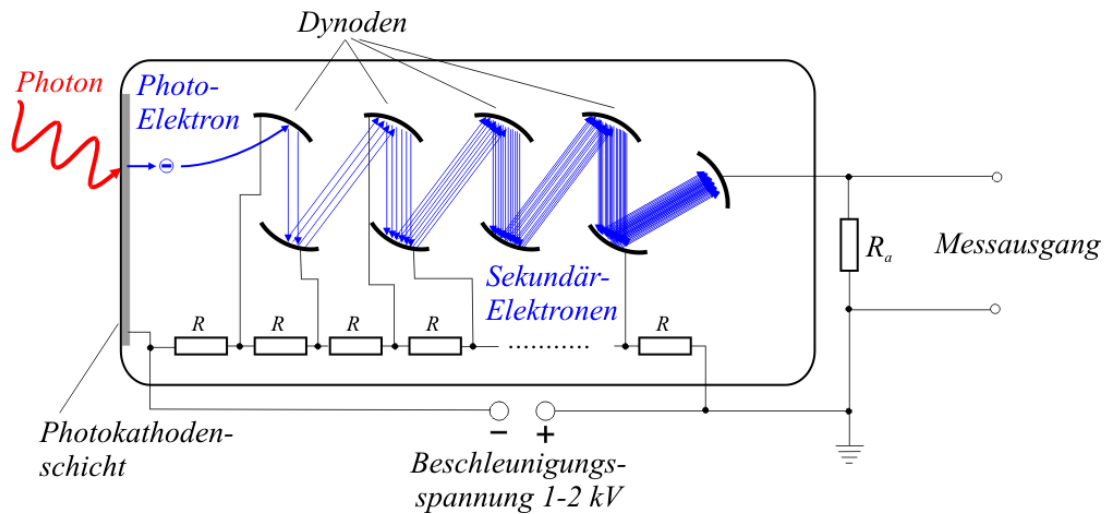


Abbildung 2.: Eine schematische Darstellung des Aufbaus und des Kaskadenprozesses eines PMTs [4].

die Xe*-Excimer mit einer Wellenlänge von 178 nm [5] ab und der in dieser Bachelorarbeit benutzte Picosekunden-Laser arbeitet im Bereich von $(467,4 \pm 5)$ nm [6].

Die kinetische Energie E eines emittierten Elektrons ergibt sich durch die Einsteingleichung:

$$E = h \cdot \nu - \Phi \quad (1.1)$$

mit h dem Planckschen Wirkungsquantum, ν der Frequenz des Photons und Φ der Austrittsarbeit. Es gibt eine notwendige minimale Grenzfrequenz, bevor der photoelektrische Effekt stattfinden kann, wobei sie Schwankungen unterliegt. Diese kommen zustande aufgrund abweichender Dicken der Beschichtung auf der Kathode, dem eingestrahlteten Spektrum des Lichts und anderen intrinsischen Eigenschaften des PMTs wie z.B. dem thermischen Rauschen, welches die Austrittsarbeit beeinflusst.

Die Verstärkung der Dynodenkette kann bestimmt werden durch die Betrachtung der Verstärkung jeder einzelnen Elektrode selbst. Diese wird durch das Sekundäremissionsverhältnis σ beschrieben, wobei dieser Wert die Vervielfachung, also den Quotienten aus ausgelösten Elektronen zu aufgetroffenen Elektronen angibt. Die Theorie zu der sekundären Emission ist ziemlich ähnlich zur photoelektrischen Emission, wobei hier die Photonen durch die Elektronen ersetzt werden. Beim Auftreffen eines Elektrons wird dessen kinetische Energie an das Dynoden-Material abgegeben, wodurch einige Elektronen aus dem Material herausgelöst werden.

Das Dynoden-Material muss neben einem hohen Sekundäremissionsverhältnis σ zusätzlichen Ansprüchen gerecht werden, wie der Gewährleistung der Stabilität des Vervielfachungseffekts bei hohen Strömen und einer geringen thermischen Emission und damit einem niedrigeren Rauschen. Das Modell R6041-406 arbeitet mit 12 Dynoden wobei eine Gesamtverstärkung (engl. *gain*) im Bereich von typischerweise 10^6 liegt [2].

Der Wert von σ berechnet sich folgendermaßen:

$$\sigma = K \cdot V_d \quad (1.2)$$

wobei K eine Proportionalitätskonstante und V_d die Potentialdifferenz zwischen den Dynoden ist. Nimmt man an, dass die angelegte Spannung äquivalent unter den Dynoden verteilt wird, resultiert für den *gain*:

$$G = \sigma^n = (K * V_d)^n \quad (1.3)$$

mit n als Anzahl der Dynoden.

Die Auflösung eines PMTs variiert aufgrund der Transitzeit der Elektronen und Fluktuationen, hervorgerufen durch statistisches Rauschen. Nachdem das Elektron ausgelöst wird, soll sein Weg zur ersten Dynode idealerweise zielgerichtet, zeitlich einheitlich und verlustfrei erfolgen.

Die Transitzeit der Elektronen ist aber abhängig von diversen Faktoren: Zum Einen ist die Weglänge des emittierten Elektrons und dessen kinetische Energie zu berücksichtigen. Hat zum Beispiel ein Elektron, welches aus der Mitte des PMTs ausgeschlagen wurde, den Weg zur ersten Dynode zurückgelegt, so hat ein zeitgleich gestartetes Elektron, welches am Rand emittiert wurde, etwa ein Drittel des Weges zurückgelegt. Für schnelle PMTs ist die zeitliche Unveränderlichkeit bei unterschiedlichen Auftreffstellen besonders wichtig. Falls die erste Dynode asymmetrisch eingebaut ist, verlängert sich die Transitzeit zusätzlich. Dieser Effekt trägt den Namen *transit time difference* (dt. Laufzeitdifferenz) und ist ein Resultat der Geometrie des Systems. Man kann den Effekt durch eine sphärische Kathode gering halten oder aber auch durch eine Modifikation des elektrischen Feldes, sodass in den Außengebieten größere Feldstärken entstehen.

Die Emissionsrichtung und die Energie der Elektronen bewirken hingegen den *transit time spread* (dt. Signallaufzeitverbreiterung). Offensichtlich benötigen Elektronen mit einer hohen kinetischen Energie eine geringere Zeit, um die erste Dynode zu erreichen, vorausgesetzt die Trajektorie ist nicht nahezu parallel zur Kathodenoberfläche. In modernen PMTs beträgt die Transitzeit zwischen Photokathode und der ersten Dynode 0,2 bis 0,5 ns. Um diesen Effekt zu verringern, müssen die elektrischen Felder dort im PMT hoch sein.

Die fundamentale Grenze der Auflösung eines PMTs bildet das erwähnte statistische

1. Photomultiplier Tubes (PMTs)

Rauschen. Diese Grenze ist der statistischen Natur der Photoemission und sekundären Emissionsprozessen zuzuschreiben: Bestrahlt man einen PMT mit einer konstanten Intensität an Licht, kann man beobachten, dass der Strom an der Anode um einen Mittelwert fluktuiert. Der Effekt ist unter dem Namen *shot noise* oder auch *Schottky Effekt* bekannt. Für den oben erwähnten Aufbau eines lange, konstant angestrahlten Photomultipliers kann die Stärke des Effekts berechnet werden. Hierzu nimmt man an, dass die durch Photonen ausgelösten Ereignisse einer Poissonverteilung folgen, welche innerhalb einer Zeitperiode τ stattfinden und zusätzlich eine Binomialverteilung für die Wahrscheinlichkeit der Emission eines Photoelektrons verlangt. Die Abweichung des Effektivwerts berechnet sich dann durch

$$\langle \Delta I^2 \rangle = \frac{Ie}{\tau} \quad (1.4)$$

mit I als Kathodenstrom und e als Elektronenladung. Im Allgemeinen sind die Multiplier für höchstens 10% des statistischen Rauschens in einem typischen PMT-Signal zuständig.

Weitere Einflüsse auf Messungen liefert der *Dark Current* (dt. Dunkelstrom). Die Bezeichnung bezieht sich auf einen Strom, welcher trotz unbeleuchtetem Photomultiplier fließt. Er hat seine Ursprünge in vielerlei Quellen: thermische Emission von dem Kathoden- und Dynodenmaterial, Leckströme, radioaktive Kontamination (Hintergrundstrahlung oder Umgebungs-/Arbeitsmaterial) und deren Begleiterscheinungen wie Ionisations- und Lichtphänomene. Die thermische Emission macht hier den größten Anteil aus, wobei sich ihr Beitrag mit Hilfe der Richardson-Gleichung beschreiben lässt:

$$I = AT^2 \exp\left(\frac{-e\Phi}{kT}\right) \quad (1.5)$$

mit A als Konstante, Φ der Austrittsarbeit, $T[K]$ der Temperatur und k der Boltzmannkonstante. Das Reduzieren der Temperatur führt demnach zur Verminderung des *Dark Currents*. Falls sich Restgas im PMT befindet, können durch den Transit der Elektronen die Gasatome ionisiert werden. Diese fliegen zur Kathode wo sie wiederum Elektronen auslösen. Dieser Prozess erzeugt einen Nachpuls (engl. *Afterpulse*), welcher Sekunden bis Mikrosekunden nach dem ersten Puls auftauchen kann.

Ein wichtiges Maß zur Beurteilung der Effektivität eines PMTs ist die Detektionseffizienz. Dies ist das Produkt aus der Quanteneffizienz η mit einem Wert α , der den Anteil der Photoelektronen, welche von den Dynoden verstärkt werden, widerspiegelt. Realistische Werte für ν liegen für Bialkalir basierendes Kathodenmaterial zwischen 0,25 bis 0,3, für α etwa bei 0,7. So ergibt sich für die Detektionseffizienz ein durchschnittlicher Werte von ca 20%.

1.2. Einzelphotoelektronenspektrum

Ausgehend von der oben beschriebenen statistischen Natur des Austritts der Photoelektronen aus der Kathode kann man die Poissonverteilung verwenden, um Messungen als Einzelphotoelektronen (engl. single photo-electrons (SPE))-Messungen zu präparieren. Der prozentuale Anteil eines Erwartungswerts von SPEs, Multipletts oder einem Rauschsignal kann dann abgeschätzt werden durch:

$$P(p, n) = \frac{p^n e^{-p}}{n!} \quad (1.6)$$

p entspricht dabei dem prozentualen Anteil der aufgenommenen Signale (Waveforms), welche auch als solche registriert worden sind, n ist Zahl der Photonen, die zu diesen Pulsen beigetragen haben. Arbeitet man mit einem Wert von 5% als Kriterium, d.h. nur 5% der aufgenommenen Signalformen enthalten tatsächlich einen dem Laser zuordenbaren Ursprung, während die restlichen Signale zu einem Großteil Rauschen darstellen. Man kann die Wahrscheinlichkeit der Erwartungswerte für $p = 0$ und $p = 0,05$ mit den folgenden Formeln berechnen:

$$\frac{0,05^0 e^{-0,05}}{0!} \approx 95,12\% \quad (1.7)$$

$$\frac{0,05^1 e^{-0,05}}{1!} \approx 4,76\% \quad (1.8)$$

$$\Rightarrow 100\% - 95,12\% - 4,76\% = 0,12\% \quad (1.9)$$

Tut man dies, dann sind $\approx 95,12\%$ der aufgezeichneten Signale leer bzw. es wurde für $\approx 95,12\%$ kein Lichtsignal registriert, obwohl der Laser ein Photon abgegeben hat. Dafür kann man für $\approx 4,76\%$ der aufgezeichneten Signale einzelne Photoelektronen erkennen. Die übrigen $0,12\%$ der Signale sind Multipletts (z.B. Zwei-Photoelektronen). Es ergibt sich ein Verhältnis von $97,48\%$ SPE Waveforms zu $2,52\%$ Multiplett-Erscheinungen.

1.3. Zustandekommen der Signal-Funktion

Um die charakteristische Antwortfunktion des Photomultipliers und den Einfluss von Verstärkerketten zu beschreiben, wird hier ein Modell aus der Doktorarbeit [1] von Dipl. phy. Bastian Beskers verwendet: Bei einem beliebigen Zusammenstoß mit Xenon als Targetmaterial wird eine Energie E in verschiedenen Xenonatomen deponiert, da jeweils nur eine gewisse Energie W aufgenommen werden kann. Die Anzahl der angeregten Atome, welche elektromagnetische Strahlung abgeben, ist folglich der Quotient von der Energie E und W . Jedes dieser angeregten Atome kombiniert mit neutralen Atomen zu Eximeren und strahlt in seinem Zerfallsprozess ein einziges Photon ab. Zwei Varianten der Zerfallszeit sind am häufigsten zu beobachten, abhängig vom Spinzustand des Eximeres. Diese können sich in dem Triplet(Spin=1)- oder Singlet(Spin=0)-Zustand befinden haben, sodass sich dadurch unterschiedliche Zerfallszeiten ergeben.

1. Photomultiplier Tubes (PMTs)

Der Zerfallsprozess kann durch einen exponentiellen Ansatz beschrieben werden. Dieser kann bei geeigneter Zeitvariablenwahl auch ein Signal eines einzelnen Photolektron-Ereignisses am PMT nachbilden. Das ganze entspräche dort einem perfekten δ -Puls. Durch drei Zeitvariablen (τ_{anode} , τ_{RC} , σ) werden Möglichkeiten gegeben, weitere, abweichende Pulsformen charakterisieren zu können. Der Wert τ_{anode} beschreibt die Breite des Ladungspulses an der Anode, τ_{RC} spiegelt den Anteil des RC-Elements der PMT-Base wieder und σ den Einfluss eines Amplifiers. Die Funktion für den PMT selbst beherbergt demnach nur zwei der Zeitvariablen in zwei Exponentialfunktionen. Diese werden genutzt, da δ -Pulse durch exponentiellen Zerfall mit sehr kleinen Zerfallszeiten modelliert werden können:

$$S_{PMT}(t) = \frac{A_0}{\tau_{RC} - \tau_{anode}} \left[\exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau_{RC}}\right) \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau_{anode}}\right) \right] \quad (1.10)$$

Möchte man den Einfluss des Amplifiers einbeziehen, so muss man die Funktion mit einem Gauß $g(\sigma, t)$ analytisch falten.

$$g(\sigma, t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (1.11)$$

So ergibt sich die Formel:

$$S_{spe} = S_{PMT}(t) * g(\sigma, t) \quad (1.12)$$

2. Picosekunden-Laser

Der verwendete LED-Laser von Advanced Laser Diode Systems (A.L.S)[6] erzeugt ultrakurze, optische Pulse im Bereich von einigen wenigen Picosekunden. Der Zeitverlauf einer Emission folgt einer Gauß-Form, da ein Puls bei Null startet, ein Maximum durchläuft und anschließend wieder auf Null abfällt. Somit ergibt sich ein charakteristischer Wert von PulsLasern, nämlich die Pulsdauer, die durch die Halbwertbreite der Gauß-Kurve angegeben werden kann. Allgemein kann die Dauer solcher Pulse je nach Bauart und damit der Zweck des Diodenlasers stark variieren. So sind RiesenimpulsLasers, mit Pulsdauern im Nanosekundenbereich, UltrakurzpulsLasers mit Pulsdauern im Bereich von wenigen Pikosekunden bis einigen Femtosekunden und Laser mit Pulsen im Bereich von einigen 100 as (Attosekunden) möglich.

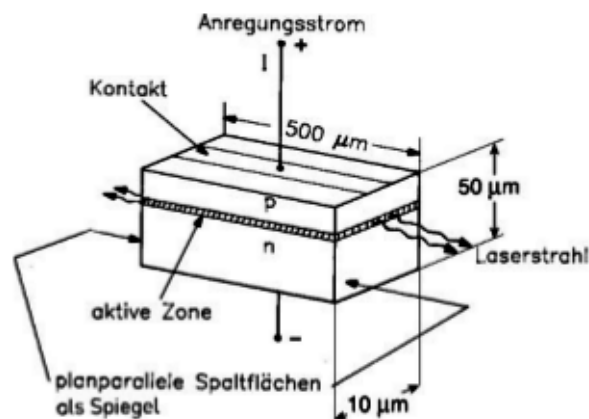


Abbildung 3.: Schematischer Aufbau eines einfachen Diodenlasers [7].

Ein Dioden-/ Halbleiterlaser besteht in der einfachsten Darstellung aus zwei planparallelen Flächen, welche den Resonator bilden. Man kann diesen durch das Spalten eines Kristalls erzeugen. Die Endfläche kann bei DiodenLasern vollständig oder nur teilweise verspiegelt sein. Zusätzliche Verspiegelungen sind nicht unbedingt notwendig, da die Verstärkung bei DiodenLasern meist sehr hoch ausfällt. Die anderen Flächen des Kristalls sind rau, um Oszillationen in unerwünschten Bereichen zu unterdrücken. Problematisch an einem Diodenlaser ist der Beugungseffekt an dem schmalen Emissionsquerschnitt. Dort beträgt die Divergenz des Strahls im Schnitt bis zu 30° quer zur aktiven Schicht. In Abbildung 3 sieht man die Homostruktur. Eine solche Struktur besitzt eine p- und n-Schicht aus demselben Material, welches aber unterschiedliche Dotierungen aufweist. Es ist eine verlustanfällige Konfiguration, die den benötigten

2. Picosekunden-Laser

Schwellstrom für den Laserbetrieb hochtreibt, da eine Führung des Lasers in der aktiven Schicht kaum gegeben ist und der Strahl dadurch in nicht-laseraktive Bereiche eindringen kann. Hinzu kommt, dass Absorptionsprozesse im aktiven Medium das Licht dämpfen. Zur Überwindung dieser Verluste ist ein minimaler Pumpstrom notwendig, der als Schwellstrom bezeichnet wird: Unterhalb des Schwellstroms emittiert die Laserdiode inkohärentes Licht, oberhalb kohärentes Licht. Zur Verringerung der Schwellstromdichte kann man den Grundaufbau modifizieren, wie es Laser mit einer Doppel-Heterostruktur tun, oder man verbessert die Führung des Lasers, ähnlich wie bei einem Streifenlaser oder einem Rippenwellenleiter-Laser.

Der für diese Bachelorarbeit benutzte Pikosekundenlaser nutzt einen anwachsenden Pumpstrom, welcher die Ladungsträgerdichte n erhöht bis diese einen gewissen Grenzwert (im Schaubild 4) überschreitet, der gerade der Laserschwelle entspricht. Schaltet sich dann der Pumpstrom i ab, sinkt n wieder unter den Grenzwert. Das Ganze resultiert in der Emission eines einzelnen optischen Pulses. Zu sehen ist dies in Abbildung 4.

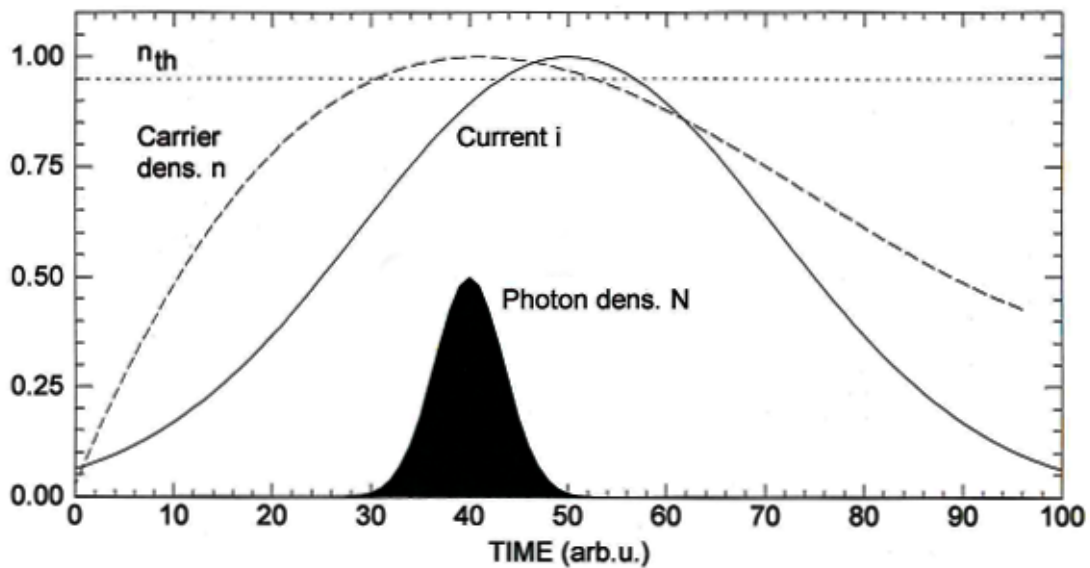


Abbildung 4.: Darstellung eines Gain switches mit der freien Ladungsträgerdichte n und Photonendichte N [6].

Teil III.

Versuchsaufbau

1. Aufbau

1.1. Kernaspekt

Das zu untersuchende PMT-Modell R6041-406 [2] befindet sich in einer Fassung innerhalb eines abgedunkelten Kastens (engl. Dark Box), zusammen mit einem Pikosekunden-Laser, dessen Output durch eine Blende innerhalb eines angeschlossenen Glasfaserkabels reguliert werden kann. Ein Präzisions-Mikrostelltisch wird durch Motoren des Modells M-403.2DG [8] von Physik Instrumente (P.I) bewegt, wobei diese an eine Bewegungssteuerung des Modells C-884 von P.I. [9] angeschlossen sind. Der Mikrostelltisch kann mit einer Auflösung von $0,018 \mu\text{m}$ das Ende der Glasfaserleitung des Lasers und damit den Laserkopf bewegen. Der Picosekunden-Laser mit ($\lambda = 467,4 \pm 5$) nm Wellenlänge von der Firma Advanced Laser Diode Systems (A.L.S) [6] besitzt neben der Laserquelle auch einen Controller, der das Trigger-Signal für die restliche Datenerfassung (engl. data acquisition, kurz DAQ) erzeugt. Das DAQ ist außerhalb der Dark Box platziert und besteht aus den zwei Karten (engl. Boards) SIS3316 [10] und SIS3305 [11], wobei nur das Board SIS3305 das PMT-Signal aufnimmt. Trotzdem werden beide Boards durch das Trigger-Signal angesprochen Ereignisse aufzunehmen. Das Signal aus dem Laser-Controller muss zunächst durch ein Lineargate von der Firma Phillips Scientific (Model 744) seine Polarität wechseln, da für die Boards aus dem positivem Rechteck-Puls des Triggersignals ein negatives Rechteck-Signal erzeugt werden muss. Im nächsten Schritt wird es in einem Discriminator vom selben Hersteller (Model 705) in einen Nimm-Puls von 0,7 V umgewandelt, der anschließend beide DAQ-Bords bedienen kann.

