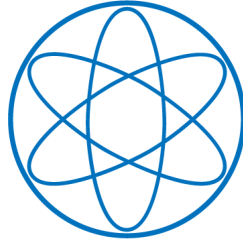


PHYSIK - DEPARTMENT
LEHRSTUHL FÜR EXPERIMENTELLE
ASTROTEILCHENPHYSIK



Entwicklung eines Testaufbaus für Photomultiplier im Rahmen des LENA-Projekts

DIPLOMARBEIT
VON
MICHAEL NÖBAUER
19. DEZEMBER 2011



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Zusammenfassung

Das LENA-Projekt ist ein in Planung befindliches Neutrinoobservatorium auf Basis eines 50-kt-Flüssigszintillator-Detektors, dessen Aufbau sich an den erfolgreichen Neutrinodetektoren Borexino und Kamland orientiert. Die große Szintillatormasse wird benötigt, um diffusen Supernova-Hintergrund zu messen und um neue Erkenntnisse zum Protonzerfall zu erhalten.

Die von Neutrinos im Flüssigszintillator deponierte Energie wird in Form von Szintillationslicht abgestrahlt. Um dieses Licht nachweisen zu können, werden in LENA etwa 60.000 Photomultiplier verwendet. Aus diesem Grund stellen Photomultiplier eine Kernkomponente von LENA dar, denn sie entscheiden über Orts- und Zeitauflösung des gesamten Detektors. Um einen idealen Typ Photomultiplier auszuwählen, ist es nötig, einen Teststand zu entwerfen.

In dieser Arbeit werden die praktischen Rahmenbedingungen für so einen Versuchsaufbau dargelegt und mögliche Varianten für Lichtquellen untersucht. Ein großes Kapitel widmet sich der Realisierung einer homogenen Ausleuchtung von Photomultipliern durch eine Kombination aus Laser und optischen Elementen.

Um die Lichtausbeute bei gleicher Anzahl an Photomultipliern zu erhöhen, werden bei LENA, wie auch bei Borexino, Lichtkonzentratoren (Winston-Cones) eingesetzt. Ein Abschnitt dieser Arbeit untersucht die Verträglichkeit der selbstklebenden Reflexionsfolie VM 2000 der Firma 3M, die ein mögliches Material zur Beschichtung von Lichtkonzentratoren sein könnte, mit den Flüssigszintillatoren LAB, PXE und PC.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Neutrinos und das Standardmodell	1
1.2	Neutrinos als Informationsträger	2
2	Das LENA-Projekt	4
2.1	Physikalische Ziele	4
2.1.1	Niederenergiephysik	4
2.1.2	Hochenergiephysik	8
2.2	Aufbau des Detektors	9
2.2.1	Flüssigszintillator	10
2.2.2	Photosensoren	11
3	Photosensorteststand	16
3.1	Äußerer Aufbau	17
3.2	Lichtquelle und Optik	21
3.2.1	Design der Optik	24
3.2.2	Elektronik und Auswertung	30
3.2.3	Justierung der Optik	33
3.2.4	Bestimmung der Intensitätsverteilung	36
3.3	Messungen	44
3.3.1	Transit-Time-Spread	44
3.3.2	Dunkelrate verschiedener Photomultiplier	45
3.3.3	Homogenität der Nachweiswahrscheinlichkeit eines PMTs	52
3.4	Tauglichkeit und Verbesserungsmöglichkeiten	53
4	Materialstudie zur Beschichtung von Winston Cones	55
5	Ausblick	62

Kapitel 1

Einleitung

Seit ihrer Postulierung durch Pauli im Jahre 1930 stellen die Neutrinos die Wissenschaft vor immer neue Herausforderungen. So dauerte es noch 25 Jahre bis das vorausgesagte Teilchen erstmals nachgewiesen werden konnte. [1] Die Schwierigkeit Neutrinos nachzuweisen liegt darin, dass sie nur über die schwache Wechselwirkung mit anderen Teilchen (und auch mit sich selbst) interagieren. So würde ein Elektroneneutrino mit einer Energie von 1 MeV, wie sie etwa in der Sonne entstehen in Eisen im Mittel circa 30 Lichtjahre zurücklegen, bevor es zu einer Wechselwirkung kommt. [2]

1.1 Neutrinos und das Standardmodell

Im Standardmodell der Teilchenphysik finden Neutrinos ihren Platz als jeweils vierte Komponente in den drei Teilchenfamilien. Die Tatsache, dass rechtshändige Neutrinos und linkshändige Antineutrinos in diesem Modell nicht vorgesehen sind bedingt, dass Neutrinos hier als masselos angenommen werden. Wäre dies der Fall, so entspräche jeder Flavor genau einem Masseneigenzustand. Erste Anzeichen, dass dem nicht so ist, lieferte das Homestake Experiment. Die Kollaboration um Raymond Davis detektierte 1970 einen deutlich geringeren Fluss solarer Neutrinos als im Standardsonnenmodell angenommen. [1] Eine Bestätigung dieses Effektes lieferte das Super-Kamiokande-Experiment, in dem der Fluss atmosphärischer Neutrinos ebenfalls deutlich geringer gemessen wurde als erwartet. [3] Erst das SNO-Experiment, das von 1999 bis 2006 Daten genommen hat, war in der Lage, alle Neutrino flavors nachzuweisen. Die gemessenen Werte für ^8B -Neutrinos dieses Experiments stehen im Einklang mit dem Standardsonnenmodell und liefern so den endgültigen Beweis für die Neutrinooszillation

Neutrinooszillation

Die Neutrino flavors bestehen aus einer Überlagerung der drei Masseneigenzustände. Nach einer zurückgelegten Strecke ändern sich die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Masseneigenzustände und so wird mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit im Detektor ein anderer Flavor gemessen als ursprünglich erzeugt worden ist. Die Grundvoraussetzung für diese Mischung ist eine endliche Neutrinomasse. Trotz jahrzehntelanger Neutrinoforschung und zahlreicher immer größer werdender Experimente ist es derzeit nur möglich, eine obere Grenze für das Massenquadrat anzugeben: [5]

$$m_\nu^2 = \sum_i |U_{ei}|^2 m_i^2 < 2,2 \text{ eV}^2 \quad (1.1)$$

1.2 Neutrinos als Informationsträger

Erst mit der Entwicklung von Kernreaktoren gab es Neutrinoquellen mit genügend hoher Intensität um ihren Nachweis zu ermöglichen. Der in den Spaltprodukten bestehende Neutronenüberschuss wird durch β^- -Zerfälle abgebaut, bei denen Elektronantineutrinos im Energiebereich einiger MeV emittiert werden. In einem Szintillator-Experiment konnten diese Antineutrinos von Reines und Cowan 1956 über den inversen Betazerfall nachgewiesen werden. [1]

Trotz aller Herausforderungen, vor die uns Neutrinos stellen, dienen sie auch als Informationsträger. So liefern z.B. solare Neutrinos Informationen über die Fusionsreaktionen, die im Kern der Sonne ablaufen. Im Gegensatz zu Photonen, die wegen der hohen Opazität im Sonneninneren Tausende von Jahren benötigen, um an die Oberfläche zu gelangen, können Neutrinos die Sonne ungehindert verlassen und liefern so ein aktuelles Bild über die Vorgänge im Sonneninneren. Über das Energiespektrum der solaren Neutrinos lassen sich die Verzweigungsverhältnisse in den pp-Ketten bestimmen und der Anteil des CNO-Zyklus an der Energieproduktion in der Sonne bestimmen. Daraus kann man Rückschlüsse auf die Massenverhältnisse der Elemente und die Oszillationsparameter in der Sonne ziehen.

Ein Beispiel einer anderen Größenordnung ist die Supernova SN1987A, die sich am 23. Februar 1987 in der großen Magellanschen Wolke ereignete. Die 19 am Kamiokande- und IMB-Detektor registrierten Antineutrinoereignisse lieferten bedeutende neue Erkenntnisse in der Supernova- und Neutrinophysik. So ließ sich aus der Energieverteilung der beobachteten Ereignisse die mittlere Energie der Elektronantineutrinos berechnen und daraus wiederum Radius und Masse des entstandenen Neutronensterns ermitteln. In der Neutrinophysik ergab sich ein entscheidender Hinweis auf die Frage nach ihrer Masse: Über die Zeitdifferenz,

in der Neutrinos verschiedener Energien auf der Erde ankommen, lässt sich gemäß der speziellen Relativitätstheorie eine obere Massengrenze von $m_{\nu_e} \leq 31 \text{ eV}$ bestimmen. Weiterhin konnten Obergrenzen für elektrische Ladung und magnetisches Moment angegeben werden, die in der Physik heutzutage, wie früher die Neutrinomasse, als Null angenommen werden. Die Anzahl der leichten Neutrinoarten konnte auf $N_\nu = 2,5_{-0,8}^{+4,1}$ berechnet werden. [1] Viele aus dieser Supernova gewonnenen Ergebnisse zu Neutrinoeigenschaften sind heute überholt durch modernere Neutrinoexperimente wie etwa Superkamiokande oder Borexino.

Bei der Konstruktion von Borexino lag das Hauptaugenmerk darauf, niederenergetische solare Neutrinos messen zu können, wohingegen in den früheren Neutrinoexperimenten SNO und Super-Kamiokande nur ^8B -Neutrinos ab einer Energie von etwa 5 MeV gemessen werden konnten. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde eine Kugel mit 300 t organischem Flüssigszintillator gefüllt und mit Photomultipliern ausgestattet. In Borexino konnten erstmals ^8B -, ^7Be - und pep-Neutrinos bis zu einer unteren Grenze von ca. 200 keV gemessen werden. [6]

Kapitel 2

Das LENA-Projekt

Angespornt von dem Erfolg des Borexino-Experiment ist geplant, ein noch größeres Neutrinoobservatorium zu bauen, das den Namen LENA (Low Energy Neutrino Astronomy) erhalten soll. Dieses neue Experiment soll 50 kt organischen Flüssigszintillator enthalten und aufgrund seiner Größe nicht mehr sphärisch, sondern zylindrisch aufgebaut werden. Bei einer sphärischen Konstruktion wäre der Abstand der PMTs zum Zentrum so groß, dass aufgrund der kurzen Abschwächlänge des Szintillators Licht vom Zentrum die PMTs nicht mehr erreichen würde. [7]

2.1 Physikalische Ziele

Obwohl LENA für niederenergetische Neutrinoastronomie steht und ursprünglich dafür geplant worden ist, ist der Forschungsbereich dieses Experimentes nicht darauf beschränkt. Die Tatsache, dass man auch hochenergetische atmosphärische Neutrinos und Neutrinostrahlen von Teilchenbeschleunigern untersuchen kann und im Flüssigszintillator genügend Protonen vorhanden sind, um neue Erkenntnisse zum Proton-Zerfall zu erhalten, könnte LENA zu einem Experiment machen, das zu vielen neuen Ergebnissen nicht nur in der Neutrinophysik führen kann. Abb. 2.1 zeigt die Neutrinoströme natürlicher und künstlicher Quellen bei verschiedenen Energien.

2.1.1 Niederenergiephysik

Supernova-Neutrinos

Würde sich während der Laufzeit von LENA eine Supernova in unserer Galaxie in einer Entfernung von etwa 10 kpc ereignen, die wie in gängigen Supernova-Modellen üblich die achtfache Masse der Sonne besitzt und eine Energie von

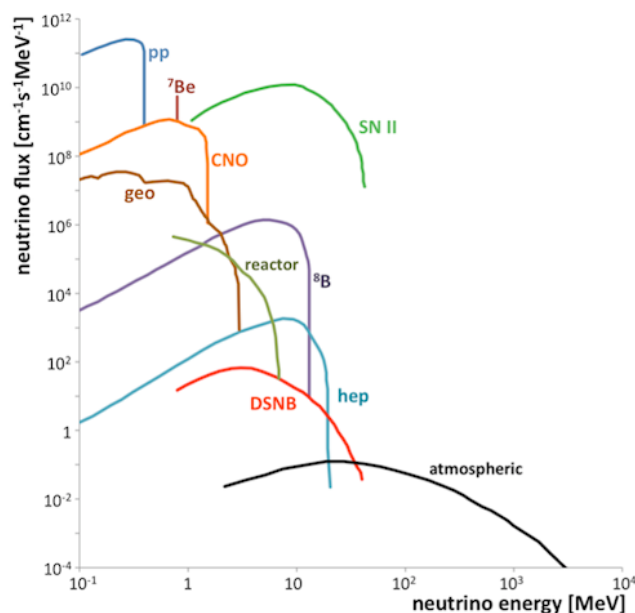


Abbildung 2.1: Hier sind die Neutrino Flüsse natürlicher und künstlicher Quellen in Abhängigkeit von der Energie dargestellt. [8]

$3 \cdot 10^{46} J$ emittiert, so könnte LENA in etwa 14.000 bis 22.000 Ereignisse detektieren [7], die meisten davon über den inversen Betazerfall über Elektron-Antineutrinos. Tabelle 2.1 zeigt die verschiedenen Detektionskanäle. Hier zeigt sich ein Vorteil von Detektoren auf Basis organischer Flüssigszintillatoren: Es kann zwischen Neutrinos und Antineutrinos unterschieden werden, da ^{12}C mit Elektronenneutrinos reagieren. Aus den Koinzidenzen mit den Rückzerfällen können mit LENA das Energiespektrum und die Flüsse bestimmt werden.

Gerade für die Beobachtung von Supernovae ist ein Neutrinoobservatorium enorm wichtig, weil circa 99 % der Gravitationsenergie in Form von Neutrinos emittiert wird. Eine Supernova in unserer Galaxie, von der wir mit Abstand am meisten lernen würden, ereignet sich im Mittel jedoch nur alle 50 Jahre. Es wäre also ideal, wenn zu jedem Zeitpunkt ein leistungsstarkes Neutrinoobservatorium in Betrieb wäre. Ähnlich wie bei der Sonne können Neutrinos eine Supernova einige Stunden vor den Photonen verlassen und somit könnte LENA eine Supernova erkennen, bevor sie sichtbar wird und optische Teleskope könnten sich darauf ausrichten.

Kanal	Rate
(1) $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$	11000 – 15000
(2) $\bar{\nu}_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{B} + e^+$	180 – 420
(3) $\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{N} + e^-$	190 – 520
(4) $\nu_e + {}^{13}\text{C} \rightarrow {}^{13}\text{N} + e^-$	~ 10
(5) $\nu + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{12}\text{C}^* + \nu$	600 – 1500
(6) $\nu + e^- \rightarrow e^- + \nu$	620
(7) $\nu + p \rightarrow p + \nu$	1300 – 4400
(8) $\nu + {}^{13}\text{C} \rightarrow {}^{13}\text{C}^* + \nu$	~ 10

Tabelle 2.1: Reaktionskanäle mit Raten bei der Beobachtung einer Supernova in der Milchstraße durch LENA. [7]

Diffuser Supernova-Neutrino-Hintergrund (DSNB)

Unter diffusem Supernova-Neutrino-Hintergrund versteht man Neutrinohintergrundstrahlung, die Kernkollaps-Supernovae im gesamten Universum erzeugt haben. Da an dieser Hintergrundstrahlung sehr viele Supernovae beteiligt sind, lässt sich dadurch ein gemittelttes Spektrum von Supernova-Neutrinos ermitteln. Weiterhin kann die Supernova-Rate in Abhängigkeit von der Rotverschiebung bestimmt werden. Die derzeit beste obere Grenze für den Fluss des Diffusen Supernova-Neutrino-Hintergrunds lieferte das Super-Kamiokande-Experiment für $E_{\nu_e} > 19,4 \text{ MeV}$: [9]

$$\Phi_{\bar{\nu}_e}^{DSNB} < 1,2 \bar{\nu}_e \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \quad (2.1)$$

Auch hier wird der Kanal des inversen Betazerfalles der Ausschlaggebende sein. Das Energiefenster liegt dabei zwischen 10 und 25 MeV, darunter dominieren Untergrundereignisse durch Reaktor-neutrinos, darüber atmosphärische Neutrinos.

Solare Neutrinos

Wie auch schon bei Borexino sollen bei LENA niederenergetische solare Neutrinos detektiert werden können. Die untere Energiebegrenzung liegt bei 250 keV, was der oberen Grenze des ${}^{14}\text{C}$ -Spektrums entspricht. Durch die niedrige Energieschwelle ist es möglich die Spektren von ${}^7\text{Be}$ -, pep-, CNO- und teilweise pp-Neutrinos zu messen.

Durch die größere Flüssigszintillatormasse (50 kt vs. 100 t) wird die Statistik deutlich größer sein als bei Borexino und die Genauigkeit erheblich zunehmen. Dadurch könnte sich eine Lösung in der Frage nach der Metallizität der Sonne ergeben, bei der sich derzeit zwei Modellrechnungen widersprechen: Das jüngste Modell, das sich auf die Analyse der Fraunhofer-Linien im Sonnenspektrum bezieht sagt eine niedrige Metallizität voraus, während die Daten der Helioseismologie eine hohe

Metallizität ergeben. Eine genaue Messung der Raten von ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$ und CNO kann darauf eine Antwort geben, denn genau bei diesen Spektren ist der Unterschied in den beiden Modellen am größten. [6] Da sich der Unterschied im Fehlerbereich der beiden Modellrechnungen bewegt, ist bei der Messung ein möglichst geringer Fehler nötig, wobei LENA mit seiner großen Statistik gut geeignet ist.

Geoneutrinos

Geoneutrinos entstehen beim Zerfall radioaktiver Nuklide im Erdinneren aus den Zerfallsreihen von Uran und Thorium, sowie aus dem Zerfall von ${}^{40}\text{K}$. Ihr Energiespektrum erstreckt sich bis etwa 2,6 MeV, wodurch ihr Spektrum in Wasser-Cerenkov-Detektoren nicht gemessen werden kann. Durch ihre Messung gewinnt man Informationen über die Zusammensetzung von Erdkruste, Erdmantel und Erdkern, die anders nicht zu bestimmen wären. [10]

Bereits im Kamland-Experiment und im LENA-Vorgängerexperiment Borexino wurden Daten zu Geoneutrinos genommen, jedoch mit einer recht geringen Statistik. In LENA hingegen wird es möglich sein, etwa 1.000 Geoneutrinos pro Jahr zu detektieren. Aufgrund der geringen Rate wird hier ausschließlich der Kanal des inversen Betazerfalls ausschlaggebend sein. Da Reaktorneutrinos im selben Energiebereich auftreten, wäre für die bestmögliche Messung von Geoneutrinos ein Standort ideal, der möglichst weit von Atomkraftwerken entfernt ist, was aber wiederum Nachteile für die Messungen mit Reaktorneutrinos mit sich bringen würde.

Reaktorneutrinos

Wählt man einen Standort für LENA, der in der Nähe eines Atomreaktors liegt, bietet sich die Möglichkeit, wichtige Parameter zur Neutrinooszillation zu bestimmen. So könnte sich innerhalb eines Jahres das Massendifferenzquadrat Δm_{12}^2 auf 3 % genau bestimmen lassen, nach mehreren Jahren Messung sogar bis auf 1 % genau. [11] Für diese Messungen würde sich der französische Standort Frejus anbieten, der in der Nähe mehrerer Atomreaktoren liegt.

Dunkle Materie

Derzeit wird davon ausgegangen, dass in etwa 23 % der Energie im Universum in Form kalter dunkler Materie (CDM = Cold Dark Matter) vorliegt. Falls ein Teilchen dunkler Materie, das sein eigenes Antiteilchen ist (Majoranateilchen), in LENA mit sich selber annihiliert, kann es Neutrino-Antineutrino-Paare erzeugen, die dann nachgewiesen werden können. Ein vielversprechender Kandidat hierfür ist das WIMP (Weakly Interacting Massive Particle), das in der Theorie der Supersymmetrie dem leichtesten stabilen supersymmetrischen Teilchen entsprechen

könnte. Obwohl in den meisten Modellen angenommen wird, dass WIMPs eine Masse von etwa 10 GeV bis 1 TeV besitzen, gibt es Szenarien, die geringere Massen erlauben. In genau diesen Szenarien könnte LENA eine entscheidende Rolle in der Detektion dunkler Materie spielen.

2.1.2 Hochenergiephysik

Atmosphärische Neutrinos

In der Erdatmosphäre entstehen bei der Wechselwirkung mit hochenergetischer kosmischer Strahlung hadronische Schauer, die hauptsächlich aus geladenen Kaonen und Pionen bestehen. Diese wiederum zerfallen in Myonen, wobei ein (Anti-) Myon-Neutrino frei wird. Zerfallen die Myonen bevor sie die Erde erreichen werden zwei weitere Neutrinos frei, nämlich ein (Anti-) Myon-Neutrino und ein (Anti-) Elektron-Neutrino.

Atmosphärische Neutrinos können die Erde nahezu ungehindert durchdringen und treffen somit aus allen Richtungen auf den Detektor. Mit Hilfe einer Spurrekonstruktion kann daher ihre zurückgelegte Strecke berechnet werden und somit Rückschlüsse auf das Oszillationsverhalten gezogen werden. Die Energiegrenze, bis zu der atmosphärische Neutrinos gemessen werden können, liegt aufgrund der großen Dimensionen von LENA bei einigen 10 GeV. [7]

Long-baseline Neutrino Beams

Eine gute Möglichkeit zur Untersuchung des letzten unbekannten Neutrinomischungswinkels θ_{13} und der CP-verletzenden Phase δ_{CP} sind an Teilchenbeschleunigern erzeugte Neutrino-Strahlen. Um Oszillationen in einigen hundert km zu beobachten, benötigt man eine Neutrinoenergie von einigen hundert MeV. LENA könnte dabei durch seine große Szintillatormasse genügend Ereignisse detektieren, um diese Unbekannten zu bestimmen. Denkbar wäre etwa ein Neutrinostrahl vom CERN zu LENA, was jedoch noch von der Standortwahl abhängt. [7]

Protonzerfall

Als nach dem Urknall sämtliche Antimaterie mit Materie annihiliert war, blieb ein Überschuss an Materie übrig, aus dem das heute bekannte Universum aufgebaut ist. Die Frage, warum diese Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie existiert, ist ein bisher ungeklärtes Phänomen der Kosmologie, das durch ein Zerfallen des Protons gelöst werden könnte.

Der Protonzerfall würde die Baryonzahl verletzen und neben Teilchen, die in Energie zerstrahlen, Antiteilchen erzeugen, die wiederum mit Materie annihilieren könnten. Baryonzahlverletzende Wechselwirkungen sind in einigen Theorien enthalten, die über das Standardmodell hinausgehen, wie zum Beispiel die großen Vereinheitlichungstheorien, bei denen die Eichsymmetrien des Standardmodells in einer erweiterten Symmetriegruppe eingeschlossen werden.

