

# Construction of a LED pulser system for the OLYMPUS Experiment

von

**Waqas Rehman**

Bachelorarbeit in Physik  
vorgelegt dem Fachbereich Physik, Mathematik und Informatik  
(FB 08)  
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz  
am 28. November 2011



JOHANNES GUTENBERG  
UNIVERSITÄT MAINZ

# Aufbau eines LED-Lichtpulsersystems für das OLYMPUS-Experiment

von

**Waqas Rehman**

Bachelorarbeit in Physik  
vorgelegt dem Fachbereich Physik, Mathematik und Informatik  
(FB 08)  
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz  
am 28. November 2011



JOHANNES GUTENBERG  
UNIVERSITÄT MAINZ

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

Mainz, den 28. November 2011

Waqaas Rehman  
Institut für Kernphysik  
Johann-Joachim-Becher-Weg 45  
Johannes Gutenberg-Universität D-55099 Mainz  
`wrehman@students.uni-mainz.de`

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1	Elastische Elektron-Nukleon-Streuung und Formfaktoren . . . . .	4
2.2	Moller und- Bhabhastreuung . . . . .	7
<b>3</b>	<b>OLYPMUS-Experiment</b>	<b>8</b>
3.1	Aufbau des OLYMPUS-Experiments . . . . .	8
3.2	Symmetrischer Moller/Bhabha-Luminositätsmonitor . . . . .	9
3.3	Eigenschaften von Bleifluorid-Kristallen . . . . .	10
3.4	Funktionsweise eines Photomultipliers . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Aufbau des LED-Lichtpulsersystems</b>	<b>14</b>
4.1	LED-Driver-Board . . . . .	14
4.2	Lichtmischblock . . . . .	19
4.3	Lichtleitung in den Photomultiplier . . . . .	21
<b>5</b>	<b>Vorbereitende Messungen zur Auswahl der LED's für das LED-Driver-Board</b>	<b>22</b>
5.1	Testverfahren zur Überprüfung geeigneter Lichtsignale der LED's . . . . .	22
5.1.1	Charakterisierung der verwendeten LED's . . . . .	36
5.2	Maximierung des Spannungsflusses des LED-Driver-Boards mit einem Photmultiplier	37
5.3	Messung charakteristischer Kenngrößen des Photomultipliers . . . . .	38
5.3.1	Dunkelstrom . . . . .	38
5.3.2	Abhängigkeit des Photomultipliersignals von der Hochspannung . . . . .	39
<b>6</b>	<b>Optimierung der Fasereinkopplung</b>	<b>41</b>
6.1	Messung der Intensitäten beim Lichtaustritt an verschiedenen Messpositionen . . .	41
6.1.1	Analyse der Messergebnisse bei doppelroter LED-Betriebskombination des LED-Driver-Board-Systems . . . . .	42
6.1.2	Analyse der Messergebnisse bei doppelblauer LED-Betriebskombination des LED-Driver-Board-Systems . . . . .	45
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>48</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>49</b>
<b>9</b>	<b>Literaturnachweis</b>	<b>62</b>

# 1 Einleitung

Die elastische Lepton-Nukleon-Streuung ist eine der wichtigsten Methoden in der Teilchenphysik, um die Struktur und Eigenschaften von Hadronen zu untersuchen. Erst vor kurzem wurde am JLab bei der Elektron-Proton-Streuung auf der Basis von Polarisationsmessungen das Verhältnis der elektrischen und magnetischen Formfaktoren des Protons  $\frac{G_e}{G_m}$  bestimmt [1]. Hierzu wird das Verhältnis der Wirkungsquerschnitte von Elektron-Proton und Positron-Proton-Streuung gebildet. Bei dem Ergebnis am JLab wurde jedoch eine entscheidende Diskrepanz zu demjenigen Verhältnis der elektromagnetischen Formfaktoren entdeckt, das bis in die 1990er mittels der Rosenbluth-Separation bestimmt wurde. Bei der Rosenbluth-Separation bestimmt man die Formfaktoren durch die Berechnung der elastischen Wirkungsquerschnitte bei festem Impulsübertrag  $Q^2$ , aber variablen Streuwinkeln  $\Theta_s$  und Energien des einfallenden unpolarisierten Strahls [1]. Es wird angenommen, dass die Abweichung des Formfaktorverhältnisses auf den Beitrag der Zwei-Photonen-Austausch-Amplitude zurückzuführen ist. Diese Vorstellung meint im Kontrast zu bisherigen Annahmen, dass mehr als ein Photon bei der elastischen Lepton-Proton-Streuung ausgetauscht wird.

Das Ziel der OLYMPUS-Kollaboration ist es, diesen Ansatz nun experimentell zu bestätigen und dieses Verhältnis mit einer Genauigkeit von 1% zu bestimmen. Die experimentelle Anlage befindet sich im Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY) am Beschleuniger **Doppel-Ring-Speicher** (DORIS) in Hamburg. Als Streuteilchen werden Elektronen bzw. Positronenstrahlen benutzt und auf ein unpolarisiertes Wasserstofftarget geschossen. Das heißt, dass zusätzlich auch Elektron-Elektron (Moller) und Positron-Elektron-Streuung (Bhabha) auftreten. Dieser Nebeneffekt wird gemessen, um vor allem den systematischen Fehler zu kontrollieren. Dazu wurde ein symmetrischer Moller/Bhabha-Luminositätsmonitor (SYMB-Luminositätsmonitor) konzipiert mit dessen Hilfe die Streureate von Moller/Bhabha-Ereignissen detektiert werden kann, woraus man mit Hilfe des durch die Quantenelektrodynamik bekannten Wirkungsquerschnitts, die Luminosität berechnen kann.

Der Ziel dieser Arbeit besteht darin ein auf lichtemittierende Dioden (LED) basierendes externes Lichtkalibrationssystem zu konstruieren und zu testen, damit es am SYMB-Luminositätsmonitor verwendet werden. Ein solches „LED-Lichtpulsersystem“ soll es ermöglichen das Verhalten der beiden Detektoren des SYMB-Luminositätsmonitors, bestehend aus Bleifluorid-Kristallen und Photomultipliern, unabhängig von der sie umgebenden Elektronik permanent zu untersuchen. Mit diesem System lassen sich beispielsweise suboptimal funktionierende Photomultiplier ausmachen, wenn deren Verstärkungsfaktor sich mit der Zeit verringert. Außerdem werden Grenzwerte für den Betrieb des Systems bestimmt, die für ein akkurates Auslesen der Daten bei der Kalibration wichtig sind. Das System muss aber auch bestimmte Anforderungen erfüllen. Der Lichtpuls muss eine ausreichend kurze Pulsbreite von maximal  $\approx 60-70$ ns haben. Außerdem soll das System es auch ermöglichen, dass Licht in verzögerten Zeitabständen abgegeben werden kann. Die Intensitäten des Lichts müssen hoch genug sein, dass die Elektronik am DORIS diese Daten auch verarbeiten kann. In dem was folgt wird ein System präsentiert, das diesen Anforderungen an das LED-Lichtpulsersystem gerecht wird.

In Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen des OLYMPUS-Experiments, vor allem des SYMB-Luminositätsmonitors erläutert. Daraufhin werden in Kapitel 3 die Einzelheiten des Aufbaus des OLYMPUS-Experiments und der grundlegenden Bestandteile der SYMB-Detektoren diskutiert. In Kapitel 4 wird das gesamte Aufbaukonzept des LED-Lichtpulsersystems abgehandelt. In Kapitel 5 werden dann Testmessungen mit dem fertiggebauten LED-Lichtpulsersystem durchgeführt. Dabei soll die Lichtquelle in der Form optimiert werden, dass danach Lichtpulse kurzer Signalbreite produzierbar sind. Es werden auch verschiedene Messungen zur eindeutigen Charakterisierung des Systems durchgeführt. In Kapitel 6 werden Lichtintensitätsmessungen beim Betrieb des LED-Lichtpulsersystems durchgeführt.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Elastische Elektron-Nukleon-Streuung und Formfaktoren

Der Wirkungsquerschnitt einer Teilchenreaktion ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass zwischen einem einfallenden Teilchen (bspw.  $e^{+/-}$ ) und einem Targetteilchen eine Reaktion, wie beispielsweise ein Streuprozess stattfinden kann. Der Mott-Wirkungsquerschnitt berücksichtigt auch Spineffekte, die bei Streuprozessen im Bereich relativistischer Energien auftreten. Dieser lautet wie folgt:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott}^* = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Rutherford} \cdot \left(1 - \beta^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}\right)$$

Der Stern in der Formel bedeutet, dass der Rückstoß noch nicht berücksichtigt ist. Bei der elastischen Elektron-Proton-Streuung wird das Elektron als Projektil an einem Nukleon (Target) gestreut. Diese Form der Streuung ist hilfreich, um Informationen über das Nukleon zu gewinnen. Nukleonen haben eine radiale Ausdehnung von ungefähr 0,8fm, weshalb Energien in der Größenordnung des Protons nötig sind, um es zu untersuchen. Dadurch lässt sich der Energieverlust beim Targetrückstoß nicht mehr vernachlässigen, wodurch der Mott-Wirkungsquerschnitt einen zusätzlichen Faktor erhält.

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott}^* \cdot \left(\frac{E'}{E}\right)$$

Die Streuung kann durch den Viererimpulsübertrag  $q^2$  beschrieben werden. Dieser bezeichnet die Differenz zwischen dem Impuls  $p$  des einlaufenden und dem Impuls  $p'$  des auslaufenden Teilchens. Unter Vernachlässigung der Elektronenmasse  $m_e$  wird dieser geschrieben als:

$$q^2 = (p - p')^2 = 2m_e^2 c^2 - 2 \left( \frac{EE'}{c^2} - |p| |p'| \cos\theta \right) \approx \frac{-4EE'}{c^2} \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

Da wir außerdem mit positiven Größen arbeiten wollen definieren wir  $Q^2 = -q^2$ . Des Weiteren, gibt es eine magnetische Wechselwirkung zwischen dem Strom des Elektrons und dem magnetischen Moments des Protons, was zu einem zusätzlichen Term im Wirkungsquerschnitt führt:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{d\sigma}{d\Omega} [1 + 2\tau \tan^2 \frac{\theta}{2}]$$

mit der dimensionlosen Größe  $\tau = \frac{Q^2}{4M^2 c^2}$ , wobei  $M$  die Masse des Protons beschreibt.

Da das Elektron ein geladenes Dirac-Teilchen ist, nimmt der  $g$ -Faktor im magnetischen Moment  $\mu = g \cdot \frac{e}{2M} \cdot \frac{\hbar}{2}$  den Wert 2 an, wenn man kleine Abweichungen vernachlässigt, die von quantenelektrodynamischen Prozessen höherer Ordnung herrühren. Nukleonen haben jedoch eine innere Struktur, da sie aus Quarks aufgebaut sind. Der  $g$ -Faktor ergibt sich also aus der Substruktur des Nukleons. Für das Proton und Neutron betragen die gemessenen Werte

$$\mu_p = \frac{g_p}{2} \mu_N = 2,79 \cdot \mu_N$$

und

$$\mu_n = \frac{g_n}{2} \mu_N = -1,91 \cdot \mu_N$$

wobei  $\mu_N$  dem Kernmagneton entspricht:

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2M} = 3,1525 \cdot 10^{-14} \text{ MeVT}^{-1}$$

In diesem Fall benötigt man also zwei Formfaktoren, die die magnetischen und elektrischen Verteilungen beschreiben. Die elektrischen und magnetischen Formfaktoren, die man hier erhält,  $G_E(Q^2)$  und  $G_M(Q^2)$ , hängen von  $Q^2$  ab. Aus dieser Abhängigkeit können wir mit Hilfe der Formfaktoren Rückschlüsse auf die räumliche Verteilung von Ladung und magnetischem Moment des Nukleons schließen. Den Wirkungsquerschnitt für die Elektron-Nukleon-Streuung kann man nun wie folgt beschreiben (Rosenbluth-Formel [1]):

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott} \left[ \frac{G_E^2(Q^2) + \tau G_M^2(Q^2)}{1 + \tau} + 2\tau G_M^2(Q^2) \tan^2 \frac{\theta}{2} \right]$$

Interessante physikalische Auswirkungen hat der Grenzfall  $Q^2 \rightarrow 0$ . Die elektrischen Formfaktoren der Nukleonen  $G_E$  reduzieren sich in diesem Fall gerade auf die auf der Elementarladung  $e$  normierten elektrischen Ladung. Die magnetischen Formfaktoren reduzieren sich auf das auf dem Kernmagneton  $\mu_N$  normierte magnetische Moment  $\mu$ .

$$\begin{aligned} G_E^p(Q^2 = 0) &= 1 & G_E^n(Q^2 = 0) &= 0 \\ G_E^p(Q^2 = 0) &= 2,79 & G_E^n(Q^2 = 0) &= -1,91 \end{aligned}$$

Diese Werte für die Formfaktoren und die Rosenbluth-Formel gelten im Rahmen des Ein-Photon-Austauschs (erste Bornsche Näherung). Bei der Berücksichtigung einer Zwei-Photonen-Austauschamplitude ungleich Null, ergeben sich unterschiedliche Werte für die Wirkungsquerschnitte der Elektron-Proton und- Positron-Proton-Streuungen, was zu der Diskrepanz im Verhältnis der Formfaktoren führt. Im Rahmen dessen erfahren obengenannte Größen (Wirkungsquerschnitte, Formfaktoren) Veränderungen.

Die Diskrepanz zwischen Messungen auf der Basis von Polarisationsstransfermessungen und der Rosenbluth-Methode wird für wachsende Werte von  $Q^2$  größer (Abb. 1). Dies liegt daran, dass für wachsende  $Q^2$  das Formfaktorenverhältnis  $\mu \frac{G_e}{G_m}$  monoton fällt [1].