Ein wichtiger Punkt ist die bereits erwähnte Blende [12], die sich innerhalb der Verbindung vom Laser zum Laserkopf befindet. Eine kleine Schraube öffnet die Blende, wenn man sie gegen den Uhrzeigersinn dreht, und schließt diese im Uhrzeigersinn. Dabei entspricht eine Drehung von 45° Grad der kleinen Schraube einer Veränderung der Lichtintensität um den Faktor 10. Die beiden wichtigsten Einstellungen sind in Abbildung 6 und 7 zu sehen. Die Dämpfungsglieder der Blende bestehen aus zwei Kollimationslinsen, welche durch das Drehen der Gewinde-Radialschraube den Strahl blocken. Dadurch ist die Blende polarisationsunempfindlich.

1.2. Positionierung

Der PMT wurde so positioniert, dass die Lammellenstruktur (grid) senkrecht von oben nach unten verläuft. Überprüft wurde dies mit Hilfe des Konzeptes der Zentralprojektion aus der darstellenden Geometrie mit dem Bildbearbeitungsprogramm Autodesk

1. Aufbau

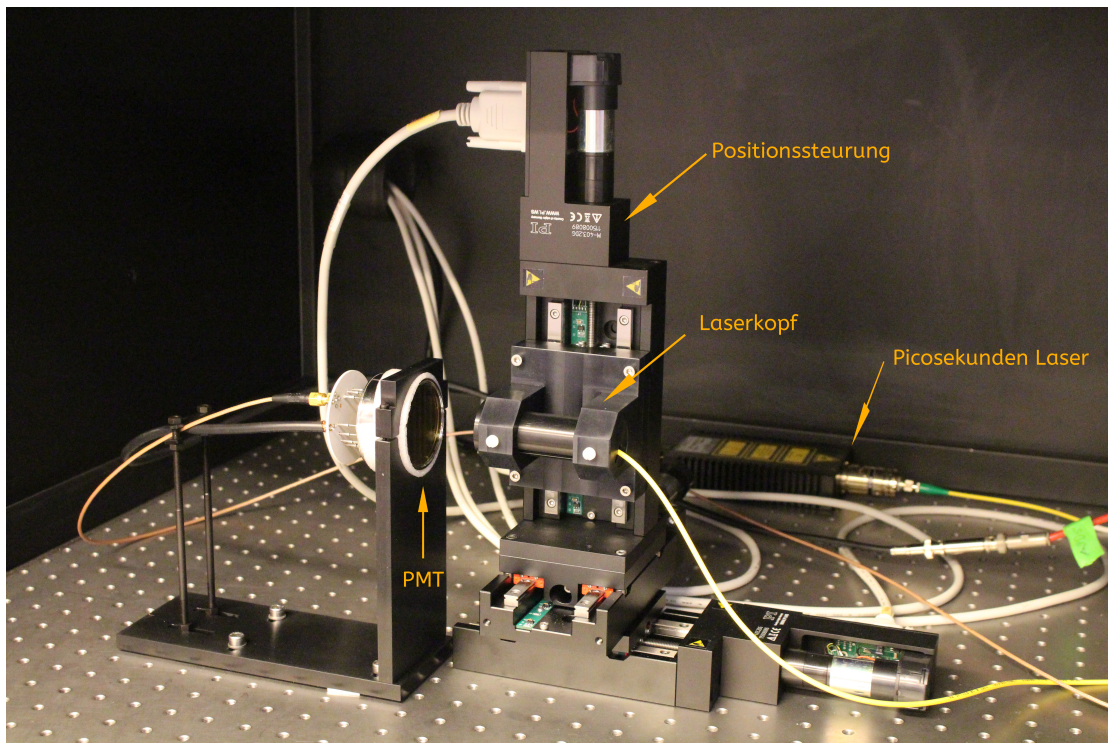


Abbildung 5.: Vorne links zu erkennen ist der PMT in einer Aluminium-Fassung eingebettet und rechts davon das Glasfaserkabel mit dem Laserkopf, welches an der Positionsteuerung angebracht ist. Im Hintergrund sieht man die Laserdiode. Nicht zu sehen ist hier die Blende, diese befindet sich rechts außerhalb des Bildes.

Sketchbook. Dabei nutzt man aus, dass auf Darstellungen senkrechte oder waagerechte Kanten von Objekten parallel zu weiteren senkrechten/waagerechten Kanten dargestellt werden. Angewendet auf die Lamellenstruktur ist dies in Abbildung 8 zu sehen. Es wurde mit einem Tiefenmesser überprüft, ob der PMT einheitlich in der Fassung vorsteht. Die parallele Ausrichtung des PMTs bezüglich des Laserkopfs wurde mit Hilfe des Laser-Distanzmessgeräts Toolcraft LDM SOP [13] bestimmt, indem der Abstand von der Oberseite ($0,694 \pm 0,003$) m und der Unterseite ($0,695 \pm 0,002$) m des PMTs zur Wand überprüft wurde. Das Gleiche wurde dann mit dem Laserkopf durchgeführt (Oben: ($0,541 \pm 0,003$) m und Unten: ($0,543 \pm 0,003$) m).

Um das PMT mittig zu positionieren, wurde mit Hilfe eines Oszilloskops die Signalstärke an verschiedenen Positionen gemessen und danach die entsprechenden Korrekturen durchgeführt. Das Positionierungs-System von P.I. kann sich nur 50 mm pro Achse bewegen, dabei entspricht 0 mm dem Punkt am nächsten an den Motoren.

Für die X-Achse (Controller: Achse 2), senkrecht zu der Lamellenstruktur, ist eine Bewegung zur 0 mm Marke eine Bewegung nach rechts und zu 50 mm eine Bewegung nach links, für die Y-Achse (Achse 3), entlang der Lamellenstruktur, ist eine Bewe-



Abbildung 6.: Die Position für eine reguläre Messung mit ≈ 20 Photoelektronen.



Abbildung 7.: Die Position für die SPE-Messungen. In dieser Einstellung konnte das vorgegebene 5% Datenlimit erreicht werden.

gung zur 0 mm Marke eine nach oben und zu 50 mm eine nach unten. Die Achse 1, d.h. die Distanz zwischen Photomultiplier und Laserkopf, wurde bei allen Messungen nicht verändert und blieb konstant bei der Position 25 mm, was zzgl. 0,8 mm Sicherheitsabstand eine reelle Distanz von 33 mm ergibt. Das Festhalten der Position bezüglich der Achse 1 wurde beschlossen, nachdem Unregelmäßigkeiten beobachtet worden sind. Beim Durchfahren der Achse 1 senkten und erhöhten sich die Signale auf dem Oszilloskop mehrmals, obwohl man nur einen Brennpunkt erwartet. Bei ca. 25 mm wurde das schwächste Signal verzeichnet, sodass man eine Art Sättigungsverhalten aufgrund eines eintretenden Fokus interpretierte. Es werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Positionsangaben in eckigen Klammern angegeben [Achse 2, Achse 3]. Anstatt der vorgeschlagenen drei Achsen wurden vier gewählt, da bei oberflächlichen Scans mit einem Oszilloskop eine inhomogene Empfindlichkeit des PMTs festgestellt wurde. Zur Untersuchung der Beobachtung wurde für die Achsen 2 und 3 eine erhöhte Messpunktzahl von 19 gewählt. Es wurde für die Achse 2 eine Distanz von 4,45 mm zwischen den Messpunkten gewählt. Die Abstände für die Punkte bei der Achse 3 waren 4,3 mm. Der Wert weicht deswegen von dem Abstand bei der Achse 2 ab, da keine klaren Empfindlichkeitseinbrüche nachgewiesen werden konnten: Es blieb ein kleines Signal von 50 mA am Rand übrig, welches abnahm und zunahm, obwohl man sich von der Mitte zum Rahmen hin bewegte. Das Signal fiel zwar dann auf nahe Null ab, doch erwies sich der Abstand dieser Punkte pro Achse als unterschiedlich. Es waren zudem Randphänomene erkennbar, weswegen 5 dicht beieinander liegende Punkte in 0,5 mm Abstand pro Seite gewählt worden sind, um dieses zu untersuchen. Für die Abstände bei den Querachsen wurden 4,68 mm für die Achse 2 und 7,58 mm für die Achse 3 gewählt. Hier wurde ein einziger Punkt zur Randuntersuchung festgesetzt, da die anderen Achsen die Untersuchung abdeckten.

1. Aufbau

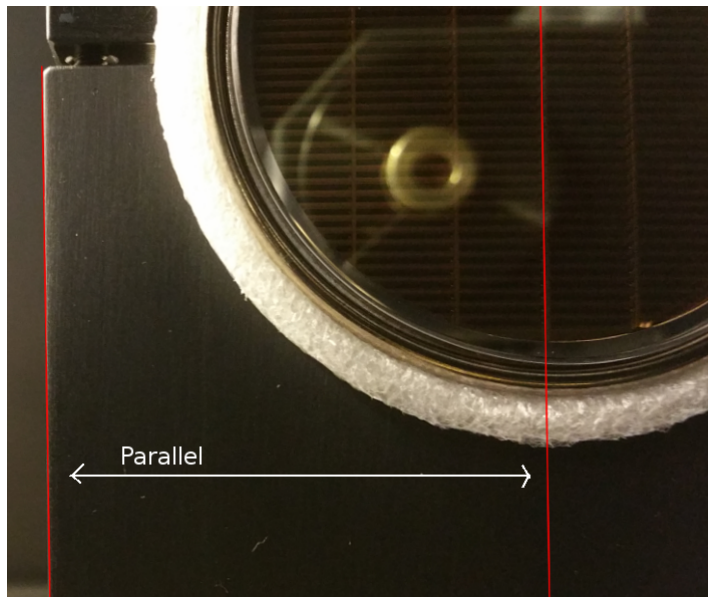


Abbildung 8.: Zu sehen ist die Frontseite des PMTs mit Polsterung, welches von einer in der hiesigen Werkstatt des Instituts gebauten Halterung gehalten wird. Beide roten, senkrecht verlaufenden Geraden sind parallel zueinander.

1.3. DAQ und Elektronikette

Die Datenerfassungs-Karten (Boards) SIS3316 und SIS3305 nehmen analoge Signale auf, welche dann durch einen Analog-Digital-Umsetzer in digitale Messdaten umgewandelt werden. Die umgewandelten Daten werden durch das auf CERN root und C++ basierende und angepasste Analysepaket, welches von Dipl. Phy. Bastian Beskers zusammengestellt worden ist, weiterverarbeitet. Um die Performanz des SIS3305 zu untersuchen wurden auch Daten mit dem Oszilloskop (Agilent Technologies DSO9254A) aufgenommen. Für diese Daten war ein Update und eine Modifizierung der Software nötig, um von den Analyseprogrammen verarbeitet werden zu können. Der Vorteil des Oszilloskops ist, dass dieses zum Einen mit einer Abtastrate (engl. Samplingrate) von 20 GSa/s arbeitet und zum Anderen vergleichsweise kleine Signalschwankungen (engl. Jitter) aufweist.

Das Board SIS3305, an dem das PMT angeschlossen ist, und das Board SIS3316 besitzen unterschiedliche Samplingraten: Während SIS3305 durch die Kombination von 4 Channelanschlüssen eine Zeitauflösung von 0,2 ns schafft, bewerkstelligt SIS3316 nur eine Zeitauflösung von 8 ns, dafür ist die Energieauflösung mit 5 V zu 1 V größer. Die Karten sind in Abbildung 14 dargestellt.

Ein beobachtbares Phänomen bei der Datenentnahme war, dass trotz zeitlich konstantem Trigger-Signal beide Boards unterschiedliche Event-Anzahlen in dem Programm von Dipl. Phys. Pierre Sissol verzeichneten. Das Analyseprogrammpaket

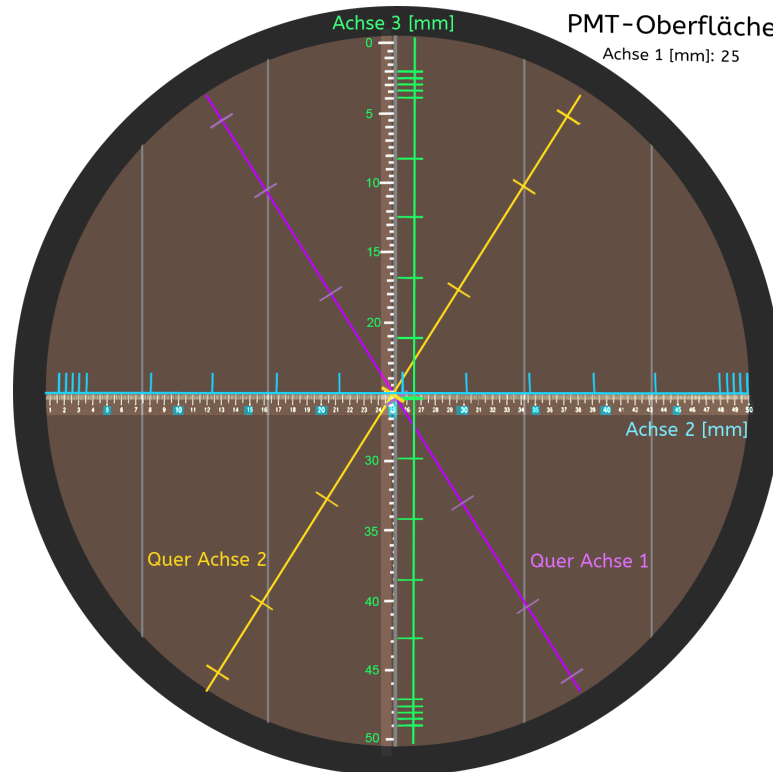


Abbildung 9.: Die PMT-Oberfläche wurde entlang vier Achsen durchfahren, wobei nur die Querachsen einen gemeinsamen Mittelpunkt besitzen bei [25,5 mm, 25,5 mm]. Die Achse 3 verläuft absichtlich neben der Mitte des PMTs, da eine Strebe sich dort befindet.

arbeitet nur mit Messdaten, welche für beide Boards die selbe Event-Anzahl besitzt. Es scheiterten rund 72 % der Messungen wegen des Verzählens und mussten von vorne gestartet werden.

Diese Aussage beruht auf einer Statistik, die für eine zwei-Stunden Messreihe ergab, dass von 145 begonnenen Messungen nur 33 richtig gezählt worden sind. Da eine DAQ-Datenaufnahme in mehreren Zyklen von je 2000 Aufnahmen arbeitet und diese auch so speichert, konnte für acht Messungen durch das Entfernen des Zyklus, bei welchen eine der Karten sich verzählt hatte, eine erfolgreiche Messung präpariert werden. Diese wurde nur dann durchgeführt, wenn das Mindestmaß von mehr als zehntausend Signalen dadurch nicht unterschritten wurde. So ergab sich eine Erfolgsrate mit 41 annehmbaren Messungen in einem zwei-Stunden-Zeitraum zu 28 %.

Das PMT-Signal wurde im Rahmen dieser Bachelorarbeit unter dem Einfluss von verschiedenen Konfigurationen mit einem Splitter (Abbildung 13) und Amplifieren analysiert. Der Splitter ermöglicht aus einem Signal zwei Signale mit halber Am-

1. Aufbau

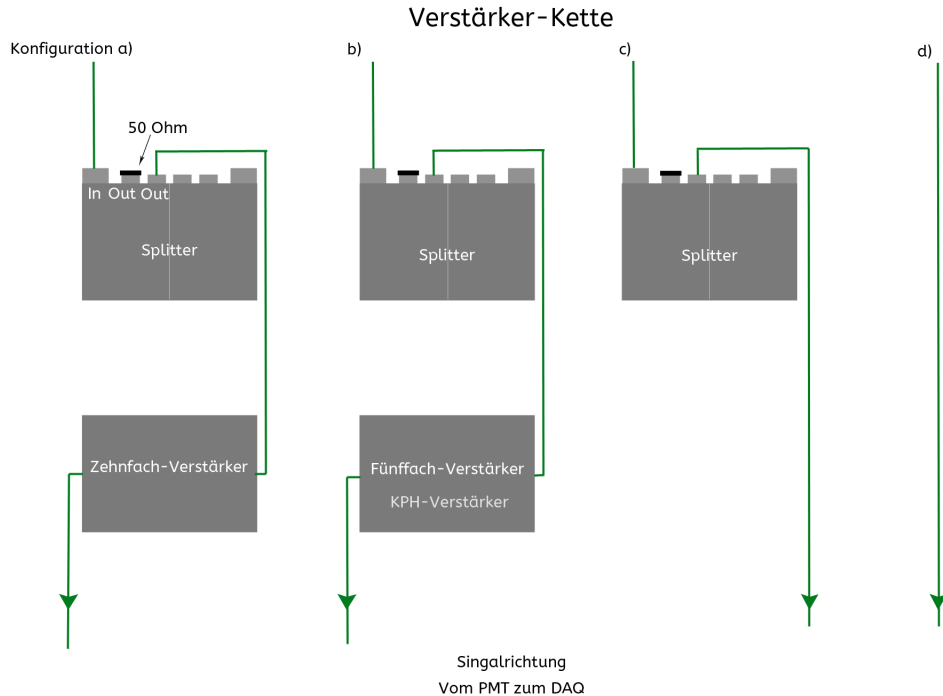


Abbildung 10.: Dargestellt sind die 4 Konfigurationen, welche im Rahmen dieser Bachelorarbeit als Elektronikette am PMT-Signal untersucht worden sind.



Abbildung 11.: Der Zehnfachverstärker mit dem Schirmgeflecht um die Anschlüsse gewickelt.

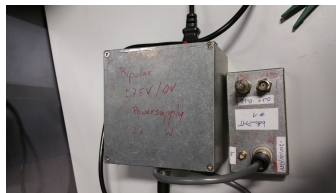


Abbildung 12.: Der Fünffachverstärker der KPH.



Abbildung 13.: Der benutzte Splitter.

plitude, ohne zeitliche Fluktuationen zwischen den Signalen, zu generieren. Es gab zwei Varianten von Amplifieren: Ein haus eigener Zehnfachverstärker (Abbildung 11) und ein Fünffachverstärker des Instituts für Kernphysik (KPH) (Abbildung 12). Die Konfigurationen, dargestellt in Abbildung 10, sind a) Splitter-Zehnfachverstärker, b) Splitter-Fünffachverstärker c) nur der Splitter und d) ohne Elektronikette. Zusätzlich

1.3. DAQ und Elektronikette

wurden die Konfigurationen mit und ohne Umwicklung durch ein Schirmgeflecht um die Anschlüsse getestet. Das Schirmgeflecht ist abgebildet in Abbildung 11.

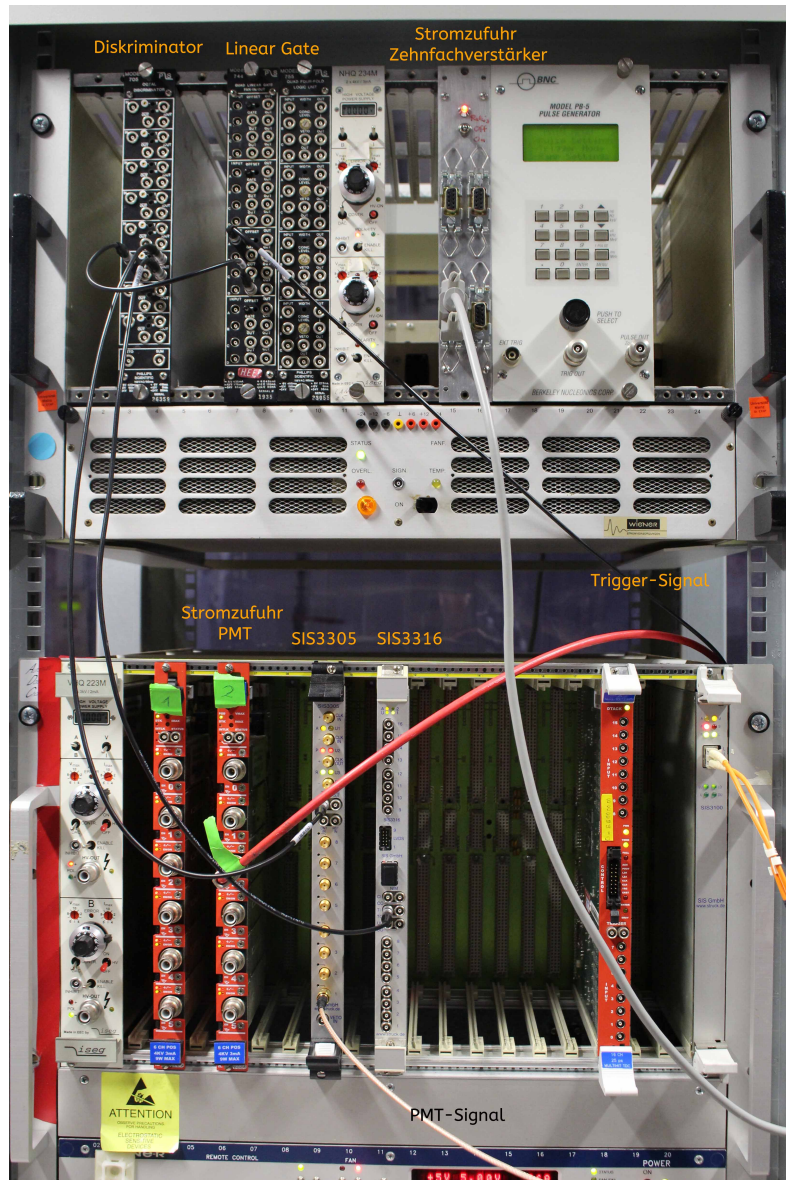


Abbildung 14.: Zu sehen ist eine Fotografie ein Teil des Versuchsaufbaus.