In der einfachsten Symmetriegruppe $SU(5)$ ist ein Protonzerfall über den Kanal

$$p \rightarrow \pi^0 + e^+, \tau_p = 10^{29} a \quad (2.2)$$

möglich. Im Super-Kamiokande-Experiment hätte ein solcher Zerfall registriert werden können, wurde er aber bisher noch nicht. Aufgrund der Laufzeit von Super-Kamiokande kann man die Lebensdauer dieses Zerfallskanals auf $\tau_p > 8,2 \cdot 10^{33} a$ abschätzen. [12] Die Messungen schließen auch die vorhergesagte Lebensdauer dieses Zerfalls in der $SO(10)$ -Theorie ($\tau_p > 10^{32 \pm 1} a$) aus.

Supersymmetrische Erweiterungen der $SU(5)$ - und $SO(10)$ -Gruppe favorisieren den Protonzerfall über den Kanal

$$p \rightarrow K^+ + \bar{\nu}, \tau_p = 10^{34} a \quad (2.3)$$

Dieser Zerfall ist in Wasser-Cherenkov-Detektoren nur schwer zu entdecken, da die Energie des Kaons unterhalb der Cherenkov-Schwelle liegt. Im Gegensatz dazu ist bei LENA die Energie des Kaons ausreichend, um es nachweisen zu können und die von Super-Kamiokande ermittelte Lebensdauer von $\tau_p > 2,3 \cdot 10^{33}$ genauer messen zu können. Wird in LENA innerhalb von 10 Jahren kein Proton-Zerfall beobachtet, kann man die Lebensdauer auf $\tau_p > 4 \cdot 10^{34}$ abschätzen.

2.2 Aufbau des Detektors

Im Gegensatz zum Borexino-Experiment, das sphärisch konstruiert wurde, wird LENA eine zylindrische Form erhalten. (Abb. 2.2) Der Grund dafür ist, dass bei einem sphärischen Aufbau dieser Größe durch Absorption und Streuung das Szintillationslicht aus dem innersten Bereich die Photomultiplier nicht erreichen würde. Desweiteren ist aufgrund der Größe von LENA ein Zylinder einfacher zu bauen und liefert genügend Symmetrien, um die Datenauswertung nicht unnötig zu erschweren.

In einer äußeren ca. 115 m hohen Kaverne befindet sich ein Stahltank mit 100 m Höhe und 30 m Durchmesser. Der Tank wird umgeben von Wasser, das ihn vor

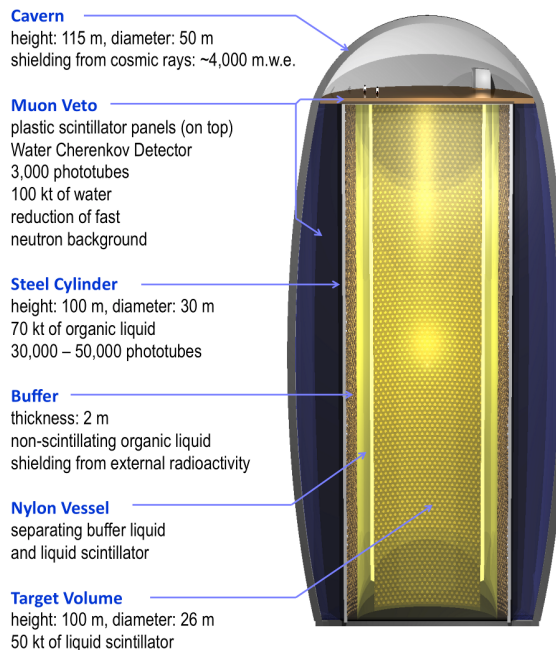


Abbildung 2.2: Schematischer Aufbau des geplanten LENA-Experiments [6]

ungewollter Umgebungsstrahlung und myoninduzierter Neutronenstrahlung abschirmt und in Form eines Wasser-Cherenkov-Detektors als Myon-Veto fungiert.

Mögliche Standorte für LENA müssen vor kosmischer Strahlung abgeschirmt sein, was eine Lage in einem Untergrundlaboratorium bedingt. Infrage kommt derzeit die Phyäsalmi-Mine in Finnland und das Laboratoire Souterrain de Modane (LSM), das sich bei einem Tunnel in den italienisch-französischen Alpen bei Frejus befindet. Während der finnische Standort Vorteile bei der Messung von Geoneutrinos hätte, weil er weit entfernt von Reaktoren liegt, bedingt genau diese Tatsache, dass wenige Reaktorneutrinos nachgewiesen werden können.

2.2.1 Flüssigszintillator

Bereits die Experimente KamLAND und Borexino haben gezeigt, dass Flüssigszintillatoren durch ihre gute Energieauflösung und niedrige Energieschwelle Vorteile haben. Als Szintillatormaterialien kommen organische Lösungen in Frage, die typischerweise ein oder zwei Benzen-Ringe enthalten.

Neutrinos werden über elastische Streuung mit Elektronen oder Atomkernen der Szintillatorflüssigkeit nachgewiesen. Die Rückstoßteilchen deponieren ihre Energie,

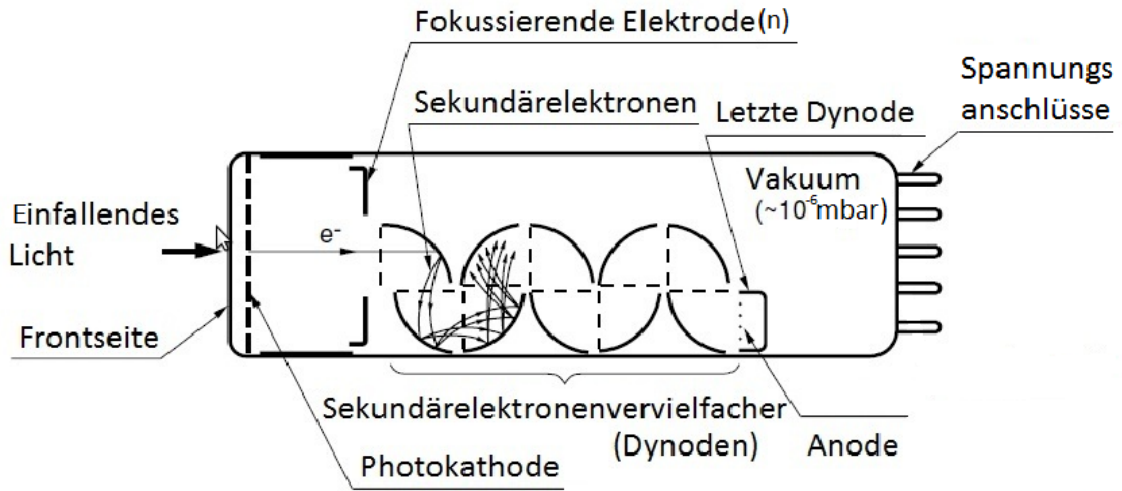


Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau eines Photomultipliers [13]

indem sie die Szintillatormoleküle anregen. Diese wiederum entledigen sich der überschüssigen Energie durch isotrope Abstrahlung von ultraviolettem Licht. Um eine Reabsorption des Szintillationslichtes zu verhindern, werden sogenannte Wellenlängenschieber zu dem Szintillator gemischt, welche die Lichtfrequenz so verändern, dass dieses nicht mehr absorbiert werden kann.

In Borexino wurde als Szintillator PC (Pseudocumen, C_9H_{12}) mit $1,5g/l$ PPO (Polyphenylenoxid, $(C_8H_8O)_n$) als Wellenlängenschieber verwendet. Obwohl PC eine hohe Lichtausbeute hat, wird es für LENA wohl verwendet werden, da durch seine geringe Abschwächlänge Licht vom Detektorinneren nicht mehr zu den Photomultipliern durchdringen würde. Aussichtsreichere Kandidaten sind LAB (Linearalkanbenzen, $C_{18}H_{30}$) und PXE (Phenyl-o-Xylylethan, $C_{16}H_{18}$), als Wellenlängenschieber wird eine Kombination aus PPO und Bis-MSB verwendet werden.

2.2.2 Photosensoren

Eine wichtige Rolle im LENA-Experiment kommt den Photosensoren zu. Ihre Nachweis-Effizienz wirkt sich auf die Energieauflösung und die Energieschwelle aus, ihre Zeitauflösung bestimmt neben den Zerfallskonstanten des Szintillators, wie genau man den Ort des entstandenen Lichts bestimmen kann.

Photomultiplier

In großvolumigen Neutrinodetektoren (z.B. SNO, Borexino, Ice Cube etc.) haben sich Bialkali-Photomultiplier-Tubes (PMT) als sehr gute Lichtdetektoren erwiesen. Bei diesen PMTs werden aus der Bialkali-Photokathode mit geringer Austrittsarbeit über den Photoeffekt Elektronen herausgelöst. Über Elektroden, an denen eine Spannung angelegt ist, werden die ausgelösten Elektronen beschleunigt und auf einen Sekundärelektronenvervielfacher fokussiert. In diesem Vervielfacher lösen die Elektronen an der ersten Dynode weitere Elektronen aus. (Abb. 2.3) Dieser Prozess setzt sich in den weiteren Dynoden fort, bis die Elektronen an der Anode ein messbares Signal erzeugen. Dieses Signal an der Anode kann über eine Elektronik ausgelesen werden und liegt bei einer Spannung von etwa 5-10 mV.

Eine charakteristische Größe bei PMTs ist die Quantenausbeute, die angibt welcher Anteil der auf die Kathode auftreffenden Photonen in Photoelektronen umgewandelt wird. Bei Bialkali-PMTs liegt diese bei etwa 25 % und ist somit relativ niedrig. Höhere Quantenausbeuten versprechen PMTs mit Photokathoden aus Super-Bialkali (SBA) oder Ultra-Bialkali (UBA). Während letztere derzeit nur bis zu einem Durchmesser von zwei Zoll gefertigt werden, sind SBA-PMTs schon bis zu einer Größe von zwölf Zoll erhältlich. Die Quanteneffizienz steigt bei SBA-PMTs auf 35 % und bei UBA-PMTs sogar auf bis zu 43 %, wodurch weniger PMTs benötigt würden. (siehe Tabelle 2.2) Trotz dieser deutlich höheren Werte, ist fraglich, ob es wegen des Preisunterschieds nicht günstiger ist, konventionelle Bialkali-PMTs in größerer Anzahl zu verwenden. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass man durch mehr PMTs mit geringerer Quanteneffizienz im Mittel eine bessere Ortsauflösung erhält.

Wichtig bei der Auswahl der geeigneten Photomultiplier ist auch die Zeitunsicherheit der Dauer vom Auftreffen des Lichts bis zum Aussenden eines elektrischen Signals des PMTs, die sogenannte "Transit Time Spread"(TTS). Sie ist entscheidend für die gesamte Zeitauflösung und Positionsbestimmung von LENA.

Ein weiteres wichtiges Kriterium bei PMTs ist die Dunkelrate, also die Signale, die der PMT erzeugt, ohne dass ein Photon auf die Kathode trifft. Gründe dafür können unter anderem thermische Emissionen von Elektronen oder Materialverunreinigungen sein.

Eine weitere charakteristische Eigenschaft von Photomultipliern ist die Wahrscheinlichkeit, dass Afterpulse auftreten. Afterpulse entstehen z.B. dadurch, dass von der ersten Dynode zurückgestreute Elektronen wiederum Elektronen an der Photokathode auslösen und so ein verspätetes kleineres Signal erzeugen. Schnelle Afterpulse können dabei die Pulsform des ursprünglichen Signals verfälschen, wodurch

es zu Schwierigkeiten bei der Pulsformanalyse kommt.

Ziel bei LENA ist es, 30 % der Oberfläche mit Photosensoren abzudecken. Je nach Größe der PMTs würden dafür zwischen 21.600 (Durchmesser 20 Zoll) und 943.100 (Durchmesser 3 Zoll) benötigt. (Siehe Tabelle 2.2) Wie auch bei Borexino sind 8-Zoll-PMTs derzeit die besten Kandidaten, wobei neue größere PMTs mit besseren Eigenschaften diese Tendenz nochmals verändern könnten.

Lichtkonzentratoren

Durchmesser	o. Winston-Cones	m. Winston-Cones	m. Winston-Cones & UQE
3 Zoll	943 100	538 900	384 900
5 Zoll	329 300	188 200	134 400
8 Zoll	110 400	63 100	45 100
10 Zoll	82 300	47 000	33 600
12 Zoll	53 900	30 800	22 000
20 Zoll	21 600	12 300	8 800

Tabelle 2.2: Anzahl der benötigten PMTs, um eine optische Abdeckung von 30 % zu erreichen bzw. beim Einsatz von PMTs mit UQE-Kathode die Lichtausbeute zu erreichen, die man mit herkömmlichen PMTs und 30 % optischer Abdeckung erreicht. [7]

Um die optische Abdeckung zu erhöhen, hat man bereits bei Borexino nichtabbildende parabolische Lichtkonzentratoren eingesetzt. (Abb. 2.4) Ähnliche Konzentratoren, sogenannte Winston-Cones sollen auch bei LENA zum Einsatz kommen, um damit die aktive Oberfläche um etwa den Faktor 1,75 zu erhöhen bzw. die Anzahl der Photosensoren um ebendiesen Faktor zu verringern. Tabelle 2.2 zeigt die benötigten PMTs bei verschiedenen Durchmessern mit und ohne Winston-Cones, sowie mit Winston-Cones und UQE-Kathode.

Druckeinkapselung

Durch die Höhe des Szintillatortanks von 100 m entsteht im unteren Bereich ein Druck von 9,8 bar (LAB) bzw. 11,1 bar (PXE). Da Photomultiplier nur einem Druck von etwa 7 bar standhalten, müssen sie zumindest im unteren Bereich des Detektors mit einer Einkapselung vor diesem hohen Druck geschützt werden. Die Einkapselung soll aus Metall bestehen und an der Stelle der Photokathode mit Acrylglas versehen werden.



Abbildung 2.4: Bild eines Lichtkonzentrators bei Borexino [14]

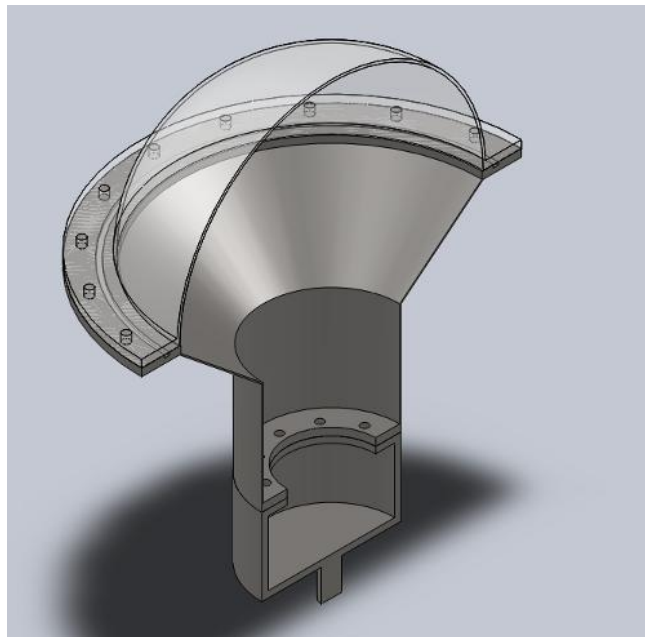


Abbildung 2.5: So könnte eine Druckeinkapselung der Photomultiplier aussehen. Auf einen Korpus aus Metall um den hinteren Teil der PMTs wird ein Fenster aus Acrylglas vor der Photokathode befestigt. [15]

Abschirmung vom Erdmagnetfeld

Das natürliche Magnetfeld der Erde kann bei Photomultipliern Teile der Elektronenschar, die sich von Dynode zu Dynode vermehrt ablenken und somit daran hindern, die nächste Dynode zu erreichen. Dadurch kann es zu geringeren Quanteneffizienzen kommen. Um die Photosensoren von diesem Magnetfeld abzuschirmen werden diese mit einer sogenannten Nickel-Eisen-Legierung mit hoher magnetischer Permeabilität ("Mu-Metall", $\mu_r = 50000 - 140000$ [16]) umgeben. Dadurch wird das Erdmagnetfeld im Metall konzentriert und die Photomultiplier innerhalb des Metalls abgeschirmt.

Kapitel 3

Photosensorteststand

Damit das LENA-Projekt in möglichst vielen Gebieten der Physik die bestmöglichen Erkenntnisse liefern kann, ist die optimale Auswahl der Photosensoren überaus bedeutsam.

Einerseits ist es dafür wichtig, Größe, Form und Material der Winston-Cones so auszuwählen, dass möglichst viel Licht auf den Photomultiplier gelangt. Andererseits spielen die Eigenschaften von Photomultipliern eine entscheidende Rolle.

Ein wichtiger Faktor ist dabei die Photo-Detektionseffizienz, die sich aus der Quanteneffizienz der Photokathode und der Sammeleffizienz der Photoelektronen sowie aus Verlusten durch Rückstreuung von der ersten Dynode ergibt. Besitzen Photomultiplier hohe Detektionseffizienzen, so kann bei gleicher Anzahl an Sensoren eine größere Statistik an Photonen pro deponierter Energie aufgenommen werden.

Wichtig ist dabei jedoch auch, wie groß die Zeitunsicherheit der Dauer vom Auftreffen des Lichts bis zum Aussenden eines elektrischen Signals des PMTs, die sogenannte "Transit Time Spread" (TTS), ist. Als Störungen können sogenannte Afterpulse auftreten, die z.B. dadurch entstehen, dass Photoelektronen aus der ersten Dynode Ionen auslösen, die aufgrund ihrer positiven Ladung zur Kathode beschleunigt werden und dort mehrere Elektronen auslösen. Diese Elektronen erzeugen mit einer Verzögerung von einigen μs ein weiteres, größeres Signal.

Einen weiteren wichtigen Faktor für die Auswahl der passenden Photomultiplier stellt die Dunkelrate (Anzahl der Signale ohne eintreffendes Licht) dar. Sie entsteht etwa durch thermische Emissionen oder radioaktive Verunreinigungen und beeinträchtigt die Energieauflösung und die Positionsbestimmung im gesamten Detektor.



Abbildung 3.1: Bild des Photosensor-Teststandes: Rechts ist die Black-Box zu sehen, in der Mitte die Elektronik.

Um ermitteln zu können, welcher Typ Photomultiplier alle diese Anforderungen am besten erfüllt, ist es nötig, einen Aufbau zu erstellen, mit dem man genau diese Eigenschaften ermitteln kann.

3.1 Äußerer Aufbau

Die offensichtlichste und wichtigste Anforderung an einen derartigen Aufbau ist Dunkelheit, was konkret bedeutet, dass sich der zu testende PMT und die dafür verwendete Lichtquelle in einer dunklen Kiste ("Black-Box", Abb. 3.1) befinden müssen. In diesem Aufbau wird eine Black-Box mit einer Abmessung von 1,90 m x 1 m verwendet, die innen mit schwarzem Filz ausgekleidet ist, um Reflexionen zu vermeiden. Die einzige dauerhafte Öffnung ist ein Rohr, durch das die benötigten Kabel geführt werden. Es ist an der Innen- und Außenseite der Box mit schwarzem Filz verdeckt. Der Deckel der Black-Box wird versenkt und die ganze Box noch mit Filz überdeckt. Trotz all dieser Maßnahmen ist die Kiste nur so weit lichtdicht, dass man mit stark gedimmten Licht keine störenden Ereignisse misst. Eine deutliche Verbesserung bringt eine zweite Lage schwarzer Filz über der

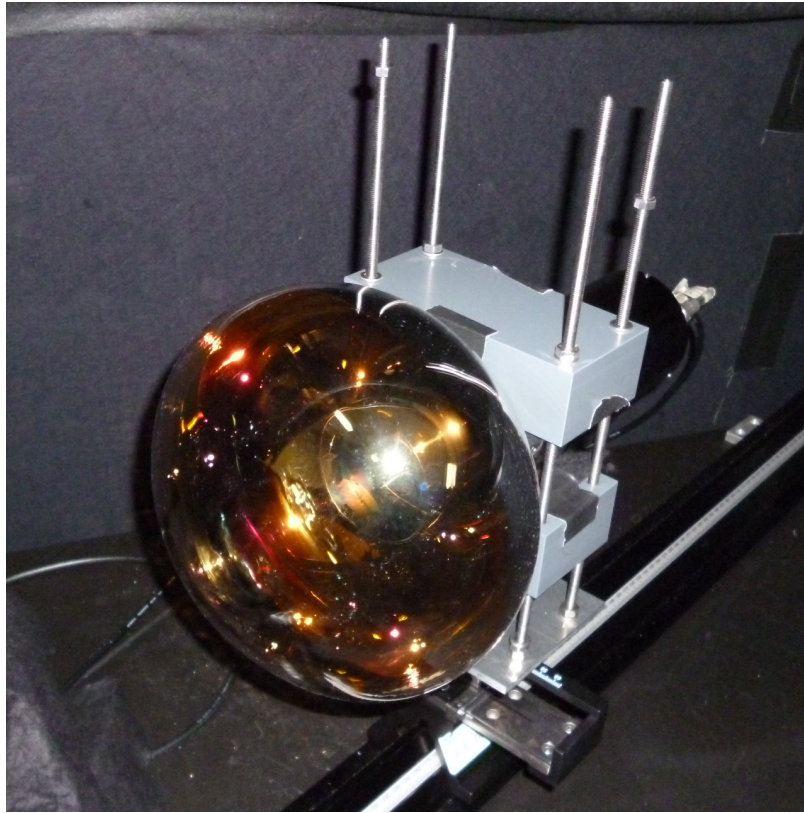


Abbildung 3.2: Bild des PMT-Halters mit eingebautem PMT: Der PMT-Halter ist hier auf dem Verschiebereiter befestigt. Ganz unten sieht man die optische Bank. Im Halter ist der 8-Zoll-PMT R5912 von Hamamatsu befestigt.



Abbildung 3.3: Bild einer optischen Bank der Firma Henschke mit verschiedenen Reitern [18]

Black-Box und die Beschwerung der Ecken mit Bleiziegeln.

Als Arbeitsplatte wurde ein gewöhnlicher Labortisch den Anforderungen entsprechend modifiziert. Zunächst wurde die Höhe so angepasst, dass zwischen Tisch und Deckel der Black-Box noch genügend Platz für einen 12-Zoll-Photomultiplier samt Winston-Cone ist. Um zu vermeiden, dass optische Elemente durch Bodenvibrationen verwackeln, wurden unter die Tischbeine 15 mm dicke Moosgummistücke gelegt. Desweiteren wurde die Tischoberfläche mit einem schwarzen matten Schultafellack gestrichen, um Reflexionen zu vermeiden.

