



JOHANNES GUTENBERG
UNIVERSITÄT MAINZ

Systematische Studien zur Linearität eines Photomultipliersystems zur Vermessung paritätsverletzender Asymmetrien mit dem P2-Experiment am MESA-Beschleuniger

von

Paul Antoine Martinet

Bachelorarbeit in Physik
vorgelegt dem Fachbereich Physik, Mathematik und Informatik (FB 08)
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
am 4. Dezember 2023

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. Frank Maas
2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. Wolfgang Gradl

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 4. Dezember 2023

Paul Antoine Martinet
Institut für Kernphysik - P2
Johann-Joachim-Becher-Weg 45
Johannes Gutenberg-Universität D-55128 Mainz
a.martinet@students.uni-mainz.de oder amartinet@gmx.de

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Motivation	1
2. MESA und das P2-Experiment	2
2.1. Die elektroschwache Vereinheitlichung und der Weinbergwinkel	2
2.2. P2-Experiment	3
2.3. MESA	7
3. Grundlagen	8
3.1. Photomultiplieröhre - PMT	8
3.2. Aktiver Spannungsteiler - P2-DivA	9
3.3. Analog-Digital-Wandler - P2-ADC	9
3.4. Leuchtdiode - LED	11
3.5. Abschätzung der Spannung am ADC	12
3.6. Alternierende Rechteckfunktion	13
4. Versuchsaufbau zur Simulation einer Asymmetrie	14
4.1. Erzeugung des Lichtsignals und Gates	15
4.2. Halterung der LED	16
4.3. Variable Abschwächung durch gekreuzte Polfilter	16
4.4. Photodiode	17
4.5. Finden der richtigen Parameter	17
5. Messungen	19
5.1. Versuchsdurchführung	19
5.2. Methodik der Analyse	19
5.3. Analyse der Streuung der Asymmetrie ΔA	22
5.4. Asymmetrie in Abhängigkeit zur Lichtmenge	27
5.5. Asymmetrie in Abhängigkeit zur Verstärkung (HV)	30
5.6. Fehlerdiskussion	32
6. Zusammenfassung und Ausblick	35
A. Anhang	36
A.1. Messwerte - Asymmetrie gegenüber Lichtmenge	36
A.2. Messwerte - Asymmetrie gegenüber Verstärkung(HV)	37
A.3. Daten aus Strahlzeit	38
A.4. Formeln zur Berechnung von χ^2	38
B. Danksagung	39
C. Literaturverzeichnis	40

1. Einleitung und Motivation

In Mainz entsteht derzeit ein neuer Teilchenbeschleuniger – der Mainz Energy-Recovering Superconducting Accelerator (MESA). Voraussichtlich ab 2024 wird MESA einen kontinuierlichen, spinpolarisierten Elektronenstrahl mit einer Energie von 155 MeV und einer Intensität von bis zu 10 mA liefern. Dieser Elektronenstrahl wird für die Experimente MAGIX, BDX@MESA und P2 genutzt. Ziel des P2-Experiments ist es, den elektroschwachen Mischungswinkel $\sin^2 \Theta_W$, auch bekannt als Weinberg-Winkel, bei einem niedrigen Impulsübertrag von $Q^2 = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ GeV}^2$ mit einem relativen Fehler von 0,14% zu vermessen (vgl. Abb. 1.1). Die Bedeutung dieser Messung liegt darin, dass der Weinberg-Winkel im betreffenden Bereich des Impulsübertrags bisher nicht durch hochpräzise Messungen bestätigt wurde. P2 zielt darauf ab, diese Wissenslücke zu schließen. Denn eine mögliche Abweichung von den theoretischen Vorhersagen des Standardmodells der Teilchenphysik in diesem Bereich könnte auf neue Physik jenseits des Standardmodells hinweisen.

Für das P2-Experiment liefert MESA spinpolarisierte Elektronen bei einer Intensität von 150 μA , deren Polarisation mit einer Frequenz von 1 kHz wechselt. Um den Weinberg-Winkel zu messen, werden die polarisierten Elektronen an den Protonen eines Liquid-Hydrogen-Targets elastisch gestreut. Je nach Polarisation wird dabei ein Unterschied im Wirkungsquerschnitt der Streuung erwartet. Die dabei auftretende paritätsverletzende Asymmetrie wird am Cherenkov-Detektor gemessen. Dieser, sowie die physikalische Grundlage des P2-Experiments, werden in Kapitel 2 beschrieben.

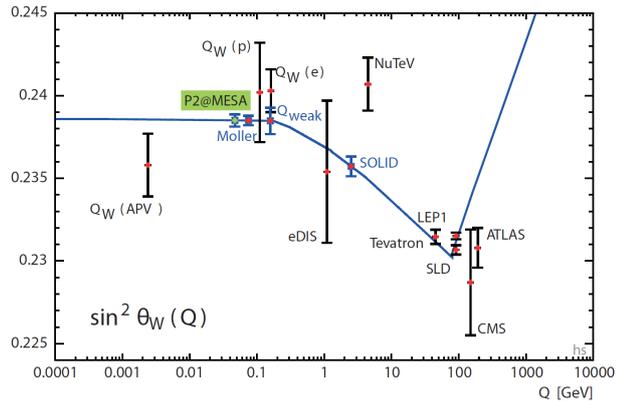


Abb 1.1.: Messungen des schwachen Mischungswinkels in Abhängigkeit des Impulsübertrags Q durch vergangene (schwarz) und zukünftige (blau) Experimente [1][7]

In dieser Arbeit wird die Linearität des Photomultiplermesssystems, ein integraler Bestandteil des Detektorsystems, untersucht. Vor allem bei Präzisionsexperimenten, wie P2, ist es notwendig die Linearität des Messsystems sorgfältig zu untersuchen, da Nichtlinearitäten zu einer Verfälschung des Messergebnisses führen. Hierzu wird in dieser Arbeit mit dem in Kapitel 3 und 4 beschriebenen Aufbau eine Asymmetrie simuliert, anhand derer das Messsystem auf Linearität untersucht werden kann. Die Ergebnisse, sowie mögliche Verbesserungen, werden in Kapitel 5 diskutiert.

2. MESA und das P2-Experiment

2.1. Die elektroschwache Vereinheitlichung und der Weinbergwinkel

„Das, was die Welt im Innersten zusammenhält...“ [5], wird durch das Standardmodell der Elementarteilchen beschrieben. Es besteht aus 12 Fermionen und 5 Bosonen sowie drei elementaren Kräften. Die Fermionen unterteilen sich in 6 Quarks und 6 Leptonen, die über die starke, schwache und elektromagnetische Wechselwirkung sowie durch die Gravitation miteinander interagieren. Während die Wirkungen der starken, schwachen und elektromagnetischen Wechselwirkung durch die vier Eichbosonen als Austauschteilchen im Standardmodell perfekt integriert sind, nimmt die Gravitation eine Sonderrolle ein, da sie ohne Austauschteilchen wirkt.



Abb 2.1.: das Standardmodell der Teilchenphysik entnommen aus [10]

Der aufmerksame Leser fragt sich jetzt warum die Welt aus drei elementaren Kräften zusammengehalten wird, aber vier genannt wurden? In den 1960er Jahren wurde durch Sheldon Glashow, Steven Weinberg und Abdus Salam die elektroschwache Vereinheitlichung entwickelt. Diese besagt, dass die elektromagnetische und schwache Wechselwirkung verschiedene Aspekte derselben Wechselwirkung seien, der elektroschwachen Wechselwirkung. Dies wurde in den 1970er Jahren erfolgreich experimentell bestätigt.

2. MESA und das P2-Experiment

Die elektroschwache Wechselwirkung wird durch vier masselose Eichbosonen W^0 , W^1 , W^2 und B^0 beschrieben, welche sich nach Gl. 2.1, Gl. 2.2 und Gl. 2.3 zu den beobachtbaren Bosonen Z^0 und dem Photon γ , sowie den W^\pm überlagern [12]:

$$|\gamma\rangle = \sin(\theta_W)|W^0\rangle + \cos(\theta_W)|B^0\rangle \quad (2.1)$$

$$|Z^0\rangle = \cos(\theta_W)|W^0\rangle - \sin(\theta_W)|B^0\rangle \quad (2.2)$$

und

$$|W^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|W^1\rangle \mp i|W^2\rangle) \quad (2.3)$$

Bei der Überlagerung von W^0 und B^0 zu Z^0 und γ kann man von einer Drehung um den schwachen Mischungswinkel oder auch Weinberg-Winkel, Θ_W sprechen. Dieser kommt neben dieser Drehung noch auf dem Tree-Level im Verhältnis der schwachen Ladungen g und g' vor[12]:

$$\tan(\Theta_W) = \frac{g'}{g} \quad (2.4)$$

Sowie auch in der Relation zwischen schwacher Ladung g und der Elementarladung e :

$$e = g \cdot \sin(\Theta_W) \quad (2.5)$$

und im Verhältnis der Massen des W- und Z-Bosons:

$$\frac{M_W}{M_Z} = \cos(\Theta_W) \quad (2.6)$$

2.2. P2-Experiment

Ziel des P2-Experiments ist es den elektroschwachen Mischungswinkel bei niedrigem Impulsübertrag mit sehr hoher Präzision zu bestimmen. Hierzu werden spinpolarisierte Elektronen mit wechselnder Helizität an den unpolarisierten Protonen eines flüssig-Wasserstoff-Targets gestreut. Auf dem Tree-Level kommt es zu den beiden Streuprozessen in Abb. 2.2, entweder durch die elektromagnetische Wechselwirkung über ein virtuelles Photon γ oder durch die schwache Wechselwirkung über ein virtuelles Z_0 -Boson. Aufgrund der Tatsache, dass die schwache Wechselwirkung die Parität verletzt, indem nur an linkshändige Teilchen¹² gekoppelt wird, streuen die rechtshändigen Elektronen ausschließlich über die elektromagnetische

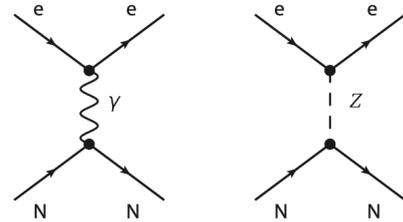


Abb 2.2.: Feynmandiagramme der Streuprozesse am P2 Experiment [1]

¹Teilchen mit negativer Helizität

²und an rechtshändige Antiteilchen

2. MESA und das P2-Experiment

Wechselwirkung. Somit unterscheiden sich die Wirkungsquerschnitte σ^\pm die jeweilige Helizität und eine paritätsverletzende Asymmetrie A^{PV} kann beobachtet werden.

$$A^{PV} = \frac{\sigma^+ - \sigma^-}{\sigma^+ + \sigma^-} \quad (2.7)$$

Aus der Asymmetrie A^{PV} der Wirkungsquerschnitte σ^\pm lässt sich die schwache Ladung $Q_W(p)$ des Protons bestimmen. Der Zusammenhang ist in 2.8 beschrieben,

$$A^{PV} = \frac{-G_F Q^2}{4\pi\alpha_{em}\sqrt{2}} [Q_W(p) - F(E_i, Q^2)] \quad (2.8)$$

wobei G_F die Fermi-Konstante, Q^2 der Impulsübertrag ist und $F(E_i, Q^2)$ die hadronische Struktur des Protons in Abhängigkeit der Anfangsenergie E_i des gestreuten Elektrons und des Impulsübertrags Q^2 beschreibt. Die schwache Ladung des Protons hängt wiederum in führender Ordnung über Gl. 2.9 mit dem Weinberg-Winkel zusammen.

$$Q_W(p) = 1 - 4 \sin^2(\theta_W) \quad (2.9)$$

P2 strebt einen relativen Fehler von :

$$\frac{\Delta \sin^2(\theta_W)}{\sin^2(\theta_W)} = 0,14\% \quad (2.10)$$

an. Hierbei wird auch ausgenutzt, dass der relative Fehler von $\sin^2(\theta_W)$ über Gl. 2.11 mit dem relativen Fehler der schwachen Ladung des Protons $Q_W(p)$ zusammenhängt.

$$\frac{\Delta \sin^2(\theta_W)}{\sin^2(\theta_W)} \approx 0,09 \cdot \frac{\Delta Q_W(p)}{Q_W(p)} \quad (2.11)$$

Im Experiment wird eine Asymmetrie von

$$A^{exp} = (-39,94 \pm 0,56) \cdot 10^{-9} \quad (2.12)$$

erwartet. Um diese hohe Präzision zu erreichen und eine solch kleine Asymmetrie messen zu können, werden hohe Anforderungen an die Strahlqualität gestellt und viel Statistik benötigt. Deshalb ist eine Datennahme von 10000 Stunden geplant.

Cherenkov Detektor

Das Detektorkonzept von P2 basiert auf dem Cherenkov Effekt, denn mittels diesem sollen in 72 kreisförmig angeordneten Quarzstäben (siehe Abb. 2.5) die Streuelektronen detektiert werden. Der Cherenkov Effekt beschreibt die Emission von Photonen, wenn ein geladenes Teilchen in ein Medium eintritt und dabei schneller ist als die Lichtgeschwindigkeit in diesem Medium.

2. MESA und das P2-Experiment

Der Cherenkov Effekt kann dabei nur in Medien mit einem Brechungsindex $n > 1$ auftreten. Durch den Eintritt des geladenen Teilchens werden die Atome entlang der Bahn dieses Teilchens für einen kurzen Moment polarisiert und emittieren Licht. Ist das Teilchen langsamer als die Lichtgeschwindigkeit in diesem Medium wird entlang der Flugbahn auch Licht emittiert, jedoch interferiert das Licht der einzelnen Atome destruktiv, sodass effektiv kein Licht beobachtet werden kann. Bewegt sich das Teilchen jedoch mit „Überlichtgeschwindigkeit“ in diesem Medium findet keine destruktive Interferenz statt, sodass das Cherenkov Licht beobachtet werden kann. Die Anzahl der Photonen, sowie deren Frequenzspektrum ist energieabhängig. Zudem hat Cherenkov Licht die nützliche Eigenschaft, dass es immer im Cherenkov Winkel Θ_C (Gl. 2.13) von der Flugbahn des Teilchens abstreut, dieser hängt neben der Geschwindigkeit des Teilchens, auch vom Brechungsindex des Mediums ab.