2. Schaltplan

Es wurden während der Bachelorarbeit verschiedene Varianten des dargestellten Aufbaus aus Abbildung 16 ausprobiert, wie zum Beispiel das Nacheinander-Triggern der beiden Boards oder das Arbeiten mit einem Veto. Diese Varianten besaßen einen Jitter von 20 ns oder funktionierten nicht. Schließlich wurde mit separaten Trigger-Signalen gearbeitet, da diese Variante am erfolgversprechendsten arbeitete. Auch wurde ver-

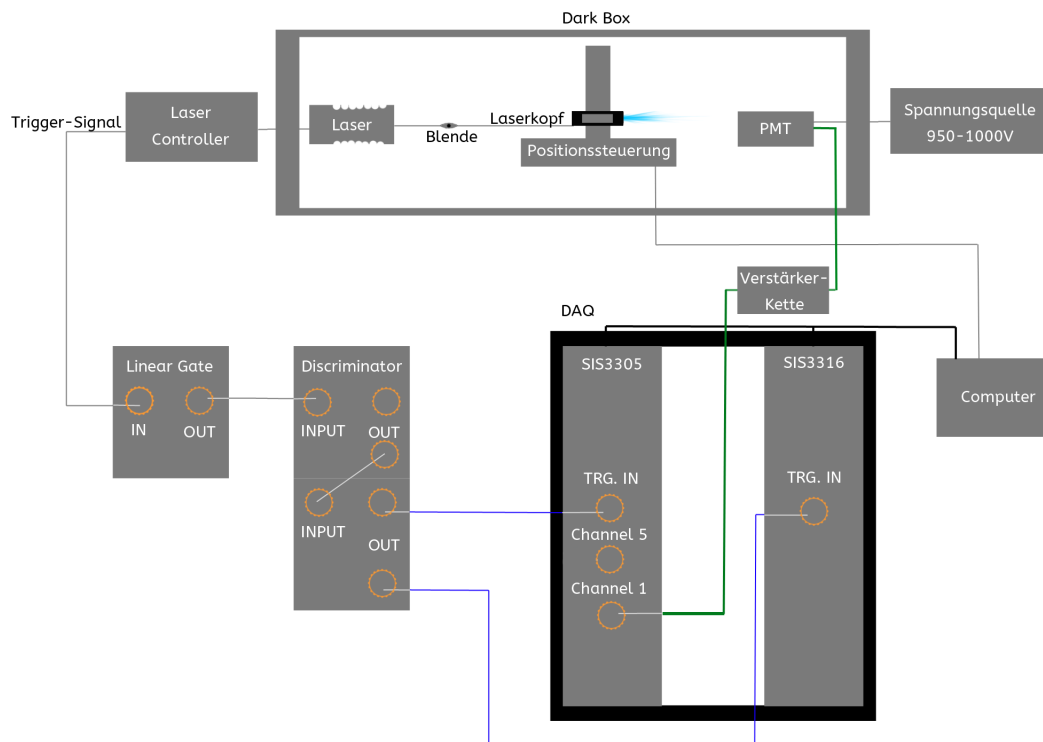


Abbildung 15.: Der Schaltplan für einer regulären DAQ-Messreihe.

sucht mit einem Veto-Signal eine Karte am Arbeiten zu hindern, damit die andere fertig wird, allerdings erwies sich dieser Aufbau als nicht arbeitsfähig. Für Messungen mit dem Agilent Oszilloskop wird das Trigger-Kabel direkt (ohne Elektronikette) mit dem Oszilloskop verbunden und auf dessen steigende Flanke getriggert. Das PMT-Signal wird dann auf einem anderen Channel des Oszilloskops aufgenommen. Der Schaltplan in Abbildung 16 zeigt einen Aufbau, welcher ein Trigger-

2. Schaltplan

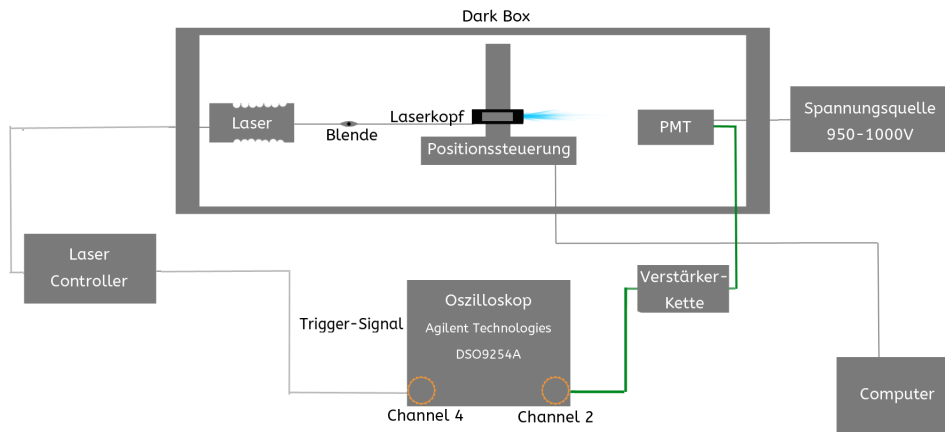


Abbildung 16.: Der Schaltplan für eine Messreihe bei der ein Trigger-Signal zusätzlich auf Channel 5 mit aufgenommen wird, um eine Korrekturmaßnahme gegen Fluktuation zu untersuchen

Signal auf Channel 5 aufnimmt. Dies war im Laufe der Untersuchung des Jitters eine mögliche Korrekturmaßnahme, jedoch unterscheidet sich der Aufbau für die anderen Untersuchungen lediglich durch das Fehlen der Verbindung zwischen dem Diskriminator und dem Channel 5.

Teil IV.

Analysemethoden

1. Feststellung des Signalverlaufs

Dieses Kapitel soll zur Nachvollziehbarkeit des Analyseprozesses dienen. Hierfür ist wichtig zu wissen, dass im Rahmen der Bachelorarbeit mit dem Betriebssystem Linux Debian 8 gearbeitet wurde. Es wird deutlich gemacht, wie die Konsolen-/ Terminalbefehle anzuwenden sind. Zur Datenanalyse wird die Programmiersprache C++ in Kombination mit Cern root (Version 5.30.01-64) verwendet.

Es werden die Programme **dataviewer**, **FitS1**, **TriggerWindowPeakToRoot** und **SuperpostionWaveforms**, dazu zahlreiche root-Skripte verwendet. Messdaten können mit dem Oszilloskop oder mit dem SIS 3305 aufgenommen werden. Arbeitet man mit SIS 3305-Daten, so muss mit Channel 2 in allen Einstellungen der Programme gearbeitet werden. Für Oszilloskop-Daten ist es Channel 0. Dieses Umstellen ist ein Überbleibsel von dem benutzten Anschlüssen für die MainzTPC in Dresden und einer internen Codierung des Agilent Oszilloskops.

Es wurde ein Dokument dem Analyse-Paket beigelegt, welches weitere Umstellungen des Programms zur Nutzung der Oszilloskop-Daten angibt.

1. Feststellung des Signalverlaufs

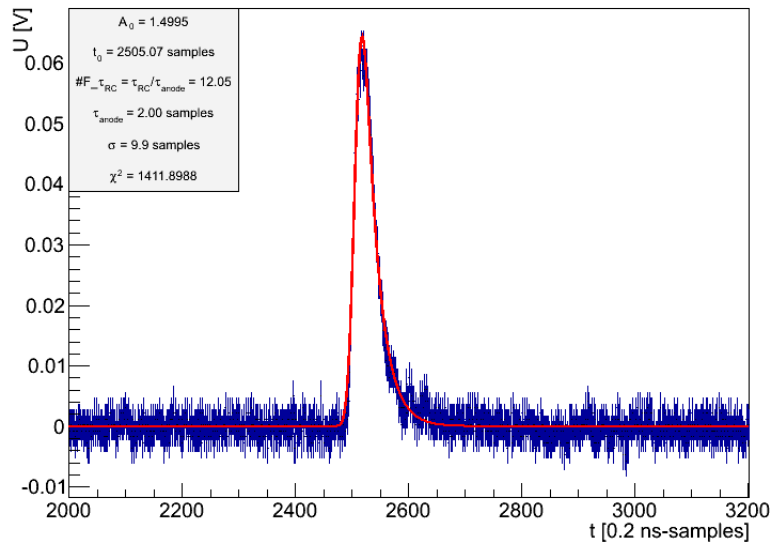


Abbildung 17.: Hier ist eine typische Waveform dargestellt. Es wurde mit 1000 V am PMT und keiner signalverändernden Elektronikette gearbeitet und am DAQ aufgenommen. Mit Hilfe des **FitS1**-Programms können die drei aus der Theorie erwähnten Zeitvariablen τ_{RC} , Sigma und τ_{anode} links im Graphen ausgelesen werden.

Nachdem eine Messung am DAQ oder Oszilloskop durchgeführt worden ist, ist es zunächst notwendig die Roh-Daten zu überprüfen. Das Programm **dataviewer** kann hierzu genutzt werden. Befindet man sich im Ordner **dataAnalysisLv10**, verwendet man den Konsolen-Befehl:

```
./bin/dataviewer Pfad zur gemessenen Datei mit Endung .mtd  
XML-File
```

Man kann grobe zeitliche Grenzen bestimmen, zwischen welchen Werten sich das abgebildete Signal im **DataViewer** befindet. Die Grenzen werden dann in das Programm **TriggerWindowPeakToRoot.C** eingefügt und dieses wird gestartet mit:

```
./bin/triggerWindowPeaksToRoot Pfad zum Ordner mit der Messung  
XML-File
```

Ausgehend von dieser Umwandlung der Messdaten in ein root-Format, wird mit einem **TBrowser** nach relevanten Amplituden- und Integralgrenzen in dem erstellten **TwpToRoot.root**-File gesucht. Diese werden für das Erstellen einer passenden Eventliste benötigt. Sie enthält je nach Modifikation des benutzten root-Skripts:

```
generateList.C(Pfad zum Ordner mit der Messung)
```

Informationen zur Pulsdarstellung: Es ist beispielsweise möglich alle Amplituden zu einem gewählten Zeitpunkt auf der Zeitachse darstellen zu lassen, oder die Amplituden auf den Wert 1 zu normieren.

Erst nach dem Erstellen einer Eventliste können die Fitfunktion erstellt werden. Ähnlich wie schon in der Theorie 1.3 beschrieben, werden zwei exponentielle Funktionen benutzt. In einer alternative Darstellung erhält man:

$$S = (1.0 - F_{\tau_{RC[l]}}) * \exp\left(\frac{-(t_A - t_0)}{F_{\tau_{RC[l]}}}\right) + P_L * \exp\left(\frac{t_A - t_0}{F_{\tau_{RC[s]}} * F_{\tau_{RC[l]}}}\right) * g(\sigma) \quad (1.1)$$

Dabei beschreibt $F_{\tau_{RC[l/s]}}$ den Faktor zwischen langer/kurzer Szintillation und τ_{RC} , wohingegen P_L den relativen Beitrag der langsamen Komponenten widerspiegelt. Die Funktion wird rekursiv anhand des Chi-Quadrat-Wertes angepasst. Ändert sich bei fünf aufeinanderfolgenden Optimierungen das Chi-Quadrat nicht mehr als 0,01, so wird die Rekursion beendet. Das Programm **FitS1** kann dazu aufgerufen werden, indem man im **dataAnalysisLv10**-Ordner den folgenden Befehl benutzt:

```
./bin/FitS1 Pfad zum Ordner mit der Messung XML-File
```

In dem erwähnten XML-File befinden sich die Startparameter für die Fits, die Ortsangabe der Eventliste und Informationen über die Fitparameter. Das Fit-Programm kommt an seine Grenzen durch Reflexionen oder Abweichungen jeglicher Art nach dem Hauptpeak, welche durch die Amplifier hervorgerufen werden.

Eine Möglichkeit mit den Messdaten umzugehen, ist das Erstellen einer Überlagerung aller Signale einer Messung durch den Befehl:

```
./bin/Superposition Pfad zum Ordner mit der Messung XML-File
```

Mehr zu den Superpositionen wird im folgenden Kapitel genannt.

2. Superposition digitalisierter Signalformen

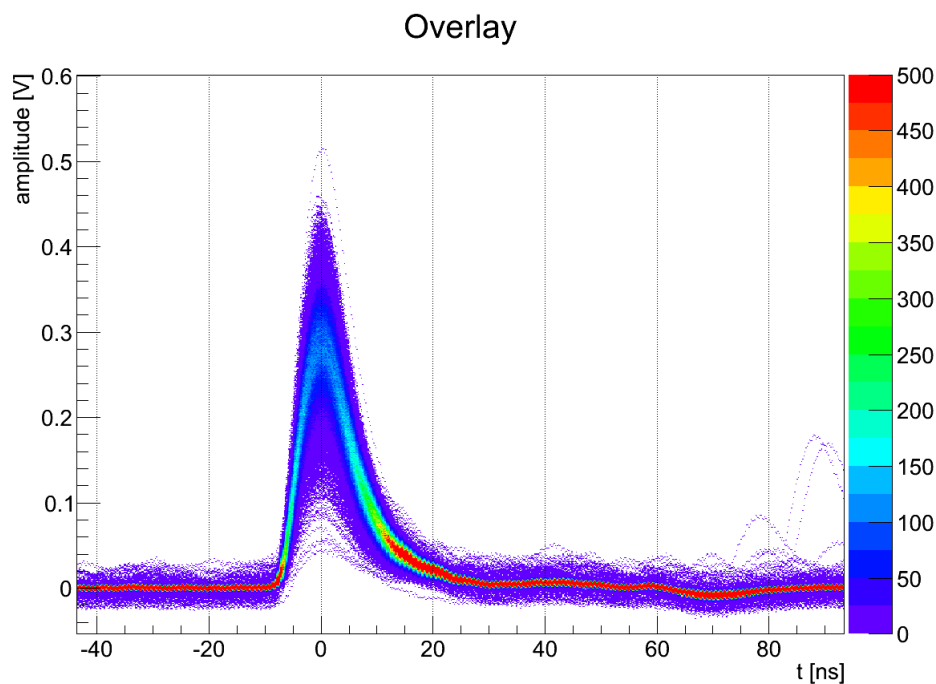


Abbildung 18.: Dargestellt ist eine DAQ-Messung mit Zehnfachverstärker und Splitter von der Mitte des PMTs [25,75 mm, 25,5 mm]. Die Waveforms wurden nicht normiert, dafür aber ihre Maxima auf die Position $t=0$ ns verschoben. Die Farbskala rechts gibt die Farbe korrespondierend zur Anzahl der Einträge pro Bin wieder.

Beim Betrachten einer Superposition wie in Abbildung 18 wird deutlich, dass es aufgrund der in der Theorie beschriebenen statistischen Prozesse zu Schwankungen der Amplitude von einer Waveform zur nächsten kommen kann. Solche Darstellungen sind nützlich, wenn das Zeitverhalten der Signale oder die Zeitform untersucht werden soll. Es können dann anhand der graphischen Darstellung Schlussfolgerungen gezogen werden.

Die Superposition, ist ein 2D-Histogramm bei dem die Achsen Amplitude [V] gegenüber der Zeit [ns] aufgetragen ist. Erzeugt werden spezifische Überlagerungen der Signale durch die Nutzung entsprechend modifizierter Eventlisten. Anders als bei den

2. Superposition digitalisierter Signalformen

Darstellungen im vorherigen Kapitel gibt eine Farbskala die Population der Signale für eine vorher festgelegte Bin-Größe an. Dabei können die Positionen der Maxima (Abbildung 18) genutzt werden, um eine präzisere Zeitverhaltens-Untersuchung (engl. Timeresponse) durchzuführen. Bei unverschobenen Graphen aufgenommen mit dem DAQ können hingegen Genauigkeitsschwankungen und andere Fluktuationen beobachtet werden. Eine typische Superposition von SIS 3305 enthält im Durchschnitt 12.000 überlagerte Signalaufnahmen, während Oszilloskop-Superpositionen je nach der Anzahl der Messzyklen bis zu 30.000 und mehr enthalten.

Möchte man die oben bereits erwähnte zeitliche Verteilung untersuchen, eignet sich weiterführend eine Projektion entlang der X-Achse einer bestimmten Voltzahl. Der Spannungswert wird dafür kurz über dem Untergrundrauschen gewählt. Von diesem Wert wird dann eine Zeit-Population-Darstellung erzeugt. Anschließend werden Gauß-Kurven für das Fitten der beiden Populationshügel, welche die Aufstiegsflanke und die abfallende Flanke wiedergeben, genutzt. Zu sehen ist dies in Abbildung 19.

Projektionen eines Zeitpunktes, wie beispielsweise $t=0$ bei einer Verschiebung der Maxima zum selben Punkt, können helfen die Amplitudenverteilung zu untersuchen. Es wird dadurch ein Populations-Amplituden-Diagramm erzeugt.

Nicht immer eignen sich Gauß-Fits zur Untersuchung der Daten, da die Populationshügel eine gewisse Scherung haben, die deutlicher wird, je höher man den Schnitt für die Projektion über dem Hintergrundrauschen wählt. Eine solche Darstellung ist in Abbildung 20 zu sehen.

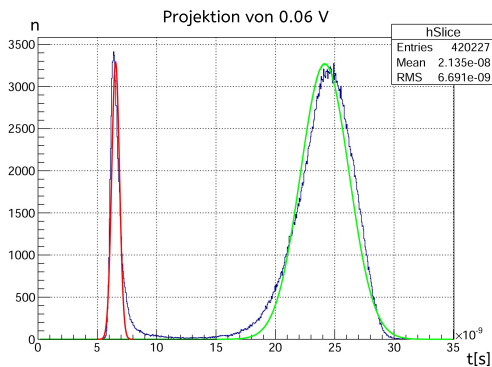


Abbildung 19.: Beide Populationshügel werden mit einer einfachen Gauß-Funktion gefittet.

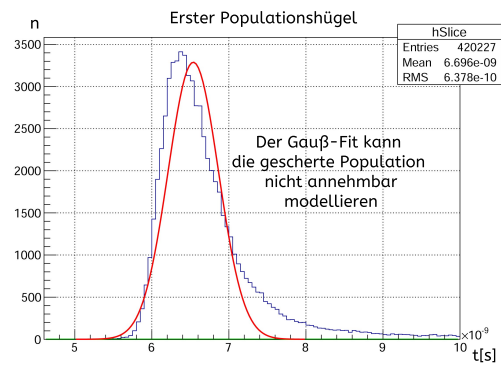


Abbildung 20.: Der Populationshügel weist eine Scherung auf, welche sich nicht ideal durch eine Gauß-Funktion beschreiben lässt.

Teil V.

Auswertung

1. Zeitverhalten der Signalform

Das Zeitverhalten (engl. Timeresponse) des Photomultiplieres kann von mehreren Einflüssen abhängig sein. Bei dessen Untersuchung wurden zusätzliche Phänomene wie Abweichungen in der Zeit von Signal zu Signal, oder eine inhomogene Empfindlichkeit der Oberfläche beobachtet. Diese Untersuchungen werden im Laufe dieses Kapitels dargestellt.

1.1. Jitter

Fluktuationen oder Sprünge in der Zeit sind beobachtet worden, als erste Signalformen mit dem SIS3305 aufgenommen wurden. Man konnte auf dem Oszilloskop, welches man nutzte um das PMT zu justieren, keine nennenswerten Sprünge verzeichnen, deswegen konnte man das PMT, den Laser oder das reine Trigger-Signal für spätere Untersuchungen ausschließen. Aufgrund des Aufbaus der Datenaufnahme, wobei zunächst eine der beiden Karten getriggert wurde und der Trigger von dieser Karte zur nächsten weitergeleitet wurde, verzeichnete man einen Jitter von mehr als 20 ns. Daraufhin wurde mehrmals der Versuchsaufbau optimiert und die einzelnen Stationen der Trigger-Umwandlungskette untersucht. In Abbildungen 21 ist das Trigger-Signal

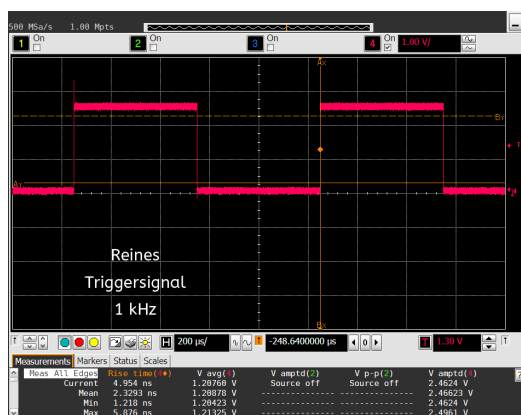


Abbildung 21.: Das reine Trigger-Signal aus dem Laser-Controller. Die Skalierung ist 200 μ s pro Kästchen für die X-Achse.

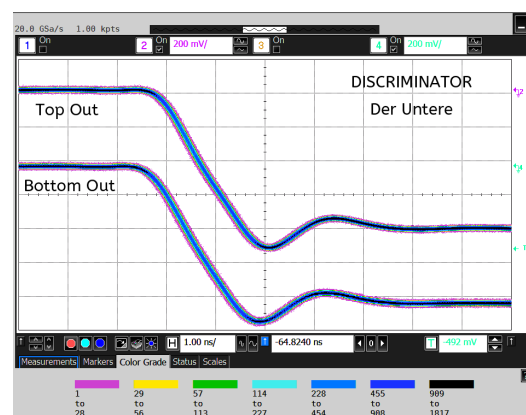


Abbildung 22.: Die Trigger-Signale, welche in die Karten eingespeist werden. Die Skalierung ist 1 ns pro Kästchen in X-Richtung.

aus dem Laser-Controller für eine Frequenz von 1 kHz dargestellt. Die Anstiegszeit des Signals beträgt ungefähr 2 ns (zu sehen in Abbildung "Muss ich noch einfügen"), was

1. Zeitverhalten der Signalform

die 2 ns der Darstellung 22 widerspiegelt. Zusätzlich ist in dieser Darstellung durch die Farbskala die Betrachtung zeitlicher Fluktuation beobachtet worden, die sich als vernachlässigbar gering einstufen lassen. Beide Abbildungen sind mit dem Agilent Oszilloskop [14] aufgenommen worden.

Eine typische Superposition von einer SIS3305-Messungen ist in Abbildung 23 zu sehen. Sie wurde unter dem Aspekt erstellt, dass sie nicht normierte und nicht verschobene PMT-Signale einer Messung bei [25,75 mm, 25,5 mm] zeigt. Es ist eine Diskrepanz von 6 ns bei den Anstiegsflanken zu beobachten. Im Vergleich dazu zeigt das Schaubild 24 eine Superposition einer Oszilloskop-Messung unter gleichen Bedingungen.