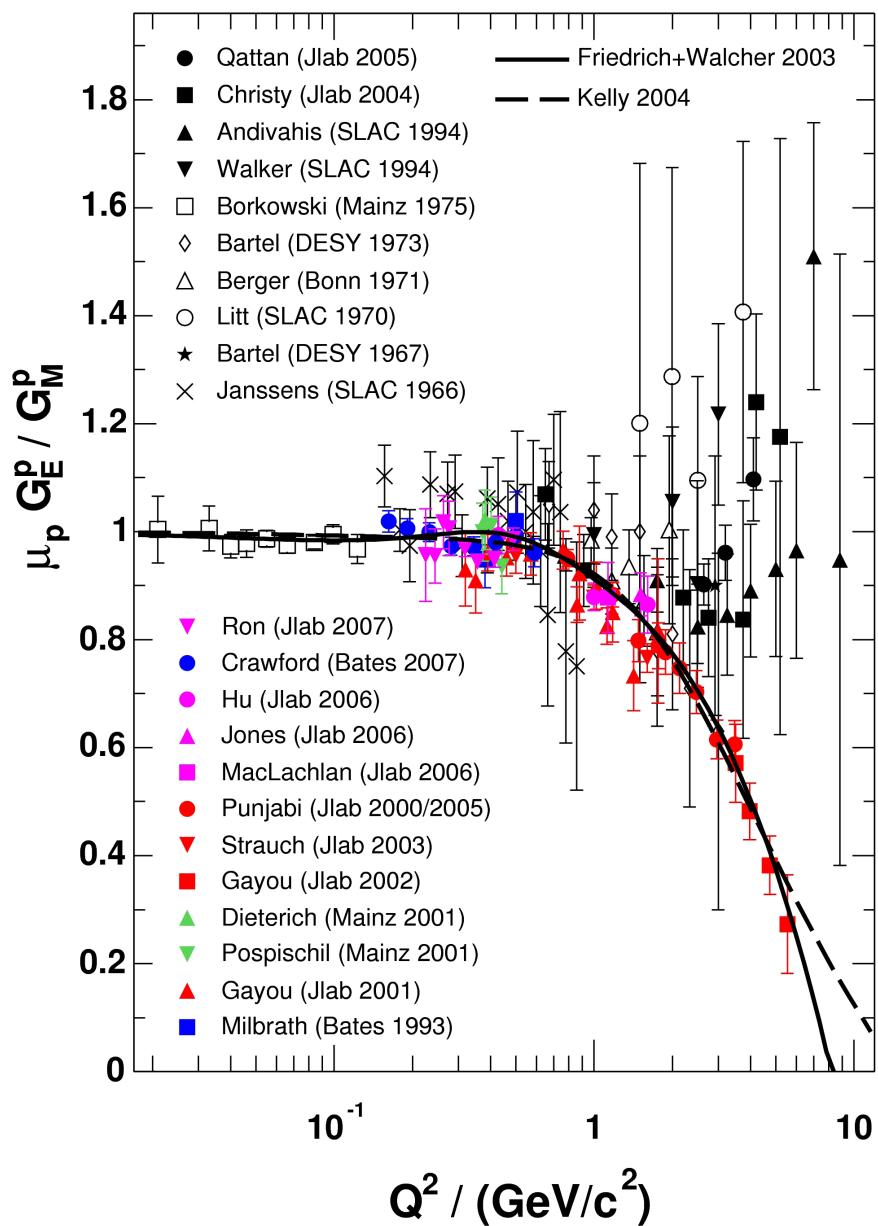


Abbildung 1: Verhältnis der elektrischen und magnetischen Formfaktoren des Protons in Abhängigkeit von  $Q^2$  [1]. Schwarze Symbole entsprechen älteren Messungen (Rosenbluth-Methode). Farbige Symbole entsprechen neueren Messungen basierend auf Polarisationstransfermessungen.



## 2.2 Moller und- Bhabhastreuerung

Der SYMB-Luminositätsmonitor basiert auf der Detektion von Moller/Bhabha-Streuprozessen. Der Wirkungsquerschnitt einer elastischen Leptonenstreuung wie  $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$  (Moller) und  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$  (Bhabha) lässt sich mit Hilfe der Quantenelektrodynamik sehr genau bestimmen. Aufgrund der proportionalen Abhängigkeit der Streurrate  $\dot{N}$  vom Wirkungsquerschnitt und der Luminosität ( $\dot{N} = L \cdot \sigma$ ), ergibt sich, dass sich aus dem bekannten Wirkungsquerschnitt und der Messung der Streurrate  $\dot{N}$  von Moller und- Bhabhastreuerungen, die Luminosität bestimmen lässt. Der Wirkungsquerschnitt beider Streuprozesse nimmt mit steigendem Streuwinkel ab (Abb. 2) [1]. Bei einer Strahlenergie von 2GeV liegt im Laborsystem die symmetrische Streuung bei einem Winkel von  $1,295^\circ$  vor. Dieser symmetrische Fall ist damit maßgebend für den Bau des SYMB-Luminositätsmonitors. Der Wirkungsquerschnitt beträgt für diesen Fall  $\frac{d\sigma}{d\Theta} = 1$

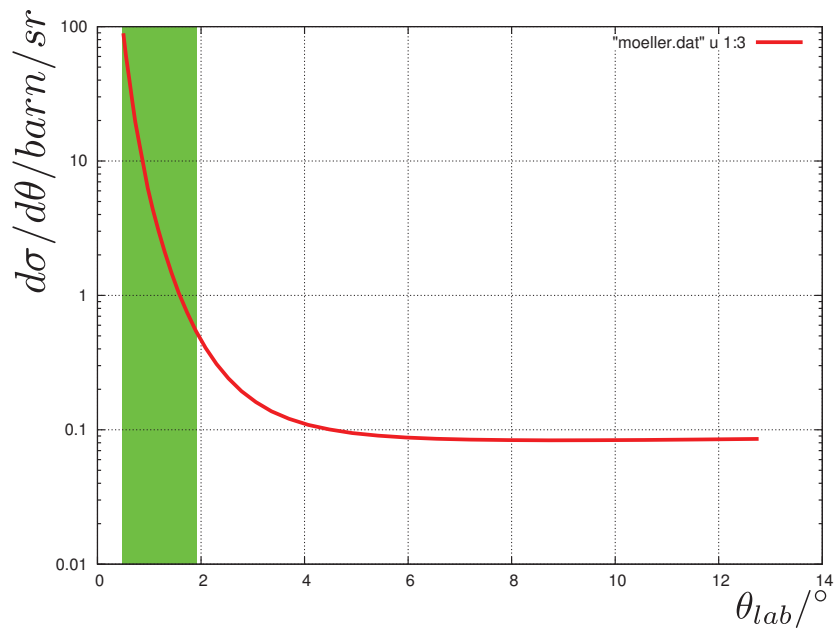


Abbildung 2: Wirkungsquerschnitt der Mollerstreuung in Abhängigkeit des Streuwinkels  $\Theta_s$ . Der grüne Bereich symbolisiert den Bereich, den der SYMB-Luminositätmonitor abdecken kann ( $0,565^\circ$ - $2,031^\circ$ ).

## 3 OLYPMUS-Experiment

### 3.1 Aufbau des OLYMPUS-Experiments

Das OLYPMUS-Experiment ist am Speicherring DORIS in Hamburg installiert. DORIS wurde ursprünglich als 300m großer Elektron-Positron-Beschleuniger aufgebaut. In einem Speicherring können schnelle und geladene elektrische Teilchen mit Hilfe elektrischer und magnetischer Felder in einer in sich geschlossenen Bahn gehalten werden. Dadurch lässt sich im Gegensatz zu einem Linearbeschleuniger die Lebensdauer eines Strahls deutlich anheben.

OLYMPUS bedient sich für die Durchführung des Experiments des BLAST-Detektors vom MIT, der dazu am Speicherring DORIS installiert wurde. BLAST (Bates Large Acceptance Spectrometer Toroid) ist ein toroidales Spektrometer, der, wie in Abb. 3 [2] zu sehen, aus mehreren ringförmigen Sektoren besteht. Die Richtung des toroidalen Magnetfelds lässt sich nach bestimmten Zeitintervallen umkehren. Die toroidale Konfiguration stellt ein kleines magnetisches Feld entlang des Strahls sicher und vermeidet damit störende Effekte beim Strahlengang. Der einfallende Positronen oder Elektronenstrahl trifft auf ein internes Wasserstofftarget, wo elastische Lepton-Nukleon-Streuung stattfindet.

Mit Hilfe einer Driftkammer lässt sich der Weg der gestreuten Teilchen, die dank der magnetischen Wirkung der Toroide dort hineingelangen, zurückverfolgen. Dadurch lassen sich Größen wie Impuls und Streuwinkel der in die Kammer gestreuten Teilchen bestimmen.

Im Zusammenhang mit jeder stattfindenden Teilchenreaktion gewährt der Flugzeit-Detektor eine stabile und schnelle Messung von Zeitsignalen. Dieser besteht aus 16 vertikal positionierten Szintillatoren.

Abgesehen vom Luminositätsmonitor, der sich die elastische Lepton-Proton-Streuung bei Streuwinkeln von ca.  $12^\circ$  zu nutze macht, arbeitet völlig unabhängig davon der symmetrische Moller/Bhaba-Luminositätsmonitor, indem er bei einem Streuwinkel von  $1,295^\circ$  Moller/Bhaba-Streuungen detektiert. Die beiden symmetrisch zueinander platzierten Komponenten des SYMB-Luminositätsmonitors sind Detektoren, die jeweils aus einer Anordnung von Kombinationen aus Bleifluorid-Kristallen und Photomultipliern bestehen.

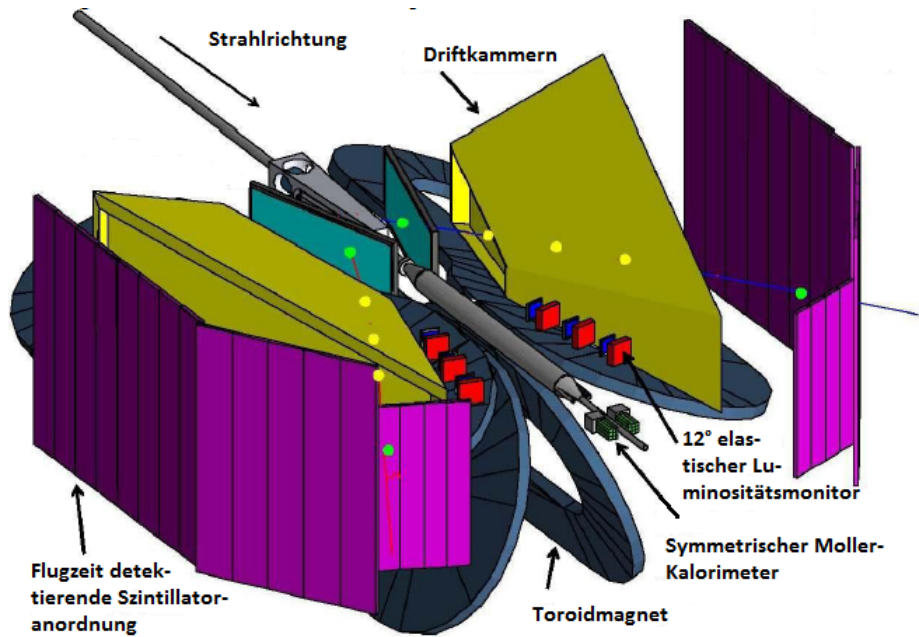


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Olympus-Experiments

### 3.2 Symmetrischer Moller/Bhabha-Luminositätsmonitor

Aufgrund des sehr geringen Winkels ( $1,295^\circ$ ) zum einfallenden Strahl, können die Detektoren des SYMB-Luminositätsmonitors sehr starker Untergrundstrahlung ausgesetzt sein. Um dies zu vermeiden werden die gestreuten Elektron-Positron- und Elektron-Elektron-Paare in Koinzidenz gemessen.

Der Luminositätsmonitor besteht aus zwei Kalorimetern (Abb. 4) [1], die der Energiebestimmung und der Unterscheidung von schnellen in den Kalorimetern abgebremsten Teilchen dienen. Die beiden Kalorimeter bestehen aus jeweils 9 Bleifluorid ( $PbF_2$ )-Kristallen. Diese Anzahl wird im SYMB-Luminositätsmonitor benötigt, um den vollen elektromagnetischen Schauer einzufangen, der durch die gestreuten Elektronen/Positronen in den Kristallen erzeugt wird. Die beiden Kalorimeter sind auf einer horizontalen Ebene symmetrisch zum Strahlengang, jeweils rechts und links davon, angeordnet. Auch dadurch wird eine hohe Präzision bei der Ermittlung der Streurrate  $\dot{N}$  erreicht.

Bei einem  $90^\circ$ -Streuprozess im Schwerpunktssystem haben die gestreuten Teilchen die gleiche Energie. Im Laborsystem entspricht dies für Moller/Bhabha-Streuprozesse bei einer Energie des einfallenden Strahls von 2 GeV einem Winkel von  $1,295^\circ$ . Der Fall, dass beide Teilchen unter dem selben Winkel und mit jeweils der Energie von 1 GeV gestreut werden, entspricht also einem symmetrischen Streuwinkel von  $1,295^\circ$  (Abb. 5 [1]). Laut bereits vorhandenen Simulationsstudien wird im OLYMPUS-Experiment bei der Moller/Bhabha-Streuung eine Streurrate von 560kHz erwartet [1].

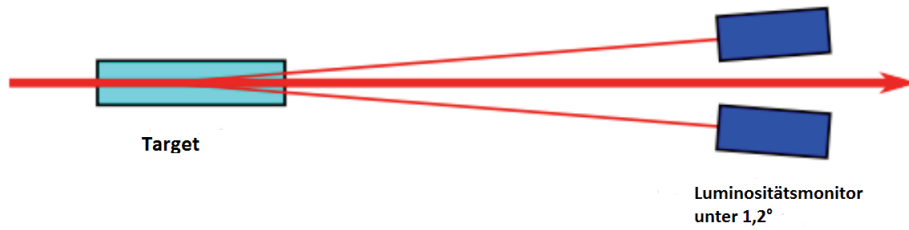


Abbildung 4: Schematischer Aufbau des symmetrischen Moller/Bhaba-Luminositätsmonitors

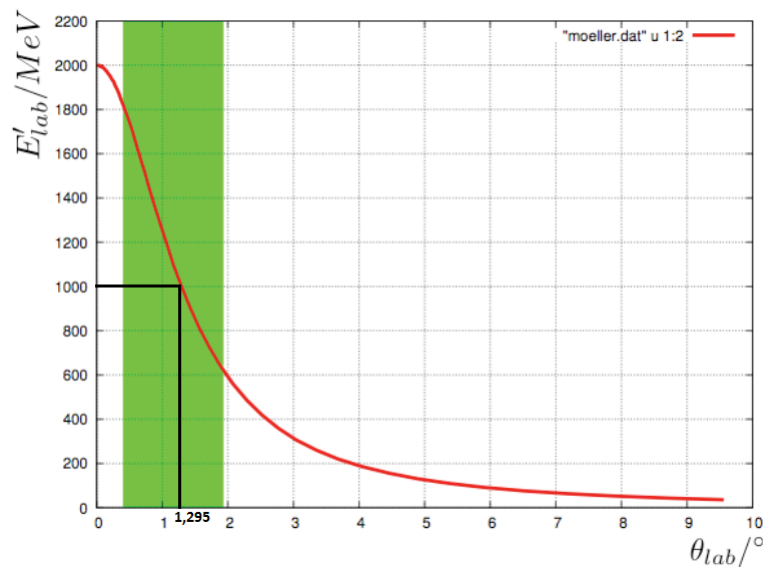


Abbildung 5: Energie des gestreuten Teilchens in Abhängigkeit vom Streuwinkel. Der grüne markierte Winkelbereich kann vom Luminositätsmonitär abgedeckt werden ( $0,565^\circ$ - $2,031^\circ$ ). Die schwarze Linie im Bild markiert den symmetrischen Fall bei einem Winkel von  $1,295^\circ$ .