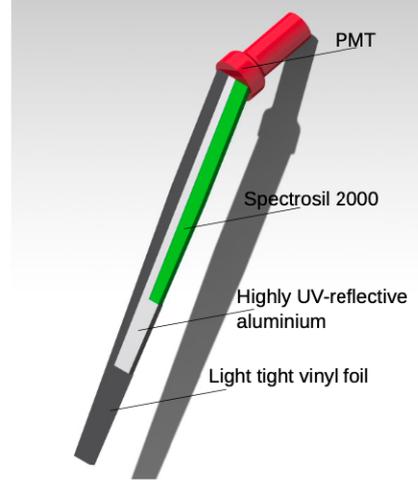


Abb 2.3.: CAD-Zeichnung eines Cherenkov Moduls[1]

$$\Theta_C = \arccos\left(\frac{1}{\beta n}\right) = \arccos\left(\frac{c'}{v}\right) \quad (2.13)$$

Wobei n für den Brechungsindex des Mediums, $\beta = \frac{v}{c_0}$ für die Geschwindigkeit des Teilchens und $c' = \frac{c_0}{n}$ für die Lichtgeschwindigkeit innerhalb des Mediums steht. Ist der Cherenkov Winkel Θ_C größer als der Grenzwinkel für Totalreflexion α_{tot} an der jeweiligen Grenzfläche kann man das Licht in einem Quarzstab einfangen (Abb. 2.4). Im P2-Experiment wird genau dieser Effekt ausgenutzt um die Photonen durch Reflexion zu einer am Ende des Quarzstabes montierten Photomultiplirohre (siehe Kapitel 3.1) zu leiten und mit dieser zu detektieren. So gilt z.B. bei hoch relativistischen Teilchen $\beta \approx 1$ in dem bei P2 verwendeten Cherenkov-Material³ an der Grenzfläche Quarz-Luft:

$$\Theta_C \approx 46,4^\circ > 43,6^\circ = \alpha_{tot} \quad (2.14)$$

Damit kein Cherenkov Licht „verloren“ geht wird zudem jeder Quarzstab mit einer hochreflektiven Folie aus Aluminium eingewickelt. Auch wird jeder Quarz, damit kein externes Licht in den Quarz gelangt, mit einer lichtdichten Vinyl-Folie eingepackt. Pro Quarzstab wird eine Elektronenrate im GHz-Bereich erwartet. Diese hohe Rate ist notwendig um die Laufzeit des Experiments einigermaßen gering zu halten, jedoch ist sie so hoch, dass eine Detektion der einzelnen Streuevents nicht mehr möglich ist. Deshalb muss integrierend, also kontinuierlich gemessen werden, man spricht hier vom „Integrating-Mode“. Es werden hier keine einzelnen Pulse, sondern die Überlagerung vieler Pulse zum Anodenstrom der PMT gemessen. Aufgrund der unterschiedlichen

³Spectrosil 2000, ein synthetisches Quarzglas, der Marke Heraeus, $n \approx 1,45$

2. MESA und das P2-Experiment

Wirkungsquerschnitte für die jeweiligen Helizitäten werden leicht verschiedene Anodenströme erwartet, aus diesen sich eben die Wirkungsquerschnitte und dementsprechend die Asymmetrie A^{PV} bestimmen lassen. Neben dem Integrating-Mode ist auch ein „Single-Event-Mode“ zur Kalibrierung der Cherenkov-Module geplant. Im Gegensatz zum Integrating-Mode werden hier die Pulse der einzelnen Streuevents detektiert.

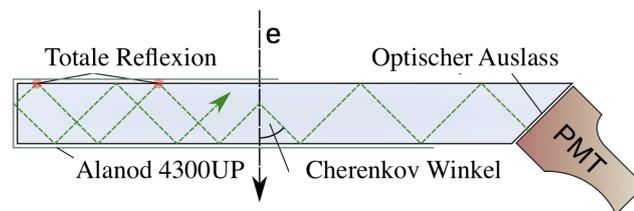


Abb 2.4.: Skizze des „Einfangen“ des Cherenkov Lichts aus [1]. Alanod 4300 UP ist der Markenname für eine hochreflektive Aluminiumfolie.

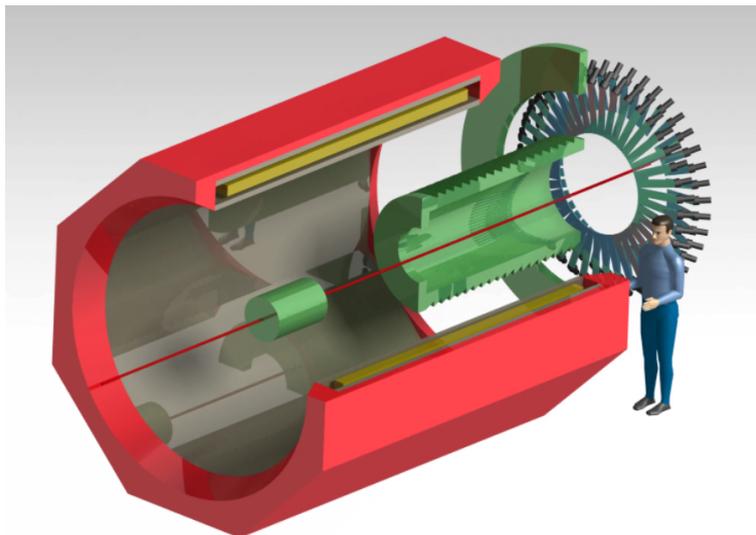


Abb 2.5.: CAD Design des P2-Aufbaus. Zu erkennen ist der supraleitende Solenoid, der rote achteckige Zylinder, sowie der bläuliche gefärbte Cherenkov-Detektor aus 72 Modulen. Der grüne Ring um den Cherenkov-Dektor wird aus Blei gefertigt und schirmt die Photomultiplier vor Strahlung. Das flüssig-Wasserstoff-Target wird auf Höhe des kleinen grünen Zylinders platziert.

2.3. MESA

Grundlage für das P2-Experiment wird der aktuell im Bau befindlichen Beschleuniger MESA (Mainz-Energy-recovering-Superconducting-Accelerator). Dieser wird für P2 einen extrem stabilen spinpolarisierten Elektronenstrahl mit einer Energie von 155 MeV bei hoher Intensität von $150 \mu\text{A}$ liefern. Neben P2 gibt es noch die Experimente MAGIX und DarkMESA. Bei MAGIX wird Elektronenstreuung an einem Gas-Jet-Target mittels zwei Vielzweckspektrometern untersucht. DarkMESA, auch Strahlfängerexperiment genannt, sucht nach dunkler Materie, sogenannten Weak-Interacting-Massive-Particles, welche möglicherweise im Strahlfänger des P2-Experiments entstehen [6].

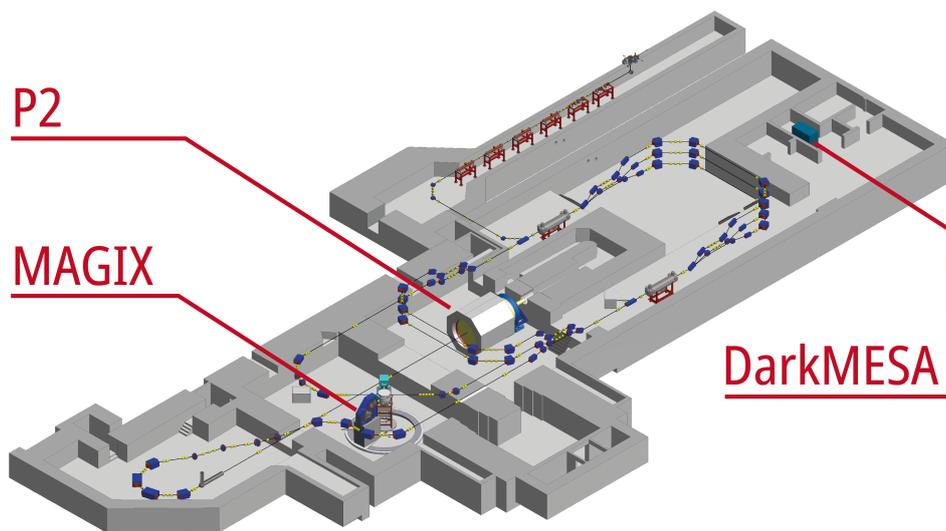
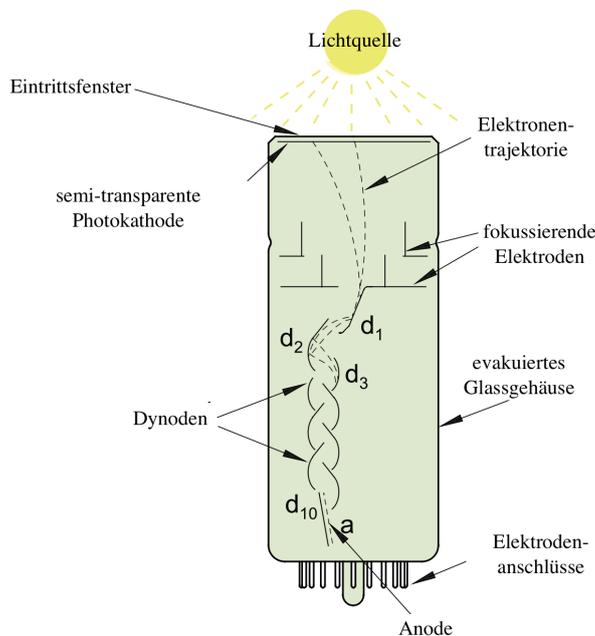


Abb 2.6.: Übersicht der Anlage des MESA-Beschleunigers aus [8]

3. Grundlagen

3.1. Photomultiplerröhre - PMT

Eine Photomultiplerröhre, oder Photoelektronenvervielfacher (engl. Photomultiplier tube - PMT), ist ein lichtempfindliches Gerät zur Messung von schwachem Licht. Es handelt sich um eine vakuumierte Glasröhre, welche mittels einer geschickten Anordnung von Elektroden und durch Nutzung des photoelektrischen Effekts in der Lage ist, wenige bis einzelne Photonen zu detektieren.



(a) Schematische Darstellung einer PMT aus [4]



(b) ET9305 PMT, ähnlich der im P2-Experiment verwendeten PMTs aus [3]

Abb 3.1.

Wenn ein Photon das Eintrittsfenster der Röhre durchdringt, stößt es auf die Photokathode und löst durch den äußeren photoelektrischen Effekt mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit, der sogenannten Quanteneffizienz¹ η , ein Photoelektron aus der Kathode aus. Das entstandene Photoelektron wird durch ein elektrisches Feld zur

¹üblicherweise <50 %, abh. v. d. Wellenlänge

3. Grundlagen

ersten Dynode beschleunigt, wo es in der Regel mehrere Sekundärelektronen² auslöst. Diese werden dann zur zweiten Dynode beschleunigt und lösen dort selbst jeweils mehrere Elektronen aus. Dieser Prozess setzt sich bis zur letzten Dynode fort. Nachdem die Elektronen alle Dynoden³ passiert haben fließen sie über die Anode aus der Röhre ab. Durch die Verstärkung des Photoelektrons im Bereich von 10^3 bis 10^7 , je nach angelegter Spannung, kann man aus einzelnen Photonen eine messbare Ladung erzeugen. Ebenso lässt sich aus einem schwachen Lichtstrom ein messbarer Anodenstrom generieren. Je nach Intensität des Lichts ist es jedoch notwendig, die Verstärkung entsprechend anzupassen. Eine Verstärkung von 10^6 , die bei der Detektion von einzelnen Photonen durchaus üblich ist, könnte bei einem stärkeren Lichtstrom zu einer Überlastung der Dynoden und dem „Durchbrennen“ des Photomultipliers führen.

3.2. Aktiver Spannungsteiler - P2-DivA

Neben der PMT selbst, ist die PMT-Base ein essentieller Bestandteil eines Versuchsaufbaus. Sie agiert als Bindeglied zwischen der PMT, der Hochspannungsquelle sowie Auswertelektronik, und verteilt die Spannung an die Dynoden. Ohne die Base ist eine PMT unbrauchbar. Einfache PMT-Basen sind im Grunde genommen Spannungsteiler, die die angelegte Hochspannung gleichmäßig auf alle Dynoden verteilen und einen Ausgang für das Anoden-Signal, beispielsweise für ein BNC-Kabel bereitstellen. Die Anforderungen an die Base für das P2-Experiment ergeben sich aus den beiden Betriebsmodi, dem Single-Event-Mode und dem Integrating-Mode (vgl. Kapitel 2.2). Da für den Single-Event-Mode eine hohe, jedoch für den Integrating-Mode eine niedrige Verstärkung benötigt wird, eignet sich eine herkömmliche einfache Base nicht. Daher wurde der P2 Voltage Divider & Preamplifier (P2DivA) entwickelt. Dieser kann mittels einem elektronisch gesteuertem Relais zwischen den beiden Betriebsmodi wechseln. Im Single-Event-Mode werden alle 10 Dynoden der PMT genutzt, um eine Verstärkung von ca. 10^5 zu erreichen. Zusätzlich wird das Signal durch einen Vorverstärker (PreAmp) um den Faktor ≈ 10 verstärkt, bevor es mittels eines externen Charge-to-Digital-Converters ausgelesen wird. Im Integration-Mode werden hingegen nur die ersten 5 Dynoden genutzt, um eine Verstärkung von ca. 10^3 zu erreichen. Der Anodenstrom wird dann durch einen Vorverstärker um nochmal 10^4 verstärkt und in eine Spannung gewandelt wird, die anschließend mit dem P2-ADC ausgelesen wird.