Um Lichtquelle, optische Elemente und PMTs befestigen zu können, wurde eine optische Bank der Firma Henschke verwendet. (Abb. 3.3) Sie war einerseits eine günstige Alternative im Vergleich zu optischen Platten und sie ermöglicht es, die Elemente diagonal in die Black-Box einzubauen und so die ohnehin beengten Platzverhältnisse optimal auszunutzen. Anstelle der optionalen Füße der Firma Henschke wurden Platten angefertigt, mit denen die optische Bank am Tisch befestigt wurde. (Abb. 3.4) In optischen Reitern (Abb. 3.3) lassen sich hier Haltestangen befestigen, an deren Ende über ein Gewinde die Halterungen für die optischen Elemente angebracht werden können.

Um verschiedene PMTs stabil befestigen zu können, wurde eine variable Halterung konstruiert, in die man PMTs mit einem Schaftdurchmesser von 50 mm bis 100 mm eingebaut werden können. (Abb 3.2) Der Schaftdurchmesser ist nicht zu verwechseln mit dem Durchmesser der Photokathode. In diese Halterung können derzeit gängige PMTs mit einem Kathodendurchmesser von bis zu 12 Zoll eingebaut werden. Je nach Form der Photomultiplier ist durchaus denkbar, dass auch größere Geräte befestigt werden können, wenn der Schaft einen Durchmesser von weniger als 100 mm besitzt und lang genug ist, um eine stabile Befestigung zu gewährleisten. Über Gewindestangen und Muttern können PMTs in verschiedenen Höhen platziert und befestigt werden. Der Halter wird über eine an der Unterseite angebrachte Stange in einem Verschiebereiter (Abb. 3.5) befestigt, der eine Auslenkung der PMTs um ± 60 mm ermöglicht. Zusätzlich zur horizontalen und vertikalen Verschiebung ist es möglich, den PMT-Halter in jedem gewünschten Winkel auf dem Verschiebereiter zu positionieren.

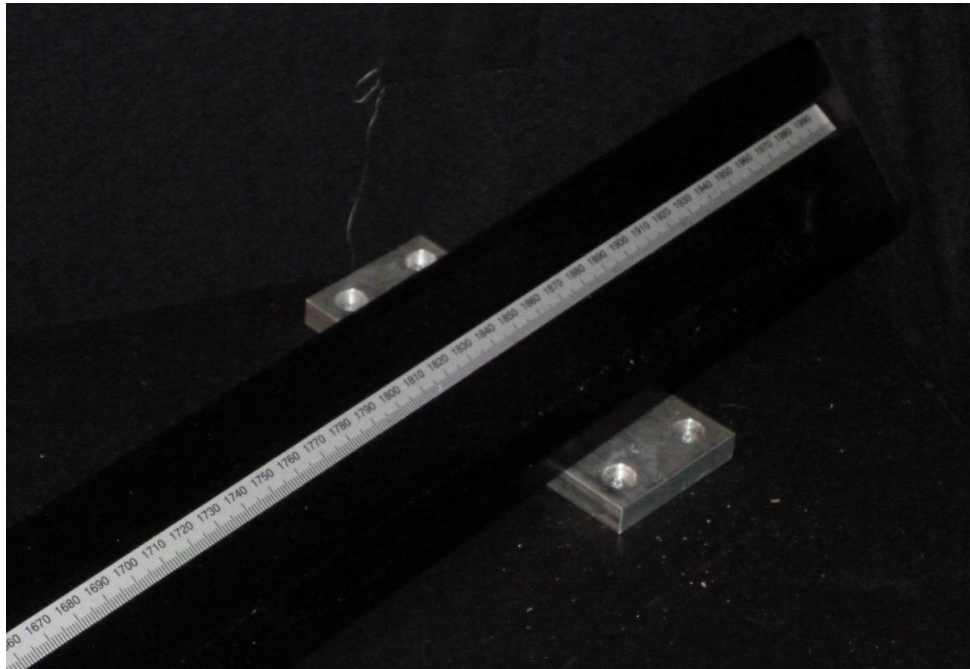


Abbildung 3.4: Bild der Befestigung der optischen Bank

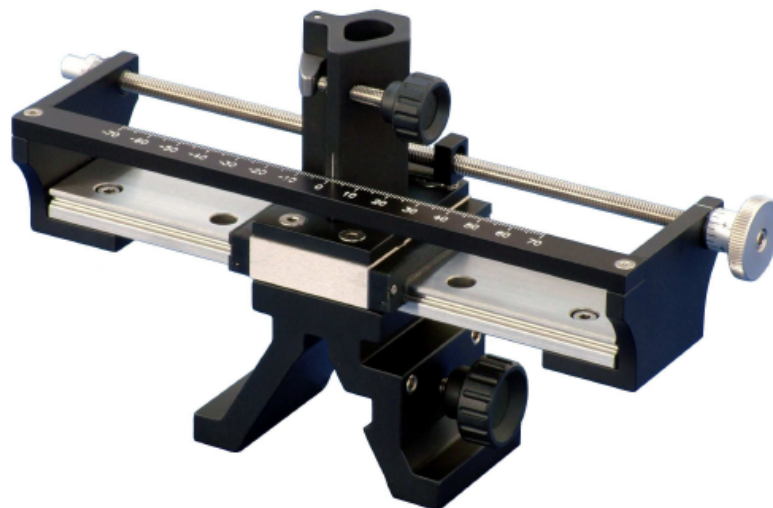


Abbildung 3.5: Verschiebereiter zur Befestigung optischer Elemente: In horizontaler Richtung ist eine Auslenkung von ± 60 mm möglich. [18]

3.2 Lichtquelle und Optik

Eine mögliche Lichtquelle sollte Licht nur in dem für LENA relevanten Wellenlängenbereich von circa 420 nm emittieren. Darüber hinaus soll das Licht möglichst homogen auf die Photokathode eines PMTs treffen, was entweder durch eine passende Lichtquelle oder durch eine entsprechende Optik zu realisieren ist. Um einzelne Ereignisse zu simulieren, muss eine infrage kommende Lichtquelle möglichst kurze Pulse im ns-Bereich emittieren, was der größte und am schwierigsten zu realisierende Anspruch ist. Zwei mögliche Kandidaten sind LEDs und Laser, wobei beide ihre Probleme mit sich bringen und nur durch passende Elektronik bzw. Optik für diesen Aufbau infrage kommen.

LED als Lichtquelle

Zunächst wurde die Tauglichkeit von LEDs untersucht. Dies bietet sich an, da LEDs einerseits günstig und andererseits leicht zu handhaben sind. Sie emittieren Licht in einem gewissen Öffnungswinkel relativ homogen, jedoch nicht homogen genug, um auf die kurze Distanz der Black-Box große Photosensoren ausleuchten zu können. Desweiteren gibt es Modelle, die Licht nur in einem bestimmten Wellenlängenbereich abstrahlen.

Zu Testzwecken wurden einige LEDs verschiedener Hersteller beschafft, die Licht im UV-Bereich abstrahlen. Um möglichst kurze Lichtpulse zu erzeugen, wurden sie mit einem Pulsor angesteuert. Die Grundspannung und die Pulshöhe wurde dabei so eingestellt, dass die LEDs nur sehr wenig Licht aussendeten und somit der PMT nur bei etwa jedem zehnten Puls zeitkorrelierte Signale erfasste. Über ein Flash-ADC konnten die Signale der PMTs beobachtet und gespeichert werden, getriggert wurde dabei durch den Pulsor.

Leider konnte mit keiner der LEDs die benötigte Zeitauflösung nur ansatzweise erreicht werden, da sie auch bei sehr kurzen Pulsen noch eine zu lange Abklingzeit zeigten. Diese war mit etwa 3 ns größer als die Reaktionszeit eines Photomultipliers.

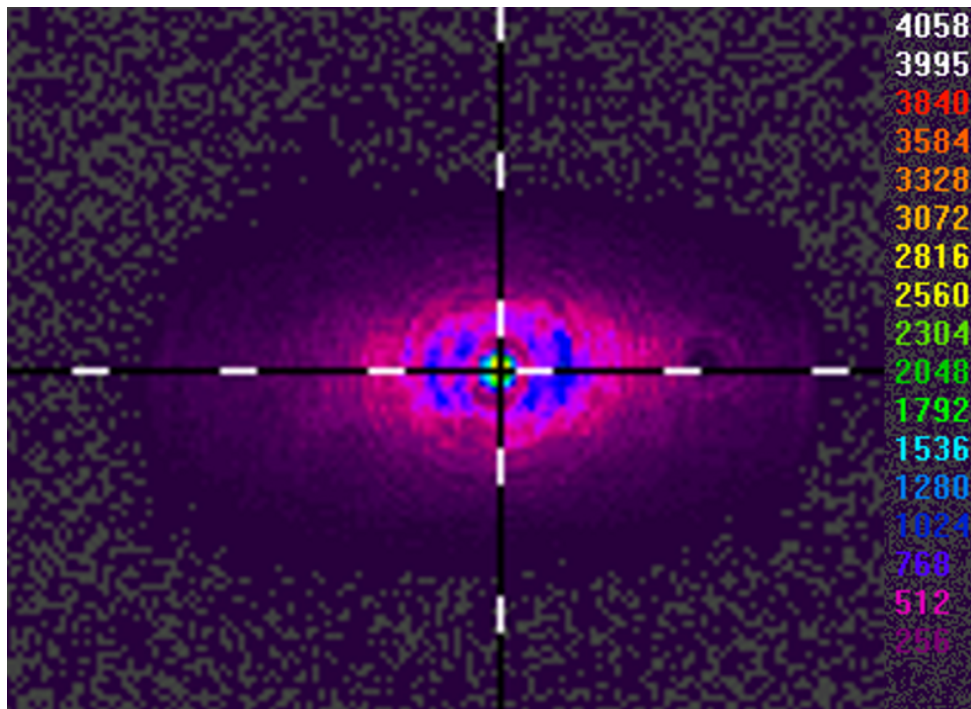


Abbildung 3.6: Hier sieht man das gaußförmige Intensitätsprofil des Lasers. Ein Pixel entspricht dabei $20 \mu\text{m}$. Im Bereich von $60 \mu\text{m}$ um das Zentrum ist die Intensität bereits um circa 50 % abgefallen. [17]

Laser als Lichtquelle

Das Problem der zu großen Zeitungenauigkeit kann durch den Einsatz eines Lasers hervorragend gelöst werden, jedoch treten dabei wieder andere Probleme auf. Im Gegensatz zu LEDs ist die Auswahl der auf dem Markt befindlichen Geräte um ein Vielfaches kleiner und vor allem die Auswahl an möglichen Wellenlängen sehr begrenzt. Es gibt zwar keine Laser in dem für LENA relevanten Wellenlängenbereich von 420 nm, jedoch existieren Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 405 nm, mit denen sich zu testende PMTs recht gut charakterisieren lassen.

Die hohe Intensität, die alle Laser üblicherweise haben, muss durch den Einsatz von Filtern abgeschwächt werden, um die Photomultiplier nicht zu beschädigen. Um den Laser durch etwaige Reflexionen nicht zu beschädigen, sollte man die Filter leicht schräg zur Strahlrichtung positionieren.

Die größte Einschränkung des Lasers ist jedoch seine eben für ihn charakteristische Eigenschaft, annähernd paralleles Licht zu erzeugen, wodurch statt eines



Abbildung 3.7: Bild des Lasers EPL 405 von Edinburgh Instruments [19]

gesamten Photomultipliers nur ein kleiner Bruchteil beleuchtet werden kann. Auf den ersten Blick scheint auch dieses Problem durch optische Komponenten einfach lösbar, zumal Laserstrahlen eine Ausdehnung von wenigen mm besitzen. Betrachtet man jedoch die Intensitätsverteilung des Laserstrahls (Abb. 3.6) näher, sieht man eine gaußförmige Verteilung, was bedeutet, dass der Laserstrahl sehr inhomogen ist.

In unserem Fall kommt ein modifiziertes Modell des EPL-405 Lasers von Edinburgh Instruments zum Einsatz. (Abb. 3.7) Im Unterschied zum normalen Modell wurde die Wiederholrate und somit die Intensität um den Faktor 10 reduziert. Bei diesem Laser sind wohl nur die innersten $20\ \mu\text{m}$ des Laserstrahls möglicherweise homogen genug, um sie für die Untersuchung von PMTs verwenden zu können. Leider konnte der Hersteller die Intensitätsverteilung nicht mit einer besseren Auflösung als μm angeben (Abb. 3.6), so dass die Homogenitätsverteilung im zentralsten Bereich des Lasers erst noch überprüft werden muss. (s. 3.2.4)

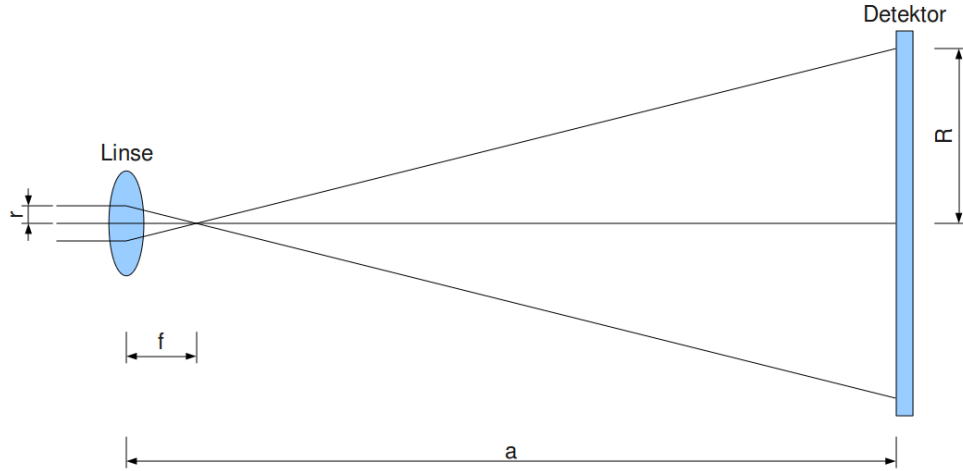


Abbildung 3.8: Strahlengang der Aufweitung bei Verwendung einer Linse

3.2.1 Design der Optik

Bedenkt man, dass der Durchmesser eines Winston-Cones mit Konzentrationsfaktor 1,75, der auf einen 12-Zoll PMT angebracht ist, circa 430 mm beträgt und dieser Bereich homogen ausgeleuchtet werden soll, so erkennt man bereits die enorme optische Herausforderung. Der Laserstrahl soll von $20\ \mu\text{m}$ auf 430 mm aufgeweitet werden, was dem Faktor 21.500 entspricht. Hätte man eine beliebig große Black-Box wäre dies mit herkömmlichen Linsen kein Problem, in unserer Black-Box hat man jedoch in der Diagonalen nur eine Länge von 2 m zur Verfügung. Berücksichtigt man die Länge der Photosensoren (PMT + Winston Cone), des Lasers und der Optik, bleibt davon jedoch nur 1 m für die Aufweitung übrig. Über den Strahlensatz (Abb. 3.8) lässt sich die dafür benötigte Brennweite bei Verwendung eines optischen Elementes berechnen:

$$\frac{r}{f} = \frac{R}{a - f} \quad (3.1)$$

$$f = \frac{a \cdot r}{R + r} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \text{m} \cdot 1 \text{m}}{0,215 \text{m} + 10 \cdot 10^{-6} \text{m}} = 4,65 \cdot 10^{-5} \text{m} \quad (3.2)$$

R ist dabei der Radius des auszuleuchtenden Bereiches, was der maximalen Größe eines Winston-Cones entspricht (215 mm), r der Radius des Laserbereichs, der verwendet werden soll ($10\ \mu\text{m}$), a der Abstand zwischen der ersten Linse und dem

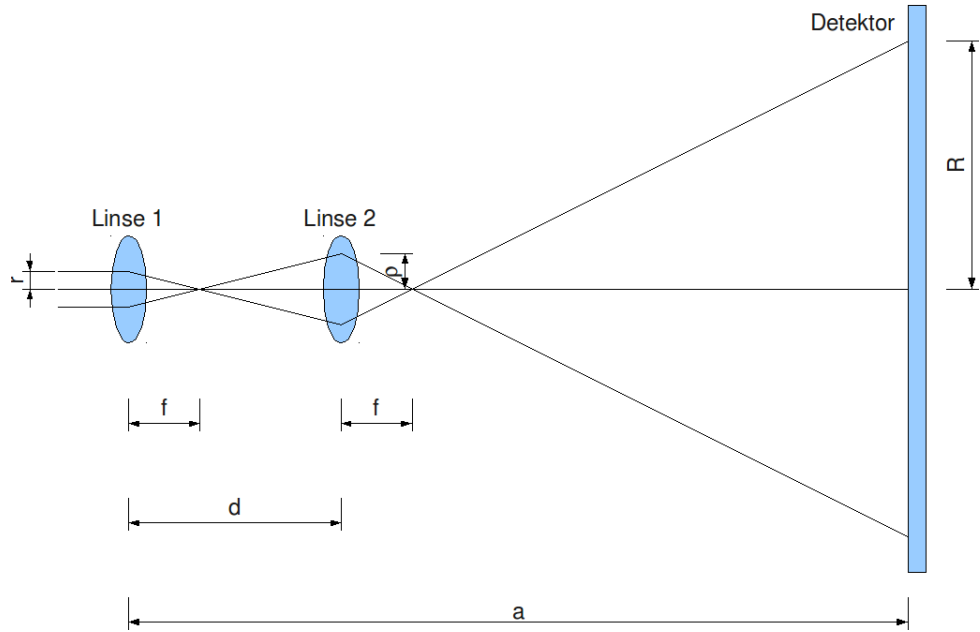


Abbildung 3.9: Strahlengang der Aufweitung bei Verwendung von zwei Linsen

Detektor und f die Brennweite der benötigten Optik. Bereits an diesem Wert erkennt man, dass man mit einer gewöhnlichen Linse keinerlei Realisierungschancen hat. Verwendet man nun jedoch zwei Linsen hintereinander (Abb. 3.9), so ergibt sich für den Radius ρ des ausgeleuchteten Bereichs an der Stelle einer zweiten Linse im Abstand d von der ersten:

$$\rho = \frac{r}{f} \cdot (d - f) \quad (3.3)$$

Nimmt man an, dass der Laserstrahl auch auf der zweiten Linse noch parallel ist (die Abweichung beträgt $0,5^\circ$), ergibt sich für den Bereich von der zweiten Linse bis zum auszuleuchtenden Bereich folgender Strahlensatz:

$$\frac{\rho}{f} = \frac{R}{a - d - f} \quad (3.4)$$

Setzt man nun 3.3 in 3.4 ein, so erhält man:

$$\frac{r \cdot (d - f)}{f^2} = \frac{R}{a - d - f} \quad (3.5)$$

Durch Multiplizieren mit dem Hauptnenner ergibt sich folgende quadratische Gleichung:

$$(-R - r) \cdot f^2 + (ar - 2rd) \cdot f + ard - rd^2 = 0 \quad (3.6)$$

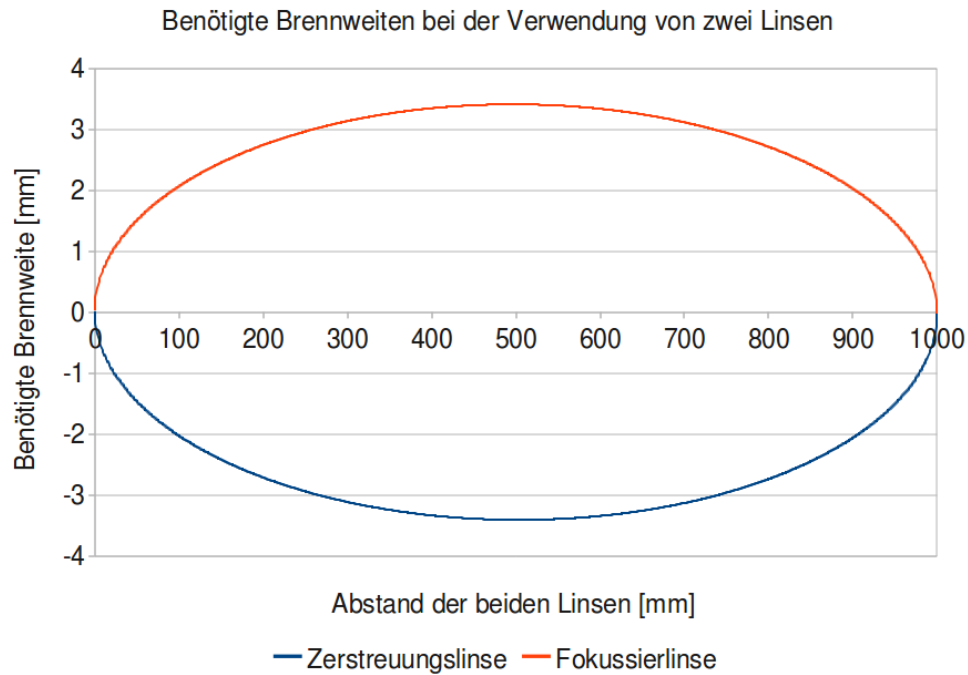


Abbildung 3.10: Benötigte Brennweiten bei Verwendung von zwei Linsen zur Laser-aufweitung: Man sieht hier, dass optische Elemente (Linsen) benötigt werden, die eine Brennweite von 3 mm oder weniger besitzen. Auf den ersten Blick sieht es so aus, als würde es keinen Unterschied machen, ob man eine Zerstreuungslinse oder eine Fokussierlinse verwendet. Tatsächlich unterscheiden sich die jeweiligen Werte abgesehen vom Vorzeichen bei den jeweiligen Abständen um weniger als 0,1 mm.

Nimmt man für $r = 10 \mu\text{m}$, für $R = 215 \text{ mm}$ und für $a = 1 \text{ m}$ an, lässt $d > 0$ variabel und löst die Gleichung nach der Brennweite f auf, so ergibt sich eine positive und eine negative Lösung. Physikalisch betrachtet entspricht die positive Lösung einer Sammellinse, die negative einer Zerstreuungslinse. In Abbildung 3.10 ist dies graphisch dargestellt. Man erkennt, dass man optische Elemente mit einer Brennweite von etwa 3 mm oder weniger benötigt, wobei ein möglichst kleiner Wert anzustreben ist, um den Abstand der beiden Linsen möglichst klein zu halten und damit auch den maximalen Einfallswinkel des Lichts am Rand des Detektors. Da Zerstreuungslinsen nur ab einer Brennweite von 5 mm erhältlich sind, folgt, dass man entweder mit Sammellinsen arbeiten oder andere optische Elemente verwenden muss.