### 3.3 Eigenschaften von Bleifluorid-Kristallen

$PbF_2$ -Kristalle sind Cherenkov-Strahler, die sich aufgrund ihrer schnellen Ansprechzeit ( $< 20ns$ ) und einer hohen Energieauflösung sehr gut als Kalorimeter für Ereignisse mit sehr hohen Signalraten eignen. Tabelle 1 enthält eine Übersicht der Eigenschaften des  $PbF_2$ -Kristalls. Mit Hilfe eines Photomultipliers kann diese Strahlung und damit das Teilchen, das das Cherenkov-Licht erzeugt, detektiert werden. Als Gesamtes bezeichnet man dieses System als Cherenkov-Detektor mit dessen Hilfe also einzelne Teilchenarten unterschieden und ihre Energien bestimmt werden können.

Dichte	$7,77 \frac{g}{cm^3}$
Brechungsindex $n$	$\cong 1,8$
Strahlungslänge $X$	9,3mm
Photoelektronen/MeV	$\approx 1,7$
relative Energieauflösung $\frac{\Delta E}{E}$	$\cong 3,2\% / \sqrt{E}$
Molière Radius	18mm

Tabelle 1: Eigenschaften eines Bleifluorid-Kristalls [3]

Eine sehr wichtige Größe bei einem solchen Kristall ist der Transmissionsgrad  $\tau$  parallel zur longitudinalen Achse des Kristalls:

$$\tau = \frac{\phi_T}{\phi_0} = e^{-L \cdot k}$$

Mittels der Reintransmission lässt sich ein Wert bestimmen, mit dessen Hilfe sich angeben lässt, wie viel Licht beim Durchgang innerhalb des Kristalls verloren gegangen ist (Abb. 6):

$$\tau^i = \frac{\phi_{out}}{\phi_{in}}$$

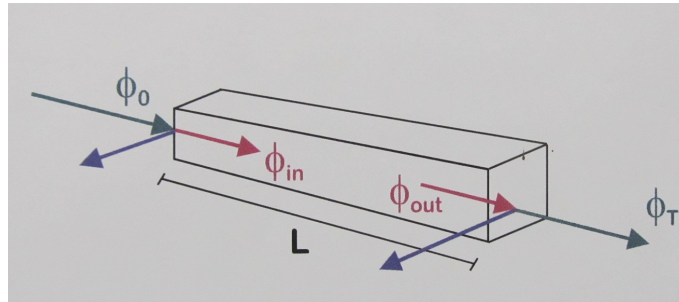


Abbildung 6: Darstellung des Strahlengangs und der Reflexionen im  $PbF_2$ -Kristall

Wenn man das  $PbF_2$ -Kristall starker Strahlung aussetzt treten neben einer logischen Verkleinerung der Reintransmission  $\tau^i$  auch noch Absorptionsbanden auf. Aufgrund des hohen Brechungsindex beim Durchgang des Lichts durch den Kristall gibt es Transmissionsverluste in der Größenordnung von ca. 20% (Abb. 7) [4]. Ferner, können Strahlen, die am Kristall Schäden über eine längere Zeitdauer verursachen, langfristig die Energieauflösung des Kristalls negativ beeinträchtigen. Dennoch gilt Bleifluorid im Vergleich zu anderen Cherenkov-Detektoren als das am meisten strahlenresistente. Außerdem, lassen sich durch optisches Bleichen mit Licht im sichtbaren Bereich im Kristall die durch die Schäden hervorgerufenen Transmissionsverluste in gewisser Näherung wieder ausgleichen.

Da es für eine erfolgreiche Durchführung des Experiments wichtig ist zu wissen, wie sich die Ansprechzeit und Energieauflösung der  $PbF_2$ -Kristalle wegen Strahlenschäden mit der Zeit ändert,

ist es wichtig die Kristalle regelmäßig zu beobachten und zu testen. Dies soll das von uns konzipierte LED-Lichtpulsersystem gewährleisten, indem es in regelmäßigen Abschnitten Lichtpulse in die Kristalle sendet und deren Verhalten dabei beobachtet.

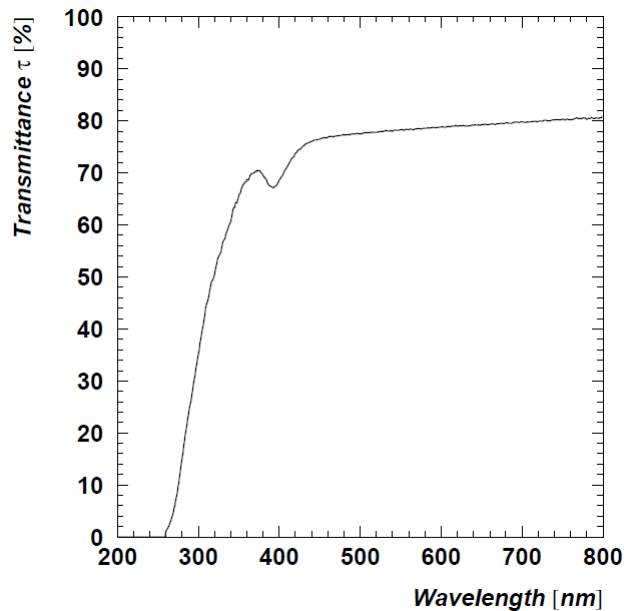


Abbildung 7: Darstellung des Transmissionsgrades eines beliebigen Bleifluorid-Kristalls mit sichtbarer Absorptionsbande bei ca. 400nm.

### 3.4 Funktionsweise eines Photomultipliers

Photomultiplier sind neben den  $PbF_2$ -Kristallen der zweite wesentliche Bestandteil des SYMB-Luminositätsmonitors. Mit Hilfe eines Photomultipliers lassen sich schwache Lichtsignale durch Erzeugung und Verstärkung eines elektrischen Signals detektieren. Der Verstärkungsfaktor kann nach einer gewissen zeitlichen Betriebsdauer abnehmen, was eine Kalibration durch das LED-Lichtpulsersystem nötig macht.

Ein Photomultiplier besteht gemäß Abb. 8 aus zwei wesentlichen Bestandteilen, nämlich einer Photokathode und einem nachgeschalteten Sekundärelektronenvervielfacher. Wie in Abb. 8 gezeigt treffen von außen kommende Photonen auf die Photokathode und lösen Elektronen aus. In einem elektrischen Feld werden die Elektronen auf Elektroden (sogenannte Dynoden) beschleunigt, wo jedes einzelne Photoelektron weitere Elektronen (Sekundärelektronen) herauslösen können. Da die Elektronen von Dynode zu Dynode wandern, nimmt die Gesamtzahl der Elektronen exponentiell zu. Damit die Beweglichkeit der Elektronen gewährleistet ist muss jede nachfolgende Dynode auf zunehmend positivem Potential geschaltet sein. Zum Schluss treffen die Elektronen auf eine Anode und fließen zur Masse ab, während an einem Widerstand Spannung abfällt. Diese Spannung ist das Ausgangssignal.

Photomultiplier sind sehr lichtempfindlich und müssen schon gegen Photoströme kleiner Größe

geschützt werden. Aus diesem Grund betreiben wir den Aufbau des LED-Lichtpulsersystems in einer lichtundurchlässigen sogenannten „Blackbox“.

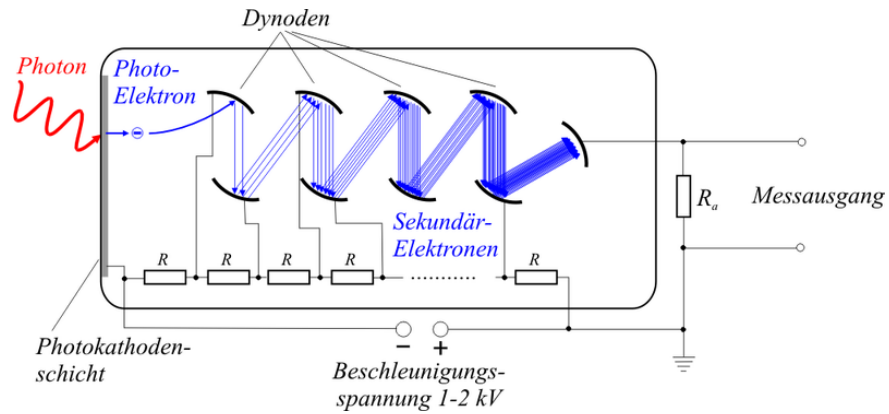


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Photomultipliers. Von Dynode zu Dynode erhöht sich die von der Hochspannung abhängige Verstärkung. Diese lässt mit der Zeit nach, was das LED-Lichtpulsersystem kalibrieren muss.

## 4 Aufbau des LED-Lichtpulsersystems

Im Prinzip lässt sich der Aufbau des LED-Lichtpulsersystems in drei wesentliche Bestandteile aufteilen.

- LED-Driver Board
- Lichtmischblock
- Photomultiplier und die Lichtleitung in desgleichen (Zu Testzwecken wird kein Bleifluorid-Kristall vor den Photomultiplier gesetzt).

Ein Frequenzgenerator pulst das LED-Driver-Board, damit die verschiedenfarbigen LED's angesteuert werden können. Die LED's senden das für sie typische Licht eines sehr kleinen Wellenlängenbereichs aus, welches in den Lichtmischblock gelangt. Dort wird es mittels diffuser Reflexionen weitgehend homogenisiert. Über Glasfaserkabel gelangt das gemischte Licht in einen Photomultiplier (Abb. 9). Mit Hilfe eines Oszilloskops werden die verschiedenen Intensitäten des Lichts gemessen und ausgewertet.

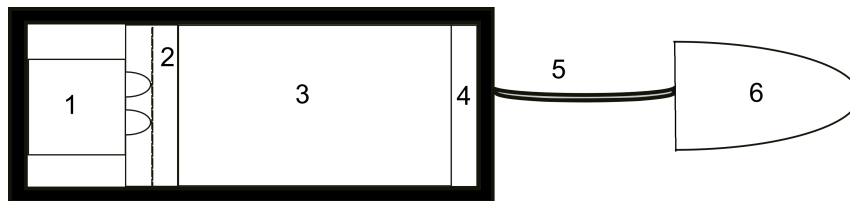


Abbildung 9: Funktionsskizze des gesamten experimentellen Aufbaus. Der Lichtmischblock ist gemäß Abb. 14 dargestellt und erklärt. Über Glasfaserkabel (5) gelangt das Licht vom Lichtmischblock in den Photomultiplier (6).

### 4.1 LED-Driver-Board

Das LED-Driver-Board kann bis zu 4 LED's betreiben. Zunächst sind eine grüne, gelbe, rote und blaue LED des Herstellers Kingbright eingesetzt. Diese wurden nach einem im nächsten Abschnitt präsentierten Testverfahren durch jeweils zwei rote und zwei blaue LED's ersetzt, wobei nur die blaue LED von Kingbright erhalten geblieben ist. Die beiden roten sind von den Herstellern HLMP und Lumitronix. Die beiden blauen sind von Kingbright und Lumitronix. Die wichtigsten Angaben der Datenblätter unserer LED befinden sich in der Tabelle 2.

Die Flussspannung beim Betrieb einer LED hängt von der Wellenlänge ab, die die LED emittiert, welche wiederum vom Bandabstand des eingesetzten Materials abhängt. Sie ist also spezifisch für jede verschiedenfarbige LED. Damit wir beim Messvorgang Orientierungswerte für unsere vier verschiedenen LED's haben enthält die folgende Tabelle auch die zum Betrieb geeigneten Spannungsbereiche:



Farbe	Bezeichnung
blau (Lumitronix)	ArtNo. 15404
rot (Lumitronix)	ArtNo. 1563002002
blau (Kingbright)	Typ L-53MBDL
rot (HLMP)	Typ EG15-UX00

Tabelle 2: Genaue Bezeichnungen der nach dem Testverfahren im LED-Driver-Board eingesetzten LED's.

Farbe	Wellenlänge	Abstrahlwinkel	Lichtstärke	Strom	Flussspannung $\Delta U$
blau (Lumitronix)	465-470nm	20°	7000mcd	20mA	3,1V (max. 3,6V)
rot (Lumitronix)	620-630nm	30°	4000mcd	20mA	2,0V (max. 2,2V)
blau (Kingbright)	465nm	60°	800mcd	20mA	3,3V (max. 3,6V)
rot (HLMP)	626-635nm	15°	6250mcd	20mA	1,9V (max. 2,2V)

Tabelle 3: Herstellerangaben der nach dem Testverfahren im LED-Driver-Board eingesetzten LED's.

Das LED-Driver-Board hat 5 Eingänge, wovon sich die 4 äußeren Eingänge nur zum direkten Einzelbetrieb der LED's eignen. Der wichtigere ist der mittlere (fünfte) Eingang, der das Schaltungssystem des LED-Driver-Boards ausnutzt und uns mehr Kombinationsmöglichkeiten zum Betrieb der LED's lässt. Mit der Schaltung des LED-Driver-Boards wird es ermöglicht, die LED's jeweils einzeln, mehrere oder sogar alle simultan zu betreiben. Durch den mittleren Eingang empfängt das LED-Driver-Board von einem Frequenzgenerator ein vorzugsweise rechteckiges Signal. Nachdem das LED-Driver-Board gepulst wird, kann es je nach Einstellung alle LED's mit diesem Puls beliefern. Dies geschieht durch einen planvollen Einbau eines Kondensators und Transistors in die Schaltung (Abb. 10). Sie funktioniert so, dass nach dem Eingang eines Triggerimpulses der Kondensator zunächst schnell aufgeladen wird, was der relativ kurzen Anstiegszeit des Ausgangssignals entsprechen soll. Dieser entlädt sich daraufhin wieder und gibt die Ladung an den Transistor. Sobald zwischen der Basis und dem Emitter die Schwellspannung  $U_{BE}$  überschritten wird schaltet sich der Arbeitsstromkreis ein und der Transistor steuert durch. Dadurch wirkt er wie ein Schalter und kann die 4 LED's ansteuern. Die Anstiegszeit soll nicht mehr als ungefähr 10ns dauern, da der Entladevorgang wesentlich länger dauern sollte.