3.3. Analog-Digital-Wandler - P2-ADC

Ein Analog-(zu)-Digital-Wandler (eng. analog-to-digital-converter - ADC) ist ein elektronisches Bauelement, das dazu dient, analoge Signale in digitale Werte umzuwandeln. Dieser Prozess ist notwendig, wenn Informationen von der physikalischen Welt, die in kontinuierlicher Form vorliegen, in eine für digitale Systeme verständliche Form umgewandelt werden müssen. Hierzu wird ein analoges Signal, z.B. eine Spannung,

²üblicherweise >4

³üblicherweise 10 Dynoden

3. Grundlagen

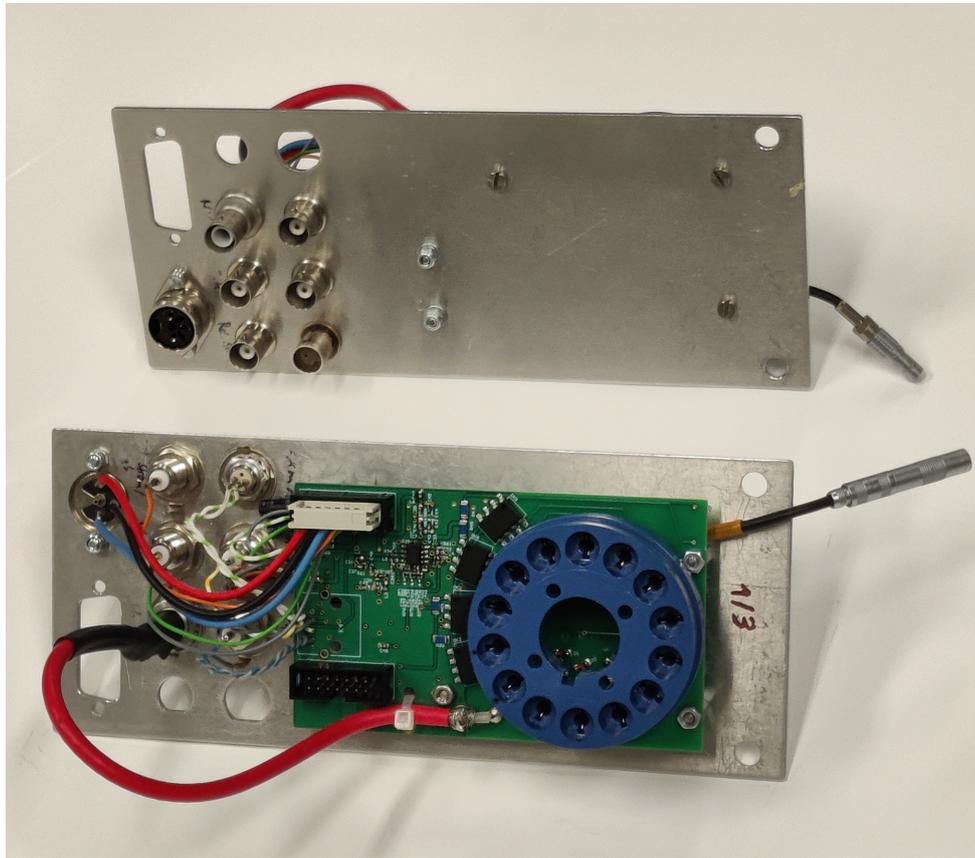


Abb 3.2.: Bild des P2-DivA, Vorder- und Rückseite. Zu erkennen sind die Anschlüsse für Stromversorgung, Ausgangssignal und Hochspannung, sowie die blaue Aufnahme für die PMT

mit einer hohen Rate (Samplingrate) abgetastet und quantifiziert, um dann als digitales Signal weiterverarbeitet zu werden. Die Quantifizierung hat jedoch nur eine endliche Auflösung, sodass hierbei ein Quantifizierungsfehler entsteht. Die Auflösung wird oft durch die Anzahl möglicher verschiedener Werte angegeben. So entspricht eine Auflösung von 18-Bit genau $2^{18} = 262144$ verschiedenen Werten. Der im P2-Experiment verwendete ADC (P2-ADC) ist ein großes Elektronikboard mit 16 einzelnen ADC-Schaltungen, welche jeweils eine Samplingrate von 15 MSps bei einer 18-Bit Auflösung vorweisen. Bei einem Messbereich von $\pm 4,096$ V entspricht dies einer Auflösung von $30,5 \mu\text{V}$. Alle 16-Kanäle werden auf einem FPGA⁴ analysiert und über eine Ethernet-Verbindung an einen Computer zur Analyse gesendet. Neben den 16-ADC-Eingängen bietet der ADC 4 Logik-Eingänge, welche im Experiment als Mess- und Helizitätsgate geschaltet werden können. Da 18-Bit bei 15 MSps einer Datenrate von 270 MB/s entsprechen, bietet der P2-ADC noch die Funktion eines Prescalefactors

⁴Field Programmable Gate Array

3. Grundlagen

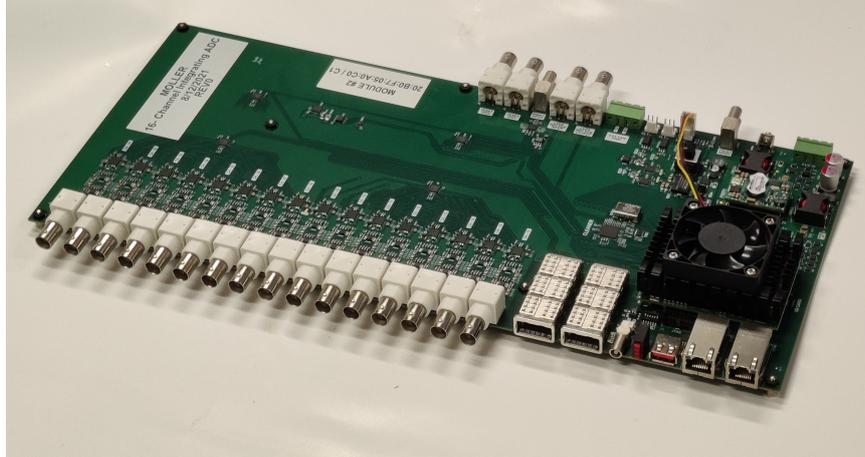


Abb 3.3.: Bild des P2-ADC mit seinen 16 Kanälen

(PreScF = 1 bis 16) an, dieser reduziert die Datenmenge, indem er nur jeden n-ten Datenpunkt speichert. Neben dem Quantisierungsfehler sind typische Fehlerquellen eines ADCs eine Nullpunktverschiebung (Offset) und eine Nichtlinearität. Das Offset muss beim P2-ADC beachtet werden und war in Kombination mit P2-DivA meist ca. -25 mV. Die Nichtlinearität des ADCs soll gemeinsam mit der der PMT in dieser Arbeit gemessen werden.

3.4. Leuchtdiode - LED

Eine LED ist ein elektronisches Halbleiterbauteil, welches Licht emittieren kann. Der Aufbau einer LED entspricht im Wesentlichen dem einer pn-Diode, jedoch mit anderen Materialien. Wird an einer LED eine Spannung in Durchlassrichtung angelegt, fließen Elektronen der n-dotierten Schicht über den pn-Übergang in die p-dotierte Schicht, wo sie dann mit den „Löchern“ der p-Dotierung rekombinieren und die dabei frei werdende Energie in Form von Licht emittieren. Die Farbe des emittierten Lichts hängt von der Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband ab, diese Energie ist materialabhängig. Die Lichtintensität ist abhängig von der Rate der Rekombinationen, und daher (in erster Näherung linear, siehe Abb. 3.4b) vom Strom, der durch die LED fließt. Da eine Leuchtdiode, überraschenderweise auch eine Diode ist, sieht die Kennlinie ähnlich aus (Vgl. Abb. 3.4a). Um eine LED zu betreiben, ist es notwendig einen Vorwiderstand zu schalten. Dieser fungiert als Strombegrenzer, da eine LED keinen Innenwiderstand hat und somit ohne Vorwiderstand kurzgeschlossen wäre. Um den passenden Vorwiderstand zu berechnen, müssen die Spannung, die über die LED abfällt U_F , der gewünschte Strom I_F sowie die gewünschte Betriebsspannung U_0 bekannt sein⁵.

⁵Typische Werte, z.B. für eine blaue LED sind $U_F = 3,2$ V, $I_F = 20$ mA, $U_0 = 5$ V

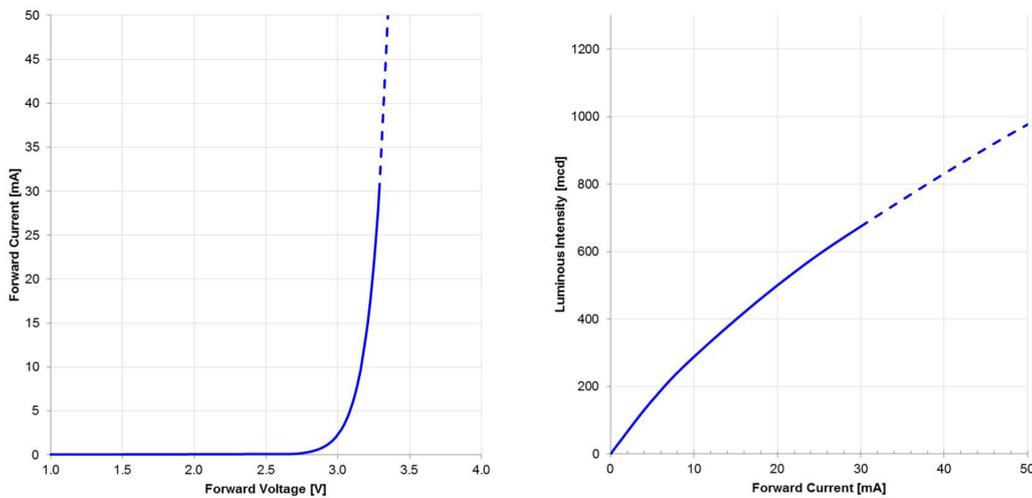
3. Grundlagen

So muss nach Kirchhoff gelten:

$$U_0 = U_R + U_F, \quad (3.1)$$

es folgt also für den Vorwiderstand R:

$$R = \frac{U_0 - U_F}{I_F}. \quad (3.2)$$



(a) Strom-Spannungs-Kennlinie einer blauen LED. Der steile Anstieg des Stroms ab einer gewissen Spannung ist deutlich zu erkennen. (b) Luminosität-Strom-Kennlinie. Der Zusammenhang kann in erster Näherung als linear beschrieben werden.

Abb 3.4.: Typische Kennlinien einer blauen LED entnommen aus [2].

3.5. Abschätzung der Spannung am ADC

Um die Intensität des Lichts der LED im Versuchsaufbau sinnvoll einzustellen ist eine Abschätzung des erwarteten Signals am ADC notwendig. Der Anodenstrom der PMT lässt sich wie folgt abschätzen: Ein gestreutes Elektron löst in einem Quarz eine gewisse Menge an Cherenkow-Photonen aus, welche insgesamt ca. 65 - 70 Photoelektronen (N_{PE}) auslösen. Diese werden durch die PMT um den Faktor G verstärkt und fließen als Anodenstrom I_{Anode} zum Vorverstärker des P2-DivA ab. Es gilt somit, mit \dot{R} als Elektronenrate und der Elementarladung e :

$$I_{Anode} = \dot{R} \cdot N_{PE} \cdot G \cdot e \quad (3.3)$$

Der Anodenstrom wird durch den Vorverstärker mit Z_{preamp} verstärkt. Da aufgrund einer Parallelschaltung von Widerständen nur 82 % des Anodenstroms zur Ausgangsspannung verstärkt werden, muss ein Korrekturfaktor (current-correction-factor ccf)

3. Grundlagen

eingeführt werden. Somit ergibt sich als erwartete Spannung am ADC:

$$U_{ADC} = Z_{preamp} \cdot I_{Anode} \cdot ccf. \quad (3.4)$$

Im P2-Experiment wird pro Cherenkov-Modul eine maximale Elektronenrate von ≈ 3 GHz erwartet, bei ca. 67 Photoelektronen pro auftreffendem Streuelektron und einer Verstärkung⁶ von ≈ 1300 ergibt sich ein Anodenstrom von $I_{Anode} = 20 \mu\text{A}$. Mit einer Vorverstärkung von $Z_{preamp} = 62857\Omega$ und $ccf = 0,82$ ergibt sich eine erwartete Spannung U_{ADC} von $U = 2,29$ V.

Dies wurde auch in einer Strahlzeit am MAMI-Beschleuniger bestätigt. Hier wurde ein Modul des Cherenkov-Detektors mit einem 855 MeV Elektronenstrahl bei einer Rate von 3,187 GHz bestrahlt und mittels der PMT ET518 bei 500 V der Anodenstrom am ADC gemessen. Hier ergab sich eine Spannung am ADC von ca. $U_{ADC} = 2,32$ V [9].

3.6. Alternierende Rechteckfunktion

In der Analyse der Messungen wird eine „alternierende Rechteckfunktion“ verwendet um als „Gate“ Messpunkte einer Helizität zuzuweisen oder diese zu verwerfen, sollten sie sich in der Übergangsphase befinden. Diese Funktion ist in Abhängigkeit von der Periodendauer T , dem Dutycycle D , dem Delay d und den resultierenden Parametern **high** und **low** in Gl. 3.5 definiert. Der Dutycycle $D \in [0, 1]$ gibt an, wie groß der Anteil der High/Low-Phase an der gesamten Periodendauer ist. Das Delay gibt eine Zeitverschiebung an, womit die hier beschriebene Funktion in der Analyse zeitlich an das Referenzsignal angepasst wird.

$$t' = (t - d) \bmod T$$

$$f(t) = \begin{cases} \text{high} & \text{wenn } t' < \frac{T}{2} \cdot D \\ \text{low} & \text{wenn } \frac{T}{2} < t' < \frac{T}{2} \cdot (D + 1) \\ \text{mean} = \frac{\text{high} - \text{low}}{2} & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.5)$$

Mit z.B. **high** = 1 und **low** = -1 kann man Messwerten bei positiver Helizität +1, bei negativer Helizität -1 und in der Wechselphase 0 zuweisen. Dies wird in Kapitel 5 bei der Auswertung relevant.