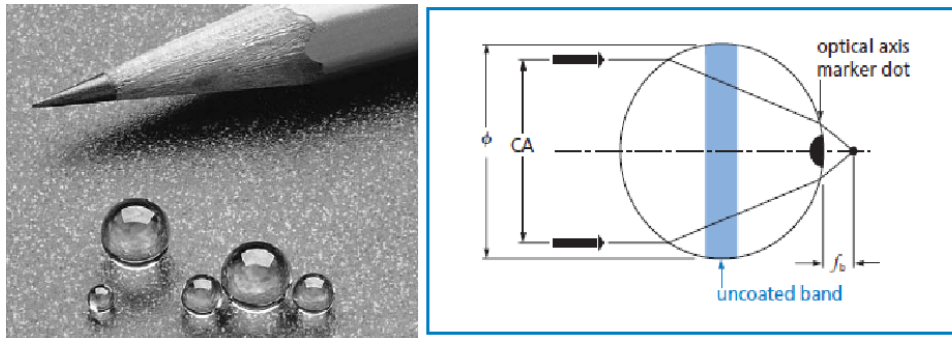


Abbildung 3.11: Bild und Strahldiagramm von Kugellinsen: Da in unserem Fall keine antireflexbeschichteten Linsen verwendet werden, gibt es auch kein unbeschichtetes Band (uncoated band) und keine Markierung für die optische Achse (optical axis marker dot). [20]

Mögliche optische Elemente

Eine Möglichkeit wäre die Verwendung von speziell für Laser konstruierten optischen Elementen. Konkret denkbar wäre vor eine Linse einen Strahlaufweiter vor eine Linse zu positionieren. Die Kosten für solche Elemente liegen allerdings im Bereich von einigen tausend Euro, wohingegen eine Linse für unter 100 Euro erhältlich ist.

Eine sehr praktische Lösung stellen Kugellinsen dar. Die Firma Melles Griot bietet diese ab einem Durchmesser von 1 mm an, was einer Brennweite von 0,55 mm entspricht. (Abb. 3.11) Kugellinsen haben den Vorteil, dass aufgrund ihrer Symmetrie beim Einbau die Orientierung keine Rolle spielt und nur auf die Position geachtet werden muss.

Eine Alternative stellen Gradient-Index-Linsen (GRIN-Linsen) dar. (Abb. 3.11 (a)) Sie besitzen eine zylindrische Form und verändern den Lichtstrahl durch einen radialen Gradienten im Brechungsindex. (Abb. 3.12 (b)) Je nach Länge der Linse und Wellenlänge des einfallenden Lichtes ergibt sich eine fokussierende oder defokussierende Wirkung. Um den gewünschten Effekt zu erhalten, muss die Länge der Linse exakt auf die Wellenlänge des einfallenden Lichtes abgestimmt sein. (Abb. 3.12 (c)) GRIN-Linsen werden hauptsächlich für die Einkopplung von Laserstrahlen in Lichtwellenleiter verwendet.

Das große Problem bei GRIN-Linsen ist, dass sie für die Wellenlänge unseres Lasers (405 nm) nicht erhältlich sind, jedoch wäre die Verwendung von Linsen, die auf eine Wellenlänge von 632,8 nm optimiert sind, eventuell erfolgsversprechend. Der Laser

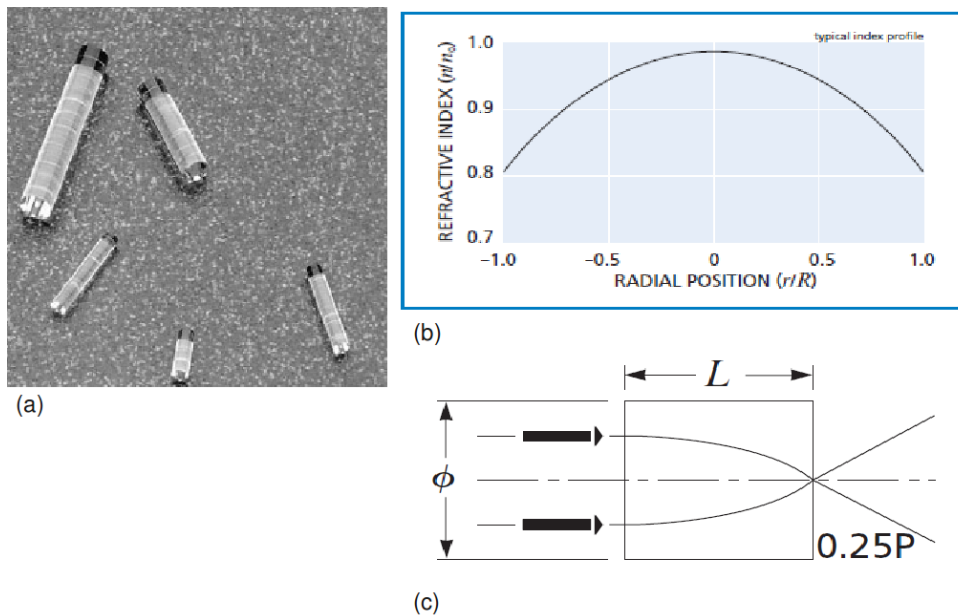


Abbildung 3.12: Bild, Strahldiagramm und Radiale Brechungsindexabhängigkeit von GRIN-Linsen: (a) zeigt ein Bild verschiedener GRIN-Linsen, (b) ein typisches Diagramm für die radiale Abhängigkeit des Brechungsindex und (c) das Strahldiagramm beim Einfall eines parallelen Strahles in eine GRIN-Linse mit Pitch 0,25. Wichtig ist hierbei, dass der Lichtstrahl nur dann genau auf dem Ende der Linse fokussiert, wenn die Länge der Linse exakt auf die Wellenlänge des einfallenden Lichtes ausgerichtet ist. [21]

würde dann nicht auf das Ende der Linse fokussieren, sondern kurz davor, was die effektive Brennweite etwas erhöhen würde. Sonderanfertigungen für eine Wellenlänge von 405 nm wären enorm kostspielig, weil man dazu eine Mindestmenge von 200 Stück abnehmen müsste.

Aufbau

Nachdem sich Kugellinsen und GRIN-Linsen als aussichtsreichste Kandidaten erwiesen hatten, wurden verschiedene Exemplare beschafft.

Bei Kugellinsen wurden die Modelle mit 1 mm und mit 2 mm Durchmesser ausgewählt. Die 1-mm-Linsen haben zwar eine bessere Brennweite, jedoch bietet Melles Griot nur Halter für Linsen ab 2 mm an, so dass 1-mm-Linsen nur zum Einsatz kommen sollten, wenn 2-mm-Linsen nicht das gewünschte Ergebnis liefern bzw. um das Ergebnis der 2-mm-Linsen noch zu verbessern. Dazu müsste entwed-

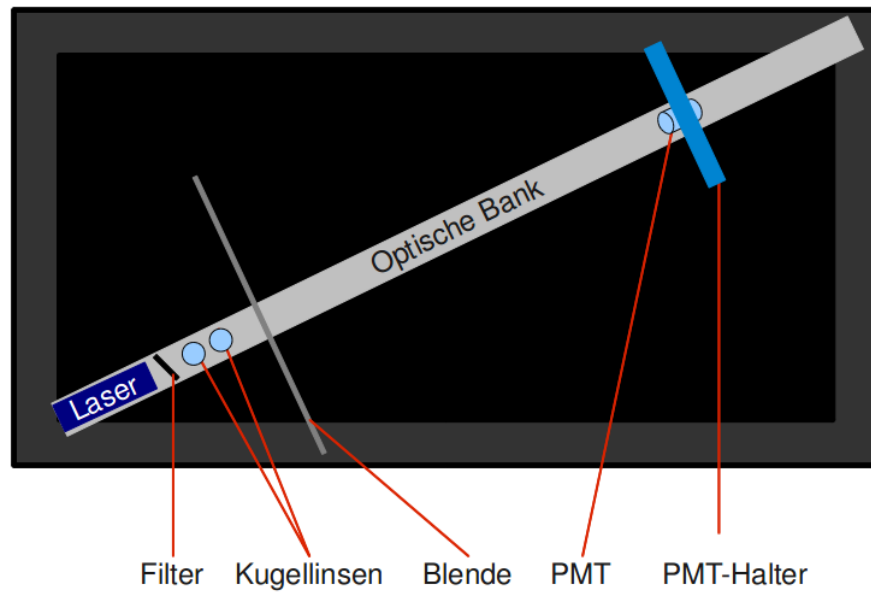


Abbildung 3.13: Schematischer Aufbau des PMT-Teststandes: In der Black-Box steht ein Labortisch (schwarz), auf dem eine optische Bank befestigt ist. Auf dieser optischen Bank sind Laser, Filter, Linsen, Blende und PMT-Halter befestigt.

er in Eigenregie ein Halter konstruiert werden oder ein Halter für 1-mm-GRIN-Linsen verwendet werden. Dies ist nicht unbedingt einfach zu realisieren, da die Linsen aufgrund ihrer kleinen Abmessungen und ihrer Kugelform schwer zu handhaben sind. Bei GRIN-Linsen wurde nur die 1-mm-Variante bestellt, weil für diese Halter existieren und größere Linsen keine Vorteile bieten. Tabelle 3.1 zeigt die Brennweiten der bestellten Linsen, wobei zu beachten ist, dass die Brennweite der GRIN-Linse in der Realität etwas höher ausfällt, weil diese nicht für die Wellenlänge von 405 nm konzipiert ist.

Linsentyp	Durchmesser [mm]	Brennweite [mm]
Kugellinse	1	0,55
Kugellinse	2	1,10
GRIN-Linse	1	1,02

Tabelle 3.1: Durchmesser und Brennweite der infrage kommenden Linsen

Zu erwähnen ist hierbei noch, dass es zwar einige Hersteller gibt, die Kugellinsen und GRIN-Linsen anbieten, jedoch ist Melles Griot der einzige, der dafür auch Halter im Sortiment hat. Bei anderen Herstellern gibt es entweder überhaupt keine Halter oder man müsste sie speziell anfertigen lassen, was die Kosten wieder in die

Höhe schnellen lassen würde. So gab z.B. die Firma Qioptiq ein Angebot über zwei in einem Gehäuse montierte Plankonvexlinsen mit einer Brennweite von 1,35 mm ab, das sich auf 1800 Euro belief. Zum Vergleich dazu kosten Kugel-/GRIN-Linsen etwa 18-30 Euro pro Stück, die Halter dafür etwa 40 Euro pro Stück.

Um die Linsen exakt auf den Laserstrahl ausrichten zu können, wurden zwei zu den Linsenhaltern passende Positionierer mitbestellt, die sich über eine μm -Schraube in zwei Richtungen verstellen lassen. Eine Umdrehung verschiebt die Halter dabei um 0,35 mm.

Um alle optischen Elemente auf einer Achse zu positionieren, wurde eine optische Bank der Firma Henschke gekauft. Um den Laserstrahl abzuschwächen, wurden noch verschiedene Filter und ein Filterhalter angeschafft, weil der Laser für die Messung von Single-Photoelektronen trotz der Aufweitung durch die Optik eine zu hohe Intensität hat.

Um Reflexionen zu vermeiden, wurde eine Blende konstruiert, in die Einsätze mit verschiedenen Durchmessern eingebaut werden können. Diese Blende wird direkt hinter die zweite Linse platziert. Durch die Blendengröße wird der Bereich bestimmt, der von dem Laser ausgeleuchtet wird.

Eine schematische Darstellung des Aufbaus in der Black-Box ist in Abb. 3.13 zu sehen.

3.2.2 Elektronik und Auswertung

Die Messungen zur Justierung, Intensitätsverteilung des aufgeweiteten Laserstrahls, Dunkelrate und der Homogenität der Photomultiplier wurden über einen Zähler durchgeführt, der alle eingehenden Signale aufnahm. Weiterführende Messungen zur Charakterisierung der Eigenschaften von Photomultiplier werden mit dem Flash ADC DC 282 der Firma Adlink durchgeführt.

Zunächst wurde das Datensignal des Photomultipliers und der Triggerausgang jeweils in einen "Linear Fan in/out" geleitet. Diese duplizieren die Signale, so dass sie von mehreren Geräten verwendet werden können. Das Triggersignal des Lasers geht durch eine Verzögerungseinheit ("Delay Unit") zeitlich verzögert direkt in das Flash ADC, das PMT-Signal ohne Verzögerung. Die Verzögerung wird benötigt, um die Reaktionszeit eines Photomultipliers auszugleichen und im Flash ADC das Triggersignal des Lasers und das Signal des Photomultipliers etwa zur gleichen Zeit zu beobachten.

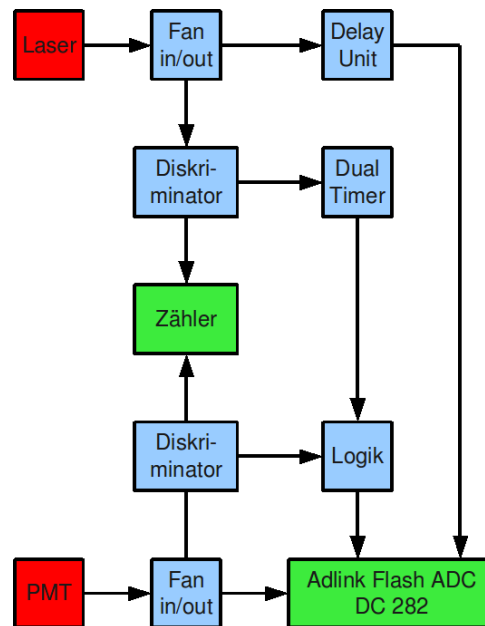


Abbildung 3.14: Schematische Darstellung der Ausleseelektronik

Weitere Duplikate der Signale von PMT und Laser-Trigger gehen in Diskriminatoren, die jeweils zwei Ausgänge besitzen. Das Signal des Photomultipliers geht von dem Diskriminator direkt in einen Kanal des Zählers, in dem dann alle Signale gezählt werden, die der PMT aussendet. Vom Diskriminator des Lasertriggers wird das Signal in einen Dual-Timer geleitet, der einen Puls variabler Länge an eine Logik ausgibt. In diese Logik geht auch das zweite Ausgangssignal des Diskriminators des PMT-Signals, bei einer Koinzidenz sendet sie ein Signal an einen weiteren Kanal des Zählers und an den Trigger-Eingang des Flash ADCs. Abb. 3.14 und Abb. 3.15 zeigen den schematischen Aufbau der Elektronik und ein Bild davon.

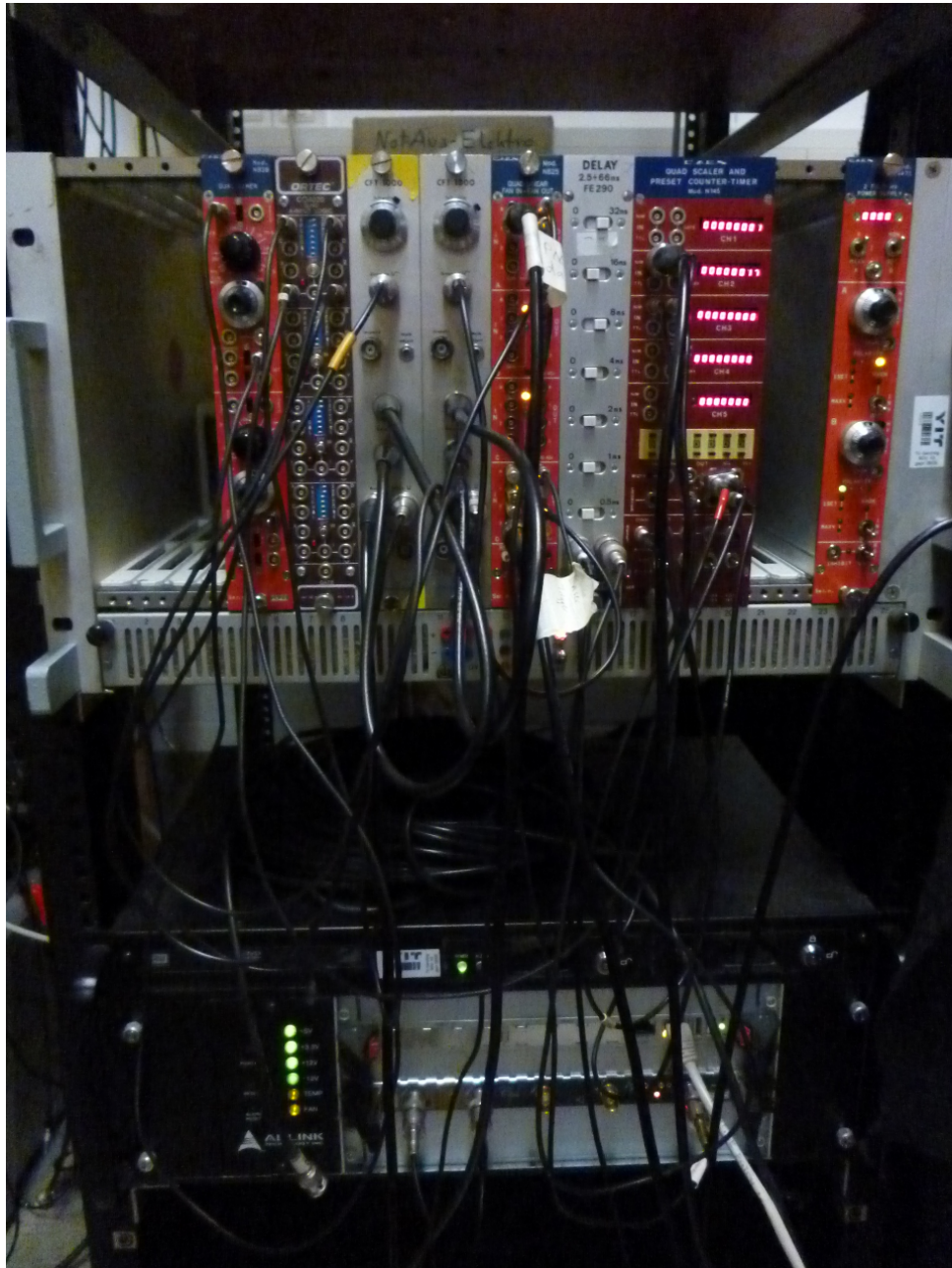


Abbildung 3.15: Bild der Ausleseelektronik: Oben sieht man von links nach rechts: Dual-Timer, Logik, Diskriminatoren, Fan in/out, Delay-Unit, Zähler, Hochspannungsgenerator. Unten ist der Messrechner mit dem eingebauten Flash ADC.



Abbildung 3.16: Bild der eingebauten Optik: Hier sieht man ganz links den Laser, rechts davon der Filterhalter, danach die beiden Positionierer, in denen die Linsen befestigt sind, ganz rechts ist noch die variable Blende zu sehen. Am rechten Positionierer sieht man die mitgelieferte Daumenschraube, alle anderen wurden bereits durch Flügelschrauben ersetzt.

3.2.3 Justierung der Optik

Leider waren die Schrauben zur Befestigung der optischen Reiter am Ende nur mit Kunststoffgriffen versehen und nur mit den Fingern zu drehen, was leicht zu Verwacklungen und Instabilitäten führte. Besserung brachte der Einsatz von Flügelschrauben, die sich mit Daumen und Zeigefinger besser anziehen lassen. (Abb. 3.16) Man muss jedoch trotzdem sehr darauf achten, nicht ungewollt ein Element des Aufbaus zu verdrehen.

Um bei der Justierung der Linsen schon grob im richtigen Bereich beginnen zu können, wurden die Haltestangen der optischen Elemente genau so angefertigt, dass sich Laserstrahl und Linsen auf derselben Höhe befinden. Noch bevor begonnen wurde, die Linsen auszurichten, musste der Laser parallel zur optischen Bank ausgerichtet werden. Hierfür wurde auf eine Blende, die genau zentriert über der optischen Bank positioniert war, ein Fadenkreuz aufgeklebt und der Laser darauf ausgerichtet.

Zur Justierung der Linsen wurde der 8-Zoll-PMT R5912 von Hamamatsu verwendet und eine Blende mit 7 mm Durchmesser direkt davor eingebaut. Um den Photomultiplier nicht zu stark zu beleuchten, wurde ein 100-fach Neutralsichtfilter

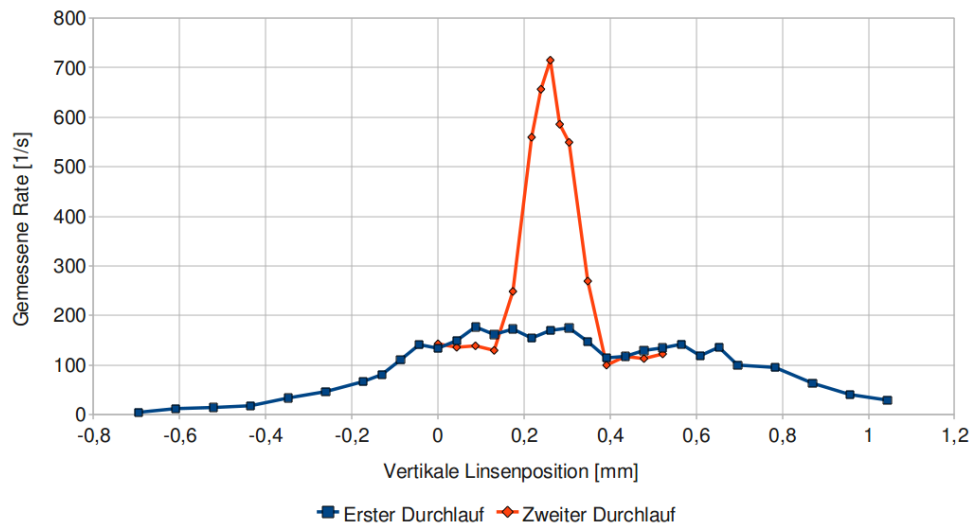


Abbildung 3.17: Gemessene Rate bei der vertikalen Verschiebung einer Linse: Beim ersten Durchlauf ist noch kein ausgeprägtes Maximum zu erkennen, nur ein Bereich, in dem das Maximum liegen könnte. Beim zweiten Durchlauf erkennt man ein deutliches Maximum an der Position 0,26 mm.