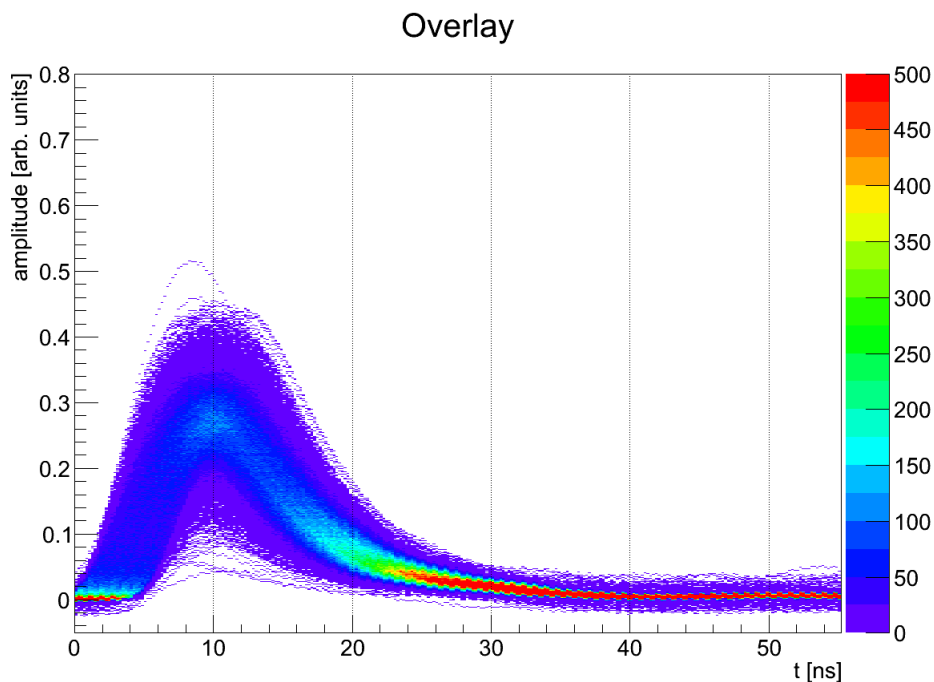


Abbildung 23.: Dargestellt ist eine Superposition aus einer DAQ-Messung mit Zehnfachverstärker und mit Splitter (Konfiguration a)) von der Mitte des PMTs bei 1000 V. Es ist eine nicht normierte und nicht verschobene PMT-Signal-Darstellung.

Der Unterschied zwischen Channel 1 und 5 wurde mit dem Schaltplan in Abbildung 25 untersucht. Als eine Korrekturmaßnahme angedacht, um das Jitter-Verhalten zu minimieren, war es das Trigger-Signal auf einem weiteren Channel mit aufzunehmen. Durch das zusätzliche Aufnehmen auf Channel 5 könnte eine Verschiebung des PMT-Signals relativ zu der Position der Anstiegsflanke des Trigger-Signals zur Verringerung des Jitters beitragen, da das Trigger-Signal für Channel 5 und die beiden Aufnahmekarten keine nennenswerten Fluktuationen aufweist. Allerdings ergab eine Untersuchung, dass die beiden Channel 1 und 5 unabhängig voneinander fluktuieren.

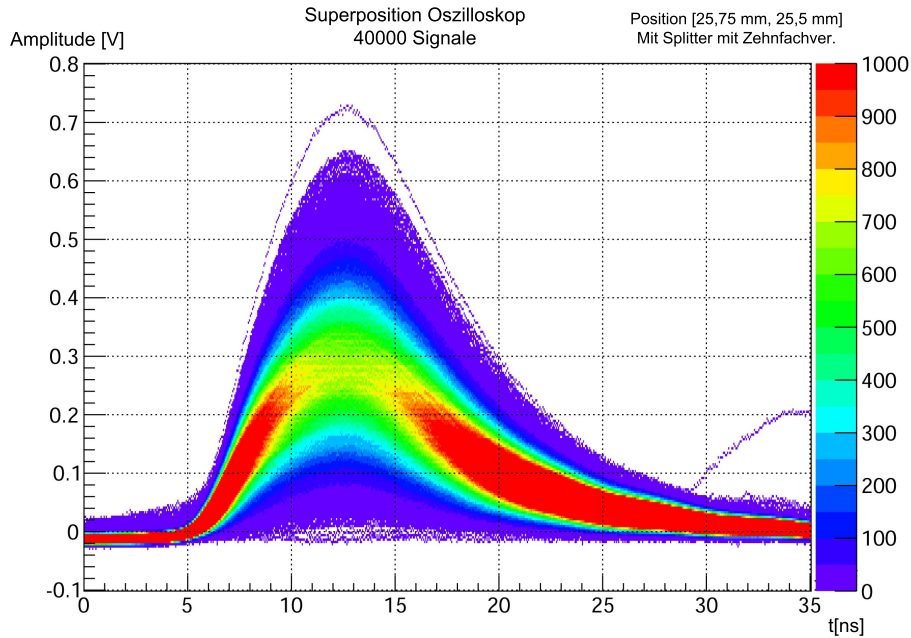


Abbildung 24.: Dargestellt ist eine Superposition aus einer Oszilloskop-Messung mit Zehnfachverstärker und Splitter (Konfiguration a)) von der Mitte des PMTs bei 1000 V. Es ist eine nicht normierte und nicht verschobene PMT-Signal-Darstellung.

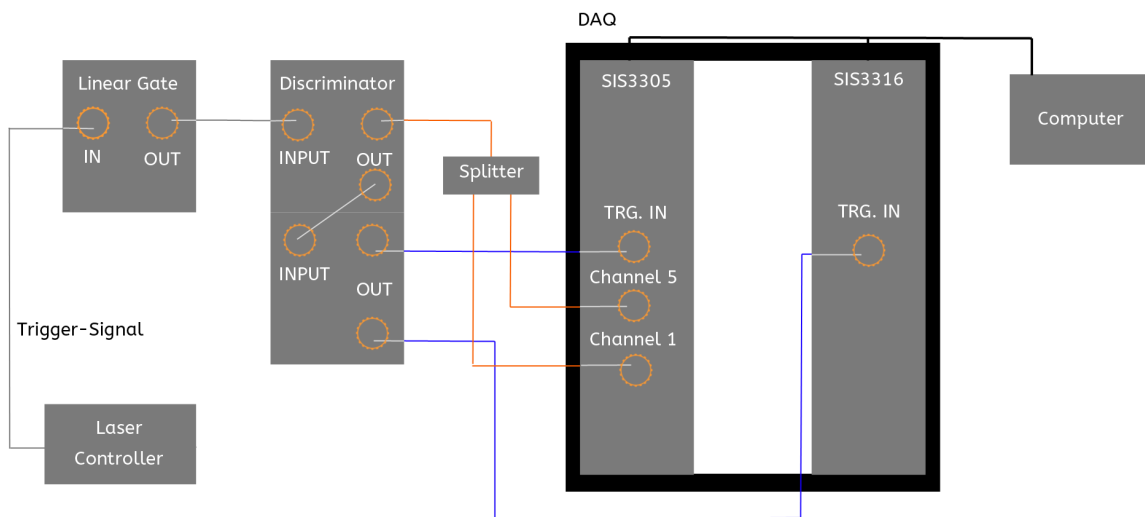


Abbildung 25.: Aus dem Discriminator 1 Ausgang Top wurde das ausgehende Trigger-signal durch einen Splitter in zwei Signale geteilt und dann an die Channel 1 und 5 angeschlossen.

1. Zeitverhalten der Signalform

Die Signale nach dem Splitter besaßen vernachlässigbare Zeitschwankungen (Abbildung 22), jedoch waren in den DAQ-Messungen diese einige Nanosekunden groß und die Channel fluktuierten unabhängig voneinander (Abbildung 27).

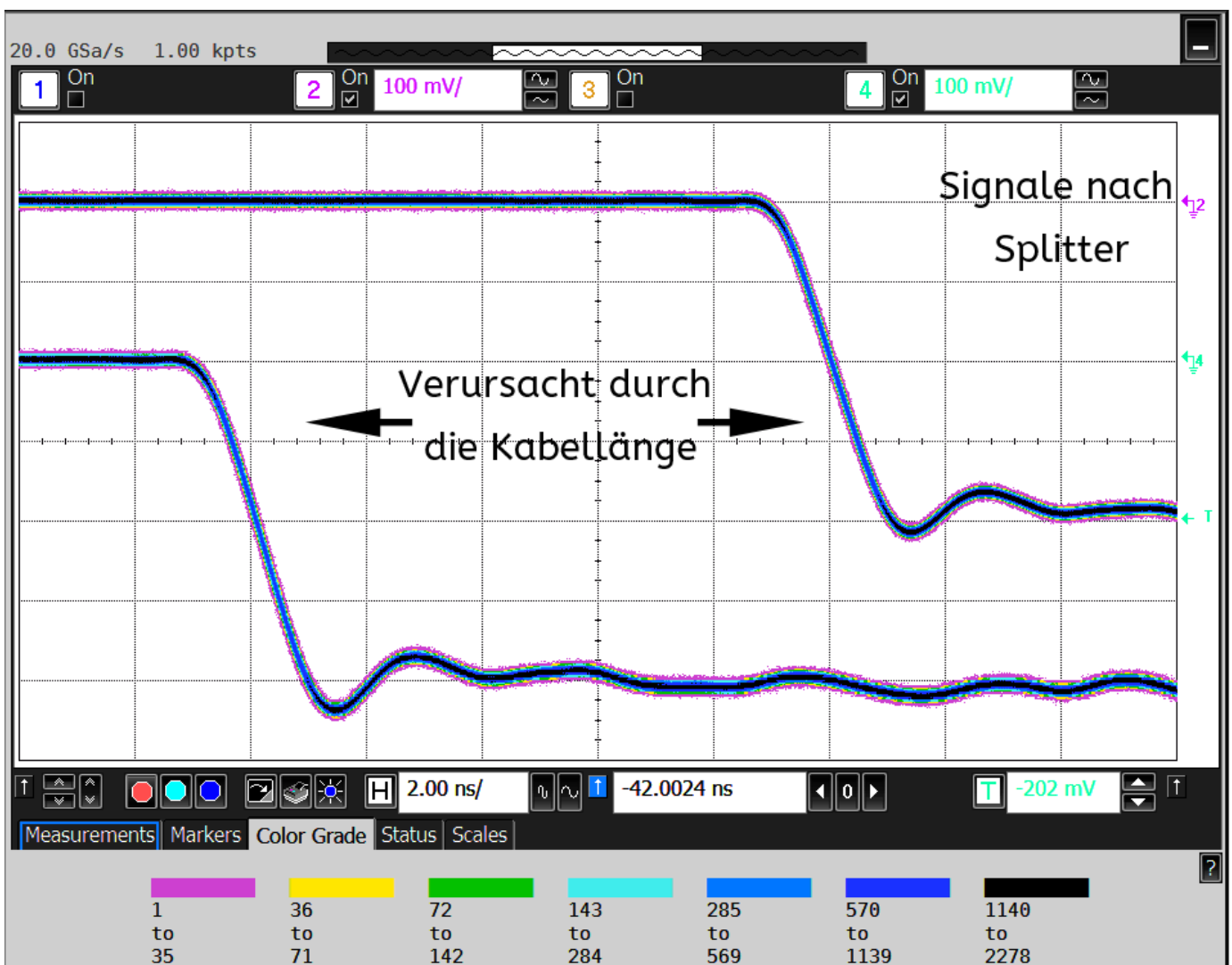


Abbildung 26.: Zu sehen sind zwei Trigger-Signale, welche aus dem Splitter kommen. Der dazugehörige Versuchsaufbau ist in Abbildung 25 zu sehen. Es ist zwar ein Laufzeitunterschied aufgrund der Kabellänge, jedoch kein Jitter feststellbar.

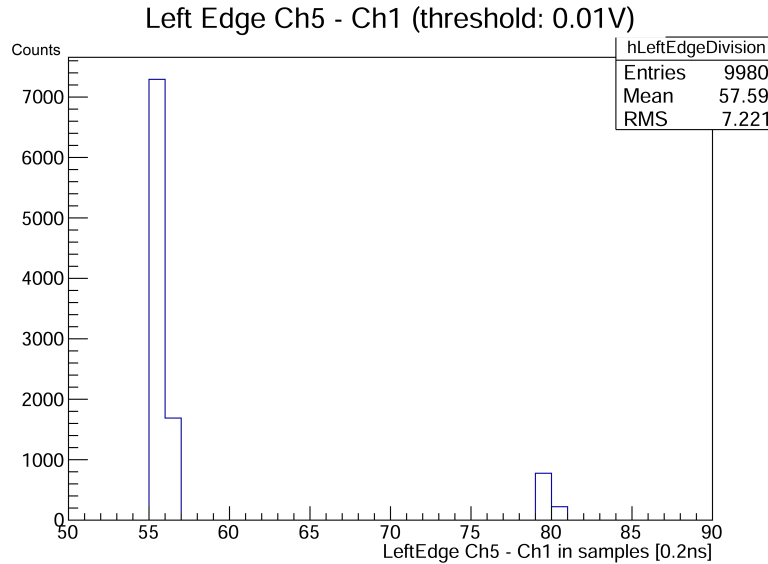


Abbildung 27.: Zu sehen ist die Subtraktion der Position der Aufstiegsflanken der beiden Trigger-Signale bei dem Wert 0.01 V. Die Darstellung wurde mit dem SIS 3305 aufgenommen.

Es wird daher die Schlussfolgerung gezogen, dass das SIS3305-Board für das Auftreten eines Jitter verantwortlich ist.

1.2. Oberfläche des PMTs

Um Aussagen über den Einfluss der Oberfläche zu treffen, werden für die Konfigurationen a) *Mit Splitter und Zehnfachverstärker* und d) *Ohne Elektronikette* die Zeitparameter der Fits pro Position auf dem PMT analysiert (siehe Abbildung 10 aus Kapitel Aufbau 1.3). Die beiden Konfigurationen wurden für einen Vergleich gewählt, da der Zehnfachverstärker kleine Schwankungen, die ohne Elektronikette aufgetreten wären, unterdrückt hätte.

Hierzu werden die root-Files, welche mit dem Programm **FitS1** erzeugt wurden, genutzt, da sich in den sogenannten Trees des root-Files Verteilungen der Parameter von Sigma und τ_{RC} befinden. Die Verteilungen der Sigma- und τ_{RC} -Werte werden mit Gauß-Funktionen gefittet und anschließend deren Mittelwerte in die Abbildung 28 für τ_{RC} und in Abbildung 29 für Sigma eingetragen. Diese beiden Abbildungen zeigen sechs Punkte auf der Achse 2, da die Empfindlichkeit am linken Rand des PMTs nicht ausreichend war um ohne Verstärker analysierbare Signale zu verzeichnen. Für die restlichen Achsen wurde äquivalent verfahren und die Plots wurden dem Anhang beigefügt.

1. Zeitverhalten der Signalform

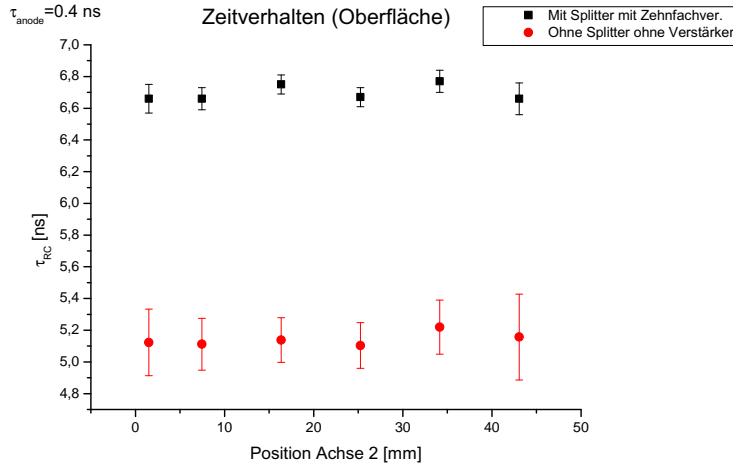


Abbildung 28.: Dargestellt sind die Mittelwerte von τ_{RC} mit einer Standardabweichung als Fehler. Anhand des Werts von τ_{RC} kann der Einfluss der Oberfläche auf das Zeitverhalten beschrieben werden.

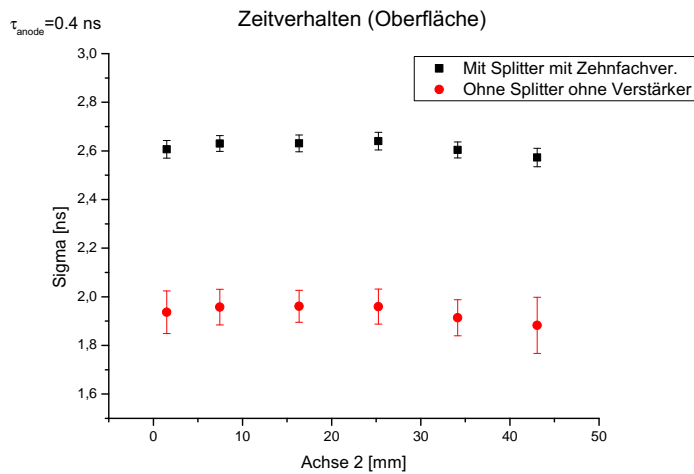


Abbildung 29.: Dargestellt sind die Mittelwerte von Sigma mit einer Standardabweichung als Fehler.

Es zeigt sich, dass die Position, an der ein Elektron aus dem Kathodenmaterial ausgeschlagen wird, keinen nennenswerten Einfluss auf die Pulsdauer besitzt, allerdings ist die Amplitudenverteilung populationsabhängig. In den Abbildungen 30 und 31 sind

1.2. Oberfläche des PMTs

für die Achsen 2 und 3 die Amplitudenverteilung der Signal-Peaks zu sehen. Es wurden hierzu Superpositionen mit einer Verschiebung der Amplituden auf $t=0$ genutzt und diese für jede durchfahre Achse erstellt. Anschließend werden die Maximalamplitude in Diagramme, siehe Abbildung 30, eingetragen. Für die Achse 2 sind Verringerungen der Amplitudenstärke zu verzeichnen, wenn eine Querstrebe der PMT-Oberfläche sich in der Nähe befindet.

Fügt man die gesammelten Informationen über die durchschnittlichen Amplitudenhöhe in ein Schaubild ein, so ergibt sich die Darstellung 32.

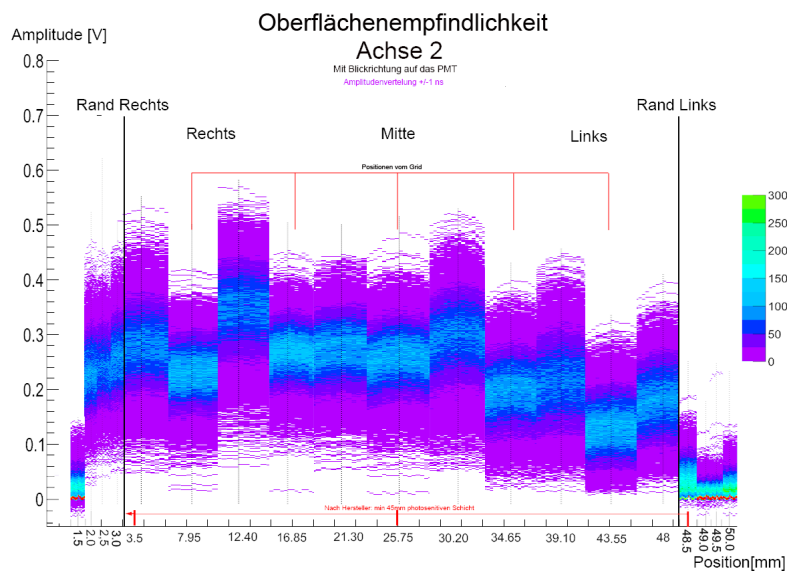


Abbildung 30.: Es ist die Amplitudenstärke der Achse 2 für 17 Punkten zu sehen. Neben den Einbrüchen bei den Querstreben ist zu vermerken, dass die recht Seite des PMTs ist empfindlicher als die linke Seite.

1. Zeitverhalten der Signalform

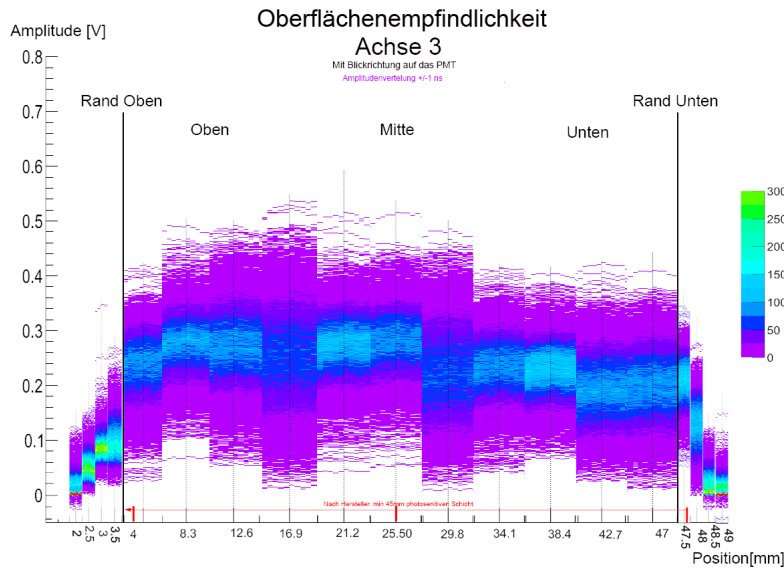


Abbildung 31.: Dargestellt ist die Amplitudenstärke der Achse 3 für 17 Punkten. Die obere Seite dem PMTs ist empfindlicher als die untere Seite.