⁶ET518 bei 500 V, dieser, sowie die Werte für Z_{preamp} , ccf , sowie N_{PE} sind aus [9] entnommen

4. Versuchsaufbau zur Simulation einer Asymmetrie

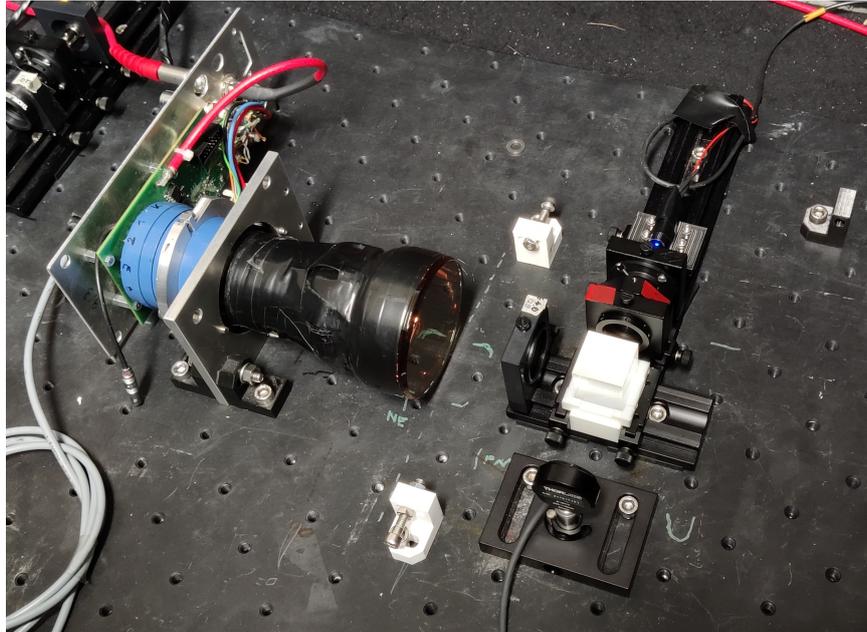


Abb 4.1.: Versuchsaufbau zur Simulation einer Asymmetrie

Der Versuchsaufbau ermöglicht die variable Abschwächung eines alternierenden Lichtsignals mit fester Asymmetrie. Dadurch kann die Linearität der Asymmetrie in Bezug auf die Lichtmenge oder anderer Parameter analysiert werden.

Durch die LED wird ein Lichtsignal mit alternierender Amplitude erzeugt, welches durch eine Iris-Blende zentriert und durch gekreuzte Polfilter abgeschwächt werden kann. Mittels eines 90/10 - Strahlteilers¹ wird das Lichtsignal geteilt, zu 10% in Richtung der PMT und zu 90% in Richtung der Photodiode. An der PMT wird das Licht gemessen und verstärkt. Daraufhin wird es über P2-DivA nochmal verstärkt und zu einer Spannung gewandelt, welche dann am P2-ADC analysiert wird. Die Photodiode ist notwendig um einen Referenzwert für die Lichtmenge² zu messen. Anhand der an der Photodiode gemessenen Intensität kann die Abschwächung eingestellt werden. Alle lichtempfindlichen Teile des Aufbaus sind in einer lichtdichten Kiste, der sog. Dunkelkiste untergebracht.

¹Thorlabs BS025 - 10:90 Beamsplitter Cube

²Die Lichtmenge wird in μW angegeben. Diese Einheit passt nicht zum Begriff „Menge“, da jedoch eine Photonrate simuliert wird, ist der Begriff Lichtmenge in diesem Kontext geeignet.

4. Versuchsaufbau zur Simulation einer Asymmetrie

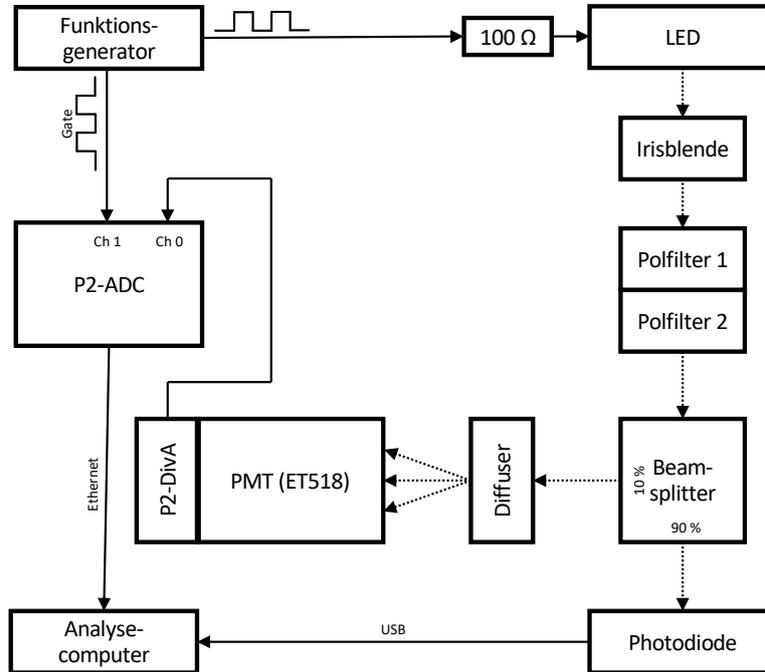


Abb 4.2.: Schematischer Aufbau zur Simulation einer Asymmetrie. Durchgezogene Pfeile repräsentieren elektrische Signale, während gestrichelte Pfeile Lichtsignale darstellen.

4.1. Erzeugung des Lichtsignals und Gates

Das Lichtsignal wird mittels einer handelsüblichen blauen LED³ erzeugt, welche durch einen Funktionsgenerator⁴ betrieben wird. Dieser erzeugt ein Rechtecksignal mit wechselnder Amplitude von maximal $U_{max} = 5V$. Damit die LED auch bei der maximalen Amplitude ordnungsgemäß funktioniert muss ein Vorwiderstand zwischen Funktionsgenerator und LED geschaltet werden. Laut dem Datenblatt der LED [11] wird diese typischerweise mit $U_F = 3,2V$ bei $I_F = 20mA$ betrieben. Nach Gl. 3.2 ergibt sich mit $U_0 = U_{max} = 5V$ ein Vorwiderstand von

$$R = \frac{U_R}{I_F} = 90\Omega \quad (4.1)$$

Aufgrund des hier betrachteten Grenzfalles muss der Vorwiderstand $\geq 90\Omega$ sein. Der nächstgrößere verfügbare Widerstand war 100Ω , also wurde dieser benutzt. Zudem wird der Funktionsgenerator auch genutzt um ein weiteres Rechtecksignal mit gleicher

³SLOAN L3-B71G-WV; $\lambda = 470\text{ nm}$

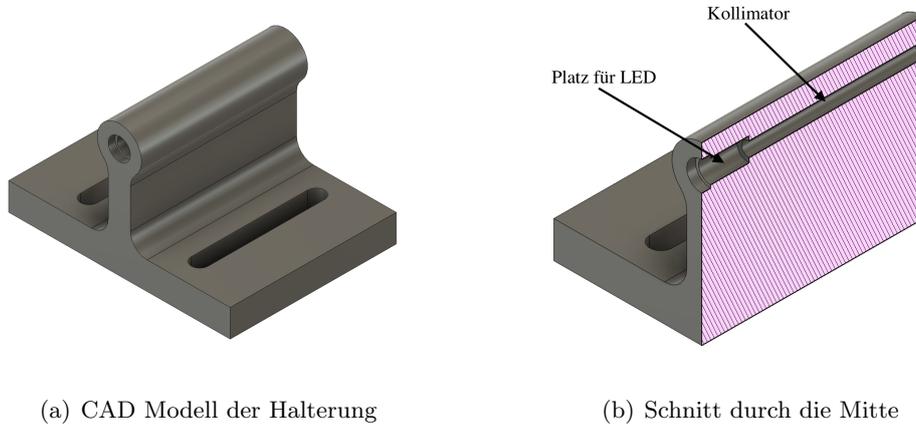
⁴SIGLENT SDG-5162 Function/Arbitrary Waveform Generator

4. Versuchsaufbau zur Simulation einer Asymmetrie

Frequenz und Phase an einen weiteren Kanal des ADCs zu senden, welches in der Analyse als Referenz für das Gate fungiert.

4.2. Halterung der LED

Um die LED in den Aufbau zu integrieren wurde eine Halterung mittels 3D-Druck gefertigt. Diese Halterung ist so konzipiert, dass sie auf den Standard-Klemmen montiert und ohne weitere Anpassungen in das vorhandene optische Schienensystem integriert werden kann. Zudem ist direkt ein Kollimator mit einem Durchmesser von 2 mm und ca. 20 mm Länge integriert. Außerdem ist die Bohrung für die LED so konstruiert, dass die LED durch einpressen fest in der Halterung sitzt.



(a) CAD Modell der Halterung

(b) Schnitt durch die Mitte

Abb 4.3.: Halterung der LED

4.3. Variable Abschwächung durch gekreuzte Polfilter

Zur Abschwächung des Lichts werden zwei gekreuzte Polfilter genutzt. Theoretisch sollte der erste Polfilter das unpolarisierte Licht der LED polarisieren und dadurch 50% der Lichtmenge absorbieren. Der zweite Polfilter schwächt das Licht nach dem Gesetz von Malus weiter ab. Diese Abschwächung ist abhängig von dem Winkel α zwischen den Polarisations Ebenen. Es gilt:

$$I = I_0 \cos^2(\alpha). \quad (4.2)$$

Somit ist theoretisch, unter Annahme idealer Bedingungen, jede Transmissionsrate zwischen 0% und 50% möglich. Jedoch hat sich gezeigt, dass die maximale Transmissionsrate bei ca. 16% liegt⁵. Da die Polfilter hier nur zur Abschwächung genutzt werden und trotz der unerwartet niedrigen Transmission ausreichend Licht an der PMT

⁵Es wurde eine Messung ohne die beiden Polfilter und eine Messung mit beiden, parallel ausgerichteten Polfiltern gemacht. Hierzu wurde die Lichtintensität jeweils an der Photodiode gemessen. Es

4. Versuchsaufbau zur Simulation einer Asymmetrie

angekommen ist, stellt die niedrige Transmission kein Problem dar und die Polfilter konnten wie erwartet genutzt werden.

4.4. Photodiode

Die Aufgabe der Photodiode ist es die Lichtmenge, die auf die PMT trifft, zu quantifizieren, hauptsächlich als relatives Maß, um die Abschwächung der Polfilter im Vergleich zur maximalen Lichtmenge zu messen. Um möglichst genaue Werte zu erhalten wurde die Irisblende so weit geschlossen, dass das gesamte Lichtbündel auf der Photodiode landet und dadurch möglichst wenig Licht nicht durch die Photodiode registriert wird. Bei der in diesem Aufbau benutzten Photodiode handelt es sich um eine Thorlabs S120VC [13], welche über einen Thorlabs PM103A PowerMonitor mithilfe der Thorlabs Optical Power Monitor Software ausgelesen wird. Laut Datenblatt [13] ist die Photodiode auf 0,5% linear und kann die Lichtintensität bis auf 3% genau bestimmen. Diese Genauigkeit ist für diesen Versuchsaufbau ausreichend.

4.5. Finden der richtigen Parameter

Um die Linearität in den im Experiment relevanten Bereichen zu analysieren, ist es notwendig den Aufbau so zu kalibrieren, dass bei maximaler Transmission die am ADC gemessene Spannung in etwa der im Experiment erwarteten maximalen Spannung entspricht (siehe Kapitel 3.5). Zudem soll die Asymmetrie des Lichtsignals möglichst klein sein, jedoch aber ausreichend groß um ohne großen Zeitaufwand mit akzeptabler Unsicherheit bestimmt zu werden. Es wurde wie folgt vorgegangen:

1. Transmission maximieren

Es wird eine konstante, beliebige Spannung an die LED angelegt und die Lichtmenge an der Photodiode beobachtet. Die Polarisationsfilter werden rotiert, bis die gemessene Lichtmenge maximal ist. Diese werden daraufhin nicht mehr verstellt.

2. Maximale Lichtmenge anpassen

Die LED wird nun über den Funktionsgenerator mit einer Rechteckspannung betrieben. Das „High-Level“ der Rechteckspannung wird so gewählt, dass am ADC die im Experiment erwartete Spannung gemessen wird. Das „Low-Level“ kann beliebig gewählt werden. Nachdem das passende High-Level gefunden wurde, wird dieses nicht mehr verändert.

3. Asymmetrie einstellen

Über das Low-Level der Rechteckspannung wird die Asymmetrie eingestellt. Je geringer die Differenz zwischen High- und Low-Level, desto kleiner die Asymmetrie.

wurden eine Lichtleistung 14 μ W mit und 89 μ W ohne Polfilter gemessen, daraus ergibt sich eine Transmission von ca. 16%

4. Versuchsaufbau zur Simulation einer Asymmetrie

In diesem Aufbau wurde die optimale maximale Spannung am ADC bei einer angelegten Spannung von 3,8 V festgestellt. Dies entspricht einer an der Photodiode gemessenen Lichtmenge von ca. 25,3 μA . Zusätzlich konnte die kleinste mit dem Aufbau erzeugbare Asymmetrie, bei einem Low-Level von 3,799 V, zuverlässig gemessen werden. Diese hier erarbeiteten Betriebsparameter der LED wurden für jede Messung in dieser Arbeit beibehalten.