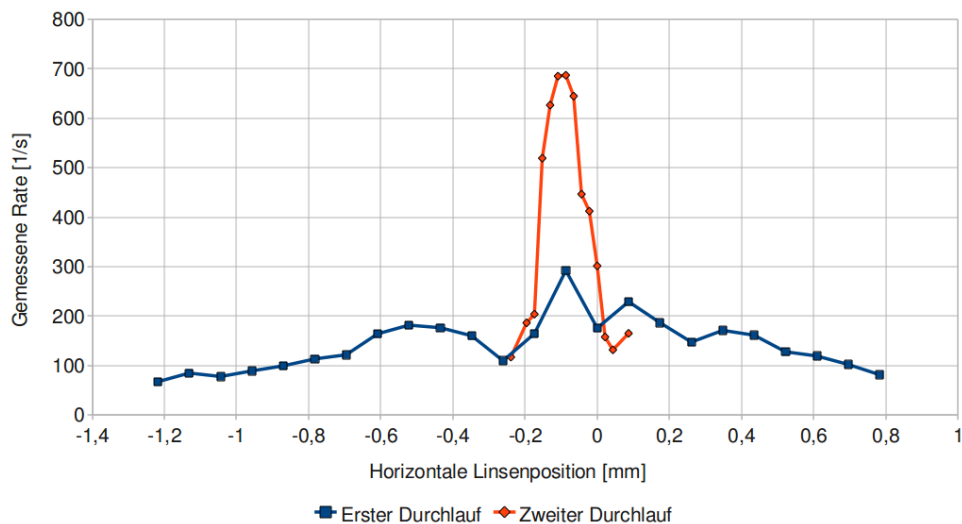


Abbildung 3.18: Gemessene Rate bei der horizontalen Verschiebung einer Linse: Hier erkennt man auch beim ersten Durchlauf schon ein recht ausgeprägtes Maximum, der zweite Durchlauf bestätigt die Position bei 0,10 mm.

zwischen Laser und Optik eingebaut. Zur Bestimmung der Intensität, die auf den PMT trifft, wurde der eingebaute Zähler verwendet. Die Linsen sollten nacheinander ausgerichtet werden, indem die vertikalen und horizontalen μm -Schrauben über einen großen Bereich variiert wurden und so die Position des Maximums bestimmt werden konnte. Bei den ersten Messungen war jedoch schon zu erkennen, dass die gemessenen Werte für bestimmte Linsenpositionen nicht reproduzierbar waren. Der Grund darin wurde in Reflexionen in der Optik und an den Außenwänden der Black-Box vermutet. Es wurde also direkt hinter der Optik eine weitere Blende eingebaut und die restlichen offenen Seiten der Optik mit schwarzem Filz abgehängt. Dabei erwies es sich als sehr vorteilhaft, dass Laser und Optik ganz hinten in einer Ecke der Black-Box platziert worden waren. Einerseits ist dadurch die Fläche, über die mögliche Reflexionen zum PMT gelangen können, schon recht klein, andererseits ist es auch einfacher, die offenen Seiten abzudecken. Testmessungen mit abgeklebter Blende haben ergeben, dass weniger als ein ungewolltes Ereignis pro Sekunde detektiert wird.

Als weitere Herausforderung stellte sich heraus, dass die Maxima sehr unscharf sind, wenn man bei beiden Achsen entfernt vom Zentrum des Laserstrahls liegt. So kann bei der ersten Achse nur über den Mittelwert eines sehr breiten Maximums die mögliche richtige Position errahnt werden, bevor dann die Suche des Maximums an der anderen Achse vorgenommen wird. Es muss also jede Achse mindestens zwei mal durchlaufen werden, um eine Linse zu justieren, wobei man bei jeder Schraube bis zu 4 Umdrehungen teilweise in $1/16$ -Schritten durchlaufen muss. In Abb. 3.17 ist zu sehen, wie unscharf sich das Maximum zu erkennen gibt, wenn man eine Linse zum ersten mal vertikal verschiebt. Da die Linse horizontal noch nicht auf den Laserstrahl zentriert ist, ist nur ein grober Bereich erkennbar, in dem man ein Maximum vermuten kann. (Hier zwischen den Positionen 0,03 mm und 0,3 mm)

Für die erste horizontale Justierung wurde dementsprechend die vertikale Position 0,17 mm gewählt. Abb. 3.18 zeigt die horizontalen Durchläufe. Beim ersten Durchlauf deutet sich ein Maximum bei -0,09 mm an. Auf diesen Wert eingestellt wurde die Linse noch einmal in der Vertikalen variiert. Beim zweiten Durchlauf in Abb. 3.17 erkennt man dann tatsächlich ein eindeutiges Maximum bei 0,26 mm. Hervorzuheben ist hierbei, dass sich diese Position deutlich von der ersten gemessenen unterscheidet. Ein Wiederholen der Messungen ist also unabdingbar, um die ideale Position der Linsen zu ermitteln. So wurde auch die Horizontale ein weiteres mal durchlaufen. Abb. 3.18 zeigt ein Maximum bei 0,10 mm. Zu bedenken ist hierbei, dass eine Verschiebung der Linse um 0,02 mm etwa einer $1/16$ Umdrehung der Justierschraube entspricht. So kann man bei der absoluten Linsenposition durchaus einen Fehler von etwa 0,02 mm annehmen. Relevant ist jedoch nicht die absolute Position, sondern die Tatsache, dass die Linsen so eingestellt werden, dass der

Photomultiplier die größte Rate misst, was bedeutet, dass die Linsen im Zentrum des Laserstrahls liegen.

In derselben Art und Weise wurde die zweite Linse justiert. Wegen der durch die Aufweitung abgeschwächten Intensität konnte auf den Einsatz von Filtern verzichtet werden.

Bedenkt man, dass für jeden Schritt zwei Messungen über 100 s durchgeführt werden und die Black-Box geöffnet und wieder geschlossen werden muss, erkennt man den enormen Zeitaufwand, den diese Justierung mit sich bringt. Eine einfachere Justierung ist leider nicht möglich, da das Laserlicht durch die starke Aufweitung bereits wenige Zentimeter nach Durchlaufen einer Linse auch auf weißem Papier nicht mehr zu erkennen ist.

3.2.4 Bestimmung der Intensitätsverteilung

Um die Intensitätsverteilung des aufgeweiteten Laserstrahls zu ermitteln, wurde der 1-Zoll PMT 9111WA von ETL verwendet. Mithilfe des in x- und y-Richtung verschiebbaren Halters konnte der Photomultiplier an verschiedene Positionen gebracht werden und die Rate dort gemessen werden. Der Photomultiplier wurde dazu in einem Meter Entfernung von der ersten Linse positioniert, genau an der Stelle, an der ein Winston-Cone positioniert wäre, der auf einen 12-Zoll-PMT angebracht ist.

Leider kann der Verschiebereiter, auf dem der PMT-Halter befestigt ist, in horizontaler Richtung nur um ± 60 mm verschoben werden. Eine Messung zu weiter außen liegenden Punkten ist zwar möglich, jedoch leidet bei diesen Messungen die Genauigkeit. Ein Grund dafür liegt darin, dass die vertikale Position neu eingestellt werden muss und der Abstand zur Optik evtl. nicht mehr genau so eingestellt werden kann. Desweiteren kann der Verschiebereiter bis zu einer Auslenkung von ± 160 mm an die optische Bank angelehnt werden und somit eine Schrägstellung des PMTs zur optischen Achse ausgeschlossen werden. Bei größeren Auslenkungen ist dies jedoch auch nicht mehr gewährleistet. Um Messungen in diesen Bereichen zuverlässig durchzuführen, wäre die Konstruktion eines anderen PMT-Halters nötig, der auch bis zu horizontalen Positionen verschoben werden kann, die weit entfernt von der optischen Achse liegen. Bei den folgenden Messungen hat die horizontale (x-)Achse den Nullpunkt an der Position des Laserstrahls. Die vertikale (y-)Achse wird der Einfachheit halber an der Höhe der oberen Kante des PMT-Halters zum Tisch ausgerichtet, der PMT ist demnach bei einem y-Wert von 330 mm auf Laserhöhe. Das Vorzeichen der x-Achse ist so definiert, dass vom Laser aus gesehen die Positionen links vom Zentrum negativ sind.

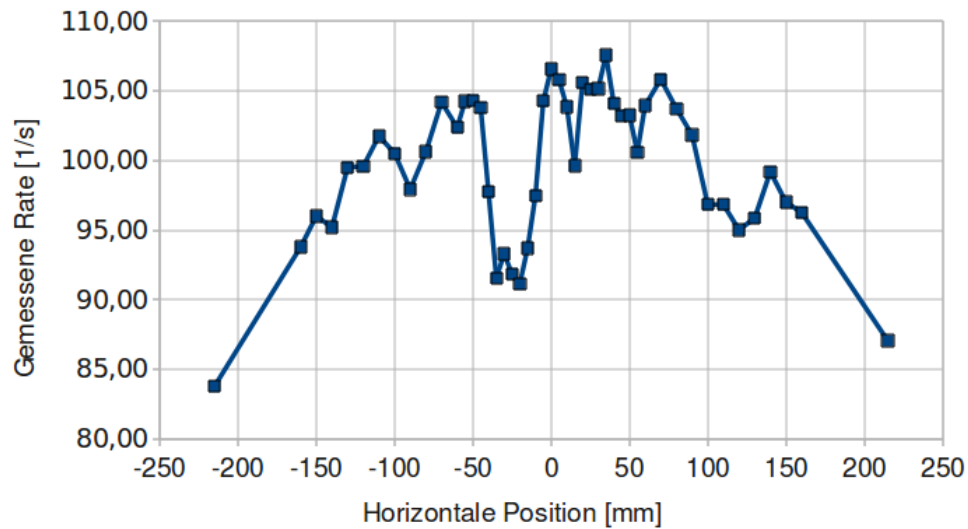


Abbildung 3.19: Horizontale Homogenitätsverteilung der Aufgeweiteten Optik auf Höhe des Laserstrahls: Hier sieht man einerseits, dass die Intensität nach außen hin um ca. 18 % abnimmt, andererseits fällt ein Intensitätsminimum um die Position 20mm auf. Dieses Minimum könnte an einem Staubkorn auf einer der Linsen liegen.

Horizontale Intensitätsverteilung auf Laserhöhe

Die Intensitätsverteilung wurde auf der Höhe des Laserstrahls in horizontaler Richtung bis zu einer Auslenkung von ± 60 mm vom Zentrum weg in Abständen von 5 mm, bis zu einer Auslenkung von ± 160 mm in 10-mm-Abständen gemessen, weiter außen nur noch je eine Messung bei ± 215 mm. (Abb. 3.19) Man erkennt, dass ab einer Auslenkung von etwa 100 mm die Intensität beginnt abzunehmen. Bei einer Auslenkung von 160 mm ist sie bereits um 10 % gegenüber der Intensität im Zentrum abgefallen, bei 215 mm, dem Rand des Bereiches, den wir ausleuchten wollen, ist die Intensität sogar um 18 % zurückgegangen. Der letzte Wert ist jedoch mit Vorsicht zu genießen, da trotz besonderer Sorgfalt nicht ausgeschlossen werden kann, dass hier eine Verdrehung oder ein veränderter Abstand zur Optik zu viel Einfluss nehmen. Ein Indiz für die Korrektheit beider Werte ist jedoch, dass die Differenz der letzten zuverlässig gemessenen Werte (bei ± 160 mm) zu den Werten bei ± 215 mm auf beiden Seiten des Zentrums gleich groß ist.

Besonders auffällig ist ein Abfall der Intensität im Bereich von -10 mm und -50 mm um bis zu 13 %. Eine Interferenzerscheinung ist hier jedoch ausgeschlossen, einerseits, da dies offensichtlich das einzige Minimum darstellt und andererseits, da die verwendete Blende im mm-Bereich liegt und damit zu groß ist, um Interferenzen zuzulassen. Eine mögliche Erklärung wäre eine Verunreinigung einer der optischen

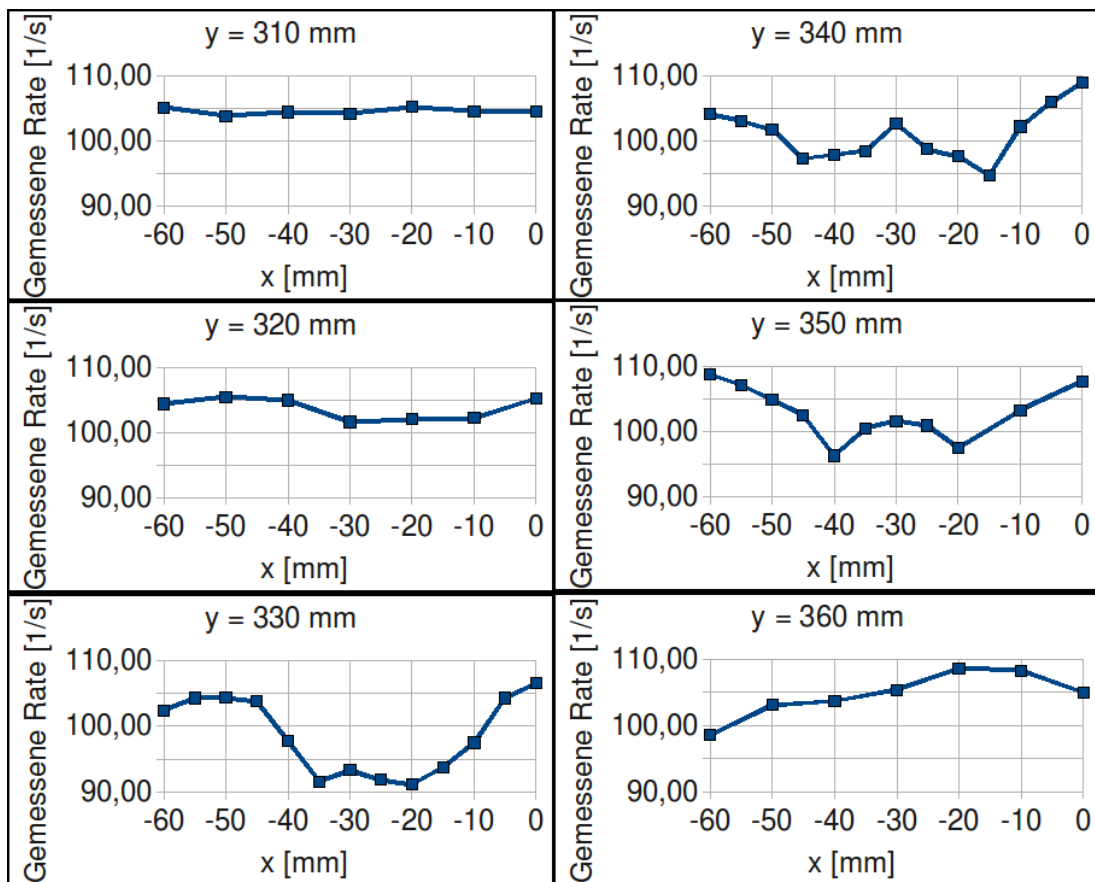


Abbildung 3.20: Horizontale Intensitätsverteilungen bei verschiedenen vertikalen Positionen um das gemessene Intensitätsminimum: Man erkennt, dass das Minimum bei den vertikalen Positionen bei 310 mm und 360 mm nicht mehr vorhanden ist.

Elemente, also entweder der Linsen oder des Lasers.

Untersuchung des Minimums in der Intensitätsverteilung

Um diesen Effekt genauer zu untersuchen wurden bei den vertikalen Positionen bei 310 mm, 320 mm, 340 mm, 350 mm und 360 mm weitere Messungen im horizontalen Bereich von -60 mm bis 0 durchgeführt. In Abb. 3.20 sind diese Messungen graphisch dargestellt. Man sieht deutlich, dass das Minimum bei höherer vertikaler Auslenkung verschwindet, also ein lokales Phänomen ist. Der Verlauf bei $y=340$ und $y=350$ deutet darauf hin, dass es sich um zwei nebeneinander liegende Verunreinigungen handeln könnte. Konkret könnten dies zwei Staubkörner sein oder aber auch ein Kratzer, der unterschiedlich tief ist.

Über den Strahlensatz lässt sich die Größe einer möglichen Verunreinigung berechnen, wobei zu unterscheiden ist, ob sich diese auf der zweiten Linse oder auf der ersten bzw. auf dem Laser befindet. Befindet sich die Verunreinigung auf der ersten Linse oder auf dem Laser, kann man dessen Größe durch Auflösen von Gleichung 3.5 nach r abschätzen:

$$r = \frac{Rf^2}{ad + d^2 + af + 2df - f^2} \quad (3.7)$$

R entspricht dabei der gemessenen Ausdehnung der Verunreinigung. Setzt man die Werte ein, so wäre die Verunreinigung $1,3 \mu\text{m} \times 1,0 \mu\text{m}$ groß. Dieser Wert liegt im unteren Bereich der typischen Größenordnung für Staubkörner von etwa $1\text{-}10 \mu\text{m}$. [23]

Befindet sich die Verunreinigung auf der zweiten Linse, kann man die ursprüngliche Größe durch Auflösen von Gleichung 3.4 nach ρ ermitteln:

$$\rho = \frac{R}{\frac{a-d}{f} - 1} \quad (3.8)$$

Auch hier ist R die gemessene Ausdehnung der Verunreinigung. Auf der zweiten Linse wäre die Verunreinigung etwa $46 \mu\text{m} \times 34 \mu\text{m}$ groß. Dieser Wert könnte passend für ein Partikel von Flugasche oder Pollen sein. [23] Es ist durchaus möglich, dass solche Teilchen über die Kleidung ins Labor gelangt sind. In dieser Größenordnung kann man aber auch annehmen, dass ein Kratzer die Ursache der Verunreinigung ist.

Vertikale Intensitätsverteilung auf der horizontalen Laserposition

Desweiteren wurden an der horizontal zentrierten Position Messungen in den vertikalen Positionen von 280 mm bis 460 mm in 10-mm-Schritten durchgeführt. Messungen bei höheren und niedrigeren vertikalen Positionen waren nicht möglich, da man einerseits schon am oberen Ende der Black-Box angelangt war und andererseits am unteren Ende des PMT-Halters.

Abb. 3.21 zeigt die Intensitätsverteilung bei Durchlaufen der vertikalen Achse. Man erkennt, dass die Intensität zunimmt, wenn man sich der Decke der Black-Box nähert. An der Position bei 460 mm liegt der Wert um 13 % über dem im Zentrum des Laserstrahls. An der untersten gemessenen Position bei 280 mm beträgt die Intensität immer noch 97 % des zentralen Wertes und liegt damit noch im selben Bereich. Ein deutlicher Anstieg der Intensität ist ab der Position bei 400

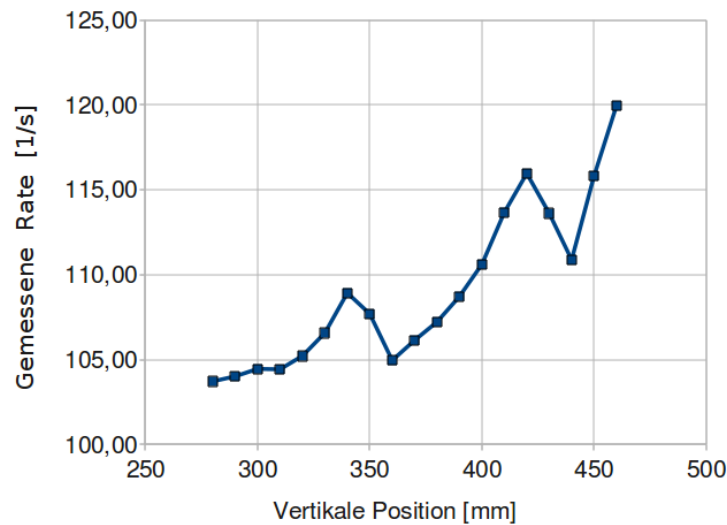


Abbildung 3.21: Vertikale Intensitätsverteilung der aufgeweiteten Optik auf der horizontalen Position des Laserstrahls: Erstaunlicherweise sieht man hier einen Anstieg der Rate, wenn man sich der Decke der Black-Box nähert. Eine mögliche Ursache können optische Reflexionen an der Decke sein, die am Tisch nicht stattfinden, weil dieser mit einem schwarzen Lack gestrichen wurde.

mm zu erkennen, also 70 mm über dem Zentrum des Laserstrahls. In der anderen Richtung konnte leider nicht so nah an die Tischplatte heran gemessen werden. Eine mögliche Erklärung für das Ansteigen der Intensität zum Deckel der Black-Box hin könnten optische Reflexionen sein. Es ist damit also nicht auszuschließen, dass dieser Effekt auch bei Positionen nahe des Tisches eintritt, wobei der Tisch mit einem schwarzen matten Lack gestrichen wurde und somit weniger Reflexionen verursachen sollte.

Eventuell ist in Erwägung zu ziehen, den Deckel oder sogar die komplette Black-Box innen mit einem solchen Lack zu versehen. Andererseits werden für die konkreten Messungen zur Charakterisierung der Photomultiplier noch Filter eingebaut, wodurch die Intensität nochmal stark zurückgeht und dieses Problem somit eventuell obsolet wird. Eine Messung dazu wäre aufgrund der geringen Raten extrem zeitaufwändig, da nur wenige Messungen pro Tag durchgeführt werden könnten, um die nötige Statistik zu erhalten.

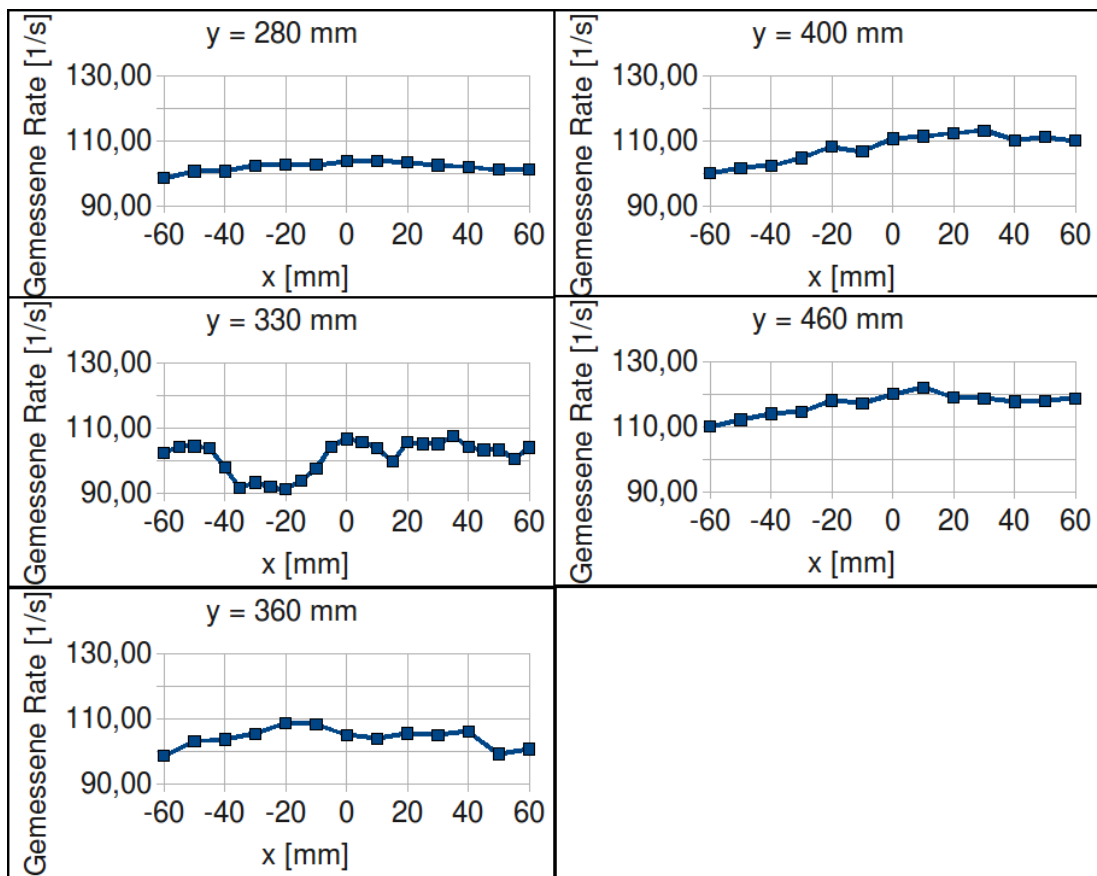


Abbildung 3.22: Horizontale Intensitätsverteilung der aufgeweiteten Optik auf der horizontalen Position des Laserstrahls bei verschiedenen Laserhöhen: Hier sieht man, dass die Intensitäten bei den beiden hohen Positionen bei 400 mm und 460 mm zur rechten Seite hin zunehmen und zur linken hin abnehmen, wohingegen bei den Positionen 280 mm und 360 mm die Intensitäten zu beiden Seiten hin abnehmen. Bei einer Höhe von 330 mm (Strahlhöhe) sieht man nur zur rechten Seite hin eine Abnahme, bei der linken Seite ist keine Einschätzung möglich, da das Minimum Verunreinigung hier die Werte verfälscht.