Um die Anzahl der zu benutzenden LED's zu bestimmen wurden Jumper als Kurzschlussstecker auf die jeweils benötigten Pins gesetzt. Durch die elektrische Vernetzung dieser Pins, sind dadurch auch die zu betreibenden LED's miteinander verbunden. Die durch diesen Mechanismus verbundenen LED's können dann gleichzeitig betrieben werden.

Abb. 10 enthält das Schaltbild, welches die Funktionsweise des LED-Driver-Boards verdeutlicht.

Abb. 11 enthält ein Layout der fertig konstruierten Platine des LED-Driver-Boards:

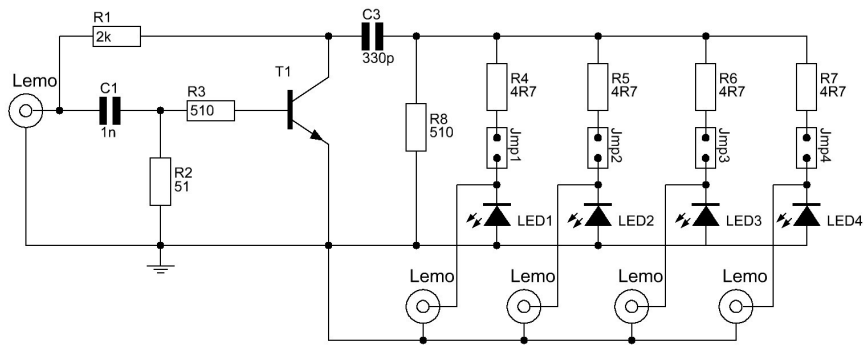


Abbildung 10: Der Schaltplan des LED-Driver-Boards. Nachdem der Kondensator C3 aufgeladen wird, gibt er die Ladung an den Transistor T1. Sobald dieser durchsteuert, werden die LED's angesteuert. Die anzusteuern LED's werden mit Hilfe von Jumpers ausgewählt.

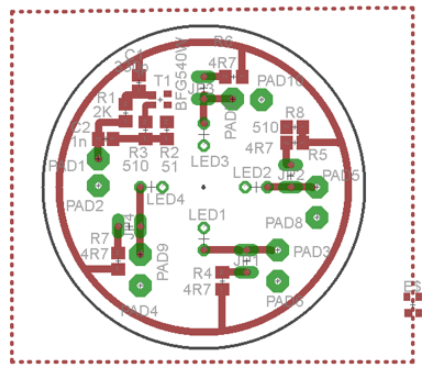


Abbildung 11: Layout des konstruierten LED-Driver-Boards. Es sind die einzelnen Bestandteile der in Abb. 10 erläuterten Bestandteile darauf zu sehen.

Ferner, besteht noch die Möglichkeit eine einzige beliebige LED auch durch Umgehen dieses Schaltungsmechanismus zu betreiben, indem man das Signal des Frequenzgenerators direkt in die Buchse eines der äußeren 4 Eingänge der LED steckt. Diese Vorgehensweise wird sich im nächsten Abschnitt „Vorbereitende Messungen zur Auswahl geeigneter LED's für das LED-Driver-Board“ noch als nützlich erweisen.

Folgende Aufnahmen (Abb. 12 und Abb. 13) demonstrieren das fertige LED-Driver-Board-System in verschiedenen Ansichten:



Abbildung 12: Gesamtkonstruktion des LED-Driver-Board Systems. Das LED-Driver-Board ist die kreisförmige eingerastete Scheibe auf die die 4 LED's gelötet sind.

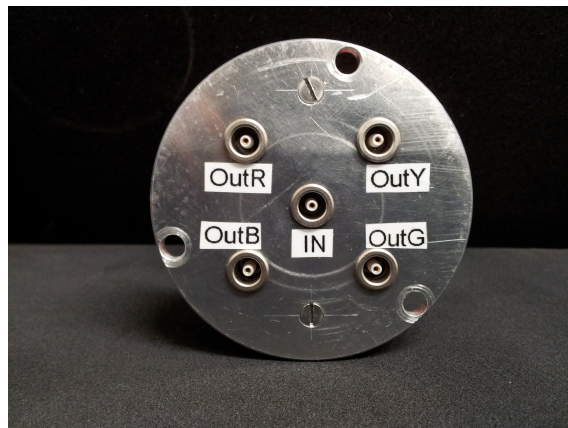


Abbildung 13: Eingänge des LED-Driver-Boards. Die Kürzel bei den äußeren Eingängen entsprechen den Farben der zunächst eingesetzten LED's (gelb, grün, rot, blau).

Das Licht der LED's muss möglichst verlustfrei und gleichmäßig in den Lichtmischblock gebracht werden, wo ein Zylinderblock aus Plexiglas mittels diffuser Reflexionen das Licht homogenisiert. Da die auf dem LED-Driver-Board angebrachten LED's sich in der Luft befinden muss eine Möglichkeit gefunden werden, das Licht der LED's gleichmäßig und ohne die Einwirkung von optischen Phänomenen wie Brechung in den Lichtmischblock zu führen. Um dies zu gewährleisten muss das von den LED's emittierte Licht Medien passieren, die auf dem Weg zum Lichtmischblock den gleichen Brechungsindex haben.

Dazu werden zwei Kreisscheiben aus Plexiglas konstruiert, da Plexiglas den selben Brechungsindex wie das Kunststoffgehäuse der LED's hat, nämlich  $n \approx 1,5$  [5]. Diese beiden Kreisscheiben sollen den näherungsweise makellosen Übergang des LED-Lichts gewährleisten. Dazu werden gemäß Abb. 14

in die erste Kreisscheibe 4 Durchbohrungen durchgeführt. In die vier 4 Bohrungen können die LED's eingekapselt werden, wobei das hintere Ende dann immer noch offen steht. Aus diesem Grund wird auf die erste Scheibe mit den Bohrungen, die zweite Kreisscheibe aus Plexiglas gelegt, wodurch die offenen Enden der Bohrungen mit dem Medium Plexiglas abgeschlossen werden. Der Durchmesser der Scheiben beträgt 40mm. Die Dicke der beiden Kreisscheiben und der Durchmesser der durch Bohrungen erzeugten Löcher entsprechen der Länge bzw. dem Durchmesser der LED's. Das entspricht einer Scheibendicke von 8mm und einem Lochdurchmesser von 5,1mm. Die Bohrungen befinden sich auf einer kreisförmigen Ebene auf der Kreisscheibe mit einem engen Durchmesser von 12mm.

Insgesamt wird durch diese Konstruktion gewährleistet, dass sich das Licht fast verlustfrei im Medium Plexiglas befindet. Durch das Ausnutzen des gleichen Brechungsindex geht der LED-typische Linseneffekt verloren. Dies führt auch dazu, dass das Licht gleichmäßig in den Lichtmischblock gelangen kann.

Der gesamte Aufbau aus LED-Driver-Board System und den darauf angebrachten übereinanderliegenden beiden Kreisscheiben (Plexiglasblock) (Abb. 15), wird später frontal an einem Ende des Lichtmischblocks montiert (Abb. 17).

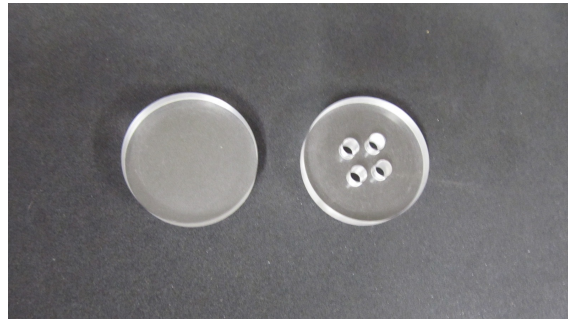


Abbildung 14: Plexiglasblock mit den beiden Kreisscheiben als seinen Bestandteilen.



Abbildung 15: LED-Driver-Board System mit dem darauf angebrachten Plexiglasblock.

## 4.2 Lichtmischblock

Der Lichtmischblock ist das weitere wesentliche Element dieses Aufbaus. Wie im vorigen Unterabschnitt beschrieben, gelangt das Licht über den Plexiglasblock von den LED's in den Lichtmischblock (Abb. 16).

Der Lichtmischblock besteht aus einem lichtdichten zylindrischen und hohlen Aluminium-Gehäuse, der von einem Plexiglaszylinder ausgefüllt wird. Der Innenradius des Aluminium-Zylinders wurde also entsprechend des Radius des Plexiglaszylinders gewählt, damit dieser ohne Luftraum dazwischen hineinpasst. Dieser beträgt  $r=100\text{mm}$ . Die Höhe des Aluminium-Zylinders wurde mit  $h_1=270,5\text{mm}$  größer als die des Plexiglaszylinders gewählt ( $h_2=200\text{mm}$ ). Das einfallende Licht wird an den diffus reflektierenden Innenwänden des Plexiglaszylinders durch Mehrfachreflexionen gemischt. Um den Reflexionsgrad möglichst hoch zu halten, wird um den Plexiglaszylinder das nahezu lichtundurchlässige weiße Millipore-Papier gerollt. Ferner werden die Außenflächen des Plexiglaszylinders vor dem Einbau ins Gehäuse mit Ethanol gereinigt, was ebenfalls zu einem verbesserten Reflexionsgrad beiträgt. Das nun homogenisierte Licht kann nach seinem Austritt am kreisförmigen Ende des zylindrischen Lichtmischblocks mittels Glasfaserkabel von einem Photomultiplier detektiert werden.

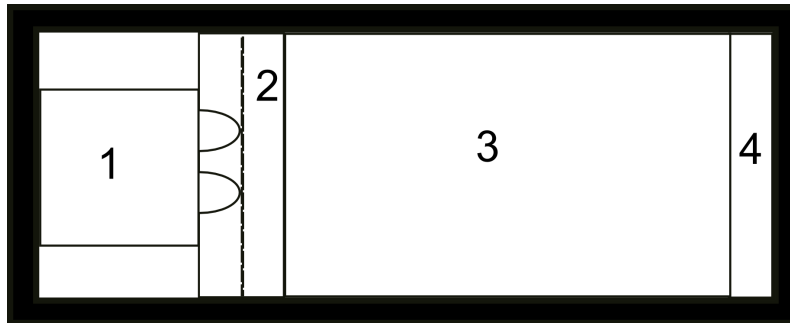


Abbildung 16: Funktionsskizze des Lichtmischblocks. Das Licht gelangt vom LED-Driver-Board System (1) über den zweischeibigen Plexiglasblock (2) in den Plexiglaszylinder („Diffuser“) (3). Das Licht wird an einer im nächsten Unterabschnitt diskutierten PVC-Kreisscheibe (4) an verschiedenen Positionen abgegriffen.

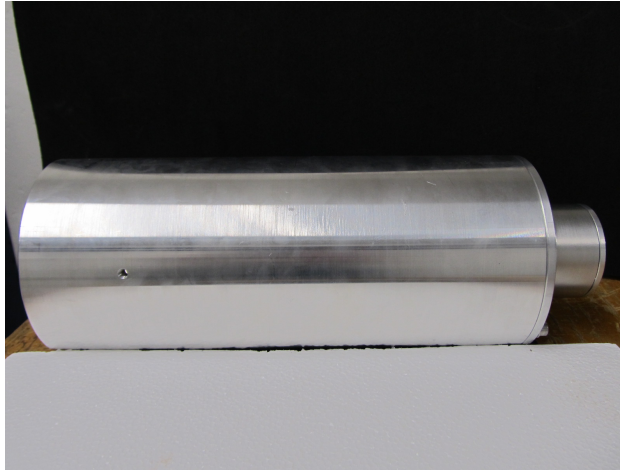


Abbildung 17: Ansicht des Lichtmischblocks mit dem am Eingang montierten LED-Driver-Board.

Die Intensität des gemischten Lichts unterscheidet sich je nach Ort auf der Kreisfläche des Plexiglaszylinders. Ein Problem ist daher die Erstellung eines Konstrukts, welches es ermöglicht zwecks Intensitätsmessung ein Glasfaserkabel an mehreren Orten der Kreisaußenfläche des Lichtmischblocks anbringen bzw. „einrasten“ zu können. Um dieses Problem zu lösen, wurde entschieden eine Kreisscheibe aus PVC zu konstruieren, in die Löcher mit dem Durchmesser eines Glasfaserkabels von 2,2mm gebohrt wurden. Es wurden insgesamt 99 Löcher in einer kreuzsymmetrischen Anordnung gebohrt, was uns eine Vielzahl von Messpunkten für die Intensität bietet (Abb. 18). Zwischen zwei Löchern wurde ein konstanter Abstand von 4mm gewählt. Diese Kreisscheibe wird nun auf die äußere Kreisfläche des Zylinders befestigt, von wo das gemischte Licht herauskommt.

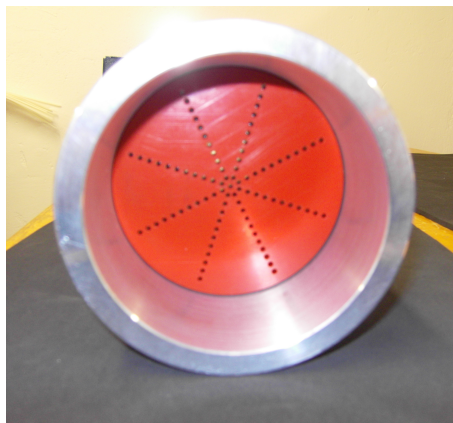


Abbildung 18: Aufnahme der PVC-Kreisscheibe mit den 99 Bohrungen. Im nächsten Abschnitt wird daraus ein Ensemble von Bohrungen ausgewählt an denen Glasfaserkabel das Licht abgreifen können.