5. Messungen

Im folgenden Kapitel werden die Versuchsdurchführung, Analysemethode, sowie die Ergebnisse präsentiert und Fehler diskutiert.

5.1. Versuchsdurchführung

Um die Linearität der Asymmetrie gegenüber eines Parameters des Aufbaus, wie Lichtmenge oder Hochspannung an der PMT zu analysieren, wurde wie folgt vorgegangen.

1. Aufwärmen der Elektronik

Um Streuung durch temperaturbedingte Änderungen in der Elektronik zu verringern wurde diese 30 Minuten vor Beginn der Messung eingeschaltet und auf die gewünschten Parameter, beschrieben in Kapitel 4.5, eingestellt. So haben die Bauteile genug Zeit um auf Betriebstemperatur zu kommen. Vor allem bei der LED ist es wichtig, dass diese mit der für die Messung angedachten Spannung betrieben wird, da diese sehr anfällig für Temperaturschwankungen ist.

2. Bestimmung des Offsets

Nachdem die Elektronik Betriebstemperatur erreicht hat, können Asymmetrien gemessen werden. Jedoch muss zuerst das Offset, bzw. das Hintergrundrauschen gemessen werden. Hierzu wird die bereits aufgewärmte LED ausgeschaltet, dann wurde gewartet, bis sich die an der Photodiode gemessene Lichtmenge stabilisiert hat, bevor eine 20-sekündige Hintergrundmessung durchgeführt wurde, deren mittlere Spannung, üblicherweise ca. -24 mV, als Offset gesetzt wurde. Sobald die Datennahme abgeschlossen ist, wird die LED sofort wieder eingeschaltet, damit diese für den nächsten Schritt wieder Betriebstemperatur erreicht.

3. Aufnehmen der Daten

Sobald die Verarbeitung der Daten der Offsetmessung abgeschlossen ist, kann die Messreihe begonnen werden. Wird die Linearität bezüglich der Lichtmenge bestimmt, so wurde bei 100% relativer Lichtmenge angefangen, welche in 5% Schritten reduziert wurde, bis nur noch 5% der anfänglichen Lichtmenge an der Photodiode gemessen wurde.

In dieser Arbeit wurde die LED stets mit einer alternierenden Rechteckspannung von 3,800 V/3,799 V betrieben. Somit ergab sich nach Transmission durch Iris-Blende und Polfilter eine maximale Lichtmenge von ca. 25,3 μ W.

5.2. Methodik der Analyse

Um mit dem P2-ADC Daten aufzunehmen, ist die Software CMMonitor (CM)¹ essentiell. Diese steuert den ADC an, empfängt die Daten und verarbeitet diese. Das

¹Von Micheal Gericke, Universtiy of Manitoba, Kanada, speziell für den P2-ADC entwickelt

5. Messungen

Aufnehmen von Daten funktioniert wie folgt:

1. Einstellen der ADC-Parameter

Im CM-Interface können verschiedene Parameter, wie Messdauer, PreScale-Factor und Messnummer, eingestellt werden. In dieser Arbeit wurde über stets 20 Sekunden bei einem PreScale-Factor von 8 gemessen. Eine längere Messdauer oder einen kleineren PreScale-Factor wurde durch den Analysecomputer nicht unterstützt.

2. Start der Messung

Nach Drücken der Schaltfläche „Start“ sendet der ADC einen „SampleStream“ an den Analysecomputer. Dieser kontinuierliche Datenstrom aus Bits und Bytes wird über eine Ethernet-Verbindung übertragen und in einer Binär-Datei (*.dat) gespeichert.

3. Verarbeitung des SampleStreams

Unmittelbar nachdem der Sample-Stream gespeichert wurde, beginnt die Software die Umwandlung des SampleStreams mittels Bit-Operationen in einen RootTree um, eine ordnerähnliche Datenstruktur, und speichert diesen als *.root-Datei. Dieser Schritt ist sehr rechenintensiv und dauert, abhängig von der Messdauer, einige Minuten. Erleichtert aber die Analyse, da die Daten hier von unverständlichen Bytes zu lesbaren Listen umgewandelt werden und somit diese Umwandlung in der Analyse entfällt.

4. Darstellung der Daten

Die verarbeiteten Daten werden im CM-Interface als Histogramm und zeitlicher Verlauf dargestellt, um die Qualität der Datenaufnahme zu überprüfen.

Durch die hohe Datenrate des P2-ADCs, das Alters des PCs, sowie der Tatsache, dass die genutzte Version des CMMonitors keine Parallelisierung zur Verarbeitung der Daten nutzt hat, die Verarbeitung einer 20-sekündigen Messung zwischen 10 und 15 Minuten gedauert. Mit einer modernen CPU und einer parallelisierten Verarbeitung sollte die Verarbeitungszeit um einen Faktor 30, auf weniger als 30 Sekunden reduzieren lassen². Sobald alle Messungen abgeschlossen sind, werden die Daten mittels Python weiter analysiert. Hierzu werden die RootTrees über das Package uproot eingelesen, unter Verwendung von numpy analysiert und mithilfe von matplotlib.pyplot dargestellt. Ein RootTree enthält neben den aufgenommenen Messwerten mit zugehörigen Zeitstempeln, auch aus den Messwerten errechnete Größen, wie den Mittelwert oder die Standardabweichungen, sowie die Einstellungen des ADCs (PreScF, Messdauer). Um nun die Messwerte einer Helizität zuzuordnen, wird an das Referenzsignals von Kanal 1 (Ch1) eine alternierende Rechteckfunktion gelegt. Anhand diesem „Gate“ wird über den Zeitstempel jedem Messwert von Kanal 0 (Ch 0) eine Helizität zugewiesen. Je nach Zustand der Rechteckfunktion wird ein Messwert (Ch 0) entweder positiver

²Unter der Annahme, dass eine moderne CPU 4-mal schneller ist, als die verwendete CPU (Modelljahr 2007) und dass diese anstatt einem Thread acht Threads nutzt.

5. Messungen

oder negativer Helizität (+/-), oder aber dem Übergang zwischen Beiden zugeordnet. Die dem Übergang zugeordnete Messwerte werden für die weitere Analyse nicht mehr beachtet. In Abb. 5.1 ist dieser Prozess anhand eines beispielhaften Spektrums gezeigt. Nachdem das Gate angewendet und die Messwerte ihrer Helizität zugewiesen wurden, wird der Mittelwert über die alle Messwerte in der jeweiligen Helizität gebildet. Von dem Mittelwert wird daraufhin das Offset O abgezogen.

$$\bar{U}^{\pm} = \frac{1}{N^{\pm}} \sum x_i^{\pm} - O \quad (5.1)$$

$$(\Delta \bar{U}^{\pm})^2 = \left(\frac{\sigma^{\pm}}{\sqrt{N^{\pm}}} \right)^2 + \sigma_O^2 = (\Delta^{\pm})^2 \quad (5.2)$$

Ausgehend davon kann die Asymmetrie A bestimmt werden:

$$A = \frac{\bar{U}^+ - \bar{U}^-}{\bar{U}^+ + \bar{U}^-} \quad (5.3)$$

$$(\Delta A_{\text{Stat}})^2 = 4(\bar{U}^+ + \bar{U}^-)^{-2} \left[(\bar{U}^- \Delta^+)^2 + (\bar{U}^+ \Delta^-)^2 \right] \quad (5.4)$$

Zu dem Fehler ΔA_{Stat} , dem durch Gaußsche Fehlerfortpflanzung errechnetem Fehler, wird ein Fehler ΔA_{Streu} addiert, welcher statistische Schwankungen des gesamten Aufbaus kompensieren soll. Um diesen zu bestimmen, wird eine Messung ohne jegliche Veränderung am Aufbau mehrmals wiederholt und dabei die Schwankung der Asymmetrie beobachtet. Die Standardabweichung der Asymmetrie dieser Messreihe wird als ΔA gesetzt, da angenommen wird, dass die Asymmetrie-Werte um den wahren Wert gaußförmig verteilt sind, und somit gilt:

$$(\Delta A) = (\Delta A_{\text{Stat}}) + (\Delta A_{\text{Streu}}) \quad (5.5)$$

5. Messungen

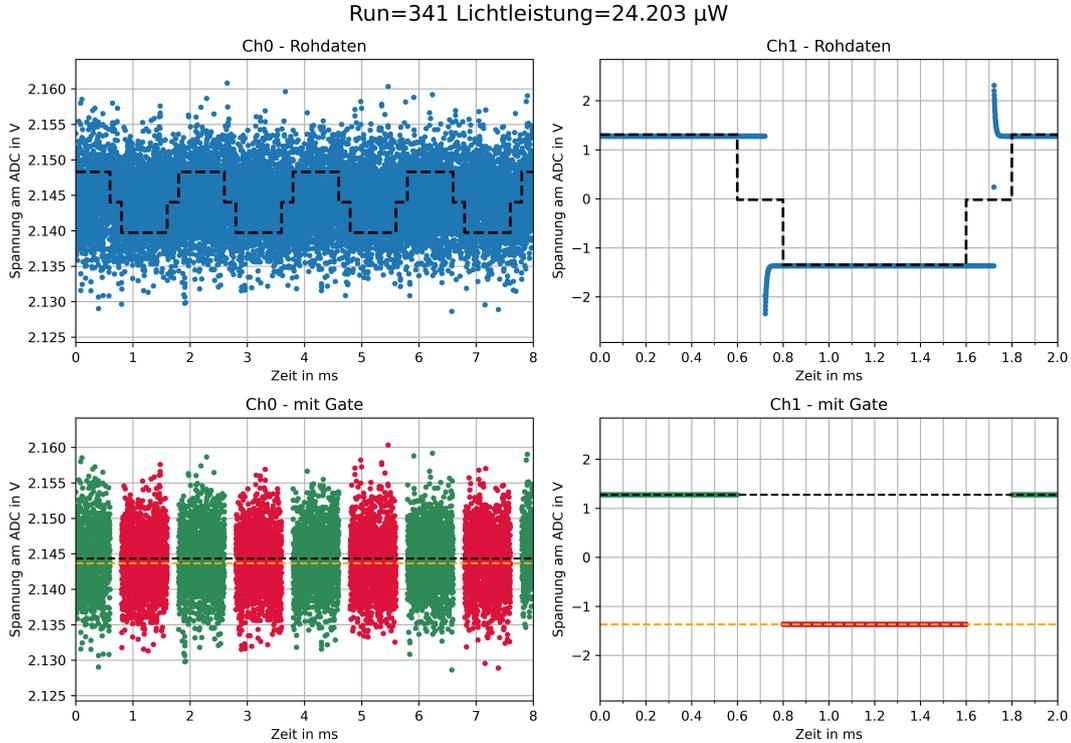


Abb 5.1.: Ch 0 zeigt die Spannung, welche sich aus dem verstärkten Anodenstrom der PMT ergibt. Ch 1 zeigt das Referenzsignal, an welches die alternierende Rechteckfunktion (schwarz-gestrichelt) gelegt wird. Diese wird auf das Signal der PMT, Ch 0, angewendet. Zur Überprüfung wird das „Gate“ auch auf das eigene Referenzsignal angewendet. Je nach Wert des Gates, werden die Messwerte zur positiven oder negativen Helizität zugewiesen (grün oder rot). Die beiden gestrichelten Linien zeigen die Mittelwerte \bar{U}^{\pm} der jeweiligen Helizität, schwarz für die Positive und orange für die Negative.

5.3. Analyse der Streuung der Asymmetrie ΔA

Um den in Kapitel 5.2 beschriebenen Fehler ΔA zu bestimmen, wurden die in Abb. 5.2 und Tab. 5.1 dargestellten Asymmetrien gemessen. Es wurden 3 Serien à 10 Messungen (Runs) aufgenommen, wobei eine niedrige, mittlere und hohe Lichtmenge gewählt wurde. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Einführung von ΔA_{Streu} notwendig ist, denn die Asymmetrien streuen wesentlich stärker als ΔA_{Stat} zulässt. Dieser ist über die Fehlerbalken an den einzelnen Asymmetrien in Abb. 5.2 angegeben. Betrachtet man den Verlauf der einzelnen Asymmetrien für die jeweiligen Serien (Abb. 5.5) lässt sich keine Korrelation zwischen dem Verlauf der Asymmetrie über die Dauer der Serie erkennen. Somit wird die Schwankung der Asymmetrie als Abweichung statisti-

5. Messungen

scher Natur angenommen. Betrachtet man jedoch die Streuung der Asymmetrie in Abb. 5.2, so ist zu erkennen, dass die Standardabweichung proportional zur Lichtmenge abnimmt. Gleichzeitig nimmt die Standardabweichung der Spannung am ADC mit steigender Lichtmenge zu (vgl. Abb. 5.4). Um ΔA sinnvoll abzuschätzen wurde daher eine Exponential-Funktion durch die Standardabweichungen der Asymmetrie in Abhängigkeit der Lichtmenge gelegt. Durch diese Beschreibung entspricht das Verhalten von ΔA bezüglich der Lichtmenge den Beobachtungen. Daher wird für den weiteren Verlauf der Analyse ΔA durch die in Gl. 5.6 angegebene Exponential-Funktion abgeschätzt. Es gilt:

$$\Delta A(x) = e^{-A \cdot (x-B)} + C \quad (5.6)$$

wobei:

$$\begin{aligned} x &= \text{Lichtmenge in } \mu\text{W} \\ f(x) &= \text{Asymmetrie} \\ A &= 0,32 \mu\text{W}^{-1} \\ B &= -39,24 \mu\text{W} \\ C &= 1,02 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

Dadurch, dass die Anzahl an Freiheitsgeraden gleich der Anzahl an Datenpunkten ist, verläuft die angelegte Funktion genau durch alle Datenpunkte.