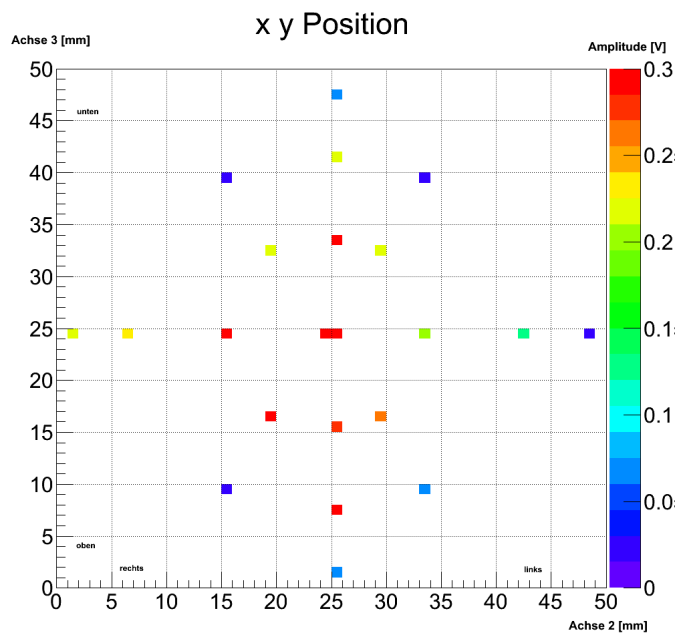


Abbildung 32.: Dargestellt sind die Mittelwerte der Amplituden für die entsprechen Positionen auf dem PMT.

1.3. Einfluss der Elektronikette auf das Zeitverhalten

Es wurde festgestellt, dass sich abhängig von der angeschlossenen Konfiguration der Verstärkerkette das Zeitverhalten der Antwortfunktion verändert. In den Abbildungen 33 und 29 sind τ_{RC} und Sigma der verschiedenen Konfigurationen für den Mittelpunkt des PMTs [25,75 mm, 25,5 mm] dargestellt, da im Kapitel davor festgestellt wurde, dass sich das Zeitverhalten nicht nennenswert anhand der Position verändert. Je kleiner der Wert der Zerfallszeit τ_{RC} ist, desto schneller fällt die Signalform ab.

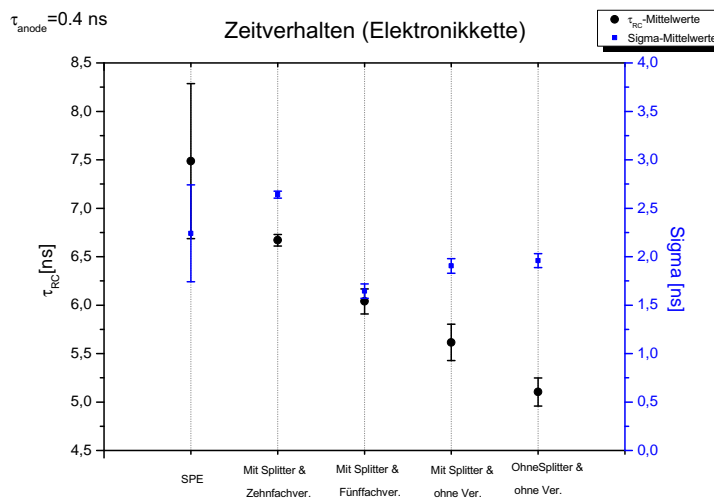


Abbildung 33.: Dargestellt sind die Mittelwerte von τ_{RC} und Sigma mit einer Standardabweichung als Fehler. Anhand der Werte kann der Einfluss der Elektronikette auf das Zeitverhalten beschrieben werden.

Die schnellsten Signale werden bei der Konfiguration d) *Ohne Elektronikette* erreicht, dann c) *Mit Splitter und ohne Verstärker*, b) *Mit Splitter und Fünffachverstärker* und die langsamsten Signale bei der Konfiguration a) *Mit Splitter und Zehnfachverstärker*. Zudem wird in Abbildung 33 ersichtlich, dass Sigma und τ_{RC} nicht proportional zueinander sind. Die Residuen und Fits der dargestellten τ_{RC} - und Sigma-Werte befinden sich im Anhang (Abbildungen 60 und 59). Es wurde zusätzlich noch die genaue Formveränderung durch die Elektronikette untersucht, dazu mehr im Verlaufe des nächsten Abschnittes.

1.3.1. Signalformänderung durch die Elektronikette

In diesem Abschnitt wird die Änderung der Signalform besprochen. Alle in diesem Abschnitt erwähnten Aussagen beziehen sich auf Signale, welche im Durchschnitt ca. 18 Photoelektronen entsprechen. Dieser Wert wurde anhand der Amplituden von

1. Zeitverhalten der Signalform

Einzelphotoelektronen ermittelt.

Die Darstellungen entsprechen stets einem Signal aus der Mitte des PMTs [25,75 mm, 25,5 mm], welches mit dem SIS3305 aufgenommen wurde. Signale der Konfiguration d) *Ohne Elektronikette* besitzen weder Reflektionen noch waren weitere amplituden manipulierende Phänomene, sodass man die PMT-Base als wenig einflussreich für das Zustandekommen der Waveform beurteilen kann.

Die Abbildung 34 wurde gewählt, da ihr Chi Quadrat relativ gering im Vergleich zu anderen Signalformen derselben Messung ist und ihre Amplitude dem Durchschnitt entspricht. Beide Graphen sind zu finden in der Abbildung 35.

Einen starken Einfluss auf τ_{RC} haben vorher festgelegte Fitparameter. Der Wert von Sigma, welcher den Einfluss eines Amplifiers widerspiegelt, kann zwar benutzt werden, um einen gelungen Fit zu erzeugen (Abbildung 34), jedoch verfälscht er τ_{RC} . Es ist sogar möglich mit einem Sigma von 0 einen guten Fit zu erzeugen. Allerdings liefert das Programm FitS1 nicht immer gute Ergebnisse. Stellt man für die Gauß-Funktion keine Breite ein (Sigma= 0), wird für eine solche Einstellung die Zeitvariable τ_{anode} variiert, die mit der ursprünglichen festgehaltenen Einstellung von zwei Samples einen Delta-Peak beschrieb. Sind die Werte von τ_{anode} zu klein, ergibt sich ein Fit mit viel zu großer Amplitude (Abbildung 37), sind die Werte von τ_{anode} zu groß, so ist kein Fit erkennbar (Abbildung 38). In Abbildung 36 sieht man einen Fit mit $\sigma = 0$ für dieselbe Messung wie für Abbildung 34. Ein Splitter, wie er auch von der Arbeitsgruppe in Dresden verwendet wurde, halbiert die Amplituden eines Signals zwar (Abbildung 39), verändert ihre Form jedoch nicht.

Der Fünffach-Verstärker der KPH erzeugt eine positive Reflektion einige Nanosekunden nach dem Signal (Abbildung 42). Anhand eines Vergleichs mit Einzelphotoelektronen und Messungen ohne Elektronikette konnte die Verfünffachung der Signalstärke bestätigt werden.

Der Zehnfach-Verstärker verursacht kleine "Dips", also negative Spannungen, einige Nanosekunden nach dem Signal (Abbildung 45). Dies ist sehr wahrscheinlich auf eine Reflektion innerhalb des Zehnfachverstärkers zurückzuführen. Einzelphotoelektronen konnten nur mit Hilfe dieses Verstärkers nachgewiesen werden, da ihre Signale sehr schwach sind (mehr dazu im anschließenden Kapitel Einzelphotoelektronen (SPE)).

1.3. Einfluss der Elektronikette auf das Zeitverhalten

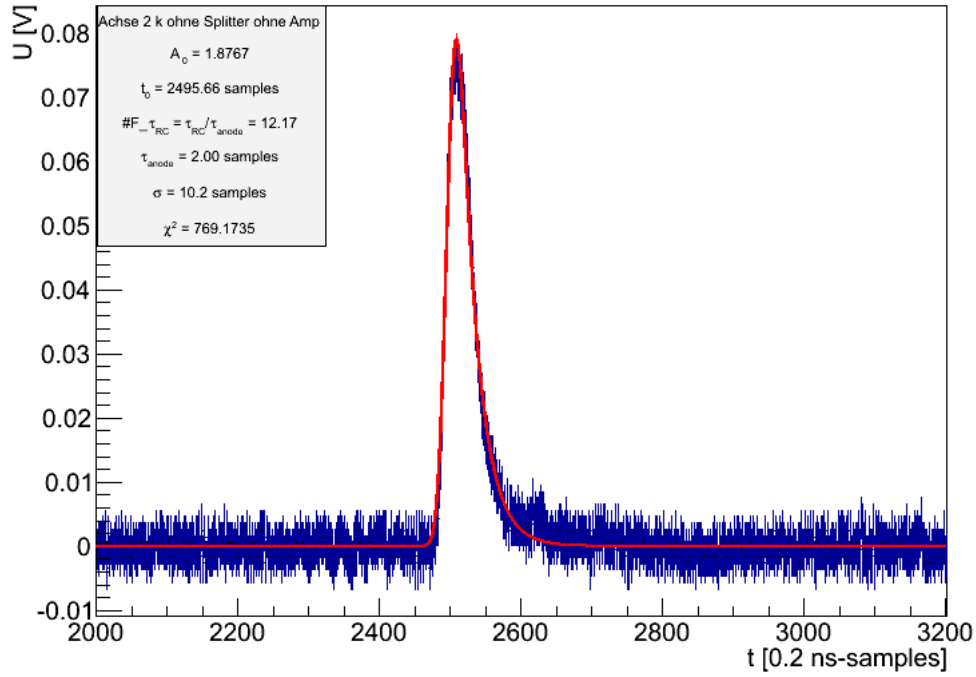


Abbildung 34.: Dargestellt ist eine Waveform aus einer Messung ohne Verstärker und ohne Splitter (Konfiguration d)) von der Mitte des PMTs bei 1000 V. Um den Parameter τ_{RC} zu bestimmen, verrechnet man den Faktor $F_{\tau_{RC}}$ mit τ_{anode} und teilt diesen aufgrund der Samplingrate mit den Divisor 5.

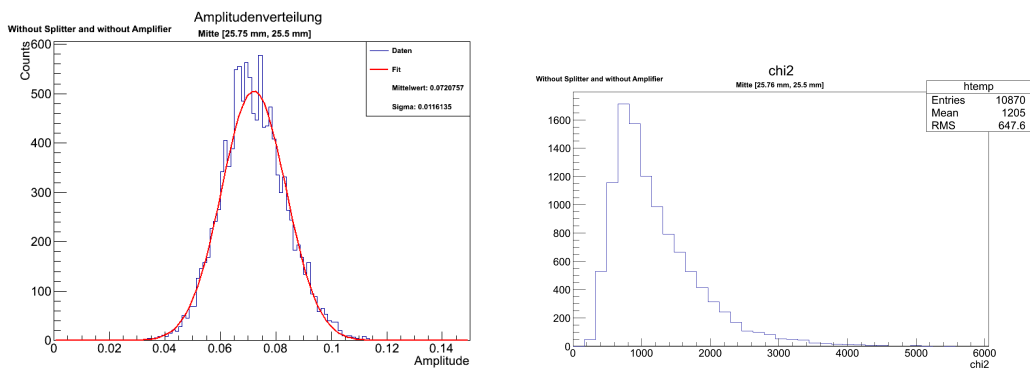


Abbildung 35.: Links zu erkennen ist die Amplitudenverteilung und rechts die Chi Quadrat-Verteilung von der Messung ohne Verstärker und ohne Splitter. Bei dem Chi Quadrat handelt es sich um das nicht reduzierte Chi-Quadrat.

1. Zeitverhalten der Signalforn

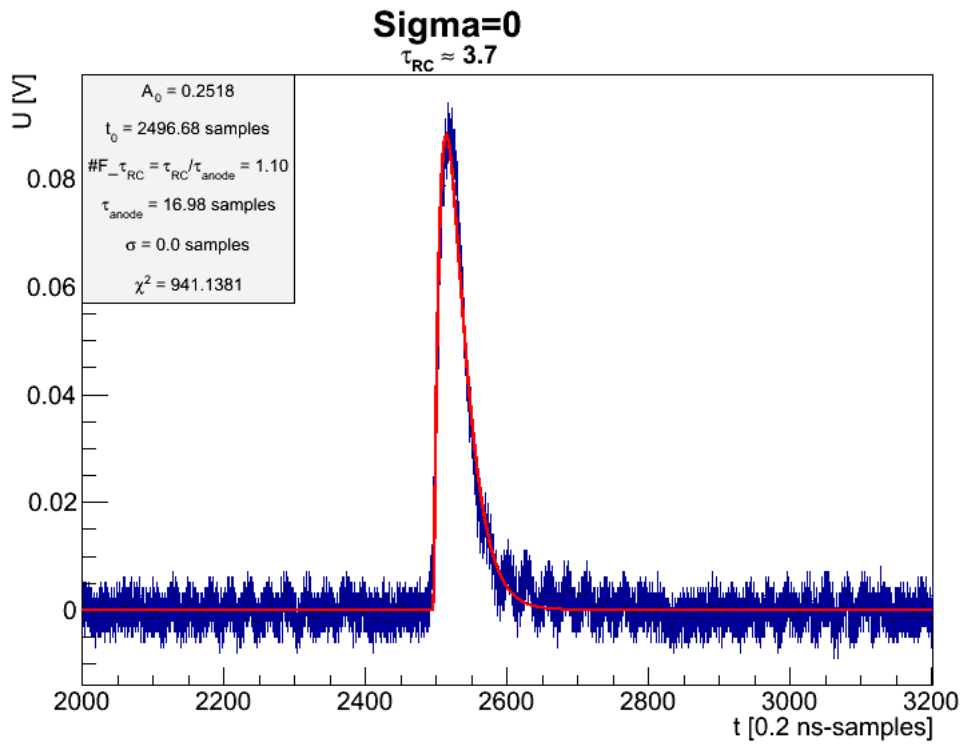


Abbildung 36.: Die Zeitvariable τ_{RC} ist bei diesem Fit-Versuch deutlich kleiner als mit einem Sigma.

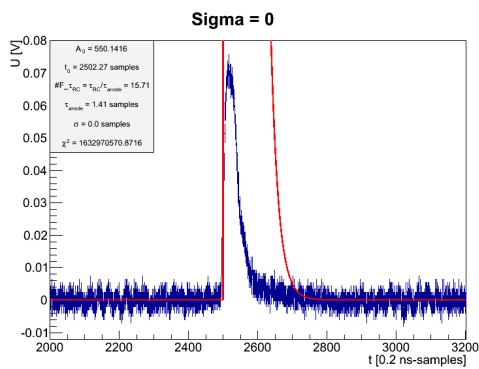


Abbildung 37.: τ_{anode} mit 1,41 Samples

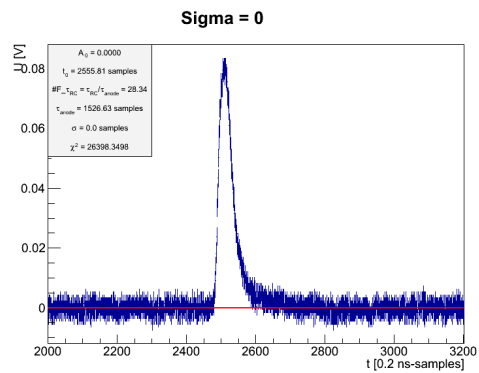


Abbildung 38.: τ_{anode} mit 1500 Samples

1.3. Einfluss der Elektronikette auf das Zeitverhalten

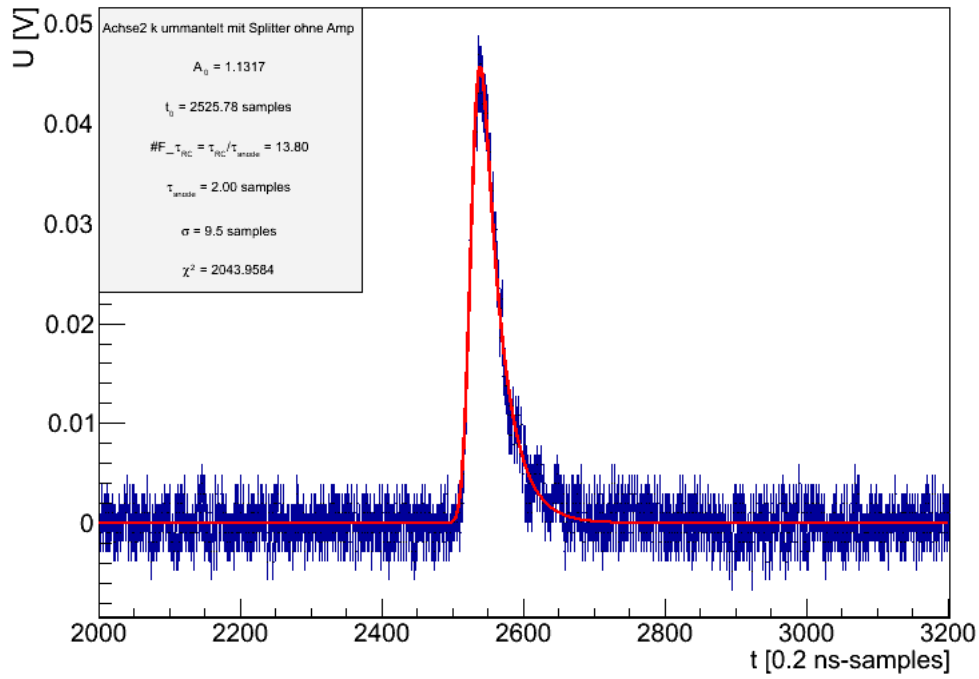


Abbildung 39.: Dargestellt ist ein Signal aus einer Messung ohne Verstärker, dafür mit Splitter (Konfiguration c)) von der Mitte des PMTs bei 1000 V. Das Chi Quadrat ist in Abbildung 41 zu finden und die Amplitudenverteilung in Abbildung 39.

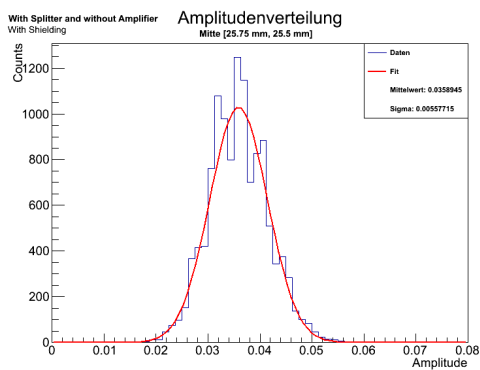


Abbildung 40.: Es ist die Amplitudenverteilung der Position aus der Darstellung 39 zu sehen (Mit Splitter ohne Verstärker)

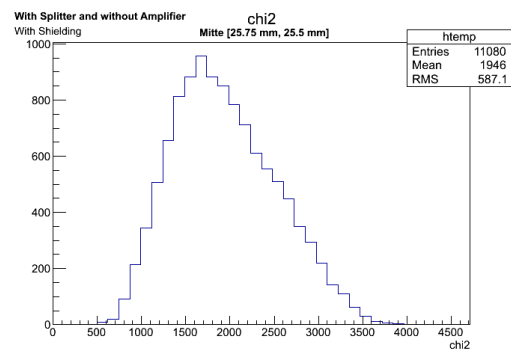


Abbildung 41.: Das Chi Quadrat der Position aus der Darstellung 39 (Mit Splitter ohne Verstärker)

1. Zeitverhalten der Signalform

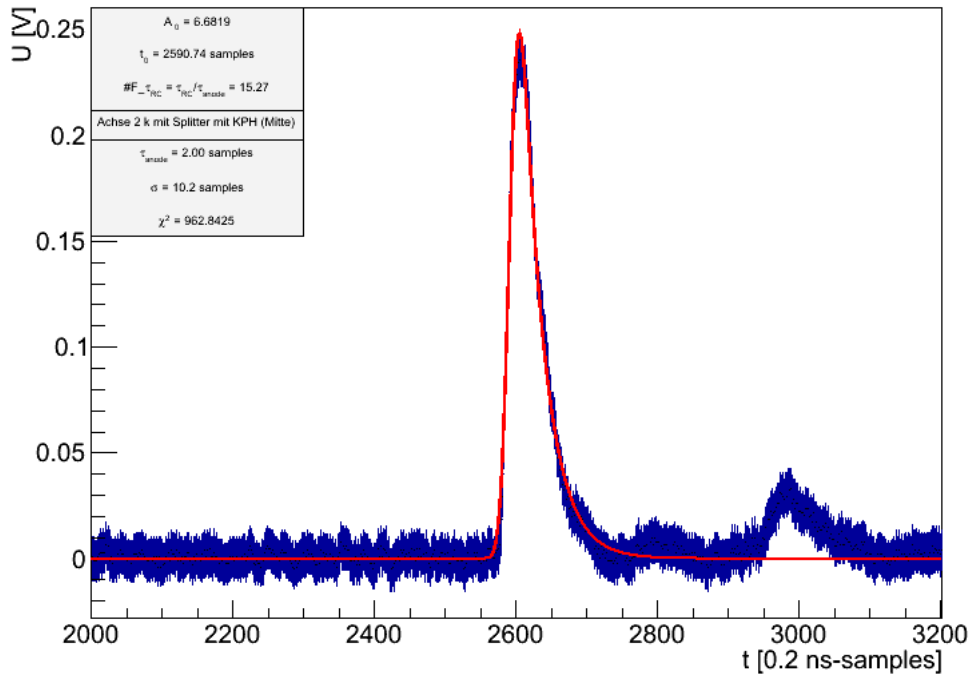


Abbildung 42.: Dargestellt ist eine Waveform aus einer Messung mit Fünffach-Verstärker und mit Splitter (Konfiguration b)) von der Mitte des PMTs bei 1000V. Das Chi Quadrat ist in Abbildung 44 zu finden und die Amplitudenverteilung in Abbildung 43.