### 4.3 Lichtleitung in den Photomultiplier

Das gemischte Licht gelangt über die einzelnen Messpositionen auf der PVC-Kreisscheibe über Glasfaserkabel in den Photomultiplier (Typ XP2900/01, Marke Phillips [3]). Die Enden des Faserkabels waren bereits poliert. Die Länge unseres Kabels beträgt 20m. Am Speicherring DORIS wird ein 2x5m langes Quarzfaserkabel hinzukommen. Also entspricht die Lichtleitung in diesem Aufbau nur zum Teil den zukünftigen Verhältnissen am Speicherring DORIS. Der Photomultiplier befindet sich aufgrund seiner Lichtempfindlichkeit in einer lichtundurchlässigen sogenannten „Blackbox“ (Abb. 19). Dort wird dieser mit einer externen Hochspannung versorgt. Das Ende des Glasfaserkabels wird mittels einer provisorischen Halterung fixiert und an die Oberfläche des Photomultipliers gehalten, damit möglichst viel Licht in den Photomultiplier gelangt.

Die Aufnahme in Abb. 19 gibt einen Gesamtüberblick über den Aufbau unserer Apparatur, mit all den für den Messvorgang in Abschnitt 6 („Optimierung der Fasereinkopplung“) relevanten Bestandteilen.

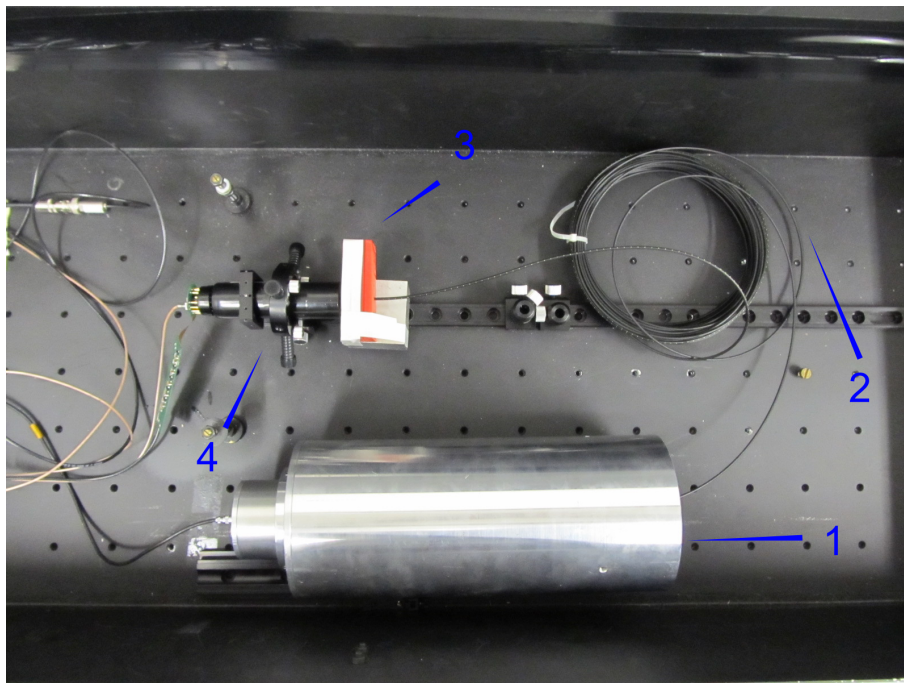


Abbildung 19: Der experimentelle Aufbau mit allen relevanten Bestandteilen. Innerhalb der lichtundurchlässigen „Blackbox“ findet die Lichtdetektion statt. Das gemischte Licht wird über den Lichtmischblock (1), das gerollte Glasfaserkabel (2) und der provisorischen rotfarbenen Halterung dessen (3) in den festfixierten Photomultiplier (4) geführt. Die rotfarbene Halterung sorgt für eine stabile Verbindung des Glasfaserkabels mit der Oberfläche des Photomultipliers. Außerhalb der Box werden die Intensitäten der Lichtsignale der LED's mit Hilfe eines Oszilloskops aufgenommen.

## 5 Vorbereitende Messungen zur Auswahl der LED's für das LED-Driver-Board

### 5.1 Testverfahren zur Überprüfung geeigneter Lichtsignale der LED's

Bevor die Messung der verschiedenen Intensitäten beim Lichtaustritt begonnen werden kann, muss sichergestellt werden, dass das LED-Driver-Board und die darin fixierten vier LED's auch Lichtpulse erzeugen, die für die Bedingungen, die bei dem Experiment der OLYMPUS-Kollaboration am Speicherring DORIS vorherrschen werden, ausreichend kurz sind.

Die Elektronen bzw.- Positronenstrahlen verlaufen nicht kontinuierlich, sondern in Form von gepulsten Elektronenpaketen. Ein Zyklus entspricht im DORIS zehn Teilchenpaketen, die in festen Zeitintervallen ausgesandt werden. Zwischen zwei solchen Paketen vergeht eine Zeit von 96ns, wohingegen die Zeit zwischen dem letzten Teilchenpaket und dem ersten des nächsten Zyklus 100ns beträgt. In genau dieser Zeit muss dem Lichtpulsersystem die Kalibration des Detektorsystems bestehend aus den 18  $PbF_2$ -Kristallen und Photomultipliern gelingen.

Aus diesem Grund ist es wichtig alle eingebauten LED's zu testen und falls nötig durch LED's zu ersetzen, die schnellere Lichtsignale erzeugen. In unserem Fall sind in dem LED-Driver-Board zunächst eine gelbe, grüne, rote und blaue LED des Herstellers Kingbright eingebaut (Tabelle 2). Diese werden zunächst einzeln nach ihrer Intensität und Pulsbreite getestet. Bei diesem Einzelbetrieb (Vortest) einer LED pulst der Frequenzgenerator des Typs Tektronix AFG 3101 eine beliebige LED mit einem Frequenzsignal. Zur Ansteuerung der LED wurde ein schneller Operationsverstärker (Typ THS 3201) der Firma Texas Instruments zwischengeschaltet (Abb. 20). Dieser stromrückgekoppelte Verstärker zeichnet sich durch ein großes Bandbreite-Verstärkungsprodukt von 1.8 GHz und einer Slew Rate von  $6700 \text{ V}/\mu\text{s}$  aus. Ein die genaue Funktion beschreibender Schaltplan des Operationsverstärkers ist dem Anhang A zu entnehmen. Um das Lichtsignal der LED zu detektieren und in ein elektrisches Signal umzuwandeln verwenden wir eine lichtempfindliche Photodiode (Typ SFH 203) der Marke Siemens [6]. Im Vergleich zu einem Photomultiplier ist sie weniger empfindlich, aber bedarf auch keiner externen Spannungsversorgung. Die Photodiode wird bei jedem Messvorgang mit einem Abstand von 5mm genau vor die in demjenigen Moment getestete LED gehalten. Damit soll eine Lichtdetektion zu möglichst immer gleichen Bedingungen stattfinden, um auch vergleichbare Messergebnisse bei den Testmessungen zu erzielen.



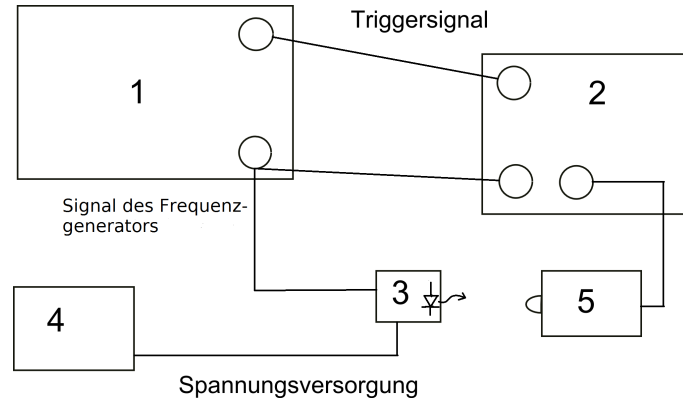


Abbildung 20: Funktionsskizze zum Einzelbetrieb einer LED (Vortest). Hierfür wird das LED-Driver-Board durch einen Operationsverstärker (Typ THS 3201, Marke Texas Instruments) ersetzt. Der Frequenzgenerator (1) pulst über den Operationsverstärker (3), die auf seinem Treiber fixierte LED. Der Operationsverstärker wird von einer externen Spannungsquelle versorgt (4). Die Photodiode (5) detektiert das Signal, das sich am Oszilloskop (2) ablesen lässt

Danach wird in einer zweiten Messreihe jede LED mit dem selben Ziel direkt über den mittleren Eingang des LED-Driver-Boards getestet, das heißt unter Verwendung des Schaltsystems des LED-Driver-Boards (Abb. 21):

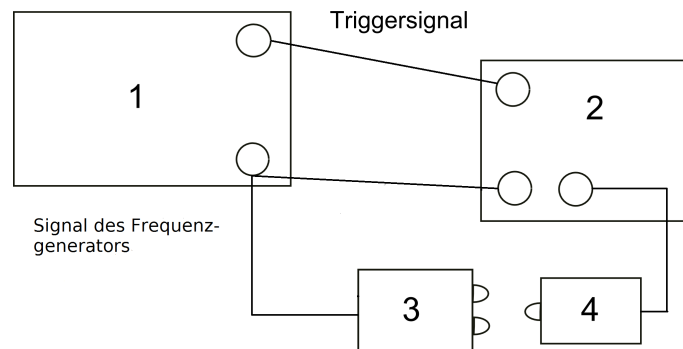


Abbildung 21: Funktionsskizze zum Betrieb einer LED mit dem Schaltsystem des LED-Driver-Boards, wie im späteren Einsatz am Experiment angestrebt. Der Frequenzgenerator (1) pulst direkt das LED-Driver-Board System (3), wodurch die jeweilige LED angesteuert wird. Die Photodiode (4) detektiert das Signal, das sich am Oszilloskop (2) ablesen lässt

Die erste Messung (Vortest) (Abb. 20) dient lediglich dazu ein erstes Bild über die Geschwindigkeit und Intensität der einzelnen LED's im Einzelbetrieb zu gewinnen und diese untereinander vergleichen zu können. Die zweite Messung (Abb. 21) ist von größerer Bedeutung, da der für die Kalibration der SYMB-Detektoren wichtige gleichzeitige Betrieb der LED's nur über diese Funktionsweise realisiert werden kann. Also müssen die LED's gerade über diesen Weg die Bedingung erfüllen, dass deren Pulsbreite um schätzungsweise 30%-40% unter 100ns liegt. Dadurch soll garantiert sein, dass keine Verunreinigung der Teilchenpakete im einfallenden Strahl durch die Lichtpulse des Lichtkalibrationssystems stattfindet.

Als Pulsbreite definieren wir hier diejenige Zeit des Pulses, die zwischen den 90%-Werten der ansteigenden und abfallenden Pulsflanke liegt.

Der Reihe nach wurden die gelbe, grüne, rote und blaue LED des Herstellers Kingbright getestet. Im folgenden befinden sich zunächst noch die Einstellungen des Frequenzgenerators (Tabelle 4 und 5) zu den beiden Testbetriebsarten gemäß Abb. 20 und 21.:

Frequenz	Oberspannung (High voltage)	Niederspannung (Low Voltage)
10kHz	0V	-2,5V
Signalbreite	Fallende Flanke	Aufsteigende Flanke
10ns	5ns	5ns

Tabelle 4: Tabelle mit der Frequenzgeneratoreinstellung zum Einzelbetrieb einer LED. Die Signalfrequenz wird mit 10kHz gewählt. Zwischen ca. -2 und -3,5V (Niederspannung) liegen die typischen Flussbereiche unserer LED. Die absteigende und abfallende Flanke werden mit dem Minimalwert 5ns gewählt. Ebenso liegt die Pulsbreite mit 10ns bei dem Minimalwert des Geräts. Diese lässt sich im Falle zu geringer Signalintensität noch leicht nach oben verändern.

Frequenz	Oberspannung (High voltage)	Niederspannung (Low Voltage)
10kHz	6V	4V
Signalbreite	Fallende Flanke	Aufsteigende Flanke
10ns	5ns	5ns

Tabelle 5: Tabelle der Frequenzgeneratoreinstellung zum Betrieb einer LED im LED-Driver-Board. Die Frequenz wird mit 10kHz gewählt. Die absteigende und abfallende Flanke werden mit dem Minimalwert 5ns gewählt. Ebenso liegt die Pulsbreite mit 10ns bei dem Minimalwert des Gerätes. Diese lässt sich im Falle zu geringer Signale noch leicht nach oben verändern. Der Offset liegt bei zunächst 4V, wobei die obere Grenzspannung bei 6V liegt. Die Differenz beider Werte bestimmt den Flussbereich, der für jede LED variiert werden muss.

Im folgenden sind der Reihe nach unsere Messergebnisse für die gelbe, grüne, rote und blaue LED des Herstellers Kingbright zu sehen (Abb. 22, Abb. 23, Abb. 24, Abb. 25). Die Pulshöhe [mV] ist entlang der Y-Achse gegen die Zeit  $t$  aufgetragen.

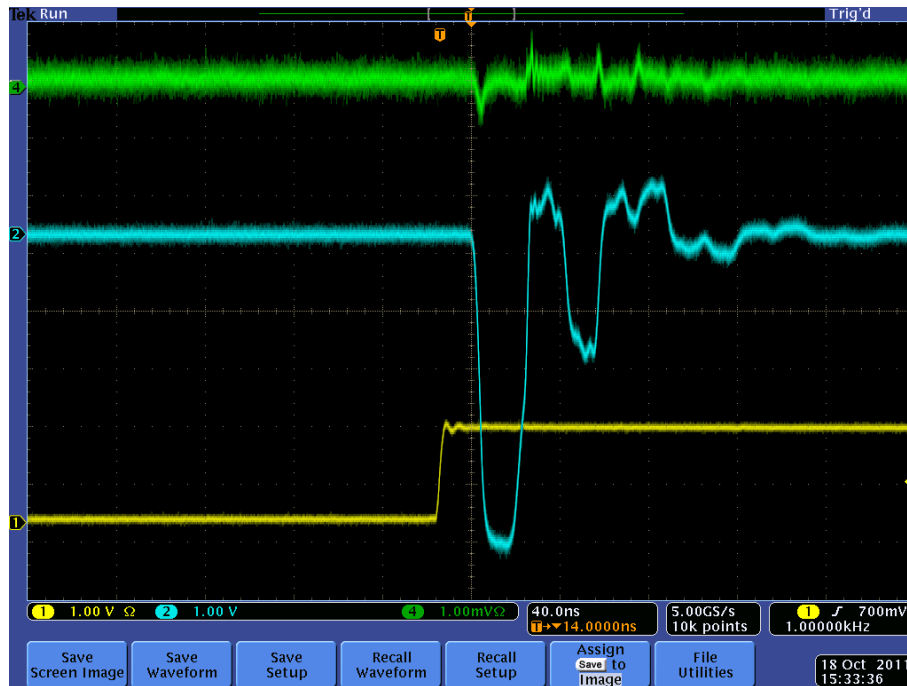


Abbildung 22: Gelbe LED des Herstellers Kingbright (Typ L-53YD) im Einzelbetrieb (Vortest) (Zeitachse: 40ns/div. Intensität: 1mV/div.). Die gelbe Linie (Channel 1) des Oszilloskops entspricht dem Triggersignal. Die blaue Linie (Channel 2) entspricht dem verstärkten und invertierten Signal des Frequenzgenerators. Das Signal wurde mit einem T-Stück abgegriffen und es sind deutliche Reflexionen zu sehen. Die grüne Linie (Channel 4) misst den Ausschlag der Lichtdetektion durch die Photodiode und ist in unserer Betrachtung die Wichtigste.