Runs	300 - 309	310 - 319	320 - 329
Lichtmenge in μW	25, 10	12, 44	1, 27
Asymmetrie in 10^{-4}	$1,594 \pm 0,0010$	$1,608 \pm 0,0011$	$1,641 \pm 0,0036$
σ_{Asym} in 10^{-6}	1,02	1,09	3,64
Spannung in V	$2,228 \pm 9,3 \cdot 10^{-4}$	$0,867 \pm 5,7 \cdot 10^{-4}$	$0,0519 \pm 6,1 \cdot 10^{-6}$
σ_{Spannung} in V	$9,3 \cdot 10^{-3}$	$0,57 \cdot 10^{-3}$	$0,061 \cdot 10^{-3}$
σ_{Spannung}	0,42%	0,066%	0,118%

Tab 5.1.: Messwerte der Analyse zur Streuung der Asymmetrie

5. Messungen

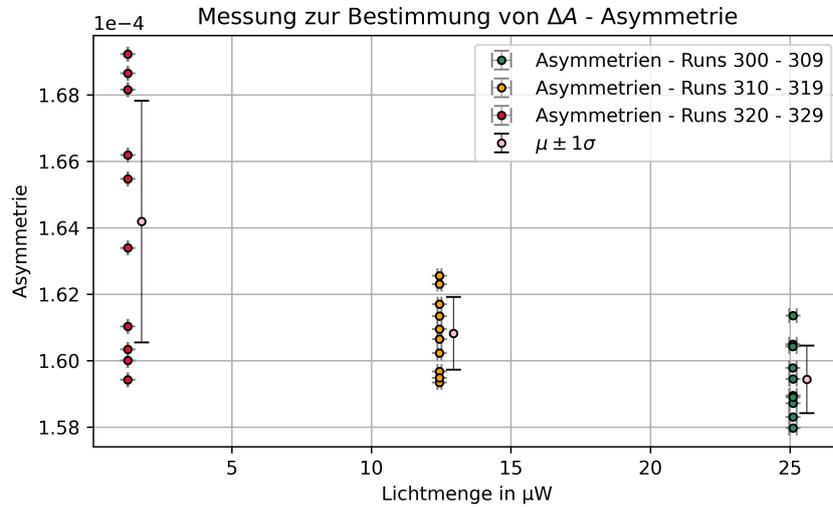


Abb 5.2.: Messung der Asymmetrie bei gleichbleibenden Parametern für drei Lichtmengen. Neben den Messwerten sind die Mittelwerte mit der Standardabweichung als Fehler, leicht versetzt, eingezeichnet. Die genauen Werte finden sich in der Legende von Abb. 5.5 und in Tab. 5.1

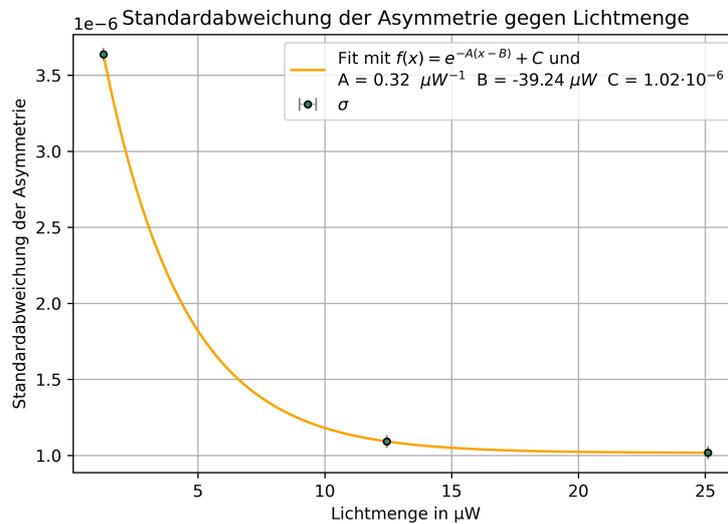
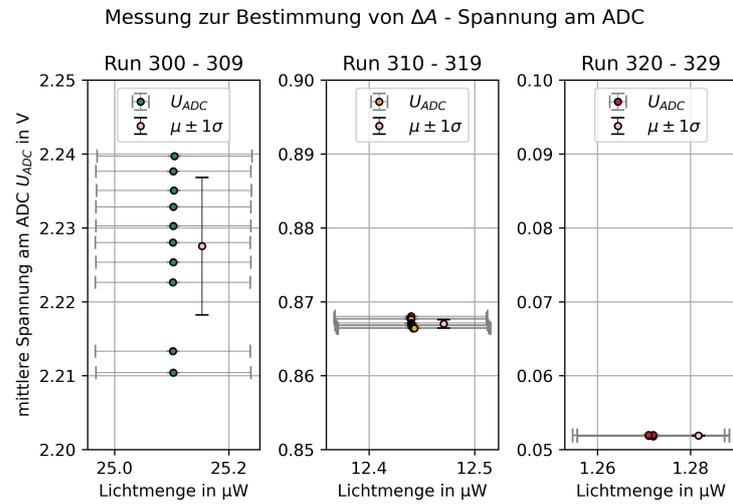


Abb 5.3.: Standardabweichungen der Asymmetrie aufgetragen gegen die Lichtmenge. Anhand der angelegten Exponential-Funktion wird der Fehler ΔA abgeschätzt.

5. Messungen



5. Messungen

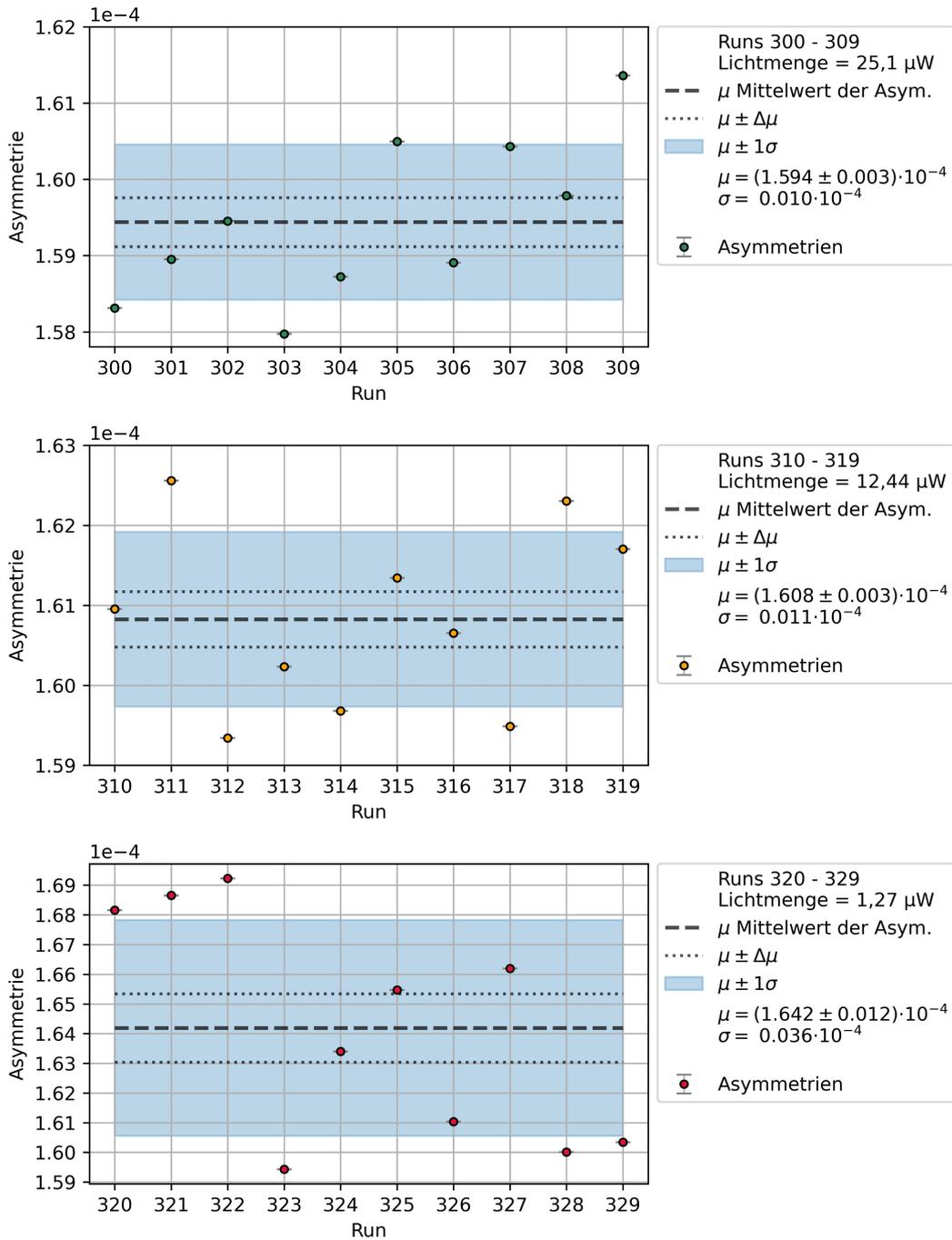


Abb 5.5.: Verlauf der einzelnen Messserien. Eingezeichnet sind die jeweiligen Asymmetrien, der Mittelwert μ der jeweiligen Serie, sowie der Fehler auf den Mittelwert $\mu \pm \Delta\mu$ und der 1σ -Bereich um den Mittelwert.

5. Messungen

5.4. Asymmetrie in Abhängigkeit zur Lichtmenge

Um das Verhalten der Asymmetrie in Bezug auf die Lichtmenge zu untersuchen, wurden die Asymmetrie für 20 verschiedene Lichtmengen gemessen. Hierbei wurde die durch die LED erzeugte Asymmetrie über die gesamte Messreihe konstant gehalten (siehe Kapitel 5.1). Für die Messung wurde mit der maximalen Lichtmenge von etwa $25,3 \mu\text{W}$ begonnen, welche als 100% festgelegt wurde. Anschließend wurde die Lichtmenge je Messung in Schritten von 5% (ungefähr $1,27 \mu\text{W}$) reduziert, bis nur noch 5% der ursprünglichen Lichtmenge an der Photodiode gemessen wurden. Es wurde jeweils über 20 Sekunden gemessen. Zwischen den einzelnen Messungen vergingen durch das Verarbeiten der Daten jeweils ca. 10 bis 15 Minuten. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Tab A.1 und den Abbildungen 5.6 dargestellt.

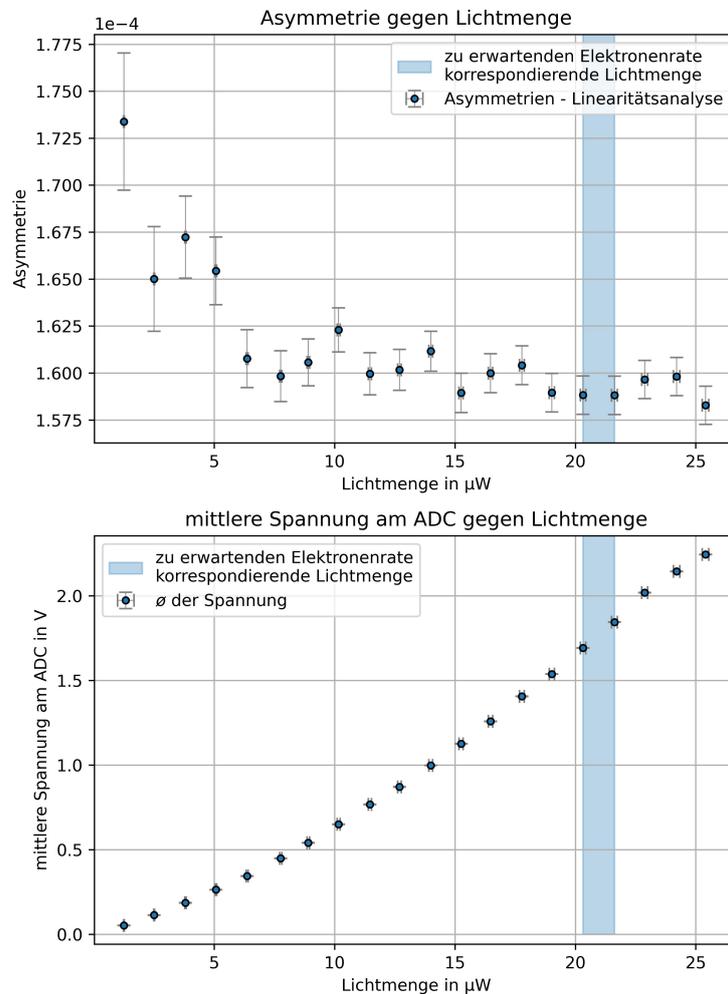


Abb 5.6.: Oben: Asymmetrie in Abhängigkeit der Lichtmenge
Unten: Spannung am ADC in Abhängigkeit der Lichtmenge

5. Messungen

Es ist eindeutig erkennbar, dass weder Asymmetrie, noch Spannung linear bezüglich der Lichtmenge sind. Betrachtet man die in Abb. 5.7 an die Asymmetrie gefittete Exponential-Funktion, erkennt man, dass diese die Abhängigkeit der Asymmetrie zur Lichtmenge gut beschreibt. Dies bestätigt auch das reduzierte Chi-Quadrat mit $\chi_{red}^2 = 0,81$.

Vergleicht man die Asymmetrien, mit denen, die für die Abschätzung von ΔA gemessen wurden, so ist eine Übereinstimmung für mittlere und hohe Lichtmengen zu erkennen, jedoch weisen die Asymmetrien für niedrige Lichtmengen eine deutliche Abweichung von $\approx 0,09 \cdot 10^{-4}$ auf. Mit der Standardabweichung für die niedrige Lichtmenge aus Tab 5.1 entspricht diese Abweichung ca. $2,5\sigma$. Dies könnte auf einen Externen Einfluss als Ursache dieser Abweichung hinweisen, jedoch könnte diese auch durch eine unglückliche Streuung entstanden sein. Aufgrund der Tatsache, dass zur Bestimmung von ΔA 10-mal mehr Daten genommen wurden, als für diese Analyse, sind diese statistisch aussagekräftiger, als die einzelnen Werte hier.