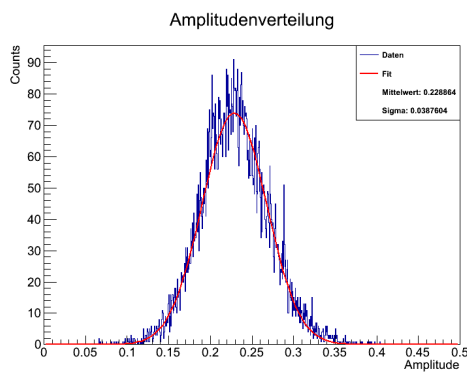


Abbildung 43.: Es ist die Amplitudenverteilung der Position aus der Darstellung 42 zu sehen (Mit Splitter und Fünffachverstärker)

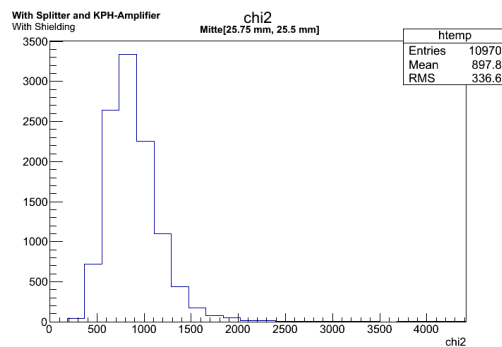


Abbildung 44.: Das Chi Quadrat der Position aus der Darstellung 43 (Mit Splitter und Fünffachverstärker)

1.3. Einfluss der Elektronikette auf das Zeitverhalten

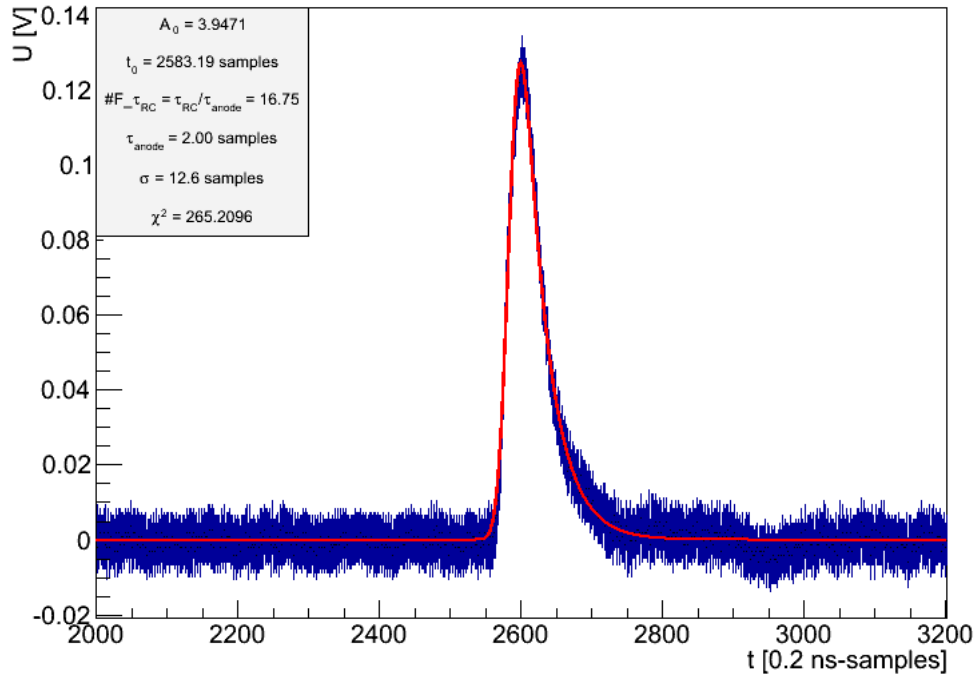


Abbildung 45.: Dargestellt ist eine Waveform aus einer Messung mit Verstärker und mit Splitter (Konfiguration a)) von der Mitte des PMTs bei 1000V. Das Chi Quadrat ist in der Abbildung 47 zu finden und die Amplitudenverteilung in Abbildung 46.

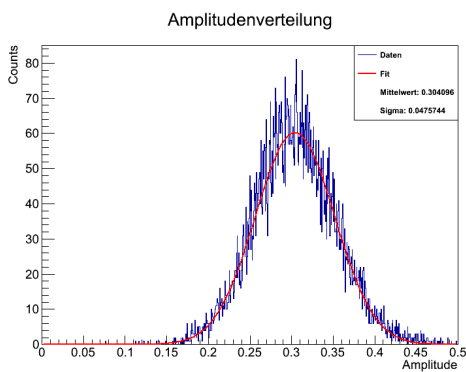


Abbildung 46.: Es ist die Amplitudenverteilung der Position aus der Darstellung 45 zu sehen (Mit Splitter und Zehnfachverstärker)

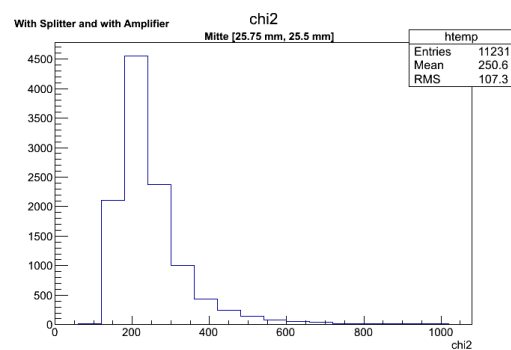


Abbildung 47.: Das Chi Quadrat der Position aus der Darstellung 45 (Mit Splitter und Zehnfachverstärker)

1. Zeitverhalten der Signalform

1.3.2. Einzelphotoelektronen (SPE)

Um Einzelphotoelektronen detektieren zu können, muss die Lichtquelle präpariert werden. Die Laser-Blende wird durch eine Drehung an der Schraube verengt, wie es in Abbildung 7 zu sehen ist. Dadurch kann das Laserlicht soweit abgeschwächt werden, dass das aus der Theorie erwähnte Detektieren des Einzelelektronenspektrums erreicht wird, bei dem 95 % der aufgenommenen Signale lediglich Rauschen darstellen. Da die durchschnittliche Amplitudenverteilung von Einzelphotoelektronen bei $(0,017 \pm 0,001)$ V lag, kann damit die durchschnittliche Photoelektronenzahl der vorherigen Messungen bestimmt werden. Sie beträgt im Durchschnitt ca. 19 Photoelektronen. Die hohe Dispersion der τ_{RC} - und der Sigma-Verteilung ist erklärbar zum Einen durch den stochastischen Auslöseprozess der Elektronen und deren kinetische Energie, die sie danach besitzen, und zum Anderen durch den hohen Anteil an Rauschen und der geringen Anzahl an gefitteten Signalen. Zu sehen sind die beiden Verteilungen in Abbildung 52.

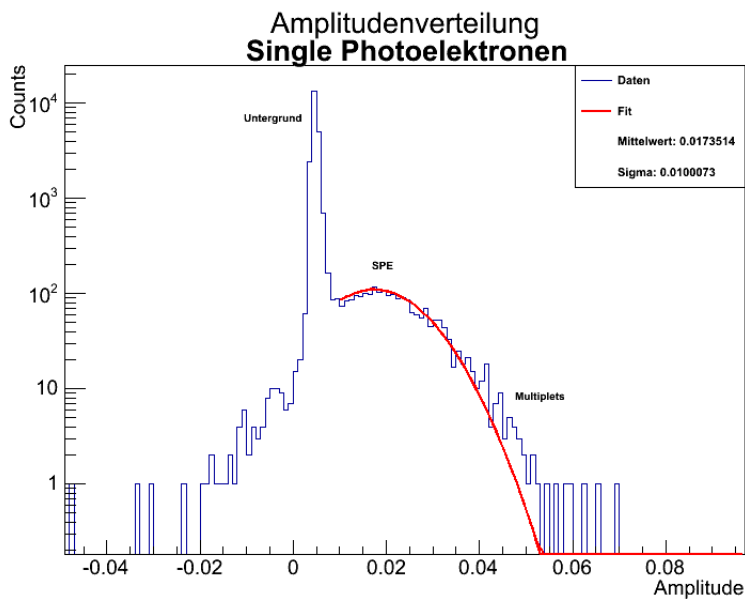


Abbildung 48.: Um die Amplitude von Einzelphotoelektronen zu bestimmen, wurde eine Amplitudenverteilung einer SPE-Messung durch das SIS3305 mit 30.000 Signalen in der Mitte des PMTs durchgeführt und das Ergebniss mit einer Gauß-Funktion gefittet.

Trotz Raumabdunklung konnten während der SPE-Untersuchungen viele Signale detektiert werden, deren Ursprung sich größtenteils, als das umgebendes Raumlicht herausstellte. Dies konnte man durch eine Oszilloskop-Messung ermitteln, indem man während einer Live-Betrachtung das Raumlicht ausschaltete. Da PMTs Dunkelströme verzeichnen, kommt dies auch als Erklärung in Frage.

1.3. Einfluss der Elektronikette auf das Zeitverhalten

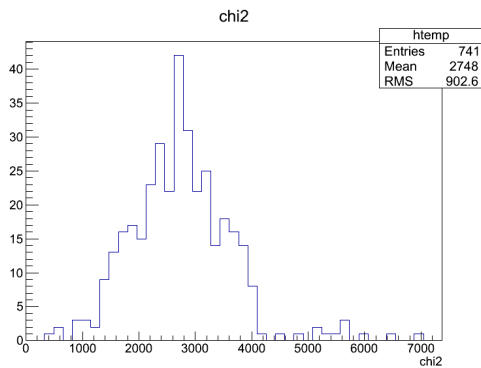


Abbildung 49.: Das Chi Quadrat der Position aus der Darstellung 51 (SPE: Mit Splitter und Zehnfachverstärker).

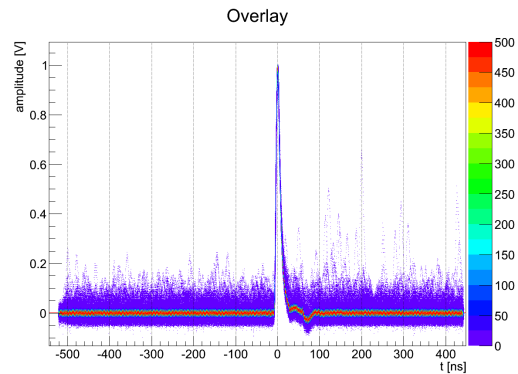


Abbildung 50.: Die Dark Box war für das Licht der Deckenlampe schwach durchlässig, sodass neben dem normierten und verschobenen Laserlicht-Signal weitere Signale zu beobachten sind.

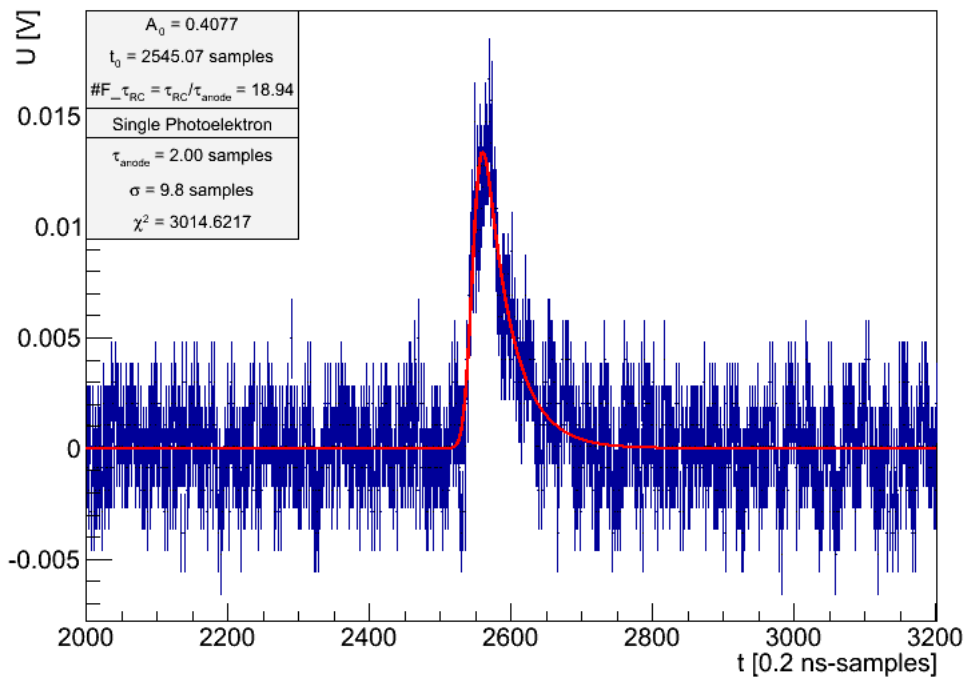


Abbildung 51.: Dargestellt ist eine Einzelphotoelektronen. Das entsprechende Chi Quadrat der Messung für die Position [25,75 mm, 25,5 mm] ist in Abbildung 49 zu finden.

1. Zeitverhalten der Signalform

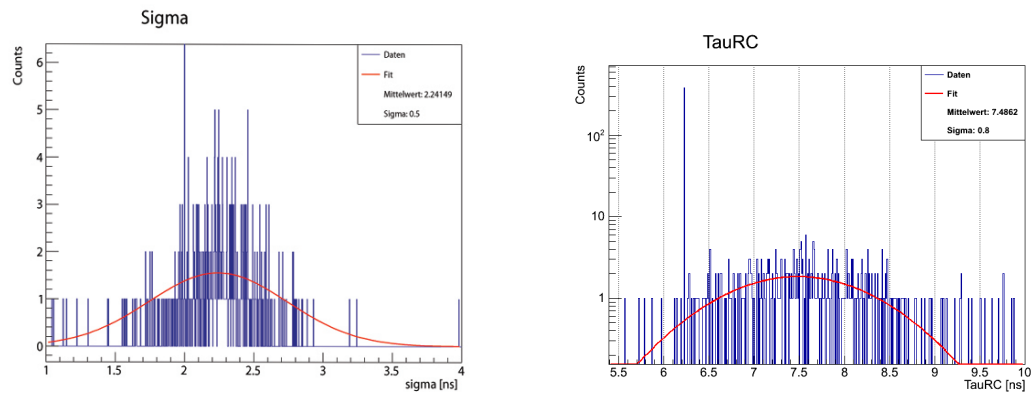


Abbildung 52.: Herausstechend aus der Verteilung sind die Parameter für die fehlgeschlagene Fits. Sie entsprechen den Fit-Startparametern, jedoch geht das Chi Quadrat der Fits gegen unendlich.

Teil VI.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde festgestellt, dass die Boards SIS3305 und SIS3316 eine unterschiedliche Anzahl an Events verzeichnen, obwohl die gleichen Signale anliegen. Das SIS3305 besitzt ein ausgeprägtes zeitliches Taktzittern bei der Übertragung von Digitalsignalen, zudem zeigen Channel 1 und 5 unabhängig voneinander dieses Verhalten. Wegen dieses Erkenntnis wurde der Hersteller *Struck Innovative Systeme GmbH* kontaktiert.

Das PMT-Modell R6041-406 von HAMAMTSU liefert ein ortsunabhängiges Zeitverhalten, jedoch ist die Amplitudenhöhe ortsabhängig. Die rechte Seite des untersuchten PMTs ist empfindlicher als die linke und oben ist empfindlicher als unten. Dieser Unterschied kann durch die Ausrichtung der ersten Dynode oder durch einer inhomogenen Dicke des Kathodenmaterials erklärt werden.

Die schnellste Timeresponse wurde mit der Konfiguration d) *Ohne Elektronikette* erreicht, dann c) *Mit Splitter ohne Verstärker*, b) *Mit Splitter und Fünffachverstärker* und zuletzt mit der Konfiguration a) *Mit Splitter und Zehnfachverstärker*. Dies ist insofern nicht verwunderlich, da jede zusätzliche Komponente das PMT-Signal verlängert. Der Parameter Sigma, welcher den Beitrag eines Verstärkers simuliert, zeigte für die Konfigurationen ein unabhängiges Verhalten von τ_{RC} .

Im Rahmen der Einzelphotoelektronen-Messungen wurde bemerkt, dass die Dark Box des Versuchs für Umgebungslicht zu durchlässig ist. Dies ist in den Messungen davor nicht aufgefallen, da diese Störungen klein im Vergleich zu der Intensität des verwendeten Laserlichts waren.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der PMT eine unsymmetrische Photokathode aufweist, welche die Amplitude der Signale beeinflusst. Die Module in der Elektronikette beeinflussen die Signalbreite, nehmen aber keinen großen Einfluss auf die Laser-Signalform, erzeugen aber wie im Fall des KPH-Verstärkers einen Nachpuls oder eine Reflektion. Die Datenerfassungskarte SIS3305 der Firma Stuck erwies sich allerdings als problematisch bei der Aufnahme von präzisen zeitlichen Signalen.

Weiterführend wäre eine zusätzliche Untersuchung des Einflusses einer PMT-Base zu testen, welche mit negativ angelegtem Potenzial arbeitet, um die Auswirkung auf die Signalformen zu untersuchen.

A. Anhang

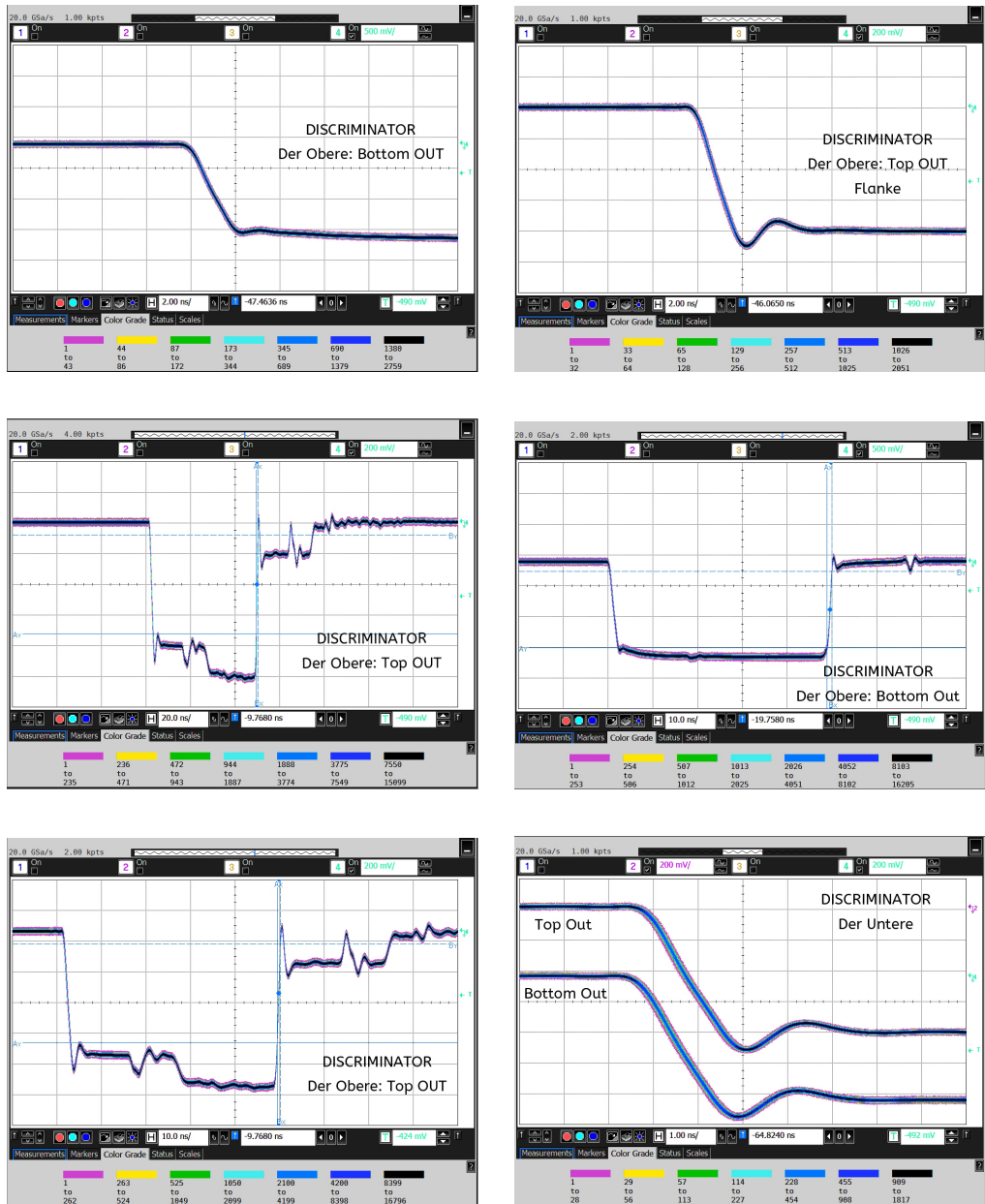


Abbildung 53.: Untersuchungen der Trigger-Elektronikkette mit dem Oszilloskop. Teil 1.

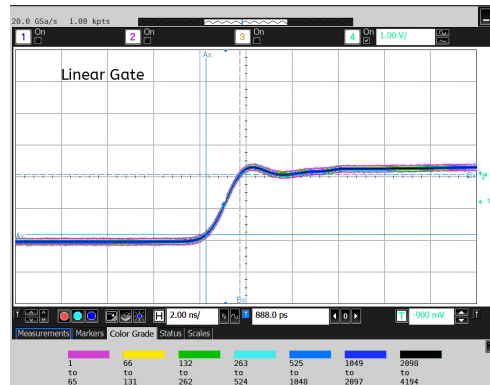
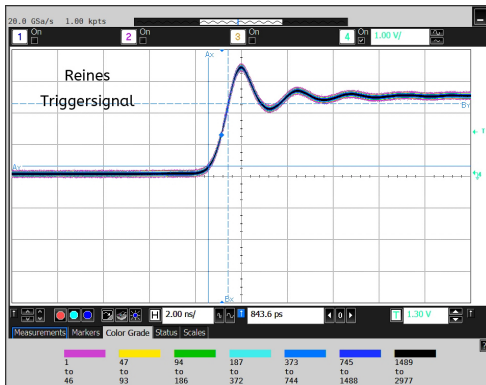
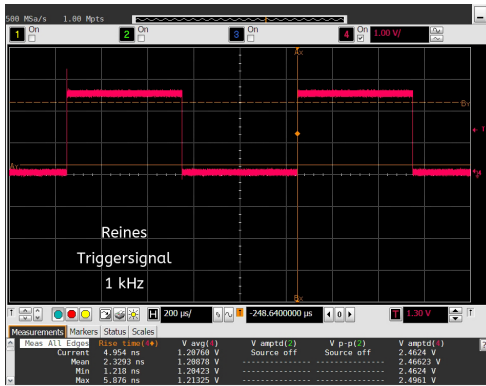


Abbildung 54.: Untersuchungen der Trigger-Elektronikkette mit dem Oszilloskop. Teil 2.

A. Anhang



Abbildung 55.: Das benutzte Oszilloskop von Agilent Technologies [14].