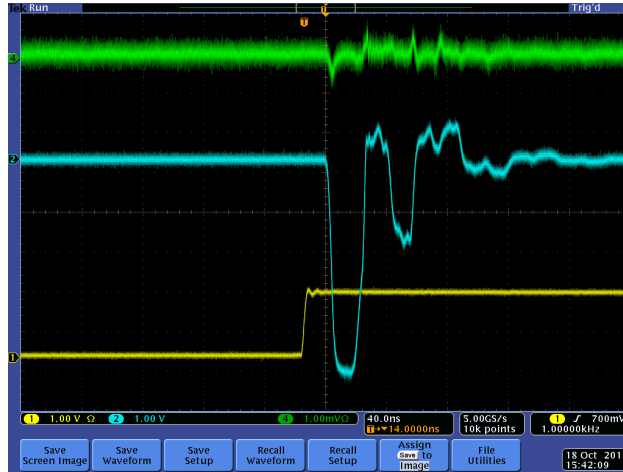


Abbildung 23: Grüne LED des Herstellers Kingbright (TypL-53GD) im Einzelbetrieb (Vortest). (Zeitachse: 40ns/div. Intensität: 1mV/div.).

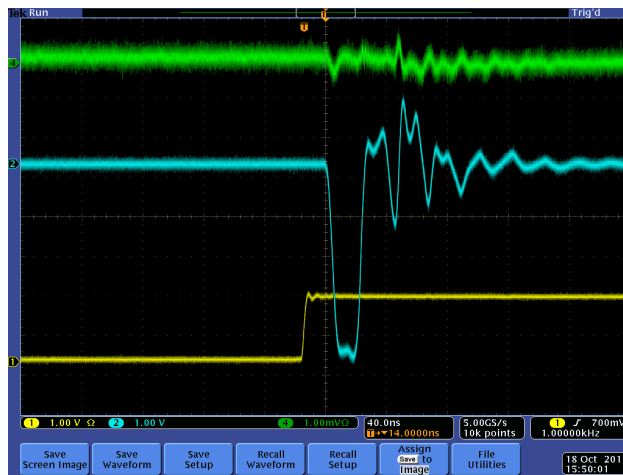


Abbildung 24: Rote LED des Herstellers Kingbright (Typ L-53HD) im Einzelbetrieb (Vortest). (Zeitachse: 40ns/div. Intensität: 1mV/div.)

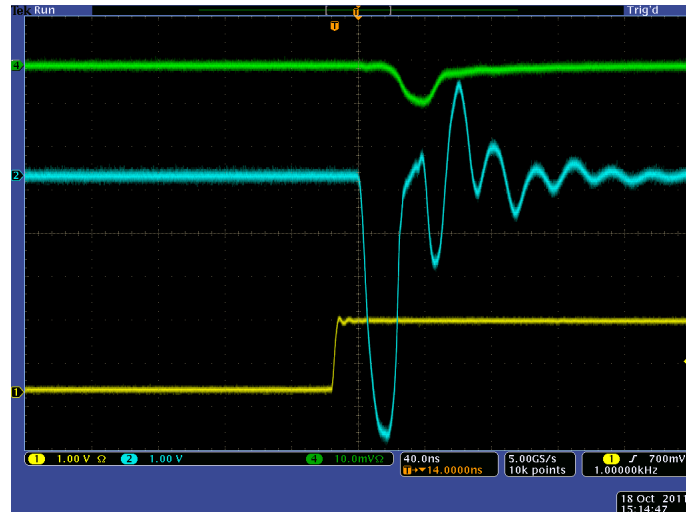


Abbildung 25: Blaue LED des Herstellers Kingbright (Typ L-53MBDL) im Einzelbetrieb.  
(Zeitachse: 40ns/div. Intensität: 10mV/div.)

Das Signal des Frequenzgenerators (Channel 2) variiert auf den Aufnahmen von Messung zu Messung, da für jede verschiedenfarbige LED sich aufgrund unterschiedlicher Flussbereiche verschiedene geeignete Spannungswerte finden ließen.

Die gelbe, grüne und rote LED (Abb. 22, Abb. 23, Abb. 24) zeigen praktisch kaum einen deutlich erkennbaren Ausschlag, wodurch weder Größen wie die Intensität oder die Pulsbreite bestimmbar sind. Dies macht sich während der Messung auch daran bemerkbar, dass selbst bei relativer Dunkelheit beim Betrieb dieser LED's ein Aufleuchten mit dem Sehvermögen der Augen nicht erkennbar war. Dies ist ein erstes Indiz dafür, dass auch die relativ unempfindliche Photodiode diese Intensitäten nicht mehr wahrnehmen konnte. Das Licht der blauen LED zeigt einen deutlichen Ausschlag von mehreren mV und eine sehr kurze Pulsbreite.

Die Photodiode ist aber scheinbar zu schwach, um genug vom Licht der grünen, gelben und roten LED zu detektieren. Ferner, liegt der begründete Verdacht vor, dass selbst das was wir als Veränderung des Ausschlags aufgrund von Licht sehen, kein Licht, sondern nur elektrische Übersprecher sind. Um das zu überprüfen wurde in einer nachträglichen leicht veränderten Messung das Licht der roten LED (Abb. 24) exemplarisch erneut versucht zu detektieren. Dabei wurde die Pulsbreite am Frequenzgenerator auf 200ns angehoben (Abb. 26).

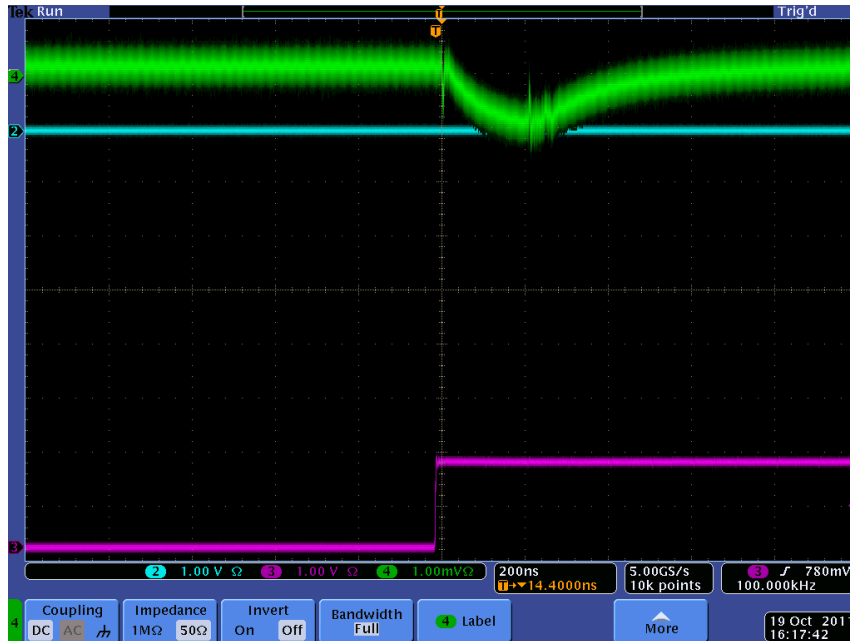


Abbildung 26: rote LED des Herstellers Kingbright (Typ L-53HD) im Einzelbetrieb bei einer am Frequenzgenerator eingestellten Pulsbreite von 200ns (Zeitachse: 200ns/div. Intensität: 1mV/div.). Das Triggersignal entspricht der zum Channel 3 gehörenden Linie der Farbe violett. Im Vergleich zu Abb. 24 ist wieder nur ein minimaler ( $\approx 1\text{mV}$ ), aber was die Signalbreite angeht, erkennbarer Ausschlag zu beobachten ( $\approx 180\text{ns}$ ).

Außerdem wurde eine Messung mit der grünen LED im Schaltsystem des LED-Driver-Boards durchgeführt (mittlerer Eingang) (Abb. 27). Dabei wurde auch das Signal beobachtet, nachdem ein weißes Blatt Papier zwischen Photodiode und Lichtquelle möglichst vertikal zum Lichteinfall platziert wurde (Abb. 28). Dieses Signal wurde mit einem ohne Papier verglichen. Erwartungsgemäß müsste ein beträchtlicher Teil des Lichts durch das Papier reflektiert werden:

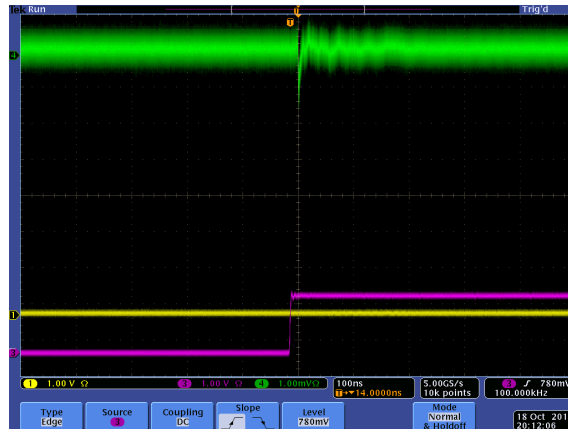


Abbildung 27: Grüne LED des Herstellers Kingbright (Typ L-53GD) im Schaltsystem des LED-Driver-Boards.

(Zeitachse: 100ns/div. Intensität: 1mV/div.). Ein dünner und kleiner Peak ist zu beobachten. Das Signal ist insgesamt sehr unklar und nicht sofort als Licht identifizierbar.

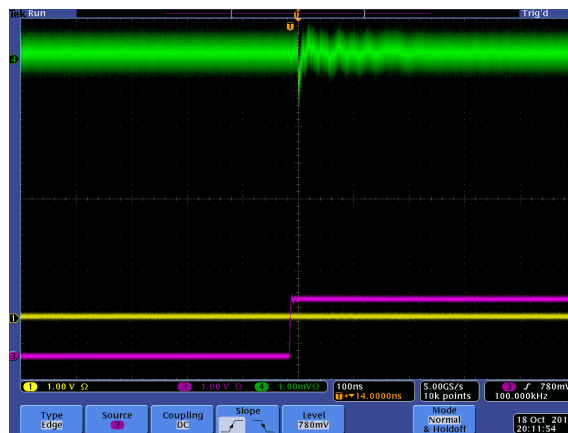


Abbildung 28: Grüne LED des Herstellers Kingbright (Typ L-53GD) im Schaltsystem des LED-Driver -Boards.

(Zeitachse: 100ns/div. Intensität: 1mV/div.). Zwischen Lichtquelle und Photodiode befindet sich weißes Papier. Im Vergleich zu Abb. 27 ist im Signal kein Unterschied feststellbar. Also handelt es sich nicht um Lichtsignale.

Auf dem Bild der roten LED mit vergrößerter Pulsbreite (im Einzelbetrieb)(Abb. 26) ist diesmal wieder nur ein geringer ( $\approx 1\text{mV}$ ), aber zumindest klar erkennbarer Ausschlag der Lichtdetektion zu sehen. Das Bild unterscheidet sich deutlich von dem schmalen Peak in Abb. 24, der nicht unbedingt einem Lichtsignal zuzuordnen ist. An dieser Aufnahme sieht man zwar, dass die rote LED doch auch Licht aussendet, das aber bei einer kurzen eingestellten Pulsbreite zu schwach für die Photodiode ausfällt. Das Licht der roten LED mit einer solchen für uns zu großen Pulsbreite ist aber nicht brauchbar. Der Papiervergleich bei der Messung mit der grünen LED liefert fast identische Aufnahmen. Falls der schmale Peak bei der Messung ohne Papier (Abb. 27) von Licht gekommen wäre, wäre zu erwarten gewesen, dass dieser aufgrund des Papiers dazwischen, nur in höchstens abgeschwächter Form im zweiten Bild (Abb. 28) fortbesteht. Doch selbst nachdem man ein weißes Blatt Papier zwischen Quelle und Detektor hält, verändert sich das Bild praktisch nicht. Also handelt es sich fast ausschließlich um elektrische Signale, die auf den Oszilloskopaufnahmen der grünen, gelben und roten LED zu sehen sind. Ferner, sind damit unseren Beobachtungen entsprechend auch die Ergebnisse der grünen, roten und gelben LED's des Herstellers Kingbright nicht brauchbar. Aus diesem Grund geben wir nur das für uns brauchbare Ergebnis der blauen LED in genauerer Form an. Dazu gehören die Fußbreite, Pulsbreite und Intensität. Diese Größen werden durch markieren und anschließendem Ablesen bestimmt.

Messgrößen	blaue LED (Reichelt)
Pulsbreite [ns]	$(28 \pm 2)\text{ns}$
Fußbreite [ns]	$(40 \pm 2)\text{ns}$
Intensität [V]	$(11 \pm 1,4)\text{mV}$

Tabelle 6: Ergebnis der blauen LED des Herstellers Kingbright (L-53MBDL) im Einzelbetrieb (siehe Abb. 25).

Die Pulsbreite des Signals der blauen LED liegt mit 28ns deutlich unter den geforderten 100ns. Beim Betrieb der blauen LED im Schaltsystem des LED-Driver-Boards erwarten wir allerdings eine deutliche Vergrößerung der Pulslänge. Auch hier muss beobachtet werden, dass das Licht nicht länger als 60ns-70ns braucht.