Man erkennt, dass die Asymmetrie im Rahmen der Messgenauigkeit exponentiell mit der Lichtmenge zusammenhängt. Aufgrund der hohen Unsicherheit lassen sich jedoch keine sicheren Aussagen über das explizite Verhalten treffen. Jedoch ist zu erkennen (Abb. 5.6), dass die Asymmetrie, im Bereich der zur erwartenden Elektronenrate korrespondierenden Lichtmenge ein lokales annähernd konstantes Verhalten aufweist. Die korrespondierende Lichtmenge ergibt sich aus dem Ursachen der hohen Unsicherheit und mögliche Verbesserungen werden in Kapitel 5.6 genauer erläutert.

5. Messungen

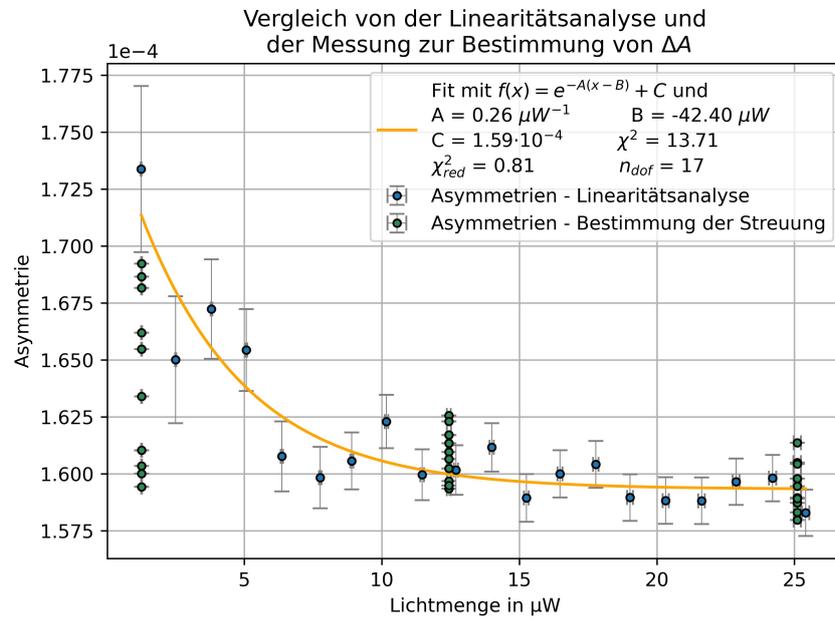


Abb 5.7.: Vergleich von der Linearitätsanalyse Abb. 5.6 und der Messung zur Bestimmung von ΔA Abb. 5.2

5.5. Asymmetrie in Abhängigkeit zur Verstärkung (HV)

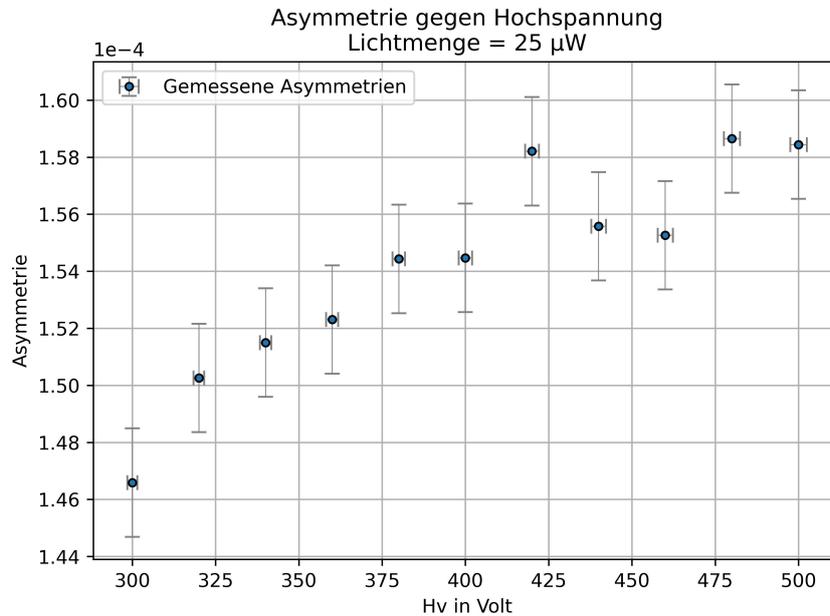


Abb 5.8.: Asymmetrie in Abhängigkeit der HV

Analog zu Kapitel 5.4, wird im Folgenden das Verhalten der Asymmetrie bezüglich der Hochspannung, bzw. Verstärkung der PMT analysiert. Hierzu wurde bei einer Lichtmenge von 25,1 μW die Hochspannung von den ursprünglichen 500 V in Schritten von 20 V pro Messung auf 300 V reduziert. Es wurde jeweils für eine Dauer von 20 Sekunden gemessen. Die Messergebnisse sind in den Abbildungen 5.8 und 5.10 dargestellt.

Betrachtet man Abb. 5.8, so ist eine stetige Zunahme der Asymmetrie mit steigender Hochspannung zu erkennen. Das Verhalten scheint, ähnlich zu dem Verhalten der Asymmetrie bezüglich der Lichtmenge (siehe Kapitel 5.3), exponentieller Art zu sein. Dies bestätigt auch die in Abb. 5.9 an die Daten aus Abb. 5.8 gefittete Funktion Gl. 5.7. Hier ergibt sich für die Funktion:

$$f(x) = A \cdot \left(1 - e^{-B \cdot (x-C)}\right) \quad (5.7)$$

5. Messungen

folgende Parameter:

$$\begin{aligned}
 f(x) &= \text{Asymmetrie} \\
 x &= \text{HV in Volt} \\
 A &= 1,59 \cdot 10^{-4} \\
 B &= 1,08 \cdot 10^{-2} \text{ V}^{-1} \\
 C &= 63,45 \cdot 10^{-6} \text{ V}
 \end{aligned}$$

Es ergibt sich ein reduziertes Chi-Quadrat von $\chi_{red}^2 = 0,51$. Dies lässt darauf schließen, dass die Fehler auf die Asymmetrie zu hoch abgeschätzt wurden. Jedoch bestätigt es auch, dass der Fit, den Zusammenhang gut beschreibt.

Anhand des Grenzwertes der Fitfunktion für hohe Hochspannungen, bzw. hohe Verstärkung, ist zu erkennen, dass die Asymmetrie gegen den Parameter A strebt. Wenn sich das durch die Fitfunktion beschriebene Verhalten auch für höhere Hochspannungen fortsetzen, würde das Verhalten der Asymmetrie für hohe Spannungen immer weniger von einem konstanten Verhalten abweichen. Daher wäre es, aus dieser Hinsicht, für das P2-Experiment sinnvoll, die Hochspannung der PMTs so hoch wie möglich zu wählen, um in einem möglichst konstanten Bereich der Asymmetrie zu messen.

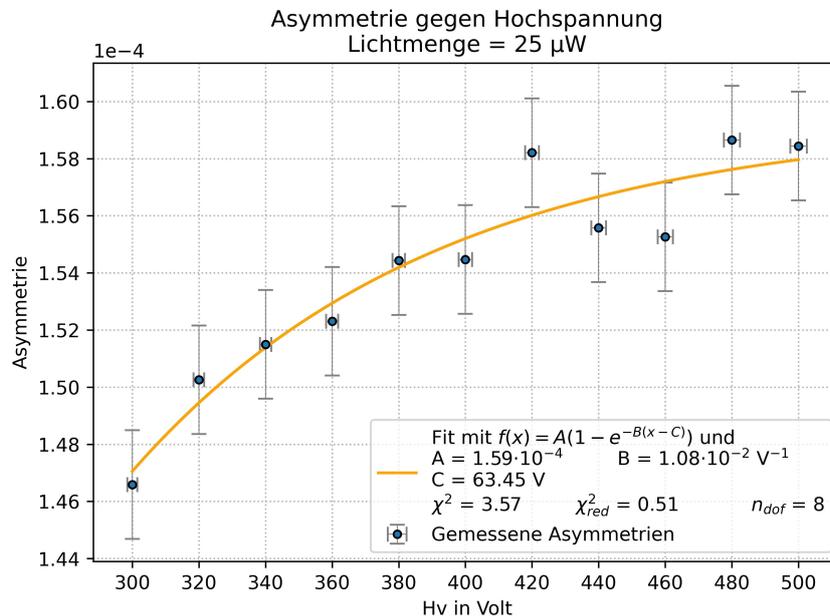


Abb 5.9.: mittlere Spannung am ADC in Abhängigkeit der HV mit Fit

Anhand von Abb. 5.10 ist zu erkennen, dass die mittlere Spannung am ADC exponentiell mit der angelegten Hochspannung zunimmt. Dieses Verhalten entspricht genau

5. Messungen

den Erwartungen, da die Verstärkung einer PMT exponential mit der Hochspannung zunimmt und die Spannung am ADC proportional zur Verstärkung ist (vgl. Kapitel 3.5)

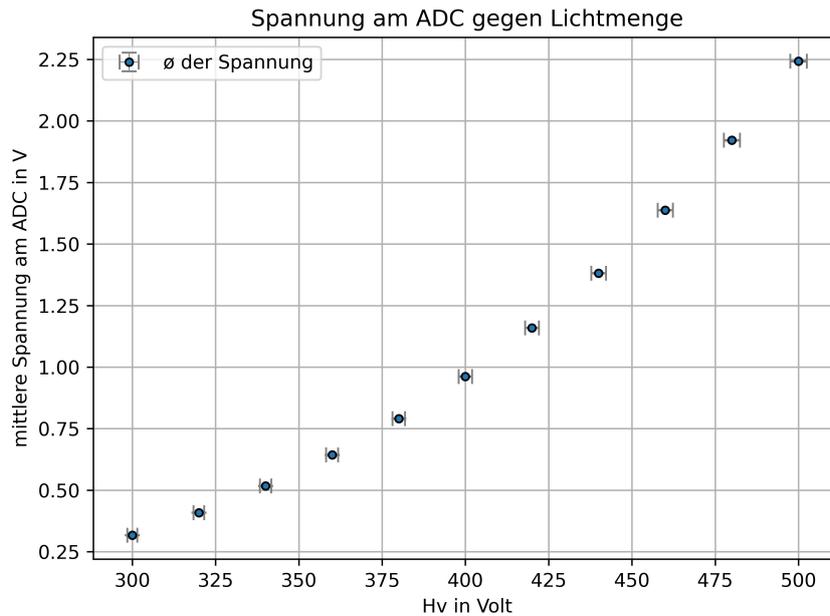


Abb 5.10.: mittlere Spannung am ADC in Abhängigkeit der HV

5.6. Fehlerdiskussion

Um das Verhalten der Asymmetrie bezüglich Lichtmenge oder Hochspannung präzise bestimmen zu können, ist es notwendig Fehler zu minimieren. Man sieht, dass die im verwendeten Aufbau beobachtete Streuung zu hoch ist, um genaue Aussagen über das explizite Verhalten der Asymmetrie des P2-Messsystems zu treffen.

Lichtquelle

Die Präzision der Asymmetrie-Bestimmung hängt wesentlich von der Stabilität des Lichtsignals ab. Denn jede Schwankung im Lichtsignal kann eine „falsche“ Asymmetrie ΔA_{Falsch} erzeugen. Schätzt man die Schwankung in der gemessenen Asymmetrie über die Standardabweichung der Lichtmenge L an der Photodiode ab, ergibt sich die folgende maximale „falsche“ Asymmetrie:

$$\Delta A_{\text{Falsch}} = \frac{\sigma_L}{2L} \quad (5.8)$$

Anhand der für die Abschätzung von ΔA aus Kapitel ref verwendeten Lichtmengen ergeben sich die in Tab. 5.2 dargestellten Schwankung der Asymmetrien. Welche

5. Messungen

Lichtmenge in μW	1,27	12,441	25,105
ΔA_{Falsch}	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$

Tab 5.2.: Abschätzung einer „falschen“ Asymmetrie aufgrund Schwankungen des Lichtsignals unterhalb der Messgenauigkeit

Um die Stabilität des Lichtsignals zu verbessern, könnte man anstelle einer hell/-dunkel blinkenden LED zwei separate LEDs verwenden. Eine LED könnte dabei durch eine konstante Strom- oder Spannungsquelle betrieben werden, während an die andere eine Rechteckspannung zur Simulation der Asymmetrie angelegt wird. Es wäre zu erwarten, dass die konstant-betriebene LED nach ausreichender Zeit zum Erreichen der Betriebstemperatur ein sehr stabiles Lichtsignal liefert, welches weniger schwankt, als das der einzelnen LED. Die blinkende LED hingegen würde aufgrund der geringeren Lichtmenge, nicht so empfindlich auf eine Schwankung oder Rauschen in der Rechteckspannung reagieren, insbesondere wenn diese im „flacheren“ Bereich der Kennlinie (Abb. 3.4) betrieben wird. Generell wäre es auch sinnvoll die Kennlinie der verwendeten LEDs zu bestimmen, um aus deren Verlauf auf die Empfindlichkeit der LED auf Spannungsschwankungen bestimmen zu können.

Die Verwendung von zwei LEDs erschwert jedoch die Messung der Lichtmenge an der Photodiode, da beiden LEDs aufgrund ihrer Bauweise nie perfekt auf einer Achse liegen werden, sondern immer einen Abstand von ca 3 mm. Somit müsste eine Lösung zur Fokussierung der LEDs auf die Sensorfläche der Photodiode gefunden werden. Zu Gunsten eines einfacheren Aufbaus wurde in dieser Arbeit nur eine LED verwendet.

Statistik

Um die Asymmetrie genauer bestimmen zu können, wäre es nicht sinnvoll die Dauer einer Messung zu erhöhen. Da der statistische Fehler auf die Asymmetrie ΔA_{Stat} durch den Fehler ΔA_{Streu} um ca drei Größenordnungen größer ist.