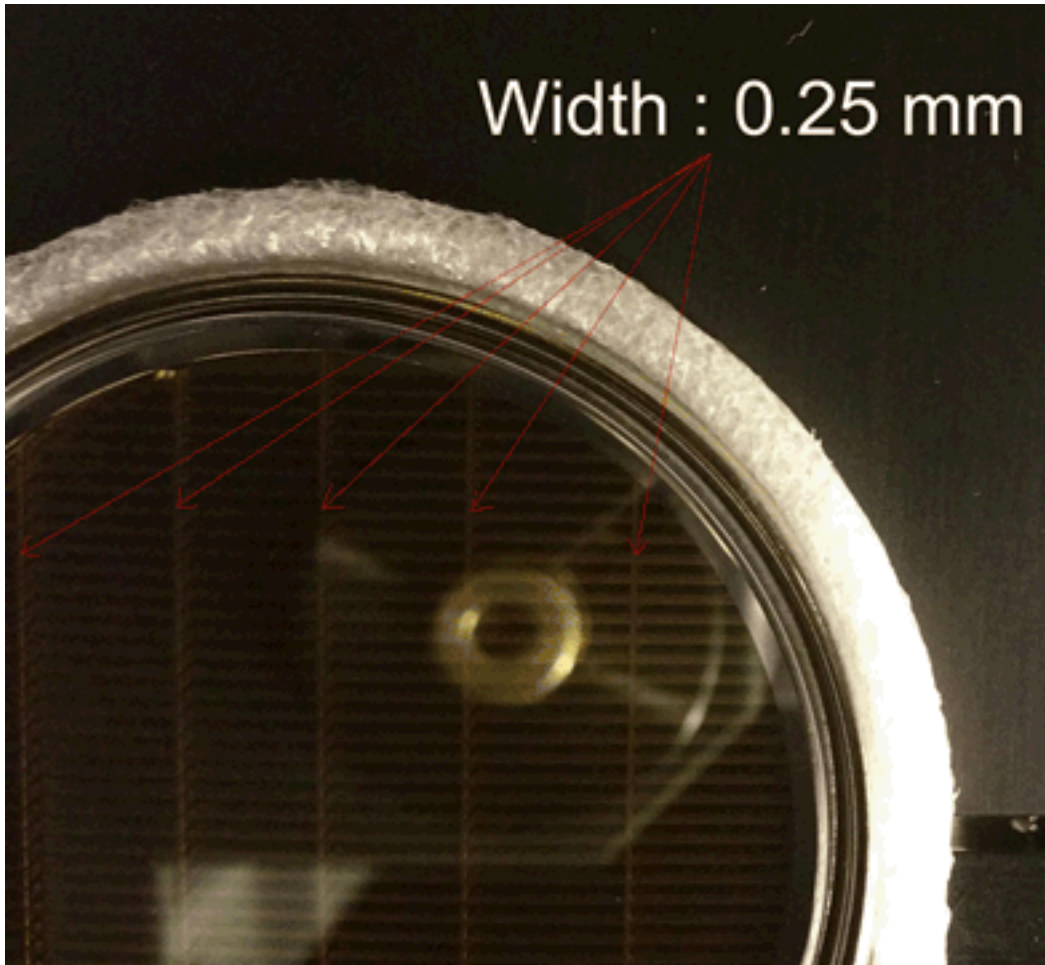
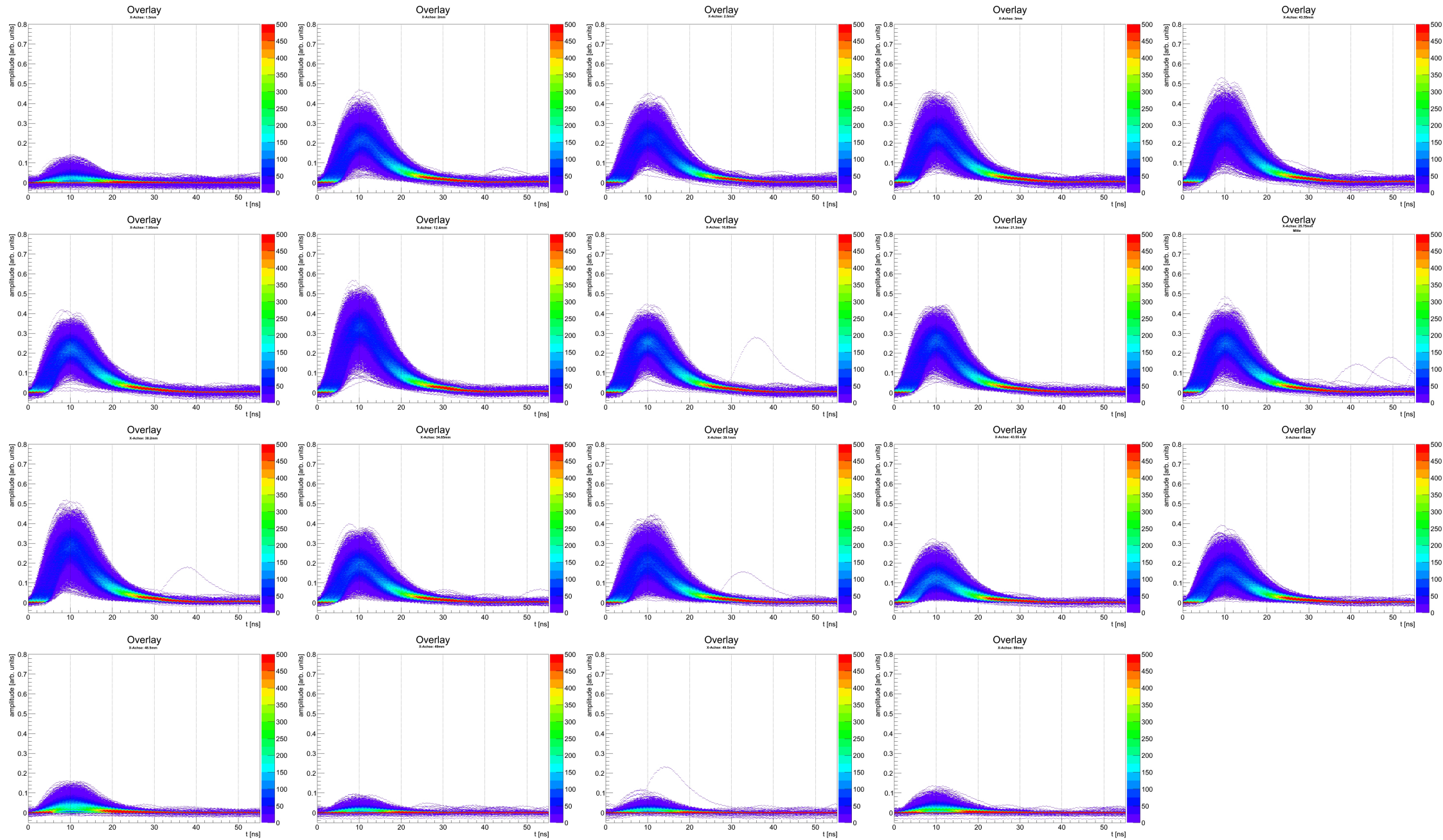


Abbildung 56.: Die Querstreben/Lammellenstruktur des PMTs.



**For Low Temperature Operation especially for Liq. Xe application,
Bialkali Photocathode, Low profile, Low Radioactivity
57mm (2 Inch) Diameter, 12 stage, Head-on Type, Synthetic Silica**

General

Parameter		Value / Description	Unit
Spectral Response Range		160 to 650	nm
Window Material		Synthetic silica glass	-
Photocathode	Material	Bialkali	-
	Minimum Effective Area	45	mm dia
Dynode Structure		Metal channel Dynode	-
Number of Stages		12	-
Weight		Approx. 110	g
Operating Ambient Temperature		-110 to +50	deg C
Storage Temperature		-110 to +50	deg C

Maximum Ratings (Absolute Maximum Values)

Parameter	Value	Unit
Supply Voltage Between Anode and Cathode	1000	V
Average Anode Current	0.1	mA

Characteristics at 25 deg C

Parameter		Min.	Typ.	Max.	Unit
Cathode Sensitivity	Luminous (2856K)	-	100	-	uA/lm
	QE at 175 nm	25	30	-	%
Anode Sensitivity	Luminous (2856K)	-	100	-	A/lm
Gain		-	1×10^6	-	-
Anode Dark Curren (after 30min. storage in darkness)		-	5	50	nA
Time Response	Anode Pulse Rise Time	-	2.3	-	ns
	Electron Transit Time	-	16	-	ns
	Transit Time Spread (FWHM)	-	0.75	-	ns
Pulse Linearity at ± 2 % Deviation		-	40	-	mA

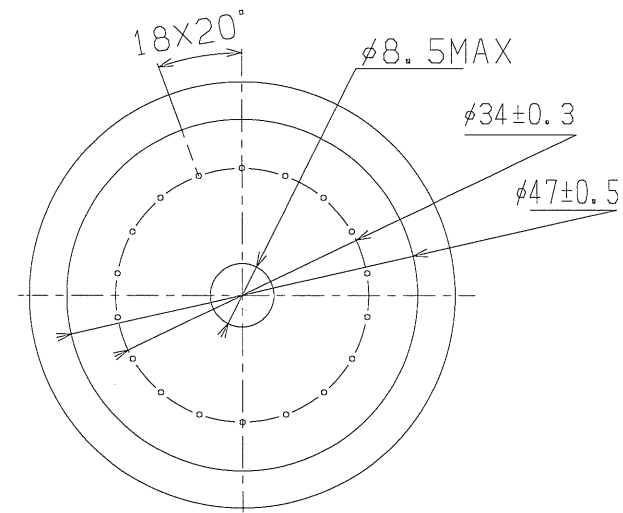
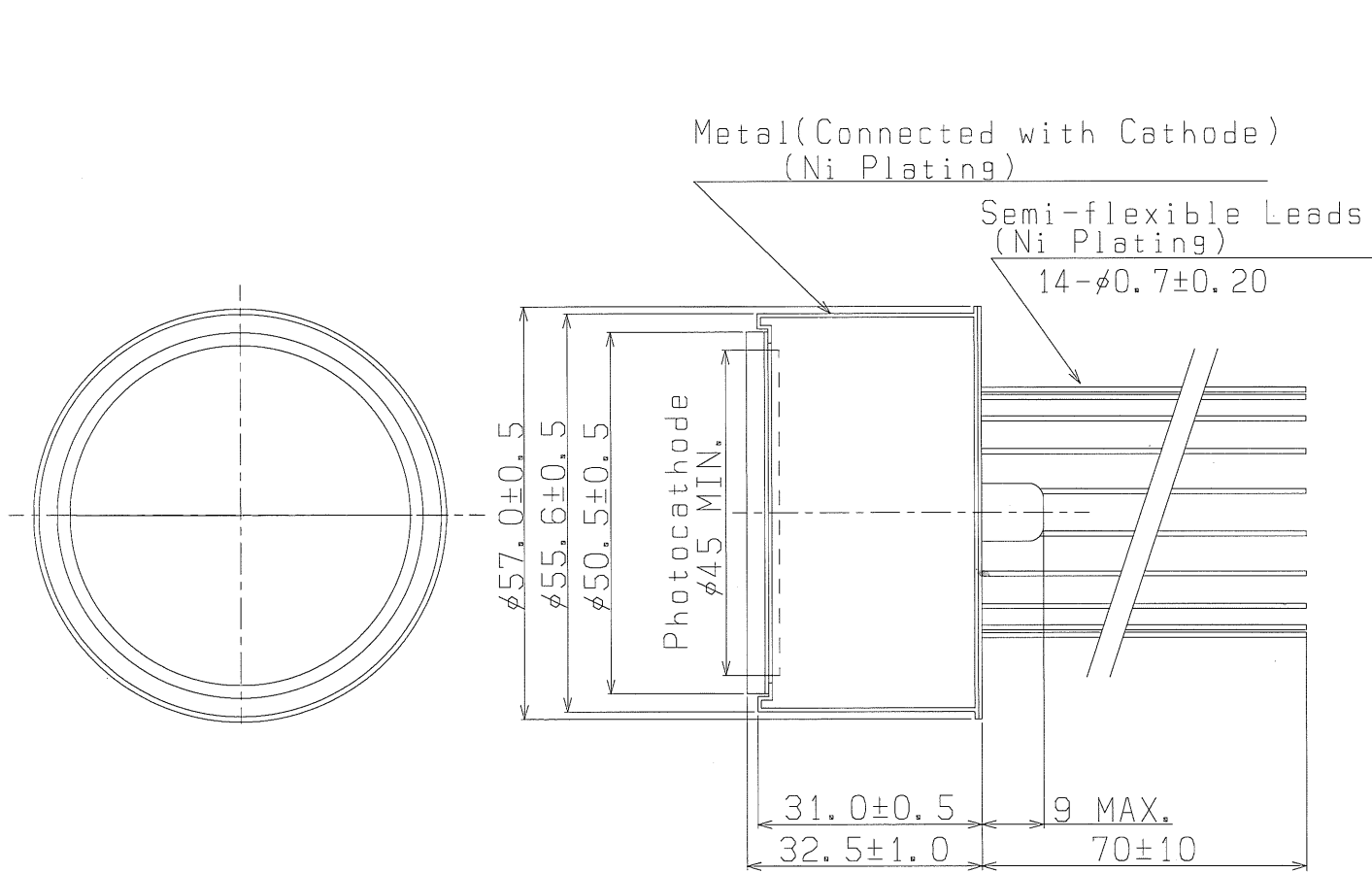
NOTE: Anode characteristics are measured with a voltage distribution ratio shown below :

Voltage Distribution Ratio and Supply Voltage

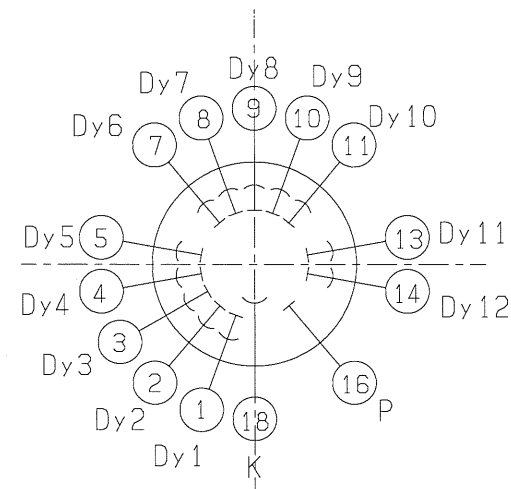
Electrodes	K	Dy1	Dy2	Dy3	Dy4	Dy5	Dy6	Dy7	Dy8	Dy9	Dy10	Dy11	Dy12	P
Ratio	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.2

Supply Voltage : 800 V K : Cathode Dy : Dynode P : Anode

Radioactivity : about 150 mBq/PMT typical



Bottom View



Basing Diagram

This information is furnished for your information only.
No warranty, expressed or implied, is created by furnishing this information.

UNIT: mm

Sheet1

Achse 2	mm	SIS 3305	Oszilloskop	SIS 3305	Oszilloskop	SIS 3305	Oszilloskop
links	50						
	49,5						
	49						
	48,5						
	48						
	43,55						
	39,1						
	34,65						
	30,2						
	25,75						
Mitte	21,3						
	16,85						
	12,4						
	7,95						
	3,5						
	3						
	2,5						
rechts	2						
	1,5						
		Mit Splitter mit Verstärker Verstärker: Bottom PMT	Mit Splitter mit Verstärker Verstärker: KPH	Mit Splitter ohne Verstärker		Ohne Splitter ohne Verstärker	
						SPE	
Achse 3	mm	SIS 3305	Oszilloskop	SIS 3305	Oszilloskop	SIS 3305	Oszilloskop
oben	2,5						
	3						
	3,5						
	4						
	8,3						
	12,6						
	16,9						
	21,2						
	25,5						
	29,8						
Mitte	34,1						
	38,4						
	42,7						
	47						
	47,5						
	48						
	48,5						
unten	49						
		Mit Splitter mit Verstärker Verstärker: Bottom PMT	Mit Splitter mit Verstärker Verstärker: KPH	Mit Splitter ohne Verstärker		Ohne Splitter ohne Verstärker	
						SPE	

Sheet1

Page 1

Sheet1

Querachse 2	Achse 2 [mm]	Achse 3 [mm]	SIS 3305	Oszilloskop	SIS 3305	Oszilloskop	SIS 3305
unten links	39,188	46,433					
	38,688	45,933					
	38,188	45,433					
	37,688	44,933					
	37,188	44,433					
	34,848	40,643					
	32,508	36,853					
	30,168	33,063					
	27,828	29,273					
	25,488	25,483					
Mitte	23,148	21,693					
	20,808	17,903					
	18,468	14,113					
	16,128	10,323					
	13,788	6,533					
	13,288	6,033					
	12,788	5,533					
oben rechts	12,288	5,033					
	11,788	4,533					
		Mit Splitter mit Verstärker Verstärker: Bottom PMT	Mit Splitter mit Verstärker Verstärker: KPH	Mit Splitter ohne Verstärker		Ohne Splitter ohne Verstärker	
						SPE	
Querachse 1	Achse 2 [mm]	Achse 3 [mm]	SIS 3305	Oszilloskop	SIS 3305	Oszilloskop	SIS 3305
oben links	39,188	4,533					
	38,688	5,033					
	38,188	5,533					
	37,688	6,033					
	37,188	6,533					
	34,848	10,323					
	32,508	14,113					
	30,168	17,903					
	27,828	21,693					
	25,488	25,483					
Mitte	23,148	29,273					
	20,808	33,063					
	18,468	36,853					
	16,128	40,643					
	13,788	44,433					
	13,288	44,933					
	12,788	45,433					
unten rechts	12,288	45,933					
	11,788	46,433					
		Mit Splitter mit Verstärker Verstärker: Bottom PMT	Mit Splitter mit Verstärker Verstärker: KPH	Mit Splitter ohne Verstärker		Ohne Splitter ohne Verstärker	
						SPE	

Page 2

Sheet1

Abbildung 57.: Eine Übersicht der Messungen (grün) mit den entsprechenden Aufnahmesystemen. Nicht aufgezählt sind Messungen, die den Einfluss des Schirmgeflechts untersucht haben, da die Darstellung hierfür gleich ausgesehen hätte.

A. Anhang

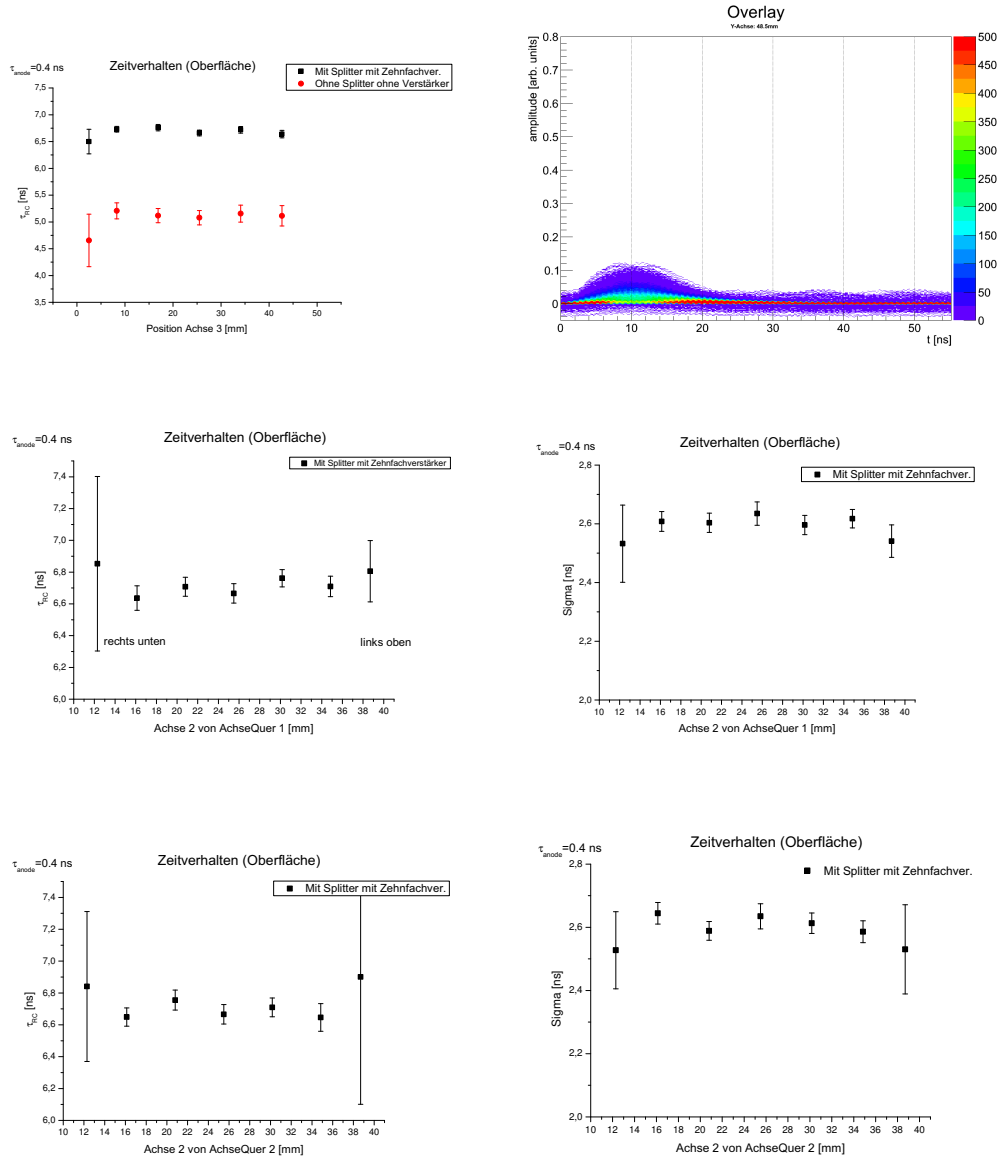


Abbildung 58.: Die restliche Timeresponse-Untersuchung. Manche der Randpunkte lieferten keine sinnvollen Ergebnisse. Das liegt an der geringen Amplitudenhöhe an den Rändern. Oben rechts ist die Superposition des Randpunktes [25,75 mm, 48,5 mm] der Achse 3 dargestellt in der Konfiguration a). Ohne Zehnfachverstärker würden die Amplituden in der Darstellung noch geringer ausfallen.