Horizontale Intensitätsverteilungen bei verschiedenen Laserhöhen

An den vertikalen Positionen bei 280 mm, 330 mm, 360 mm, 400 mm und 460 mm wurden außerdem noch die horizontalen Intensitätsverteilungen im Bereich von $\pm 60\text{ mm}$ ermittelt.

In Abb. 3.22 erkennt man bei den Positionen bei 280 mm und 360 mm, dass die Intensitäten bei beiden Seiten nach außen hin abfallen, was aufgrund des gaußför-

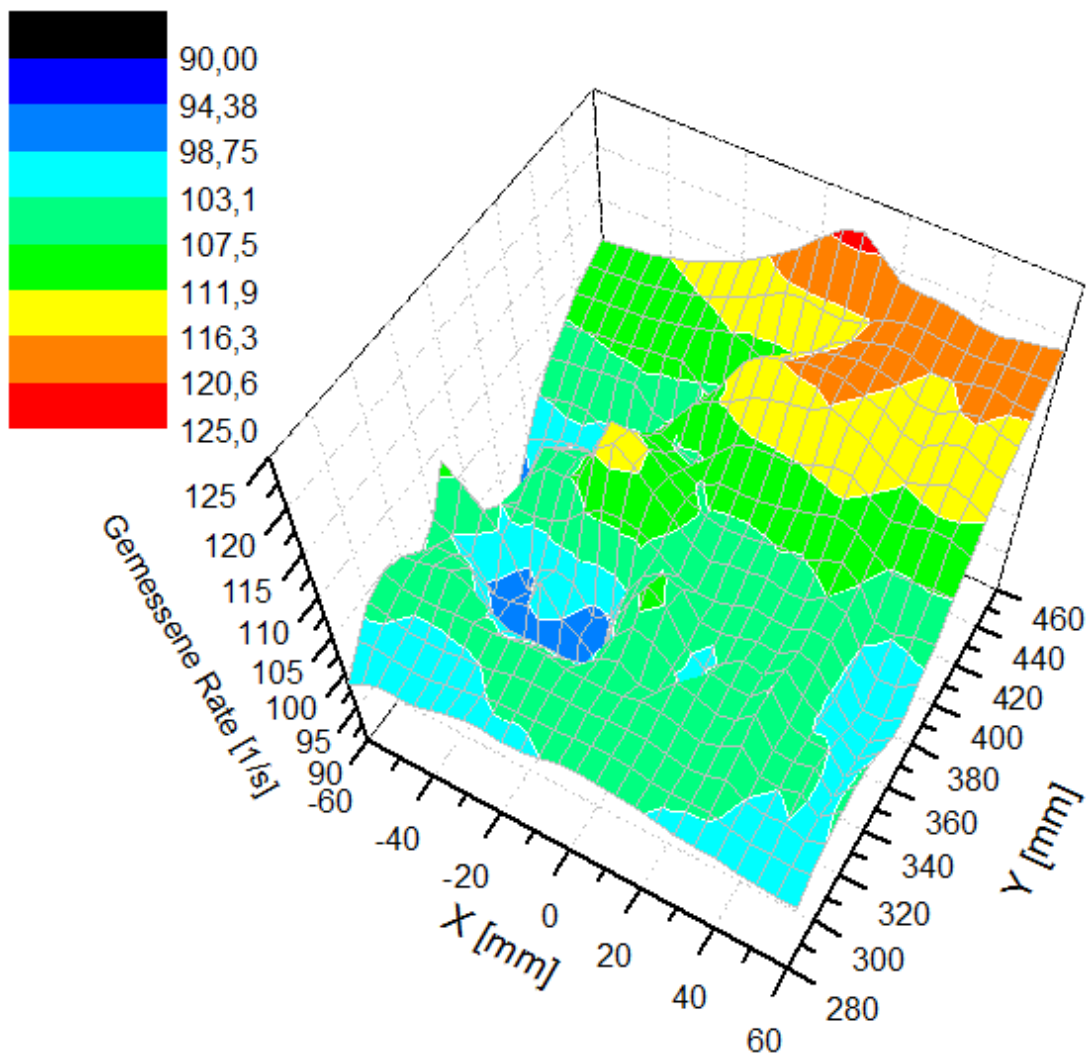


Abbildung 3.23: Dreidimensionale Darstellung der Intensitätsverteilung des aufgeweiteten Laserstrahls: Man sieht hier die Verunreinigung in ovaler Form (dunkelblau) und den Anstieg der Intensität zum Deckel der Black-Box hin.

migen Intensitätsprofils des Lasers so auch erwartet wird. Bei den Positionen 400 mm und 460 mm, die sich nahe am Deckel befinden, sieht man jedoch, dass die Intensitäten nur nach links abfallen und nach rechts ansteigen. Dieser Effekt könnte sowohl in einer Inhomogenität des Laserstrahls liegen, als auch an Reflexionen an den Außenwänden der Black-Box.

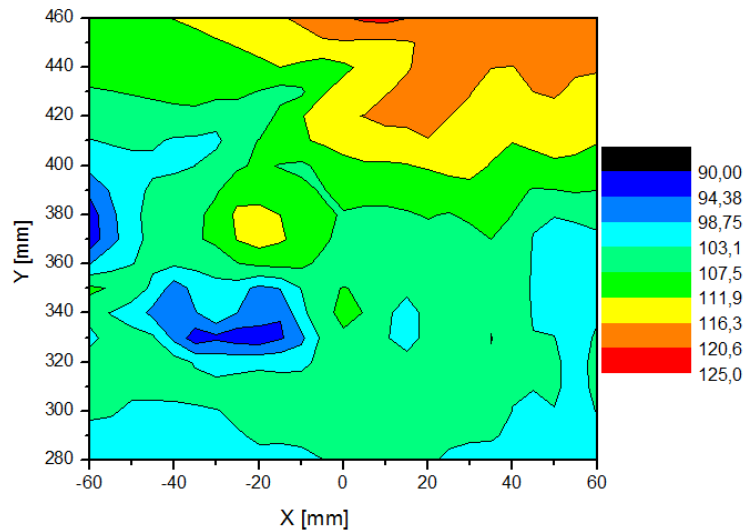


Abbildung 3.24: Konturdiagramm der Intensitätsverteilung des aufgeweiteten Laserstrahls: Hier sieht man etwas deutlicher die Form der Verunreinigung (dunkelblau) und ebenso den Intensitätsanstieg zum Deckel der Black-Box hin.

Darstellung aller Messungen in einem 3-D-Diagramm

Fasst man alle Daten zusammen und lässt die fehlenden Lücken mit dem Computerprogramm Origin 8.0 interpolieren, kann man in einem dreidimensionalen Diagramm die Intensitätsverteilung anschaulich darstellen. Dies ist in Abbildung 3.23 zu sehen, man erkennt das Minimum der Verunreinigung (dunkelblau) und den Anstieg zum Deckel der Black-Box hin.

Nicht ganz so elegant, aber dafür etwas deutlicher zeigt dies auch Abb. 3.23. Ob es sich bei der Verunreinigung um ein oder zwei Staubkörner handelt oder ob der dunkelblaue Streifen einen Kratzer andeutet, ist nicht abschließend zu klären. Diese graphischen Darstellungen sollten allerdings nicht zu "wörtlich genommen" werden, da sie, wie bereits erwähnt, auch das Ergebnis von Interpolationen sind und die Wirklichkeit in manchen Bereichen durchaus anders aussehen könnte. Dennoch geben sie einen anschaulichen Eindruck über die Intensitätsverteilung, die sich durch die Aufweitung durch die Linsen ergibt.

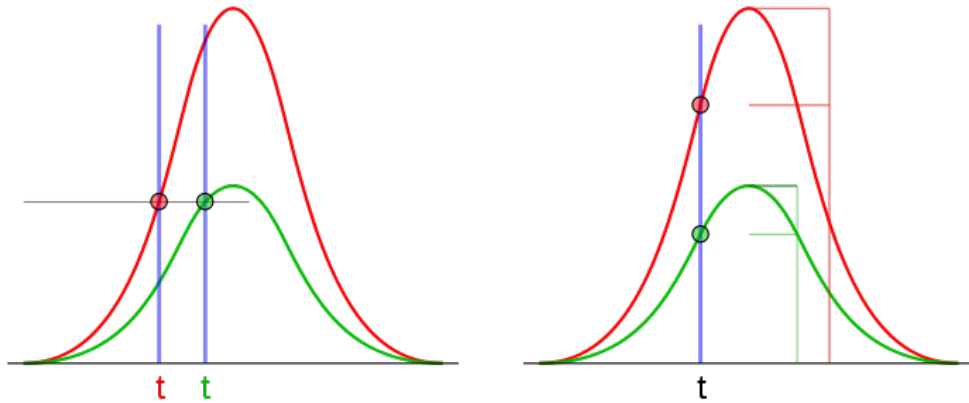


Abbildung 3.25: Vergleich von Schwellwertauslösung (links) und Constant-Fraction-Auslösung (rechts). [24]

3.3 Messungen

3.3.1 Transit-Time-Spread

Um die Tauglichkeit des neuen Aufbaus zu überprüfen, wurde eine Messung zur Transit-Time-Spread durchgeführt. Dabei wurde der 8-Zoll-PMT R5912 von Hamamatsu in einem Meter Entfernung von der ersten Linse im Zentrum des aufgeweiteten Laserstrahls platziert. Der Laserstrahl wurde durch einen Filter mit einer optischen Dichte von 3 so stark abgeschwächt, dass der Photomultiplier bei 0,074 % der Laserpulse ein Signal ausgibt.

Bei einer angelegten Spannung von +1.425 V wurden 100.000 Pulse aufgenommen, davon waren jedoch nur etwa 50.000 verwendbar, da die restlichen Punkte mit außergewöhnlicher Häufigkeit im Vergleich zum Lasertrigger zu einem sehr frühen Zeitpunkt registriert wurden. Die Ursache für dieses Problem liegt vermutlich in einem Wackelkontakt beim Triggerausgang des Lasers. Für weitere Messungen muss dieser Anschluss erst repariert werden.

Die Auswertung der vertrauenswürdigen 50.000 Pulse ergab für die Transit-Time-Spread einen Wert von 1,83 ns. Dieser Wert liegt unter dem bereits vorher am PMT-Teststand für Borexino in den Laboratori Nazionali del Gran Sasso gemessenen Wert von 2,04 ns. Die Diskrepanz dieser Werte lässt sich durch die Verwendung unterschiedlicher Diskriminatoren erklären. In unserem Aufbau wird ein Constant-Fraction-Diskriminator verwendet, der die Pulse zu dem Zeitpunkt registriert, an



Abbildung 3.26: Bild des 3-Zoll-PMTs R6091 von Hamamatsu [22]

dem sie einen bestimmten Anteil der Amplitude erreicht. [25] Bei dem Aufbau in Gran Sasso wurde ein Diskriminator mit Schwellenwertauslösung verwendet, der unabhängig von der Amplitude an einem fest eingestellten Schwellwert einen Puls registriert. (Abb. 3.25) Bei Pulsen unterschiedlicher Amplituden führt die Schwellenwertauslösung zu einer größeren Transit-Time-Spread.

3.3.2 Dunkelrate verschiedener Photomultiplier

Die Dunkelrate ist ein wichtiges Auswahlkriterium für die Photomultiplier, die später bei LENA eingesetzt werden sollen. Ziel ist es dabei natürlich, einen PMT auszuwählen, der eine möglichst geringe Dunkelrate pro Oberfläche hat. Aber auch für alle anderen Messungen, die der Charakterisierung von Photomultipliern dienen, kann sie problematisch sein. So ist es wichtig zu wissen, wie lange man bis zum Beginn einer Messung warten muss, wenn der PMT Licht gesehen hat.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Abhängigkeit von der angelegten Spannung. Die Dunkelrate liefert hier eines von mehreren Entscheidungskriterien für die Auswahl der Spannung, die bei LENA angelegt wird. Untersucht wurden hier die PMT-Modelle R6091 (3 Zoll), R5912 (8 Zoll) und R7081 (10 Zoll) der Firma Hamamatsu. Die verschiedenen Spannungen wurden dabei von der niedrigsten zur höchsten hin durchlaufen. Alle Messungen zur Dunkelrate wurden an jedem Datenpunkt zweimal mit einer Dauer von 100 Sekunden durchgeführt.

Hamamatsu R6091 (3 Zoll)

Als kleinster der drei gemessenen Modelle erwartet man bei dem 3-Zoll-Modell (Abb. 3.26) auch die geringste Dunkelrate. Um zu ermitteln wie sich die Dunkelrate

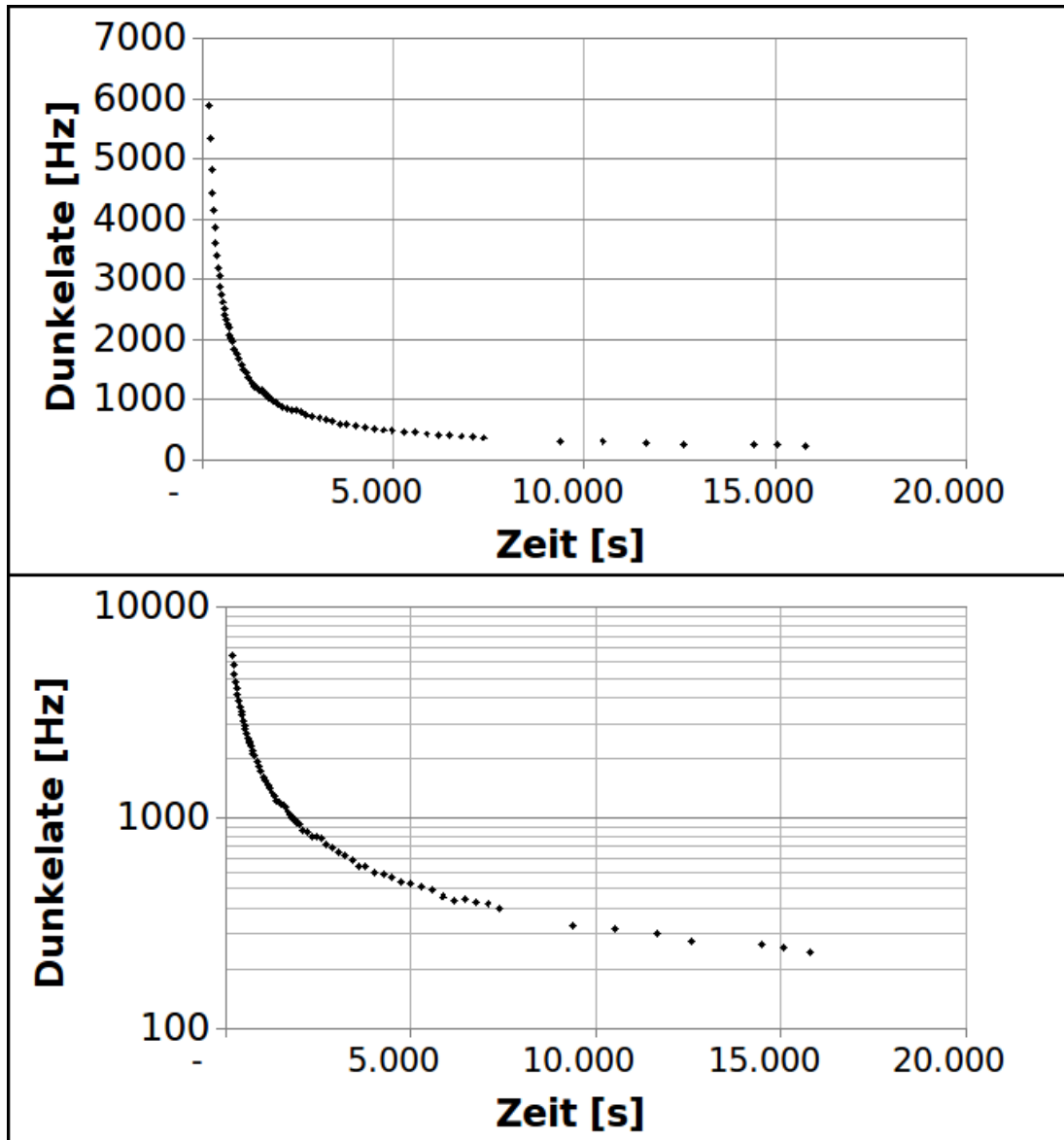


Abbildung 3.27: Zeitliche Abnahme der Dunkelrate nach Beleuchtung beim 3-Zoll PMT R6091 von Hamamatsu: Auch wenn es in der dekadischen Skalierung (oben) so aussieht, als läge ein exponentieller Verlauf vor, so wird dies durch die logarithmische Skalierung (unten) widerlegt.

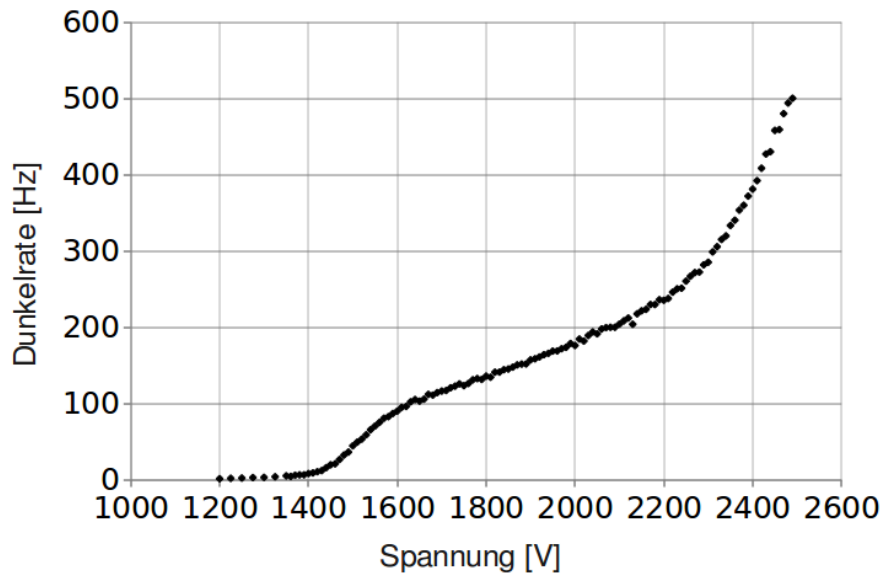


Abbildung 3.28: Abhängigkeit der Dunkelrate von der angelegten Spannung beim 3-Zoll PMT R6091 von Hamamatsu: Man sieht hier, dass die Dunkelrate im Bereich von etwa 1630 V bis 2130 V linear mit der Spannung ansteigt.

entwickelt, nachdem ein PMT Licht ausgesetzt worden war, wurde die Black-Box für 15 Minuten geöffnet und das Licht im Labor ungedimmt eingeschaltet. Dabei wurde eine Spannung von + 1.760 V angelegt, was einem Verstärkungsfaktor von 10^7 entspricht. [26]

Abbildung 3.27 zeigt den zeitlichen Verlauf der Dunkelrate nach Schließen der Black-Box dekadisch und logarithmisch skaliert. Sieht es bei der dekadischen Skalierung noch so aus, als würde die Rate exponentiell mit der Zeit abfallen, erkennt man jedoch bei der logarithmischen Skalierung, dass dem nicht so ist. Eine analytische Angabe des Abfalls ist hier leider nicht möglich.

Da die Dunkelrate selbst 4 Stunden und 20 Minuten nach Schließen der Black-Box immer noch doppelt so hoch ist als nach einigen Tagen in Dunkelheit sollte man nach einer starken Beleuchtung eines Photomultipliers für zuverlässige Messungen mindestens einen Tag warten. Selbst nach 22 Stunden und 30 Minuten betrug die Dunkelrate immer noch 141,0 Hz und war somit immer noch leicht erhöht. Zum Vergleich: Nach einigen Tagen beträgt sie nur noch etwa 125 Hz.

Bei der Messung der Abhängigkeit der Dunkelrate von der angelegten Spannung war der Photomultiplier fünf Tage lang im Dunkeln, so dass kein zeitlicher Abfall



Abbildung 3.29: Bild des 8-Zoll-PMTs R5912 von Hamamatsu [22]

der Rate mehr vorhanden war und somit die Messungen nicht verfälschen konnte. Abbildung 3.28 stellt die genommenen Daten graphisch dar. Man erkennt einen linearen Anstieg ab einer Schwelle von etwa 1.430 V, ab etwa 1.690 V verringert sich die Steigung und der Verlauf wird im Bereich von 1.630 V - 2.130 V wieder linear, ehe die Dunkelrate mit steigender Spannung immer stärker ansteigt.

Hamamatsu R5912 (8 Zoll)

Für die Messung des Abfalls der Dunkelrate dieses 8-Zoll-Modells (Abb. 3.29) wurde er acht Minuten lang dem vollen Laborlicht ausgesetzt und anschließend bei einer Spannung von + 1.425 V gemessen. Diese Spannung entspricht wiederum einem Verstärkungsfaktor von 10^7 . [26] In Abb. 3.30 sieht man auch hier, dass der Verlauf nicht exponentiell ist. Bemerkenswert ist, dass nach zweieinhalb Stunden der Wert der Dunkelrate bereits auf etwa 1.000 Hz abgesunken ist, wenn man bedenkt, dass der Wert nach einigen Tagen Dunkelheit bei etwa 870 Hz liegt. Dieses Modell erholt sich also schon nach wenigen Stunden, wenn es viel Licht gesehen hat.