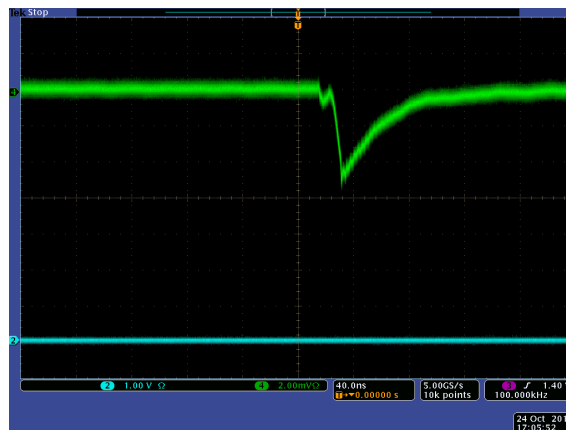


Abbildung 29: Blaue LED des Herstellers Kingbright (Typ L-53MBDL) im Schaltsystem des LED-Driver-Boards (Zeitachse: 40ns/div. Intensität: 2mV/div.).



Folgende Werte Messwerte ergeben sich dabei:

Messgrößen	blaue LED (Kingbright)
Pulsbreite [ns]	$(48 \pm 2)$ ns
Fußbreite [ns]	$(72 \pm 2)$ ns
Intensität [V]	$(5,6 \pm 1,4)$ mV

Tabelle 7: Ergebnis der blauen LED des Herstellers Kingbright (Typ L-53MBDL) im Schaltsystem des LED-Driver-Board (siehe Abb. 29)

Diese blaue LED (Kingbright) eignet sich aufgrund ihrer kurzen Pulslänge von 48ns sehr gut für unser Lichtkalibrationssystem. Nun müssen noch drei weitere LED's gefunden werden, die unseren Bedingungen genügen. Dazu betrachten wir zunächst erneut im Einzelbetrieb die Intensitäten und Pulsweiten folgender drei LED's aus unserem Sortiment:

- rote LED des Herstellers Lumitronix (ArtNo. 1563002002)
- rote LED des Herstellers HLMP (Typ EG-15-UX00)
- blaue LED des Herstellers Lumitronix (ArtNo. 15404)

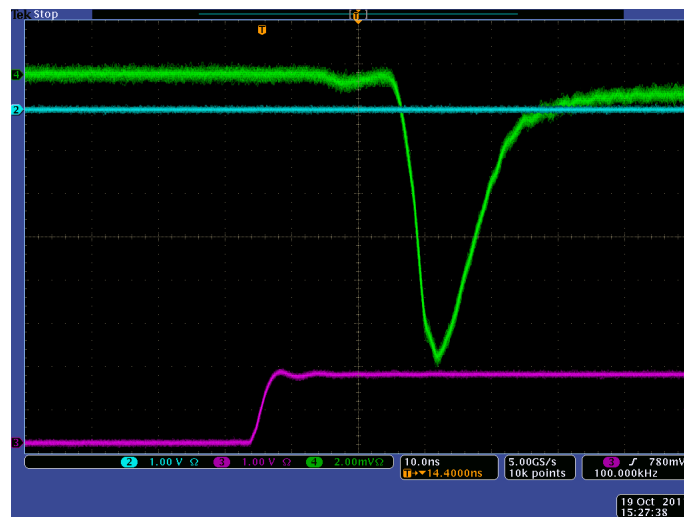


Abbildung 30: Blaue LED des Herstellers Lumitronix (ArtNo. 15404) im Einzelbetrieb (Vortest). (Zeitachse: 10ns/div. Intensität: 2mV/div.). Ein unseren Anforderungen entsprechendes kurzes und lichtintensives Signal ist zu erkennen.

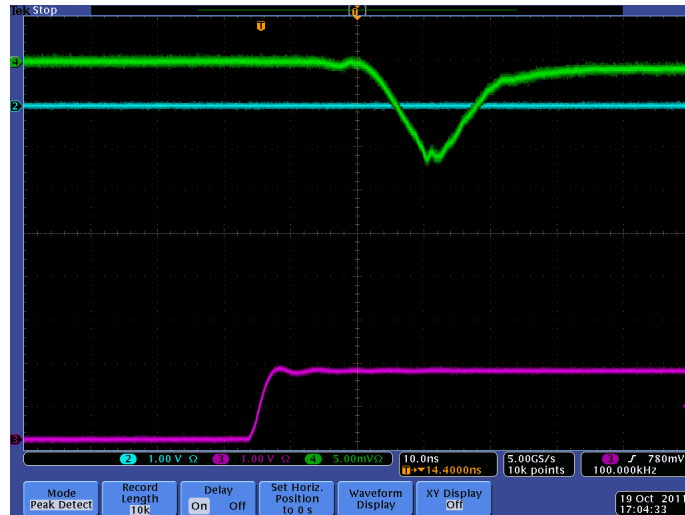


Abbildung 31: Rote LED des Herstellers HLMP (Typ EG15-UX00) im Einzelbetrieb (Vortest). (Zeitachse: 10ns/div. Intensität: 5mV/div.). Ein unseren Anforderungen entsprechendes kurzes und lichtintensives Signal ist zu erkennen.

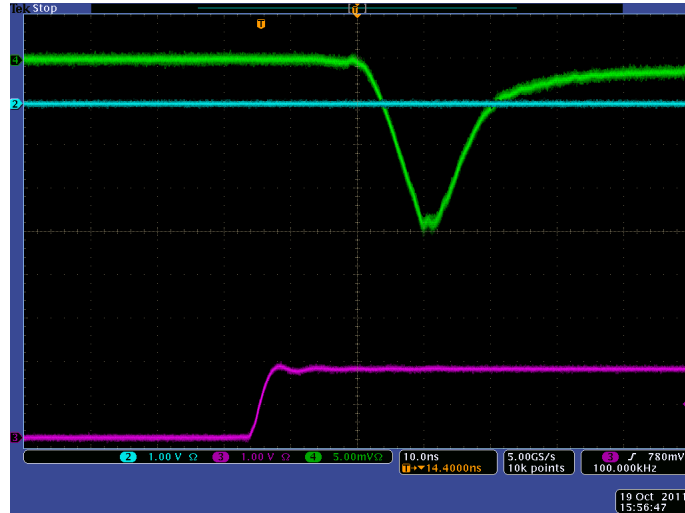


Abbildung 32: Rote LED des Herstellers Lumitronix (ArtNo. 1563002002) im Einzelbetrieb (Vor-test).  
 (Zeitachse: 10ns/div. Intensität: 5mV/div.). Ein unseren Anforderungen entsprechendes kurzes und lichtintensives Signal ist zu erkennen.

Messgrößen	blaue LED (Lumitronix)	rote LED (Lumitronix)	rote LED (HLMP)
Pulsbreite [ns]	$(20 \pm 1)$ ns	$(21 \pm 1)$ ns	$(19 \pm 1)$ ns
Fußbreite [ns]	$(29 \pm 2)$ ns	$(30 \pm 2)$ ns	$(28 \pm 2)$ ns
Intensität [V]	$(13,9 \pm 1,4)$ mV	$(20 \pm 1,5)$ mV	$(12,5 \pm 1,5)$ mV

Tabelle 8: Ergebnisse der nächsten drei Test-LED's (blau (Lumitronix), rot (Lumitronix) und rot (HLMP)) (siehe Abb. 30, Abb. 31, Abb. 32).

Die Pulsbreiten der Signale dieser drei LED's (blau (Lumitronix), rot (Lumitronix), rot (HLMP)) im Einzelbetrieb sind mit  $(20 \pm 1)$ ns,  $(21 \pm 1)$ ns und  $(19 \pm 1)$ ns hervorragend klein. Sie sind kleiner als die Pulsbreite der bereits ausgewählten blauen LED von Kingbright ( $28 \pm 1$ ns). Aus diesem Grund erwarten wir, dass sich diese drei LED's auch beim Betrieb im Schaltsystem des LED-Driver-Boards unterhalb der von uns abgeschätzten maximal zulässigen Pulsbreite von 60ns-70ns befinden werden.

Es folgen Oszilloskopaufnahmen dieser drei LED's beim Betrieb im LED-Driver-Board (Abb. 33, Abb. 34, Abb. 35).



Abbildung 33: Ergebnis der blauen LED des Herstellers Lumitronix (ArtNo. 15404) im Schaltsystem des LED-Driver-Boards.  
 (Zeitachse: 40ns/div. Intensität: 2mV/div.). Auch in dieser Betriebsart der LED bleibt das Signal kurz genug.

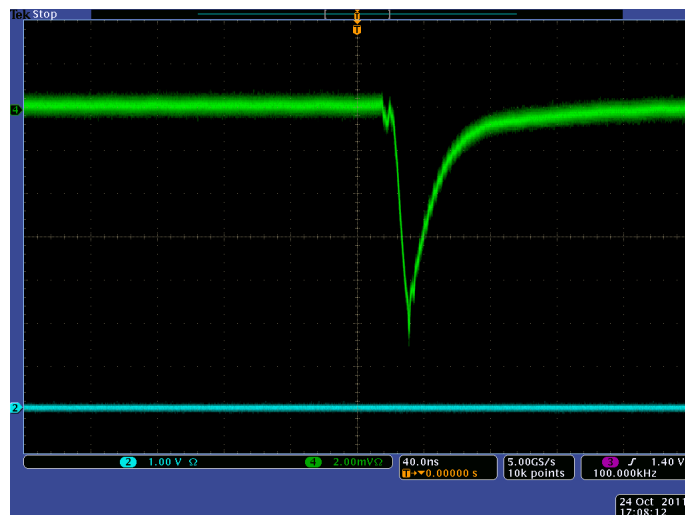


Abbildung 34: Ergebnis der roten LED des Herstellers HLMP (Typ EG15-UX00) im Schaltsystem des LED-Driver-Boards.  
 (Zeitachse: 40ns/div. Intensität: 2mV/div.). Auch in dieser Betriebsart der LED bleibt das Signal kurz genug.



Abbildung 35: Ergebnis der roten LED des Herstellers Lumitronix (ArtNo. 1563002002) im Schaltsystem des LED-Driver-Boards.  
(Zeitachse: 10ns/div. Intensität: 5mV/div.). Auch in dieser Betriebsart der LED bleibt das Signal kurz genug.

Messgrößen	blaue LED (Lumitronix)	rote LED (Lumitronix)	rote LED (HLMP)
Pulsbreite [ns]	$(60 \pm 4)$ ns	$(40 \pm 4)$ ns	$(39 \pm 4)$ ns
Fußbreite [ns]	$(92 \pm 4)$ ns	$(78 \pm 2)$ ns	$(72 \pm 4)$ ns
Intensität [V]	$(12,5 \pm 1,4)$ mV	$(11,4 \pm 1,4)$ mV	$(11,4 \pm 1,4)$ mV

Tabelle 9: Ergebnisse der nächsten drei Test-LED's (blau (Lumitronix), rot (Lumitronix) und rot (HLMP)) im Schaltsystem des LED-Driver-Boards (siehe Abb. 30, Abb. 31, Abb. 32). Im Vergleich zum Einzelbetrieb (Tabelle 8) erzielen diese Werte wie erwartet geringere Intensitäten und langsamere Lichtsignale. Es liegen jedoch unseren Anforderungen entsprechende ausreichend kurze und lichtintensive Signale vor.

Wie an den Ergebnissen zu erkennen ist, eignen sich auch diese drei LED's um im LED-Driver-Board des Lichtkalibrationssystems benutzt zu werden. Die beiden roten LED's sind relativ schnell mit ihren Pulsbreiten von ungefähr 40ns. Die blaue LED von Lumitronix liegt mit einer Pulsbreite von 60ns noch im von uns für ausreichend eingeschätzten Pulsbereich. Mit 48ns liegt auch die blaue LED von Kingbright im passenden Rahmen. Aus diesem Grund bleibt diese LED im LED-Driver-Board eingebaut. Die gelbe, grüne und rote LED's von Kingbright werden ausgebaut und durch die drei soeben als geeignet verifizierten LED's ersetzt.

### 5.1.1 Charakterisierung der verwendeten LED's

Um eine geeignete Einrichtung des LED-Driver-Boards mit den passenden LED's zu erhalten, ist diese Messung von großer Nützlichkeit gewesen. In Tabelle 10 sind zusammenfassend die Ergebnisse der vier ausgewählten LED's beim Betrieb im Schaltsystem des LED-Driver-Boards enthalten: Allerdings ist diese Messung auch fehlerbehaftet und neigt zu Ungenauigkeiten. Eine große Quelle

Messgrößen	blau (Lumitronix)	blau (Kingbright)	rot (Lumitronix)	rot (HLMP)
Pulsbreite [ ]	(60±4)ns	(48±1)ns	(40±4)ns	(39±4)ns
Fußbreite [ns]	(92±4)ns	(72±2)ns	(78±2)ns	(72±4)ns
Intensität [V]	(12,5±1,4)mV	(5,6±1,4)ns	(11,4±1,4)mV	(11,4±1,4)mV

Tabelle 10: Zusammenfassung der Ergebnisse der erwählten LED's (blau (Lumitronix), rot (Lumitronix) und rot (HLMP), blau (Kingbright)) beim Betrieb im Schaltsystem des LED-Driver-Boards.

der Ungenauigkeit ist die Photodiode. Sie bietet einige Vorteile gegenüber eines Photomultipliers. So braucht sie keine externe Spannungsversorgung, muss nicht gegen Licht abgeschottet werden und ist in der Lage den Lichteinfall proportional in elektrischen Strom umzusetzen. Allerdings ist eine Photodiode für eine solche Messung mit LED's nicht empfindlich genug. So ist es sehr gut möglich, dass die gelbe, grüne, und rote LED von Kingbright, die im Einzelbetrieb kein konkret messbares Signal lieferten, bei einem lichtempfindlicheren Detektor doch brauchbare Lichtintensitäten liefern. Um diese Vermutung zu verifizieren hätte man vor dem Auslöten dieser drei LED's aus dem LED-Driver-Board deren Signale an einem Photomultiplier auslesen lassen können.

Ferner, bestehen Zweifel bezüglich der langsameren Reaktionszeit der Photodiode, die für diesen Bautyp bei ca. 5ns liegt [6]. Ein Photomultiplier (Reaktionszeit <2ns [3]) detektiert das Licht schneller, also kann man davon ausgehen, dass wir bei einem Test mit einem Photomultiplier noch kürzere Pulsbreiten der LED's erhalten hätten. Nichtsdestotrotz ließ sich auch mit der Photodiode ein geeignetes Ensemble von LED's finden. Durch die einfache Handhabung der Photodiode gegenüber dem Photomultiplier ließ sich die Messung auch schnell durchführen. Wenn sich bei unserer Messung zu große Werte für die Pulsbreiten (<<70ns) ergeben hätten, hätte es sich durchaus gelohnt die Testmessungen mit dem Photomultiplier zu wiederholen.