Dupletts und Quadrupletts

In dieser Arbeit wurde die Asymmetrie mithilfe von Dupletts ermittelt. Hierbei bestimmt sich die Asymmetrie aus den Mittelwerten der Spannung am ADC aus zwei direkt aufeinanderfolgenden Helizitätszuständen zu je ca. 1 ms. Der Mittelwert aller Asymmetrien ergibt die gesamte Asymmetrie. Mit der Annahme, dass in jedem Helizitätsfenster die gleiche Anzahl an Samples gemessen wurde, ist dies äquivalent zu der in Kapitel 5.2 beschriebenen Methode.

Um lineare Schwankungen von Licht- und Elektroniksignalen in diesem Aufbau kompensieren zu können, ist die Implementation von Quadrupletts sinnvoll. Dabei

5. Messungen

wird die periodische Reihenfolge der Helizitätszustände von „+-“ zu „+--“ (oder „-+-“) geändert. In diesem Fall berechnet sich die Asymmetrie des Quadrupletts, aus dem Mittelwert der Asymmetrien der beiden enthaltenen Dupletts „+-“ und „-+“ (bzw. „-+“ und „+-“).

Automatisierung - elektronische Steuerung

Um in diesem Aufbau die Lichtmenge zu verändern, muss die Hochspannung der PMT ausgeschaltet und die Dunkelkiste geöffnet werden. Dies kann eventuell unerwünschte Nebeneffekte erzeugen, z.B. den Effekt des Dunkelstroms. Dabei kann an der Anode ein Strom gemessen werden, nachdem die PMT einer externen Lichtquelle ausgesetzt war, obwohl keine Photonen mehr auf die Photokathode treffen. Setzt man eine PMT z.B. einer Stunde Tageslicht aus, so kann bis zu 100h danach ein Dunkelstrom von 1 nA nachgewiesen werden [4]. Dieser Effekt, wenn auch tendenziell eher klein, weil die PMTs nur abgedeckt gelagert werden, ist sicherlich nicht zu vernachlässigen. Könnte man die Lichtmenge variieren ohne die Dunkelkiste öffnen zu müssen, etwa mit einem elektrisch verstellbaren Polfilter oder einem elektronisch gesteuertem Filterrad, könnte man die PMT, bevor eine Messung begonnen wird, für mehrere Tage in einer Dunkelkiste lassen und somit Dunkelstromeffekte auf ein Minimum reduzieren.

Ein weiterer Effekt auf PMTs, wenn auch keine Ursache für einen Fehler in dieser Arbeit ist, dass PMTs nur eine begrenzte Lebensdauer haben, und daher möglichst nicht unnötig beleuchtet werden sollten. Daher wäre es ratsam, eine elektronisch gesteuerte Abdeckung zwischen LEDs und PMT zu platzieren, damit, die LEDs, die PMT und die übrige Elektronik vor einer Messung möglichst lange eingeschaltet sein kann, um die Betriebstemperatur zu erreichen, ohne die PMT unnötig zu beleuchten. Eine solche Abdeckung könnte z.B. mit einem Arduino-gesteuerten Steppermotor realisiert werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Aufbau realisiert, der mittels einer LED mit alternierender Lichtintensität eine Asymmetrie in einem Lichtsignal simuliert, um das Verhalten des P2-Photomultiplier-Messsystem bezüglich der Lichtmenge, sowie der Hochspannung zu untersuchen. In zwei Messreihen wurde das Verhalten der durch das PMT-Messsystem gemessenen Asymmetrie bezüglich der Lichtmenge an der Photokathode, sowie das Verhalten der Asymmetrie bezüglich der Hochspannung der PMT untersucht.

Die Asymmetrie im Bereich der am P2-Experiment erwarteten Lichtmenge ist im Rahmen der Unsicherheit konstant. Jedoch zeigt die Asymmetrie bei kleineren Lichtmengen eine starke Abweichung von diesem Verhalten.

Das Verhalten der Asymmetrie bezüglich der Hochspannung, kann für Hochspannungen ab etwa 400 V im Rahmen der Messunsicherheit als konstant angenommen werden. Für kleinere Hochspannungen zeigt sich jedoch ein deutliches Abfallen der Asymmetrie.

Insgesamt wurde gezeigt, dass mit dem hier verwendeten Aufbau Aussagen über das Verhalten der Asymmetrie bezüglich Lichtmenge und Verstärkung getroffen werden können. In Kapitel 5.6 wurde mehrere Möglichkeiten zur Verbesserung der Messgenauigkeit aufgezählt. Hier bietet sich die Möglichkeit diese Verbesserungen in einer weiterführenden Arbeit in den Aufbau zu integrieren und mit deren Hilfe präzisere Aussagen über das Verhalten des P2-PMT-Messsystem treffen zu können.

A. Anhang

A.1. Messwerte - Asymmetrie gegenüber Lichtmenge

Run	Lichtmenge in μW	Asymmetrie in 10^{-4}	Spannung in V
340	25.407 ± 0.137	1.583 ± 0.010	2.244 ± 0.001
341	24.203 ± 0.131	1.598 ± 0.010	2.144 ± 0.001
342	22.877 ± 0.124	1.597 ± 0.010	2.019 ± 0.001
343	21.625 ± 0.118	1.588 ± 0.010	1.845 ± 0.001
344	20.320 ± 0.112	1.588 ± 0.010	1.692 ± 0.001
345	19.022 ± 0.105	1.590 ± 0.010	1.538 ± 0.001
346	17.777 ± 0.099	1.604 ± 0.010	1.405 ± 0.001
347	16.479 ± 0.092	1.600 ± 0.010	1.258 ± 0.001
348	15.257 ± 0.086	1.589 ± 0.010	1.126 ± 0.001
349	13.996 ± 0.080	1.612 ± 0.011	0.998 ± 0.001
350	12.696 ± 0.073	1.602 ± 0.011	0.871 ± 0.001
351	11.469 ± 0.067	1.600 ± 0.011	0.767 ± 0.001
352	10.169 ± 0.061	1.623 ± 0.012	0.650 ± 0.001
353	8.909 ± 0.055	1.606 ± 0.012	0.540 ± 0.001
354	7.766 ± 0.049	1.598 ± 0.014	0.448 ± 0.001
355	6.367 ± 0.042	1.608 ± 0.015	0.344 ± 0.001
356	5.077 ± 0.035	1.654 ± 0.018	0.263 ± 0.001
357	3.810 ± 0.029	1.672 ± 0.022	0.186 ± 0.001
358	2.510 ± 0.023	1.650 ± 0.028	0.113 ± 0.001
359	1.257 ± 0.016	1.734 ± 0.036	0.052 ± 0.001

Tab A.1.: Messwerte zur Analyse des Verhaltens der Asymmetrie gegenüber der Lichtmenge. Der Fehler auf die Asymmetrie ist der, der in Kapitel 5.3 abgeschätzt wird.

A.2. Messwerte - Asymmetrie gegenüber Verstärkung(HV)

Run	Hv in V	Asymmetrie in 10^{-4}	Spannung in V
371	500.000 \pm 2.5	1.584 \pm 0.019	2.242 \pm 0.001
372	480.000 \pm 2.4	1.587 \pm 0.019	1.921 \pm 0.001
373	460.000 \pm 2.3	1.553 \pm 0.019	1.637 \pm 0.001
374	440.000 \pm 2.2	1.556 \pm 0.019	1.381 \pm 0.001
375	420.000 \pm 2.1	1.582 \pm 0.019	1.159 \pm 0.001
376	400.000 \pm 2.0	1.545 \pm 0.019	0.962 \pm 0.001
377	380.000 \pm 1.9	1.544 \pm 0.019	0.791 \pm 0.001
378	360.000 \pm 1.8	1.523 \pm 0.019	0.643 \pm 0.001
379	340.000 \pm 1.7	1.515 \pm 0.019	0.517 \pm 0.001
380	320.000 \pm 1.6	1.503 \pm 0.019	0.408 \pm 0.001
381	300.000 \pm 1.5	1.466 \pm 0.019	0.317 \pm 0.001

Tab A.2.: Messwerte zur Analyse des Verhaltens der Asymmetrie gegenüber der Hochspannung/Verstärkung. Der Fehler auf die Asymmetrie ist der, der in Kapitel 5.3 abgeschätzt wird.

A.3. Daten aus Strahlzeit

Rate \dot{R} in GHz	MeanCh1 in V	MeanCh1Err in V	SigmaCh1 in V
0	0	$8,67335 \cdot 10^{-7}$	0,00067526
0,211	0,183026	$6,09179 \cdot 10^{-6}$	0,00904087
0,413	0,335889	$8,47361 \cdot 10^{-6}$	0,012411
0,625	0,499522	$1,03949 \cdot 10^{-5}$	0,0154271
0,842	0,671492	$1,237 \cdot 10^{-5}$	0,0181525
1,062	0,839501	$1,41579 \cdot 10^{-5}$	0,0206573
1,258	0,981101	$1,54006 \cdot 10^{-5}$	0,0225783
1,468	1,14326	$1,6862 \cdot 10^{-5}$	0,0246264
1,712	1,32575	$1,84888 \cdot 10^{-5}$	0,0270542
1,888	1,4449	$1,90386 \cdot 10^{-5}$	0,0280444
2,074	1,57975	$2,00252 \cdot 10^{-5}$	0,0296089
2,285	1,70094	$2,11072 \cdot 10^{-5}$	0,0309445
2,360	1,77738	$2,20326 \cdot 10^{-5}$	0,0319299
2,497	1,86216	$2,18184 \cdot 10^{-5}$	0,0325309
2,745	2,02442	$2,36763 \cdot 10^{-5}$	0,0343455
2,847	2,07749	$2,36745 \cdot 10^{-5}$	0,0346422
3,187	2,31895	$2,61639 \cdot 10^{-5}$	0,0375083

Tab A.3.: Daten aus einer Strahlzeit im Juli 2023 am MAMI-Beschleuniger. Angegeben ist die Spannung am ADC, welche gemessen wurde, als Elektronen mit einer Energie von 855 MeV bei einer Rate von \dot{R} auf einen Cherenkov-Quarz getroffen und über die PMT ET518 bei 500 V Beschleunigungsspannung und dem P2-DivA Spannungsteiler und Vorverstärker registriert und über den P2-ADC gemessen wurden.

A.4. Formeln zur Berechnung von χ^2

Wird eine Funktion $f(x)$ an bekannte Werte y , mit Unsicherheit Δy gefittet, so ergibt sich das χ^2 nach der im Laufe der Grundpraktika erlernten Methode:

$$\chi^2 = \sum_i \left(\frac{y - f(x)}{\Delta y} \right)^2. \quad (\text{A.1})$$

Das reduzierte Chi-Quadrat ergibt sich aus:

$$\chi_{red}^2 = \frac{chi^2}{N - N_{para}} \quad (\text{A.2})$$

wobei N die Anzahl an Datenpunkten beschreibt und N_{para} die Anzahl an Parametern der Funktion $f(x)$

B. Danksagung

Ein herzliches Dankeschön an alle, die mich während meines Studiums unterstützt haben!

Besonders möchte ich mich bei der P2-Arbeitsgruppe bedanken. Als HiWi und während meiner Bachelorarbeit habe ich mich hier stets wohlfühlt. Es hat Spaß gemacht, und es gab immer jemanden, der meine Fragen beantwortet hat.

Ein großes Dankeschön geht auch an meine Familie und Freunde. Ohne eure Unterstützung und Geselligkeit wäre das Studium nur halb so schön gewesen.

Danke!

C. Literaturverzeichnis

- [1] Dominik Becker et al. "The P2 experiment". In: *Eur. Phys. J. A* 54.11 (2018), p. 208. DOI: 10.1140/epja/i2018-12611-6. arXiv: 1802.04759 [nucl-ex].
- [2] Würth Elektronik. *WL-TMRC THT LED round mono-color color lens*. URL: https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/A500/151051BS04000_ENG_TDS.pdf. (abgerufen: 29.11.2023).
- [3] ET Enterprises. *ET Enterprises - Website: ET9305KB PMT*. URL: <https://et-enterprises.com/products/photomultipliers/product/p9305kb-series>. (abgerufen: 13.11.2023).
- [4] ET Enterprises. *Understanding Photomultipliers*. URL: https://et-enterprises.com/images/brochures/Understanding_Pmts.pdf. (abgerufen: 13.11.2023).
- [5] Johann Wolfgang von Goethe. *Faust. Eine Tragödie*. 1806.
- [6] JGU Mainz Institut für Kernphysik. *Teilchenbeschleuniger MESA*. URL: <https://www.mesa.uni-mainz.de>. (abgerufen: 20.11.2023).
- [7] JGU Mainz Institut für Kernphysik. *The P2 experiment at MESA*. URL: <https://www.blogs.uni-mainz.de/fb08p2/the-p2-experiment/>. (abgerufen: 13.11.2023).
- [8] Insitut für Kernphysik JGU. *MESA Website*. URL: <https://www.mesa.uni-mainz.de>. (abgerufen: 13.11.2023).
- [9] Rahima Krini - Institut für Kernphysik Mainz - P2. *Persönliche Kommunikation*.
- [10] MissMJ and Cush. *Standard Model of Elementary Particles-de.svg*. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles-de.svg. (abgerufen: 18.11.2023).
- [11] Sloan Precision Optoelectronics. *LED SLOAN L3-B71G-WV Datenblatt*. URL: https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/A500/L3-B71G-WVW_ENG_DS.pdf. (abgerufen: 13.11.2023).
- [12] Bogdan Povh. *Teilchen und Kerne, 9. Auflage*. Springer Verlag, 2014. ISBN: 978-3-642-37821-8.
- [13] Thorlabs. *S120VC - Specs sheet*. URL: <https://www.thorlabs.com/drawings/2bf760ec7e38aee0-4755DB9B-D678-6D96-C9AB34C81053C5B8/S120VC-SpecSheet.pdf>. (abgerufen: 13.11.2023).