Betrachtet man die Abhängigkeit der Dunkelrate von der angelegten Spannung, so erkennt man zunächst einen ähnlichen Verlauf wie ein 3-Zoll-Modell. (Abb. 3.31) Ab einer Spannung von etwa 1.100 V beginnt der Dunkelrate zu steigen. Nach Durchlaufen eines linearen Bereichs von etwa 1.200 V bis 1.300 V verringert sich die Steigung wieder und ab 1400 V bleibt sie konstant bis zu der Spannung, mit der der Photomultiplier maximal betrieben werden kann. Im Unterschied zum R6091 erhöht sich die Steigung zumindest in dem hier messbaren Bereich nicht mehr.

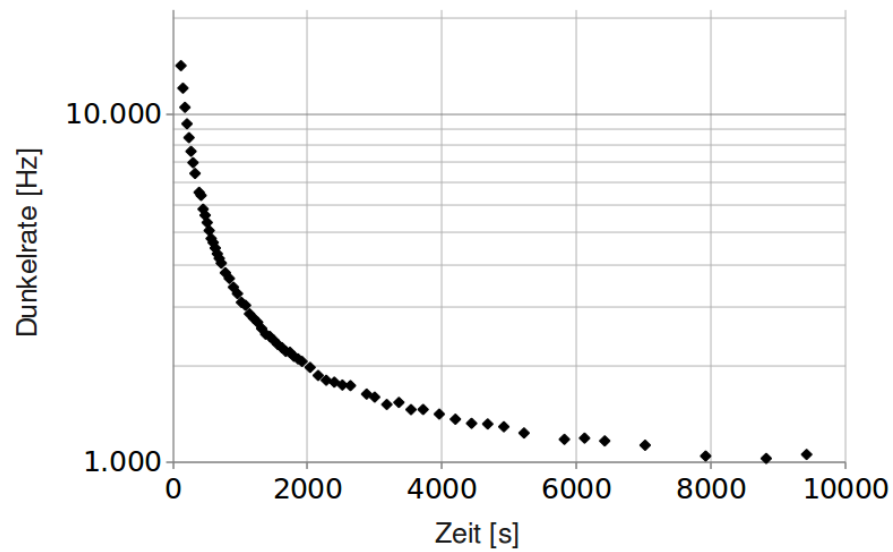


Abbildung 3.30: Zeitliche Abnahme der Dunkelrate nach Beleuchtung beim 8-Zoll PMT R5912 von Hamamatsu: Auch hier sieht man, dass der Abfall der Dunkelrate nicht exponentiell ist.

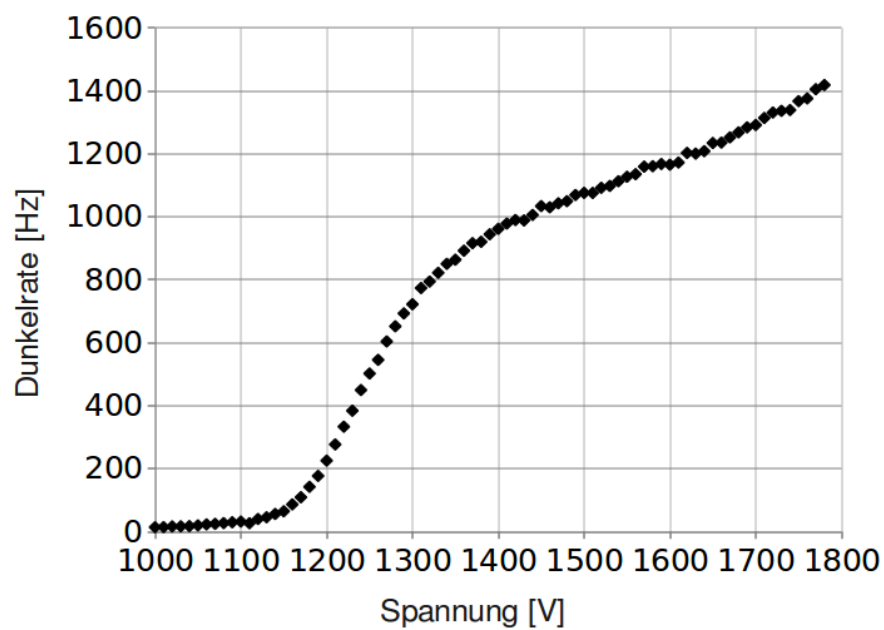


Abbildung 3.31: Abhängigkeit der Dunkelrate von der angelegten Spannung beim 8-Zoll PMT R5912 von Hamamatsu: Man sieht hier, dass die Dunkelrate im Bereich ab etwa 1.400 V linear mit der Spannung ansteigt.

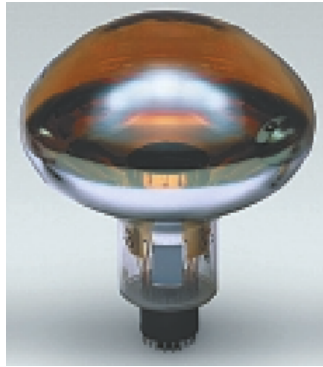


Abbildung 3.32: Bild des 10-Zoll PMTs R7081 von Hamamatsu [22]

Hamamatsu R7081 (10 Zoll)

Um den Abfall der Dunkelrate nach Beleuchtung zu bestimmen, wurde dieser 10-Zoll-PMT (Abb. 3.32) fünf Minuten lang ungedimmtem Laborlicht ausgesetzt und danach mit einer Spannung von $+1.520\text{ V}$ betrieben, was bei diesem Photomultiplier wieder einem Verstärkungsfaktor von 10^7 entspricht. [26] Man sieht in Abb. 3.33, dass schon diese kurze Beleuchtungszeit sehr hohe Raten zu Folge hat und selbst nach knapp drei Stunden liegt der Wert für die Dunkelrate mit 2.412 Hz immer noch doppelt so hoch, wie der Wert bei dieser Spannung nach einigen Tagen in Dunkelheit. Dieses Modell scheint also deutlich stärker auf Beleuchtung zu reagieren als die 8-Zoll-Variante. Hier muss man ähnlich wie beim R6091-Modell nach größerer Lichteinwirkung mindestens einen Tag warten, bevor zuverlässige Messungen möglich sind.

Bei den spannungsabhängigen Messungen erhält man sehr ähnliche Ergebnisse wie bei der 8-Zoll-Variante. (Abb. 3.34) Die Werte für die Dunkelrate liegen dabei etwas höher und der Übergang von dem ersten linear mit der Spannung ansteigenden Abschnitt zu dem zweiten ist etwas kürzer und schärfer.

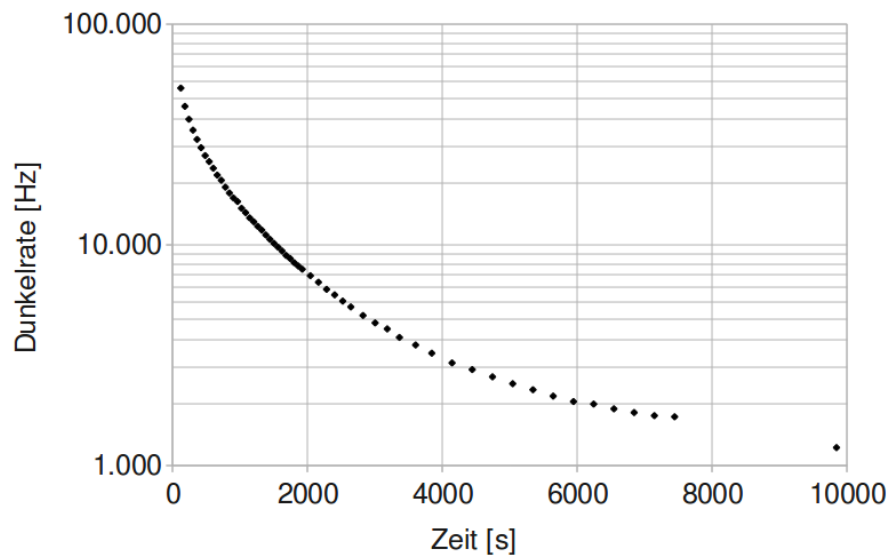


Abbildung 3.33: Zeitliche Abnahme der Dunkelrate nach Beleuchtung beim 10-Zoll PMT R7081 von Hamamatsu: Auch hier sieht man, dass der Abfall der Dunkelrate nicht exponentiell ist.

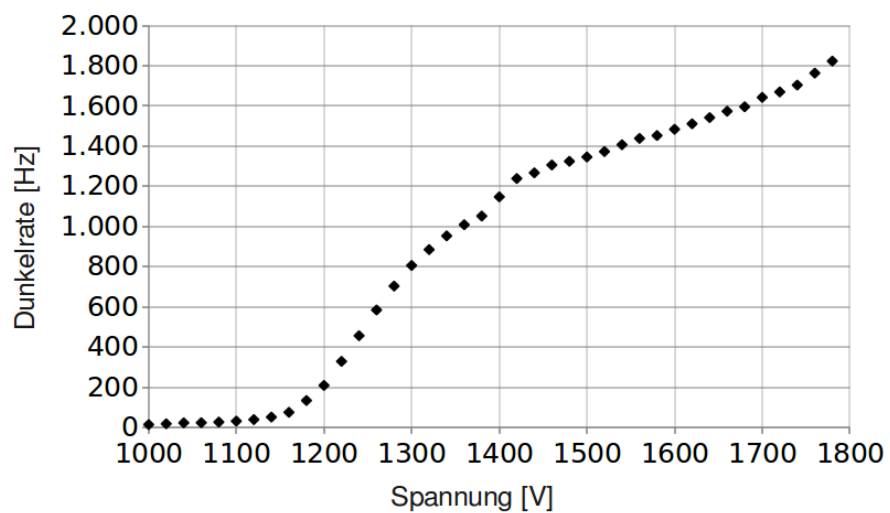


Abbildung 3.34: Abhängigkeit der Dunkelrate von der angelegten Spannung beim 10-Zoll PMT R7081 von Hamamatsu: Man sieht hier, dass die Dunkelrate im Bereich ab etwa 1420 V linear mit der Spannung ansteigt.

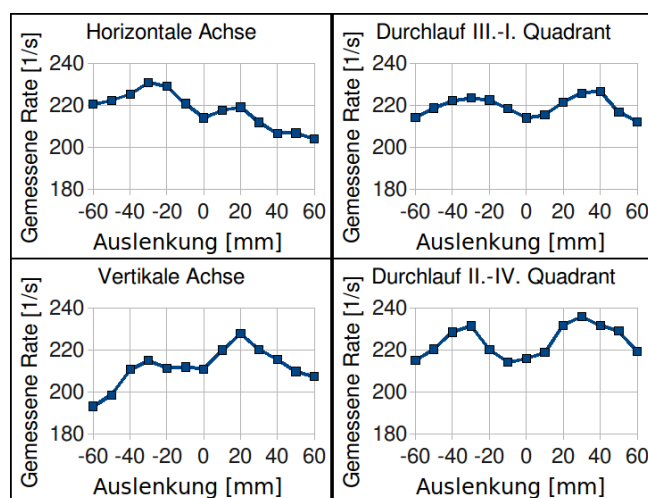


Abbildung 3.35: Man sieht hier, dass die Homogenität über den PMT verteilt um etwa 20 % variiert.

3.3.3 Homogenität der Nachweiswahrscheinlichkeit eines PMTs

Um zu testen, wie homogen Photomultiplier über ihre Fläche verteilt arbeiten, wurde der 8-Zoll-Photomultiplier R5912 von Hamamatsu auf dem Verschieberei- ter befestigt und vor ihm eine Blende positioniert. Durch Verschiebung des PMTs trifft das Licht, das durch die Blende geht, immer wieder auf einen anderen Teil des PMTs.

Bei den Messungen wurde der PMT mit einer Spannung von + 1.500 V betrieben, vor dem PMT war eine 9-mm-Blende angebracht. Der PMT war zunächst so ausgerichtet, dass die Schrift, die sich hinten am Spannungsteiler befindet, in der richtigen Orientierung war. In den Diagrammen ist die x-Achse also die Achse, auf der sich die Schrift auf dem Spannungsteiler befindet. Es wurden in horizontaler, vertikaler und in den beiden diagonalen Richtungen Messreihen bei einer Auslenkung von bis zu ± 60 mm durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde der PMT gedreht und in horizontaler Richtung um ± 60 mm in 10-mm-Schritten verschoben. In Abb. 3.35 sieht man die gemessenen Homogenitätsverteilungen. Hier ist noch kein systematischer Verlauf zu erkennen.

In Abb. 3.36 sind die genommenen Daten in einem Konturdiagramm dargestellt. Die fehlenden Daten sind dabei mit dem Computerprogramm Origin 8.5 interpoliert worden. Man erkennt hier zwei vertikale Bänder mit höherer Intensität bei ± 30 mm Abstand vom Zentrum. Mit Ausnahme der linken Seite werden zu allen Ecken hin die Intensitäten niedriger.

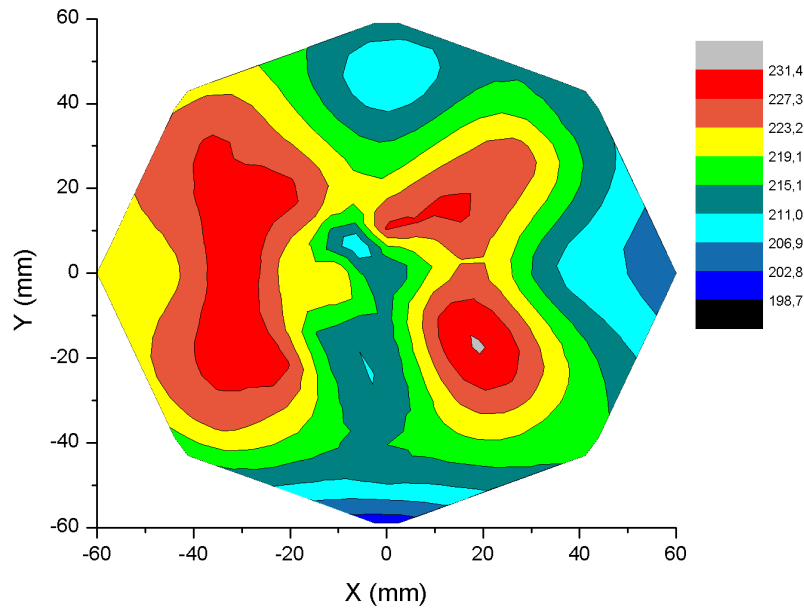


Abbildung 3.36: Konturdiagramm der Homogenitätsverteilung des 8-Zoll-PMTs R5912 von Hamamatsu: Man erkennt hier zwei vertikale Bänder mit höherer Intensität bei ± 30 mm Abstand vom Zentrum.

3.4 Tauglichkeit und Verbesserungsmöglichkeiten

Die Messungen zur Homogenität zeigen, dass der Ansatz mit Kugellinsen grundsätzlich in die richtige Richtung geht. Obwohl die Intensitäten um etwa 20 % variieren liegen sie noch in der selben Größenordnung. Im Gegensatz dazu könnte der Laser ohne vorgeschalteter Optik nur ein paar Quadratmillimeter eines Photomultipliers beleuchten. Eine völlig homogene Ausleuchtung eines so großen Bereiches wird sich wohl nur schwer verwirklichen lassen, jedoch kann man versuchen, das erreichte Ergebnis weiter zu optimieren. Der erste Ansatz dazu könnte sein, die Linsen durch Stickstoff von möglichen Staubpartikeln zu befreien oder sie mit ethanol zu säubern. Man sollte die einzelnen Linsen auch durch andere des gleichen Modells ersetzen, um ausschließen zu können, dass eine Beschädigung, wie etwa ein Kratzer, vorliegt.

Eine bessere Homogenität lässt sich natürlich einfach dadurch erreichen, dass der Abstand der Linsen vergrößert wird, damit der Vergrößerungsfaktor erhöht wird und ein kleinerer, möglicherweise homogenerer Ausschnitt des Lasers auf den Detektor trifft. Nicht ungenutzt sollte man außerdem die Möglichkeit lassen, die 1-mm-Kugellinsen und die 1-mm-GRIN-Linsen zu testen. Vor allem die kleinen Kugellinsen bieten durch ihre geringe Brennweite von 0,55 mm noch enormes Po-

tential.

Dieser Aufbau würde durch Einbau in eine längere, antireflexionsbeschichtete Black-Box noch viel mehr Möglichkeiten bieten. Man könnte dann die optischen Elemente und den Detektor gerade, und damit symmetrisch in die Kiste einbauen und hätte selbst bei vorhandenen Reflexionen keine asymmetrischen Phänomene.

Kapitel 4

Materialstudie zur Beschichtung von Winston Cones

Das Material, mit dem die Innenseite der Winston-Cones beschichtet werden soll, muss zwei wichtige Eigenschaften erfüllen. Einerseits muss es im Wellenlängenbereich von 420 nm sehr gut reflektieren, auf der anderen Seite muss es den Flüssigszintillatoren gegenüber inert sein. Darüber hinaus wären eine einfache Handhabung und ein günstiger Preis natürlich erstrebenswert.

Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel wird eine Studie über die Verträglichkeit der selbstklebenden Reflexionsfolie VM 2000 der Firma 3M mit den Flüssigszintillatoren LAB, PXE und PC vorgestellt. Zu diesem Zweck wurden Stücke der Folie in die jeweiligen Szintillatoren eingelegt (Abb. 4.1), wobei vorher der Kleber mit Aceton entfernt worden ist. Um zu erkennen, ob die Szintillatoren das Material angreifen, werden die Flüssigkeiten in regelmäßigen Zeiträumen mit dem Spektrometer Lambda 850 der Firma Perkin Elmer (Abb. 4.2) auf ihre Transmission hin untersucht. Das Gerät misst die Transmission einer Probe, indem ein Lichtstrahl durch die Probe gesendet wird und mit einem Referenzstrahl verglichen wird. Dabei werden die Wellenlängen in 1-nm-Schritten zwischen 200 nm und 800 nm variiert.

Für die Messungen wurden die Szintillatorflüssigkeiten mit einer Pipette aus den Gläsern in eine 10 cm lange Küvette (Abb. 4.1) gefüllt. Vor den Messungen wurde immer die Transmissionskurve der leeren Küvette gemessen, um einen Vergleichswert zu haben und damit bei der Auswertung der Ergebnisse falsche Rückschlüsse etwa aufgrund einer verunreinigten Küvette vermeiden zu können.

Zunächst wurde eine Messung der Flüssigkeiten durchgeführt, bevor die Material-



Abbildung 4.1: Bild der Gläser mit Szintillator und der Küvette: In den Gläsern sind Teile der Reflexionsfolie in den verschiedenen Szintillatorflüssigkeiten eingelegt. Links ist die verwendete Küvette zu sehen.



Abbildung 4.2: Bild des Spektrometers Lambda 850 von Perkin Elmer: Über den angeschlossenen Rechner werden die Daten ausgelesen.

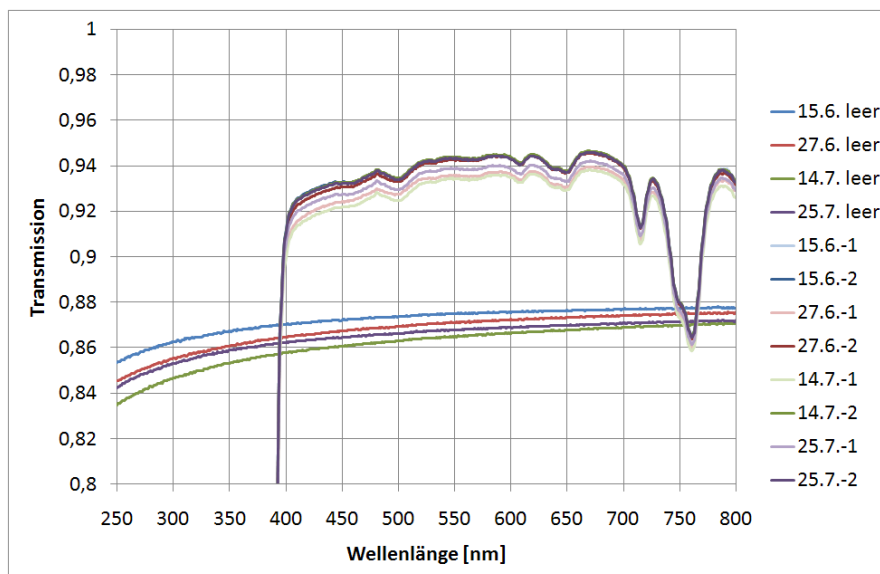


Abbildung 4.3: Veränderung der Transmission von LAB nach Einlegen einer Probe der Reflexionsfolie: Man sieht hier Schwankungen im Bereich von 1-2 %, die jedoch auf Verunreinigungen der Küvette zurückzuführen sind. Ein gutes Indiz dafür ist, dass die letzte Messung die beste Transmission liefert.

stücke eingelegt werden, danach wurde etwa alle zwei Wochen eine weitere Messung durchgeführt. Sollte einer der Flüssigszintillatoren die Folie angreifen, würden sich Teile davon lösen und die Transmission könnte sich dadurch verschlechtern.

Untersuchung von LAB

Betrachtet man die Darstellung der Transmissionsmessungen in Abb. 4.3, so sieht man, dass auch nach 41 Tagen noch keine signifikante Verschlechterung aufgetreten ist. Die Werte variieren zwar um etwa ein Prozent, dies ist jedoch durch andere Effekte, wie z.B. durch eine etwas unsaubere Küvette zurückzuführen. Um solche Effekte zu verstehen sind noch die Transmissionsspektren der leeren Küvetten der verschiedenen Messtage eingezeichnet. Desweiteren fällt auf, dass die jeweils zweite Messung an fast allen Tagen bessere Werte liefert. Zwischen den beiden Messungen wurden die Seiten der Küvette immer mit einem Tuch abgewischt, es können also die jeweils zweiten Messungen als die vertrauenswürdigeren angenommen werden.