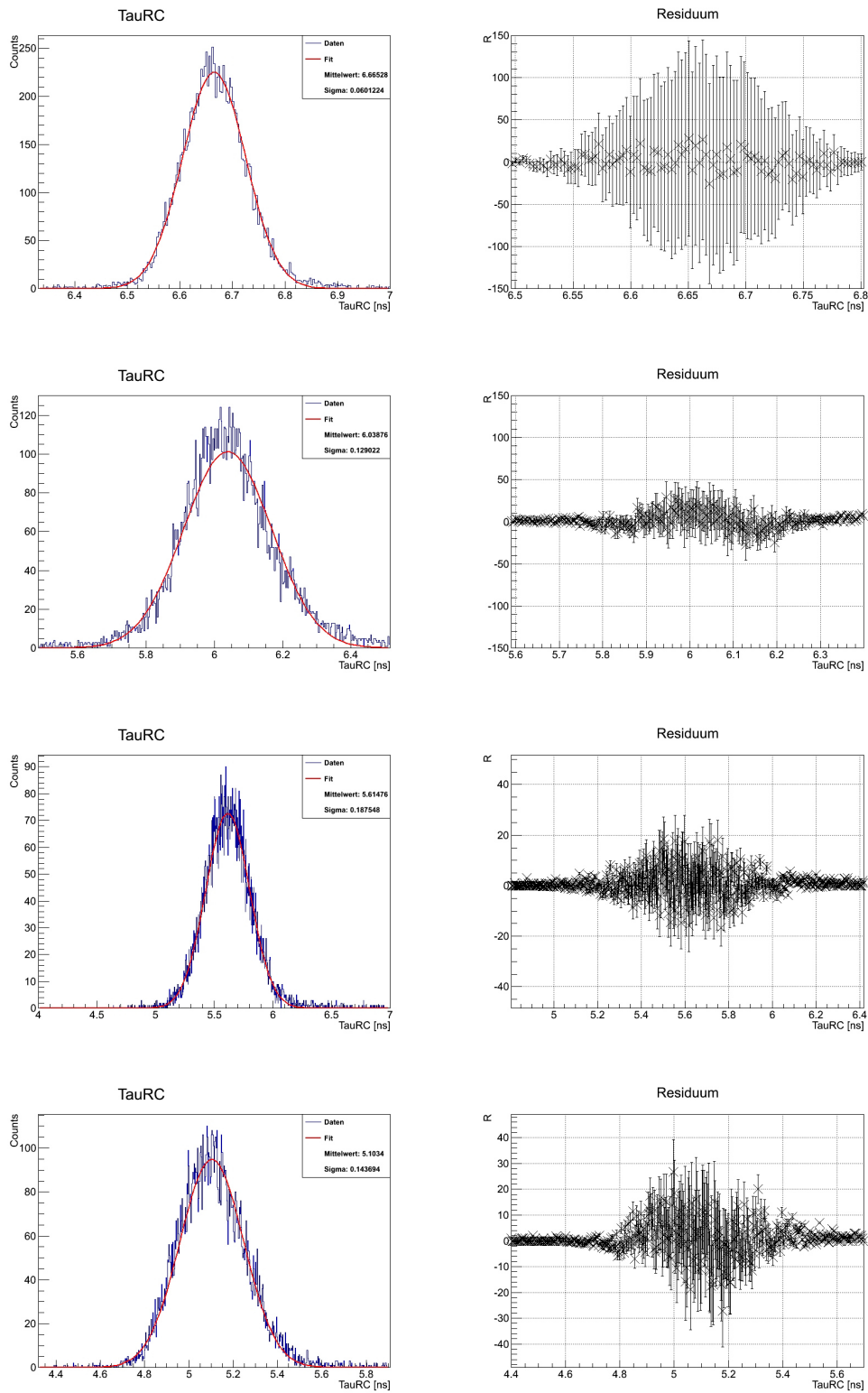


Abbildung 59.: Dargestellt sind die restlichen τ_{RC} -Werte mit ihren Residuen. Die erste Zeile stellt für den Mittelpunkt Konfiguration a) dar, die zweite Zeile Konfiguration b), die dritte Zeile Konfiguration c) und die vierte Zeile Konfiguration d). 69

A. Anhang

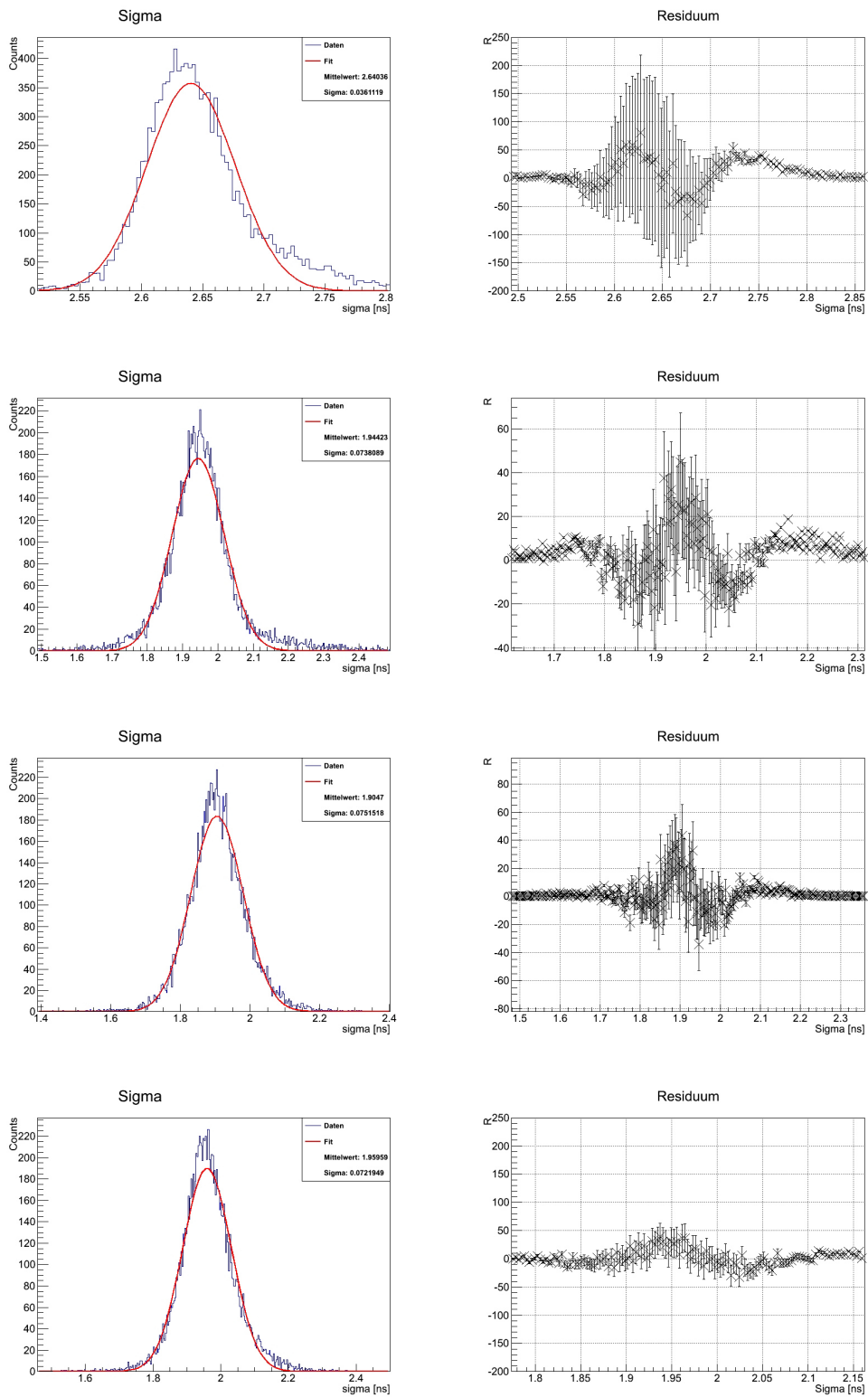


Abbildung 60.: Dargestellt sind die restlichen Sigma-Werte mit ihren Residuen. Die Zeilen nacheinander für den Mittelpunkt die Konfiguration a), b), c) und d) dar.
70

B. Literaturverzeichnis

- [1] Beskers, Bastian.
MainzTPC: Design and commissioning of a dual-phase xenon time-projection-chamber for studies of the scintillation pulse shape.
PhD thesis, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, 2017.
- [2] Hamamatsu, Arzbergerstr. 10, D-82211 Herrsching am Ammersee, Germany.
Datenblatt: Photomultiplier Tube R6041-406, 3 2012.
- [3] William R. Leo.
Techniques for nuclear and particle physics experiments : a how-to approach.
Berlin [u.a.], 2., rev. ed. edition, 1994.
- [4] *Schematische Skizze eines Photomultipliers*, 2007.
[Accessed: 2017/05/15].
- [5] E. Aprile and T. Doke.
Liquid xenon detectors for particle physics and astrophysics.
2009.
- [6] Advanced Laser Diode System A.L.S GMBH, Schwartzschildstr. 6, D-12489 Berlin, Germany.
Picosecond Diode Laser-PiLas Manual, 12 2012.
- [7] Hans-Joachim Eichler and Jürgen Eichler.
Laser : Bauformen, Strahlführung, Anwendungen.
Berlin, 8., aktualisierte und überarbeitete auflage edition, 2015.
- [8] Physik Instrumente (PI) GmbH und Co.
Datenblatt: Precision Translation Stage M-403.
- [9] Physik Instrumente (PI) GmbH und Co.
Datenblatt: Four Axis Motion Controller C-884, 01 2015.
[Accessed: 2017/05/29].
- [10] SIS GmbH, Harksheider Str. 102A, 22399 Hamburg, Germany.
Bedienungsanleitung: SIS3316 16 Channel VME Digitizer, 11 2013.
[Accessed: 2017/05/29].
- [11] SIS GmbH, Harksheider Str. 102A, 22399 Hamburg, Germany.
Datenblatt: SIS3305 5 GS/s, 2.5 GS/s, 1.25 GS/s 10-bit VME Digitizer, 04 2012.
[Accessed: 2017/05/29].

B. Literaturverzeichnis

- [12] OZ Optics, 219 Westbrook Rd, Ottawa, ON, Canada.
Variable Fiber Optic Attenuators – Blocking Pigtail Style, 3 2009.
- [13] Conrad Electronic SE.
Bedienungsanleitung: LDM 15J Laser-Entfernungsmesser.
Toolcraft, 2016.
[Accessed: 2017/05/29].
- [14] Agilent Technologies Inc.
Agilent Technologies Oscilloscopes, 12 2012.

Abbildungsverzeichnis

1.	Eine computergenerierte Darstellung der MainzTPC. Die Photomultiplier sind in dieser jeweils oben und unten an der Zeitprojektionskammer montiert [1].	3
2.	Eine schematische Darstellung des Aufbaus und des Kaskadenprozesses eines PMTs [4].	8
3.	Schematischer Aufbau eines einfachen Diodenlasers [7].	13
4.	Darstellung eines Gain switches mit der freien Ladungsträgerdichte n und Photonendichte N [6].	14
5.	Vorne links zu erkennen ist der PMT in einer Aluminium-Fassung eingebettet und rechts davon das Glasfaserkabel mit dem Laserkopf, welches an der Positionssteuerung angebracht ist. Im Hintergrund sieht man die Laserdiode. Nicht zu sehen ist hier die Blende, diese befindet sich rechts außerhalb des Bildes.	18
6.	Die Position für eine reguläre Messung mit ≈ 20 Photoelektronen. . .	19
7.	Die Position für die SPE-Messungen. In dieser Einstellungen konnte das vorgegebene 5% Datenlimit erreicht werden.	19
8.	Zu sehen ist die Frontseite des PMTs mit Polsterung, welches von einer in der hiesigen Werkstatt des Instituts gebauten Halterung gehalten wird. Beide roten, senkrecht verlaufenden Geraden sind parallel zueinander.	20
9.	Die PMT-Oberfläche wurde entlang vier Achsen durchfahren, wobei nur die Querachsen einen gemeinsamen Mittelpunkt besitzen bei [25,5 mm, 25,5 mm]. Die Achse 3 verläuft absichtlich neben der Mitte des PMTs, da eine Strebe sich dort befindet.	21
10.	Dargestellt sind die 4 Konfigurationen, welche im Rahmen dieser Bachelorarbeit als Elektronikette am PMT-Signal untersucht worden sind.	22
11.	Der Zehnfachverstärker mit dem Schirmgeflecht um die Anschlüsse gewickelt.	22
12.	Der Fünffachverstärker der KPH.	22
13.	Der benutzte Splitter.	22
14.	Zu sehen ist eine Fotografie ein Teil des Versuchsaufbaus.	23
15.	Der Schaltplan für einer regulären DAQ-Messreihe.	25

Abbildungsverzeichnis

16.	Der Schaltplan für eine Messreihe bei der ein Trigger-Signal zusätzlich auf Channel 5 mit aufgenommen wird, um eine Korrekturmaßnahme gegen Fluktuation zu untersuchen	26
17.	Hier ist eine typische Waveform dargestellt. Es wurde mit 1000 V am PMT und keiner signalverändernden Elektronikette gearbeitet und am DAQ aufgenommen. Mit Hilfe des FitS1 -Programms können die drei aus der Theorie erwähnten Zeitvariablen τ_{RC} , Sigma und τ_{anode} links im Graphen ausgelesen werden.	30
18.	Dargestellt ist eine DAQ-Messung mit Zehnfachverstärker und Splitter von der Mitte des PMTs [25,75 mm, 25,5 mm]. Die Waveforms wurden nicht normiert, dafür aber ihre Maxima auf die Position t=0 ns verschoben. Die Farbskala rechts gibt die Farbe korrespondierend zur Anzahl der Einträge pro Bin wieder.	33
19.	Beide Populationshügel werden mit einer einfachen Gauß-Funktion gefittet.	34
20.	Der Populationshügel weist eine Scherung auf, welche sich nicht ideal durch eine Gauß-Funktion beschrieben lässt.	34
21.	Das reine Trigger-Signal aus dem Laser-Controller. Die Skalierung ist 200 μs pro Kästchen für die X-Achse.	37
22.	Die Trigger-Signale, welche in die Karten eingespeist werden. Die Skalierung ist 1 ns pro Kästchen in X-Richtung.	37
23.	Dargestellt ist eine Superposition aus einer DAQ-Messung mit Zehnfachverstärker und mit Splitter (Konfiguration a)) von der Mitte des PMTs bei 1000 V. Es ist eine nicht normierte und nicht verschobene PMT-Signal-Darstellung.	38
24.	Dargestellt ist eine Superposition aus einer Oszilloskop-Messung mit Zehnfachverstärker und Splitter (Konfiguration a)) von der Mitte des PMTs bei 1000 V. Es ist eine nicht normierte und nicht verschobene PMT-Signal-Darstellung.	39
25.	Aus dem Discrimantor 1 Ausgang Top wurde das ausgehende Triggersignal durch einen Splitter in zwei Signale geteilt und dann an die Channel 1 und 5 angeschlossen.	39
26.	Zu sehen sind zwei Trigger-Signale, welche aus dem Splitter kommen. Der dazugehörige Versuchsaufbau ist in Abbildung 25 zu sehen. Es ist zwar ein Laufzeitunterschied aufgrund der Kabellänge, jedoch kein Jitter feststellbar.	40
27.	Zu sehen ist die Subtraktion der Position der Aufstiegsflanken der beiden Trigger-Signale bei dem Wert 0.01 V. Die Darstellung wurde mit dem SIS 3305 aufgenommen.	41

28.	Dargestellt sind die Mittelwerte von τ_{RC} mit einer Standardabweichung als Fehler. Anhand des Werts von τ_{RC} kann der Einfluss der Oberfläche auf das Zeitverhalten beschrieben werden.	42
29.	Dargestellt sind die Mittelwerte von Sigma mit einer Standardabweichung als Fehler.	42
30.	Es ist die Amplitudenstärke der Achse 2 für 17 Punkten zu sehen. Neben den Einbrüchen bei den Querstreben ist zu vermerken, dass die rechte Seite des PMTs ist empfindlicher als die linke Seite.	43
31.	Dargestellt ist die Amplitudenstärke der Achse 3 für 17 Punkten. Die obere Seite des PMTs ist empfindlicher als die untere Seite.	44
32.	Dargestellt sind die Mittelwerte der Amplituden für die entsprechenden Positionen auf dem PMT.	44
33.	Dargestellt sind die Mittelwerte von τ_{RC} und Sigma mit einer Standardabweichung als Fehler. Anhand der Werte kann der Einfluss der Elektronik auf das Zeitverhalten beschrieben werden.	45
34.	Dargestellt ist eine Waveform aus einer Messung ohne Verstärker und ohne Splitter (Konfiguration d)) von der Mitte des PMTs bei 1000 V. Um den Parameter τ_{RC} zu bestimmen, verrechnet man den Faktor $F_{\tau_{RC}}$ mit τ_{anode} und teilt diesen aufgrund der Samplingrate mit dem Divisor 5.	47
35.	Links zu erkennen ist die Amplitudenverteilung und rechts die Chi-Quadrat-Verteilung von der Messung ohne Verstärker und ohne Splitter. Bei dem Chi-Quadrat handelt es sich um das nicht reduzierte Chi-Quadrat.	47
36.	Die Zeitvariable τ_{RC} ist bei diesem Fit-Versuch deutlich kleiner als mit einem Sigma.	48
37.	τ_{anode} mit 1,41 Samples	48
38.	τ_{anode} mit 1500 Samples	48
39.	Dargestellt ist ein Signal aus einer Messung ohne Verstärker, dafür mit Splitter (Konfiguration c)) von der Mitte des PMTs bei 1000 V. Das Chi-Quadrat ist in Abbildung 41 zu finden und die Amplitudenverteilung in Abbildung 39.	49
40.	Es ist die Amplitudenverteilung der Position aus der Darstellung 39 zu sehen (Mit Splitter ohne Verstärker)	49
41.	Das Chi-Quadrat der Position aus der Darstellung 39 (Mit Splitter ohne Verstärker)	49
42.	Dargestellt ist eine Waveform aus einer Messung mit Fünffach-Verstärker und mit Splitter (Konfiguration b)) von der Mitte des PMTs bei 1000V. Das Chi-Quadrat ist in Abbildung 44 zu finden und die Amplitudenverteilung in Abbildung 43.	50
43.	Es ist die Amplitudenverteilung der Position aus der Darstellung 42 zu sehen (Mit Splitter und Fünffachverstärker)	50
44.	Das Chi-Quadrat der Position aus der Darstellung 43 (Mit Splitter und Fünffachverstärker)	50

Abbildungsverzeichnis

45.	Dargestellt ist eine Waveform aus einer Messung mit Verstärker und mit Splitter (Konfiguration a)) von der Mitte des PMTs bei 1000V. Das Chi Quadrat ist in der Abbildung 47 zu finden und die Amplitudenverteilung in Abbildung 46.	51
46.	Es ist die Amplitudenverteilung der Position aus der Darstellung 45 zu sehen (Mit Splitter und Zehnfachverstärker)	51
47.	Das Chi Quadrat der Position aus der Darstellung 45 (Mit Splitter und Zehnfachverstärker)	51
48.	Um die Amplitude von Einzelphotoelektronen zu bestimmen, wurde eine Amplitudenverteilung einer SPE-Messung durch das SIS3305 mit 30.000 Signalen in der Mitte des PMTs durchgeführt und das Ergebnis mit einer Gauß-Funktion gefittet.	52
49.	Das Chi Quadrat der Position aus der Darstellung 51 (SPE: Mit Splitter und Zehnfachverstärker).	53
50.	Die Dark Box war für das Licht der Deckenlampe schwach durchlässig, sodass neben dem normierten und verschobenen Laserlicht-Signal weitere Signale zu beobachten sind.	53
51.	Dargestellt ist eine Einzelphotoelektronen. Das entsprechende Chi Quadrat der Messung für die Position [25,75 mm, 25,5 mm] ist in Abbildung 49 zu finden.	53
52.	Herausstechend aus der Verteilung sind die Parameter für die fehlgeschlagene Fits. Sie entsprechen den Fit-Startparametern, jedoch geht das Chi Quadrat der Fits gegen unendlich.	54
53.	Untersuchungen der Trigger-Elektronikkette mit dem Oszilloskop. Teil 1.	60
54.	Untersuchungen der Trigger-Elektronikkette mit dem Oszilloskop. Teil 2.	61
55.	Das benutzte Oszilloskop von Agilent Technologies [14].	62
56.	Die Querstreben/Lammellenstruktur des PMTs.	63
57.	Eine Übersicht der Messungen (grün) mit den entsprechenden Aufnahmesystemen. Nicht aufgezählt sind Messungen, die den Einfluss des Schirmgeflechts untersucht haben, da die Darstellung hierfür gleich ausgesehen hätte.	67
58.	Die restliche Timeresponse-Untersuchung. Manche der Randpunkte lieferten keine sinnvollen Ergebnisse. Das liegt an der geringen Amplitudenhöhe an den Rändern. Oben rechts ist die Superposition des Randpunktes [25,75 mm, 48,5 mm] der Achse 3 dargestellt in der Konfiguration a). Ohne Zehnfachverstärker würden die Amplituden in der Darstellung noch geringer ausfallen.	68
59.	Dargestellt sind die restlichen τ_{RC} -Werte mit ihren Residuen. Die erste Zeile stellt für den Mittelpunkt Konfiguration a) dar, die zweite Zeile Konfiguration b), die dritte Zeile Konfiguration c) und die vierte Zeile Konfiguration d).	69

60. Dargestellt sind die restlichen Sigma-Werte mit ihren Residuen. Die Zeilen nacheinander für den Mittelpunkt die Konfiguration a), b), c) und d) dar. 70

C. Danksagung

Ich habe während der Bachelorarbeit sehr viel gelernt und bin dankbar, dass Prof. Oberlack mir die Möglichkeit gegeben hat, die Bachelorarbeit in der XENON-Arbeitsgruppe zu absolvieren. Neben den Kenntnissen von C++, CERN root und Linux-Systemen habe ich viel über experimentelle Aufbauten gelernt und auch viel über die damit verbundene Fehlerquellen. Ich bedanke mich bei der ganzen Arbeitsgruppe und ganz besonders bei Melanie Scheibelhut für die großartige Unterstützung und die guten Ratschläge.