Untersuchung von PXE

Betrachtet man das Transmissionsspektrum von PXE (Abb. 4.4), so sieht man auf den ersten Blick, dass die beiden ersten Messungen deutlich höhere Transmissions-

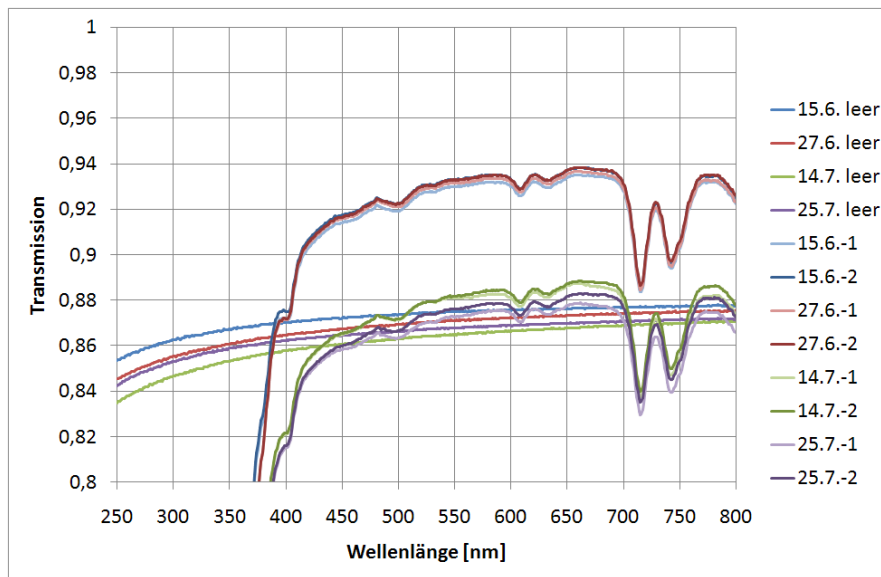


Abbildung 4.4: Veränderung der Transmission von PXE nach Einlegen einer Probe der Reflexionsfolie: Man sieht hier, dass die Transmission zwischen 27.6. und 14.7. deutlich zurückgeht, sich danach aber nicht mehr signifikant ändert.

werte liefern als die beiden letzten. Von 27.6. bis 14.7. hat sich die Transmission im für uns relevanten Wellenlängenbereich von 430 nm um etwa 6 % verringert. Betrachtet man als Vergleich die Messung der leeren Küvette, erkennt man, dass sich bei dieser die Werte um weit weniger als 1 % verringert haben. Dieser Effekt kann also nicht auf Verunreinigungen der Küvette zurückgeführt werden. Von 14.7.-25.7. sind die Transmissionswerte dann nochmal um etwa 1 % abgefallen, jedoch bei weitem nicht so stark als in den zwei Wochen zuvor. Auch hier erkennt man, dass die jeweils zweiten Messungen höhere Transmissionsraten aufweisen, jedoch nicht in so einem Maße wie bei LAB.

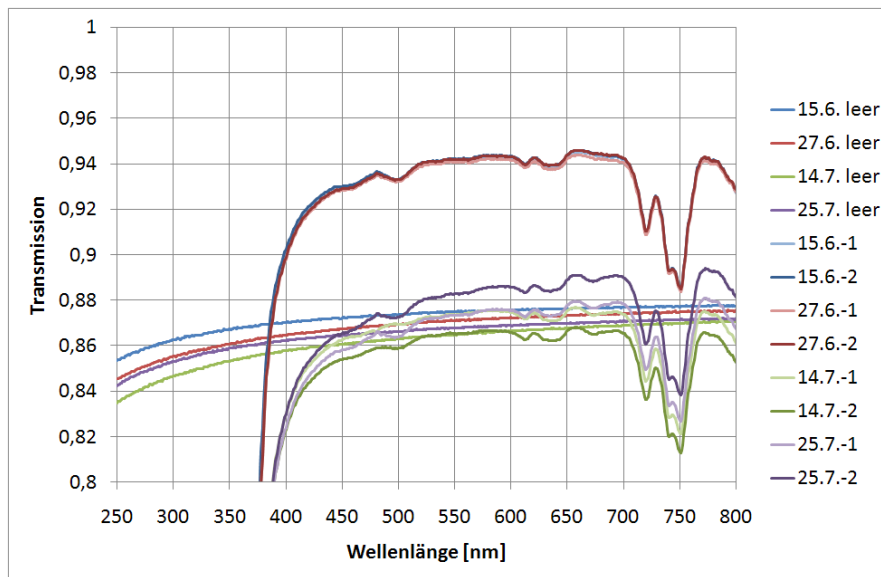


Abbildung 4.5: Veränderung der Transmission von PC nach Einlegen einer Probe der Reflexionsfolie: Auch bei PC geht die Transmission zwischen 27.6. und 14.7. zurück, danach bleibt sie jedoch in etwa konstant.

Untersuchung von PC

Im Transmissionsspektrum von PC (Abb. 4.5) ist auf den ersten Blick ein ähnliches Verhalten wie bei PXE zu erkennen. Nach 30 Tagen hat die Transmission auch bereits um etwa 6 % abgenommen. Erstaunlich ist, dass bei den Messungen am 14.7. im Gegensatz zu allen anderen Messungen die zweite der beiden Durchläufe eine niedrigere Transmission liefert als der erste. Möglicherweise ist beim Abwischen zwischen den beiden Messungen die Küvette verunreinigt worden. Nimmt man bei beiden Messungen den höheren Wert und nimmt dabei an, dass der niedrigere Wert durch Verunreinigungen entstanden ist, so sind die Transmissionen am 25.7. höher als am 14.7. Beachtet man, dass auch die leere Küvette am 25.7. einen höheren Wert liefert, könnte evtl. eine Verunreinigung an der Innenseite die Erhöhung der Transmission verursachen. Es ist auf jeden Fall keine deutliche Tendenz in eine Richtung erkennbar.

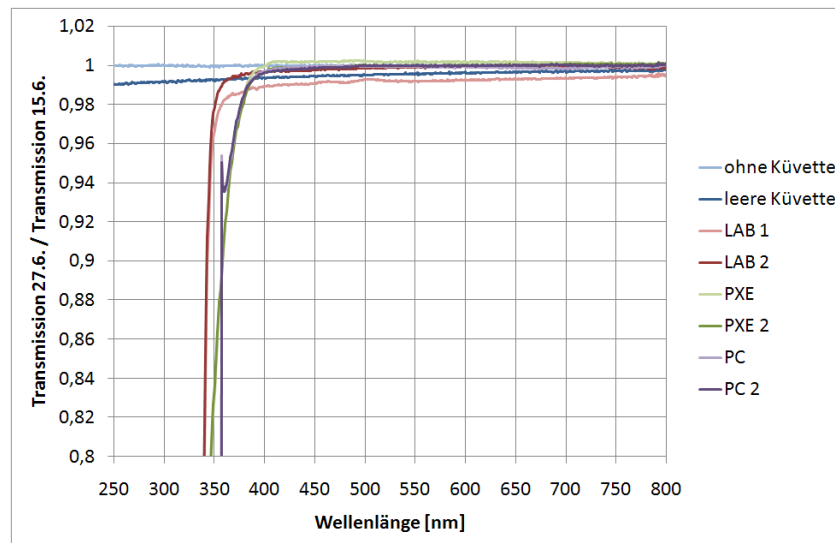


Abbildung 4.6: Veränderung der Transmission der Flüssigszintillatoren nach 12 Tagen: Nach 12 Tagen ist noch keine Signifikante Änderung der Transmission zu sehen. Die Unterschiede liegen bei weniger als 1 %.

Vergleich der Szintillatorflüssigkeiten

Vergleicht man die Veränderungen in der Transmission bei den drei Flüssigszintillatoren nach 12 Tagen (Abb. 4.6), 30 Tagen (Abb. 4.7) und 41 Tagen (Abb. 4.8), so sieht man, dass in den ersten 12 Tagen keines der Flüssigkeiten die Reflexionsfolie derart angreift, dass Teile davon ausgelöst werden und die Szintillatoren verunreinigen. Nach 30 Tagen zeigt sich jedoch bei PXE und PC ein deutlicher Rückgang des Transmissionsspektrums, wobei die Werte bei PXE immer noch um 1-2 % höher liegen als bei PC. Nach 41 Tagen sind bei höheren Wellenlängen die Transmissionen von PXE und PC in etwa gleich, bei der für LENA relevanten Wellenlänge von 420 nm ist jene von PXE aber immer noch um 1-2 % höher als die von PC. LAB hingegen zeigt auch nach 41 Tagen immer noch keine Verschlechterung in der Transmission und ist daher wohl am verträglichsten mit der hier getesteten Reflexionsfolie VM 2000 der Firma 3M. Um zu ermitteln, ob diese Folie auch nach längerer Zeit nicht von LAB angegriffen wird, müsste jedoch eine Langzeitstudie durchgeführt werden.

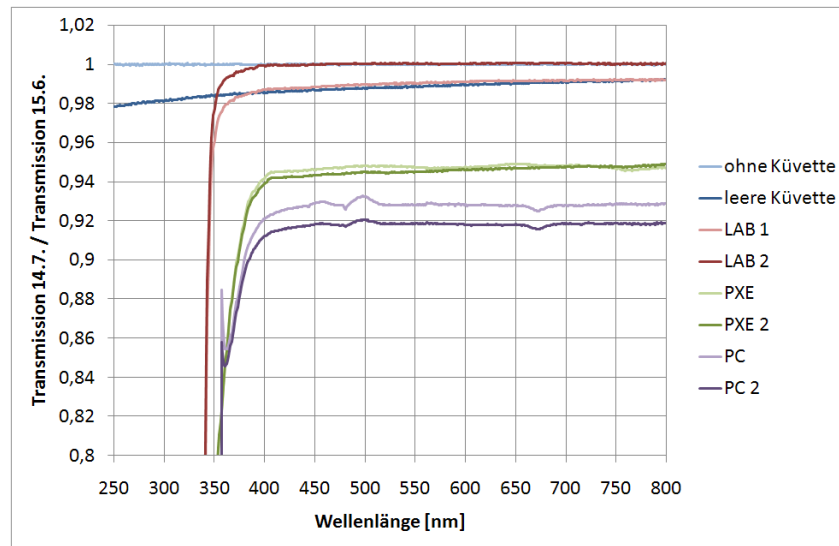


Abbildung 4.7: Veränderung der Transmission der Flüssigszintillatoren nach 30 Tagen: Nach 30 Tagen erkennt man bei LAB einen Rückgang der Transmission um 5-6 %, bei PC sogar um 7-8 %. Bei LAB ist immer noch keine Verschlechterung zu erkennen.

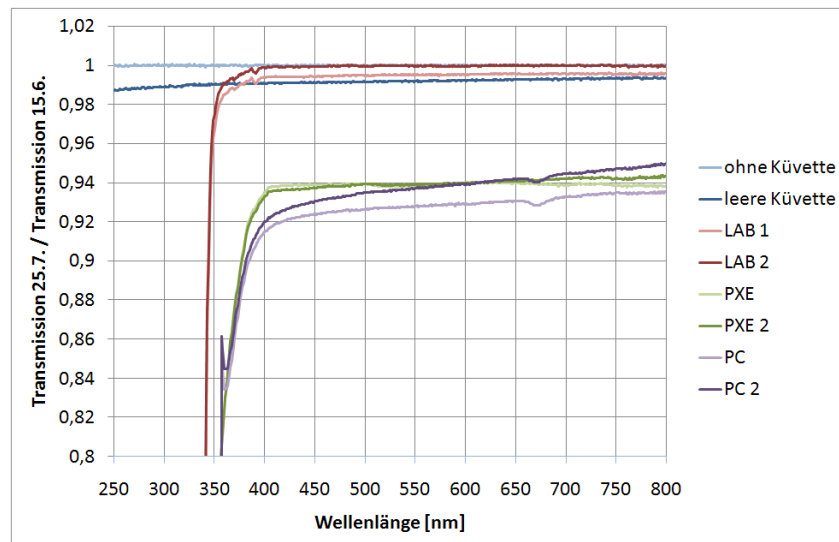


Abbildung 4.8: Veränderung der Transmission der Flüssigszintillatoren nach 41 Tagen: Nach 41 Tagen liegt die Transmission weiterhin etwa 5-6 % unter dem ursprünglichen Wert, bei PC auch bei etwa 7 %. In den letzten elf Tagen ist hier also keine Veränderung aufgetreten. Bei LAB zeigt sich weiterhin kein Einfluss auf die Transmission.

Kapitel 5

Ausblick

Mit der Konstruktion des Teststandes zur Charakterisierung von Photomultipliern ist die Grundlage geschaffen, sich intensiv mit den Tests verschiedener Photomultiplier zu beschäftigen. Dabei wird man im Verlauf der weiteren Messungen entscheiden müssen, ob und wie der Aufbau weiter verbessert und optimiert werden kann.

Erste Anhaltspunkte, welche PMTs für LENA infrage kommen, könnten die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen zu Dunkelrate und Homogenität von Photomultipliern liefern. Ergänzend dazu müssten die Messungen auch mit weiteren Modellen von anderen Herstellern durchgeführt werden. Da aber die führenden Firmen in der PMT-Herstellung ETL und Hamamatsu bereits an der Entwicklung neuerer und besserer Photomultiplier arbeiten, ist es möglich, dass die hier getesteten Modelle beim Bau von LENA bereits veraltet sind und nicht mehr infrage kommen.

Die hier durchgeführte Materialstudie hat gezeigt, dass die Reflexionsfolie VM2000 der Firma 3M ein möglicher Kandidat für die Beschichtung von Winston-Cones ist. Sie ist zumindest auf die relativ kurze Zeit von sechs Wochen gesehen nicht vom Flüssigszintillator LAB in Mitleidenschaft gezogen worden. Allerdings traten Probleme mit PXE und PC auf, die noch weiter untersucht werden sollten.

Abschließend ist zu sagen, dass die Vorbereitungen für das LENA-Projekt auf Hochtouren laufen, jedoch noch viel experimentelle Arbeit geleistet werden muss, um die passenden Komponenten für dieses Projekt zu finden. Der Aufwand dafür wird sich aber lohnen, da man am Ende ein einzigartiges Neutrinoobservatorium erhält, das in vielen Bereichen der Physik neue und bedeutende Ergebnisse liefern kann.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Neutrinospektrum natürlicher und künstlicher Neutrinoquellen . . .	5
2.2	Schematischer Aufbau des geplanten LENA-Experiments	10
2.3	Schematischer Aufbau eines Photomultipliers	11
2.4	Bild eines Lichtkonzentrators bei Borexino	14
2.5	Mögliches Design einer Druckeinkapselung für Photomultiplier . . .	14
3.1	Bild des Photosensor-Teststandes	17
3.2	Bild des PMT-Halters mit eingebautem PMT	18
3.3	Bild einer optischen Bank der Firma Henschke	18
3.4	Bild der Befestigung der optischen Bank	20
3.5	Verschiebereiter zur Befestigung optischer Elemente	20
3.6	Intensitätsverteilung des Lasers EPL 405 von Edinburgh Instruments	22
3.7	Bild des Lasers EPL 405 von Edinburgh Instruments	23
3.8	Strahlengang der Aufweitung bei Verwendung einer Linse	24
3.9	Strahlengang der Aufweitung bei Verwendung von zwei Linsen . . .	25
3.10	Benötigte Brennweiten bei Verwendung von zwei Linsen zur Laser- aufweitung	26
3.11	Bild und Strahldiagramm von Kugellinsen	27
3.12	Bild, Strahldiagramm und Radiale Brechungsindexabhängigkeit von GRIN-Linsen	28
3.13	Schematischer Aufbau des PMT-Teststandes	29
3.14	Schematische Darstellung der Ausleseelektronik	31
3.15	Bild der Ausleseelektronik	32
3.16	Bild der eingebauten Optik	33
3.17	Gemessene Rate bei der vertikalen Verschiebung einer Linse	34
3.18	Gemessene Rate bei der horizontalen Verschiebung einer Linse . . .	34

3.19	Horizontale Homogenitätsverteilung der Aufgeweiteten Optik auf Höhe des Laserstrahls	37
3.20	Horizontale Intensitätsverteilungen bei verschiedenen vertikalen Positionen um das gemessene Intensitätsminimum	38
3.21	Vertikale Intensitätsverteilung der aufgeweiteten Optik auf der horizontalen Position des Laserstrahls	40
3.22	Horizontale Intensitätsverteilung der aufgeweiteten Optik auf der horizontalen Position des Laserstrahls bei verschiedenen Laserhöhen	41
3.23	Dreidimensionale Darstellung der Intensitätsverteilung des aufgeweiteten Laserstrahls	42
3.24	Konturdiagramm der Intensitätsverteilung	43
3.25	Vergleich von Schwellwertauslösung und Constant-Fraction-Auslösung	44
3.26	Bild des 3-Zoll PMTs R6091 von Hamamatsu	45
3.27	Zeitliche Abnahme der Dunkelrate nach Beleuchtung beim 3-Zoll PMT R6091 von Hamamatsu	46
3.28	Abhängigkeit der Dunkelrate von der angelegten Spannung beim 3-Zoll PMT R6091 von Hamamatsu	47
3.29	Bild des 8-Zoll PMTs R5912 von Hamamatsu	48
3.30	Zeitliche Abnahme der Dunkelrate nach Beleuchtung beim 8-Zoll PMT R5912 von Hamamatsu	49
3.31	Abhängigkeit der Dunkelrate von der angelegten Spannung beim 8-Zoll PMT R5912 von Hamamatsu	49
3.32	Bild des 10-Zoll PMTs R7081 von Hamamatsu	50
3.33	Zeitliche Abnahme der Dunkelrate nach Beleuchtung beim 10-Zoll PMT R7081 von Hamamatsu	51
3.34	Abhängigkeit der Dunkelrate von der angelegten Spannung beim 10-Zoll PMT R7081 von Hamamatsu	51
3.35	Homogenitätsverteilung des 8-Zoll-PMTs R5912 von Hamamatsu . .	52
3.36	Konturdiagramm der Homogenitätsverteilung des 8-Zoll-PMTs R5912 von Hamamatsu	53
4.1	Bild der Gläser mit Szintillator und der Küvette	56
4.2	Bild des Spektrometers Lambda 850 von Perkin Elmer	56
4.3	Veränderung der Transmission von LAB nach Einlegen einer Probe der Reflexionsfolie	57
4.4	Veränderung der Transmission von PXE nach Einlegen einer Probe der Reflexionsfolie	58

4.5	Veränderung der Transmission von PC nach Einlegen einer Probe der Reflexionsfolie	59
4.6	Veränderung der Transmission der Flüssigszintillatoren nach 12 Tagen	60
4.7	Veränderung der Transmission der Flüssigszintillatoren nach 30 Tagen	61
4.8	Veränderung der Transmission der Flüssigszintillatoren nach 41 Tagen	61

Tabellenverzeichnis

2.1	Reaktionskanäle mit Raten bei der Beobachtung einer Supernova in der Milchstraße durch LENA. [7]	6
2.2	Anzahl der benötigten PMTs, um eine optische Abdeckung von 30 % zu erreichen bzw. beim Einsatz von PMTs mit UQE-Kathode die Lichtausbeute zu erreichen, die man mit herkömmlichen PMTs und 30 % optischer Abdeckung erreicht. [7]	13
3.1	Durchmesser und Brennweite der infrage kommenden Linsen	29

Literaturverzeichnis

- [1] N. Schmitz, *Neutrino-physik*, Teubner Studienbuecher, Stuttgart, 1987
- [2] S. Paul, W. Weise, N. Kaiser,
Online Skript Teilchen und Kerne, Kapitel Neutrino-Lepton-Streuung,
www.mpp.mpg.de/~rwagner/skript/Neutrino_Lepton_Streuung.html,
2000
- [3] Super-Kamiokande, J. Hosaka *et al.*, Phys. Rev. D74, 032002, 2006, hep-ex/0604011
- [4] J.R. Klein, *Solar Neutrinos and SNO*, University of Pennsylvania,
<http://www.hep.upenn.edu/SNO/>, 2003
- [5] C. Weinheimer *et al.*, Phys. Lett. B460, 219, 1999
- [6] M. Wurm, Dissertation, Technische Universität München, 2005
- [7] M. Wurm, *The next-generation liquid-scintillator neutrino observatory LENA*,
1104.5620v2, 2011
- [8] DESY, *Low Energy Neutrino Astronomy*, <http://neutrino.desy.de/projekte/lena/>
- [9] M. Malek *et al.*, Physical Review Letters 90, 061101 (2003), hep-ex/0209028
- [10] K. A. Hochmuth *et al.*, Probing the Earth's interior with a large-volume liquid scintillator detector, Astropart. Phys. 27, 2007, 21-29, hep-ph/0509136
- [11] S. T. Petcov, T. Schwetz, Precision measurement of solar neutrino oscillation parameters by a long-baseline reactor neutrino experiment in Europe, Phys Lett. B642, 2006, 487-494, hep-ph/0607155
- [12] T. Marrodán Undagoita *et al.*, J. Phys. conf. Ser. 39, 269, 2006
- [13] T. Mannel, Bachelorarbeit, Technische Universität München, 2011
- [14] L. Oberauer *et al.*, Light Concentrators for Borexino and CTF, Nucl.Instrum.Meth. A530 (2004) 453-462, arXiv:physics/0310076v2

- [15] G. Beischler, Bachelorarbeit, Technische Universität München, 2011
- [16] Wikipedia, <http://de.wikipedia.org/wiki/Mu-Metall>, 15.12.2011
- [17] Edinburgh Instruments, Rücksprache mit Richard Abram, April 2011
- [18] Henschke-Gerätebau, Datenblatt/Bedienungshinweise Optisches Banksystem, <http://www.henschke-geraetebau.de/Optisches-Banksystem.pdf>
- [19] Pressebox-Website,
<http://www.pressebox.de/pressemeldungen/laser-2000-gmbh/boxid/77920>,
2006
- [20] Melles Griot Website,
<https://www.cvimellesgriot.com/Products/Ball-Lenses-for-Diode-Lasers.aspx>
- [21] Melles Griot Website,
<https://www.cvimellesgriot.com/Products/Gradient-Index-Lenses.aspx>
- [22] M. Tippmann, Interne Kommunikation
- [23] Firma Ruwac, *Gefahrstoff Staub*,
<http://www.ruwac.de/redesign/pdf/14-500-staub-staubex-07.2010.pdf>,
2010
- [24] http://de.wikipedia.org/wiki/Constant_Fraction_Discriminator, 15.12.2011
- [25] Kevin Carnes, *Constant Fraction Discriminators*,
<http://jrm.phys.ksu.edu/Resource/Pubs/CFD/CFD.html>,
Januar 2003
- [26] Hamamatsu Photonics K.K., *Photomultiplier tubes and assemblies for scintillation counting & high energy physics*, Juni 2009

Danksagung

Zu allererst möchte ich Herrn Prof. Stefan Schönert danken, der mir diese Diplomarbeit erst ermöglichte.

Des Weiteren gilt mein besonderer Dank Prof. Lothar Oberauer für das Stellen dieses Diplomarbeitsthemas und die Unterstützung im Verlauf der Diplomarbeit.

Weiterer großer Dank gebührt Marc Tippmann für die Betreuung dieser Arbeit und für die ausführlichen Erklärungen zu allen physikalischen und nichtphysikalischen Fragen.

Desweiteren möchte ich mich bei meinen Bürokollegen bedanken für die lustige Zeit und für die vielen Ratschläge

Generell danken möchte ich allen Leuten des Lehrstuhls für das freundliche und entspannte Klima.

Außerdem danke ich den Leuten vom Potschamperl, die mit mir Erfolge gefeiert haben und mich Misserfolge vergessen ließen.

Mein allergrößter Dank gilt meinen Eltern und meiner Familie für die jahrelange Unterstützung während meines Studiums und ganz besonders meiner Frau Babsi für ihr Verständnis und ihre Motivation und natürlich fürs Korrekturlesen!