An den Aufnahmen zum Einzelbetrieb der LED's (Abb. 22, Abb. 23, Abb. 24, Abb. 25) ist kein reines Signal des Frequenzgenerators zu erkennen. Da der Vorwiderstand sowohl des Frequenzgenerators und des Oszilloskops auf 50Ω eingestellt war, war das gesamte System nicht auf 50Ω, sondern auf 25Ω (Parallelsschaltung) angepasst. Dadurch sind die hohen Reflexionen zu erklären. Bei der Bestimmung unserer Messgrößen lag eine Ableseungenauigkeit von immer einem halben Digit vor. Dieser Fehler hängt von der gewählten Skalierung der Zeit und Spannungsachse ab. Bei der Bestimmung der Pulshöhen kommen starke Schwankungen des Signals hinzu, sodass der Peak teilweise um 1mV hin und her schwankte. Es erforderte ein geschicktes Umgehen, um ein stabiles und möglichst hohes Niveau des Peaks zu finden. Eine weitere Fehlerquelle lag in dem auf 5mm festgelegten Abstand zwischen der Lichtquelle und der Photodiode. Da man die Lichtquelle immer wieder umjumpern und vor der Photodiode replatzieren musste, verschob sich der Abstand immer wieder leicht. Aus all diesen Gründen wurde der Fehler für die Bestimmung der Intensität auf einem halben Digit und zusätzlich 1mV festgelegt. Ein Ziel bei der Testmessung war es, mindestens so viel Lichtintensität zu detektieren, dass das Messen der Puls- und Fußbreiten nicht erschwert wird. Also sind die vielen Fehlerquellen und Schwankungen bei der Bestimmung der Lichtintensitäten nicht unbedingt ausschlaggebend.

## 5.2 Maximierung des Spannungsflusses des LED-Driver-Boards mit einem Photmultiplier

Nachdem in den vorigen Unterabschnitten (5.1, 5.2) das LED-Driver-Board durch die Auswahl von geeigneteren LED's verbessert wurde, werden nun Messungen zur genaueren Charakterisierung des Systems vorgenommen. Dabei wird ab jetzt zur Lichtdetektion ein Photomultiplier benutzt.

Zunächst ist es interessant zu wissen, wo die technischen Maximalwerte der verschiedenen Bestandteile unserer Apparatur liegen. Das LED-Driver-Board kann mit Hilfe von Jumpfern die zwei roten oder zwei blauen LED's jeweils gleichzeitig betreiben. Interessant sind hierbei die Grenzwerte für den maximalen Spannungsbereich der LED's, der die höchste Lichtintensität liefert. Um diese zu bestimmen wird das LED-Driver-Board System samt den LED's in den lichtundurchlässigen Kasten gestellt. Das LED-Driver-Board System wird dem Photomultiplier gegenübergestellt (Abb. 36), wobei ein großer Abstand von  $(25\pm 1)$ cm dazwischen gewählt wird, um den Photomultiplier nicht mit zu hohen Lichtintensitäten zu belasten. Der Photomultiplier wird mit einer Hochspannung  $U_V$  von  $(-1,300\pm 0,001)$ kV betrieben, was dem maximalen Wert des empfohlenen Betriebsbereichs des Photomultipliers entspricht. Bei der Aufnahme des Pulses am Oszilloskop wurde solange die Flussspannung am Frequenzgenerator variiert bis derjenige Wert gefunden war, der einen maximalen Pulsausschlag am Oszilloskop verursachte.

Dieses Verfahren wurde für die beiden interessanten Fälle der LED-Betriebskombinationen durchgeführt. Zum einen beim simultanen Betrieb zweier roter LED's und zum anderen mit den beiden blauen LED's. Beide Oszilloskopaufnahmen sind dem Anhang B zu entnehmen. Im Verlauf dieses Unterabschnittes werden noch charakteristische Verhaltensweisen des Photomultipliers diskutiert.



Abbildung 36: Funktionsskizze zum experimentellen Aufbau zur Maximierung des Spannungsflusses des LED-Driver-Boards mit einem Photmultiplier. Das LED-Driver-Board System (1) sendet beim Betrieb zweier LED's Licht aus, das vom Photomultiplier detektiert wird (2). Beide Komponenten dieses Aufbaus befinden sich in der lichtundurchlässigen „Blackbox“.

Messgrößen	Doppelrot	Doppelblau
Oberspannung (high Voltage) [V]	(6±0, 10)	(6±0, 10)
Offsetspannung (low voltage) [V]	(2,7±0, 10)	(3±0, 10)
$\Delta U$ [V]	(3,3±0,14)	(3±0,14)

Tabelle 11: Einstellungen zum Erreichen maximaler Lichtintensität des LED-Driver-Boards beim Doppelbetrieb mit zwei roten oder zwei blauen LED's.

Die Differenzspannung  $\Delta U$  ist diejenige mit der die Doppel-LED's im Endeffekt betrieben werden. Der Fehler berechnet sich mittels Gauß'scher Fehlerfortpflanzung.

$$\Delta(\Delta U) = \sqrt{(\Delta U_{ober})^2 + \Delta U_{off}^2}$$

## 5.3 Messung charakteristischer Kenngrößen des Photomultipliers

### 5.3.1 Dunkelstrom

Selbst bei Dunkelheit fließt im Photomultiplier ein geringer Strom zwischen den Dynoden. Die Ursache dieses sogenannten Dunkelstroms liegt meistens im thermischen Rauschen. Da die Photokathode und die Dynoden aus Materialien mit sehr geringer Austrittsarbeit bestehen, emittieren sie auch Elektronen, wenn Raumtemperatur vorherrscht. Mit positiver Spannung betriebene Photomultiplier rauschen weniger stark. Da sich unsere Photokathode auf negativer Hochspannung befindet, müsste das thermische Rauschen in unserem Fall deutlicher vorliegen. Die folgende Aufnahme zeigt die Dunkelstrompulse des Photomultipliers (Abb. 37).

Der größte Dunkelstrompuls lässt sich als ein Puls mit einer Höhe von (6,4±2)mV auslesen. Ein Teil

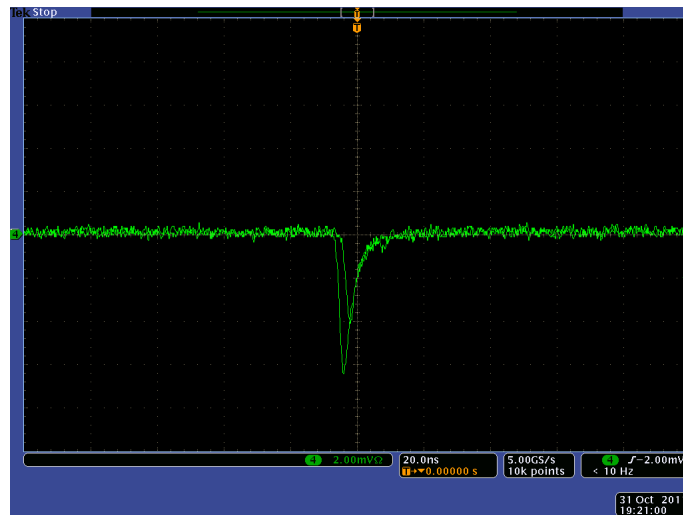


Abbildung 37: Dunkelstrompulse des Photomultipliers bei Raumtemperatur. (Zeitachse: 20ns/div. Intensität: 10mV/div.)



des Fehlers wird mit 1mV angegeben, was einer halben Skaleneinheit als Ablesefehler entspricht. Allerdings unterlag der Pulshöhenwert in Realität sehr großen Schwankungen im Bereich von 1mV, weshalb wir den gesamten Fehler mit 2mV angeben. Außerdem ist ein noch etwas kleinerer Puls mit einer ähnlichen Breite zu sehen. Ferner, wurden auch immer wieder zeitlich verzögerte Pulse in der Größenordnung von mehreren mV und einer Breite von mehreren Nanosekunden beobachtet. Eine Ursache für solche „Nachpulse“ ist die Ionisation von Restgasatomen durch Sekundärelektronen und deren anschließende Beschleunigung zur Photokathode. Diese lösen an den Dynoden erneut Elektronen aus. Die zeitliche Vergrößerung rührt von der langsamen Geschwindigkeit der Ionen her.

Letztlich ist noch zu sagen, dass der Dunkelstrom des Photomultipliers gering genug ist, um eine Kühlung vermeiden zu können. Außerdem erwarten wir später im Experiment Pulshöhen, gegenüber denen der Dunkelstrom vernachlässigbar klein sein sollte.

### 5.3.2 Abhängigkeit des Photomultipliersignals von der Hochspannung

Beim Betrieb eines Photomultipliers gibt es einen linearen Arbeitsbereich. In diesem ist die Anzahl der einfallenden Photonen proportional zur Anzahl der ausgelösten Sekundärelektronen. Ab einer gewissen Lichtintensität zeigt der Photomultiplier allerdings ein Sättigungsverhalten und löst weniger Sekundärelektronen aus. Dieser Fall tritt auf, wenn der Strom der Sekundärelektronen 10% des Stromes der im Widerstand zwischen zwei Dynoden in der Spannungsteilerkette abfällt, überschreitet.

Um das Sättigungsverhalten unseres Photomultipliers zu untersuchen, variieren wir die Versorgungsspannung zwischen 0,8kV und 1,3kV und betrachten dabei das Pulsverhalten. Im Folgenden ist das Verhalten des Photomultipliers beim Betrieb des LED-Driver-Boards mit der doppelblauen (Abb. 38) und doppelroten (Abb. 39) LED-Kombination gezeigt.

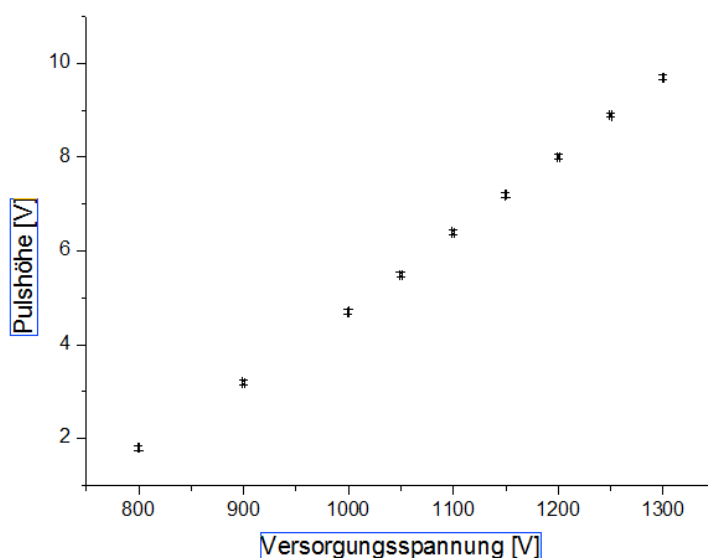


Abbildung 38: Verhalten des Photomultipliersignals im Hochspannungsbereich 800-1300V bei doppelblauer LED-Betriebskombination des LED-Driver-Boards.

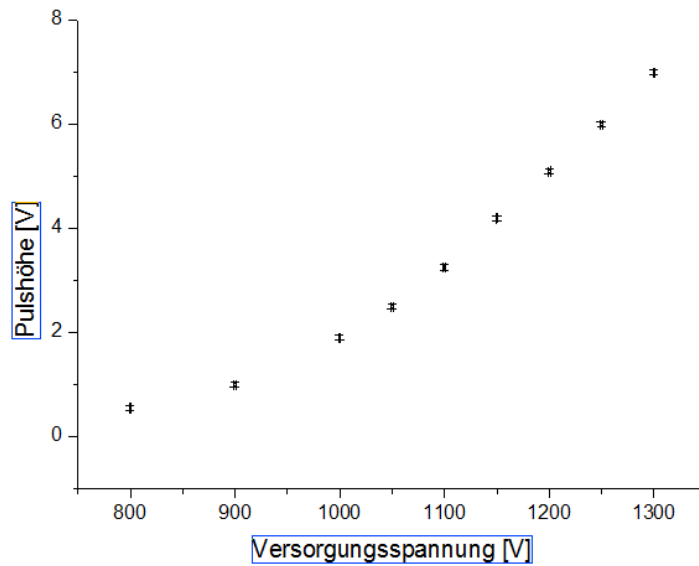


Abbildung 39: Verhalten des Photomultipliersignals im Hochspannungsbereich 800-1300V bei doppelroter LED-Betriebskombination des LED-Driver-Boards.

An den Graphen ist ein Sättigungsverhalten nicht zu erkennen. Die Spannung zwischen beiden Dyoden bleibt aufrechterhalten, sodass die Verstärkung nicht nachlässt. Der lineare Bereich reicht bis zu den 1,3kV. Das könnte bedeuten, dass die Widerstände in der Spannungsteilerkette nicht gleich groß sind, sondern zur Anode hin immer größer werden. Dadurch bleibt die Verstärkung auch für hohe Dynodenströme erhalten, wodurch der lineare Bereich deutlich vergrößert wird. Um im Bereich bis 1,3kV ein Sättigungsverhalten zu sehen, müssten die LED Licht größerer Intensität emittieren. Ansonsten könnte man versuchen über die 1,3kV Versorgungsspannung hinauszugehen. Dies ist aber nur unter Gefährdung des Photomultipliers möglich.

## 6 Optimierung der Fasereinkopplung

### 6.1 Messung der Intensitäten beim Lichtaustritt an verschiedenen Messpositionen

Im vorigen Abschnitt wurden ein paar grundsätzliche Merkmale des Photomultipliers diskutiert. In diesem Teil wird der Aufbau des Experiments entsprechend Abb. 13 endgültig wiederhergestellt. Das Glasfaserkabel wird in die verschiedenen Löcher der PVC-Kreisscheibe gesteckt, um das aus dem Lichtmischblock herauskommende Licht bis zum Photomultiplier zu führen. Dabei können dank der verschiedenen Messpositionen Gebiete am Lichtmischblock abgetastet und die Intensität des gemischten Lichts an dieser Stelle mit dem Photomultiplier ausgelesen werden. Es wurde entschieden die für die Analyse wichtigsten Gebiete zu untersuchen. Dazu wurde folgender Auszug von 33 Löchern aus der kreuzsymmetrischen Anordnung von 99 Löchern ausgewählt (Abb. 40):

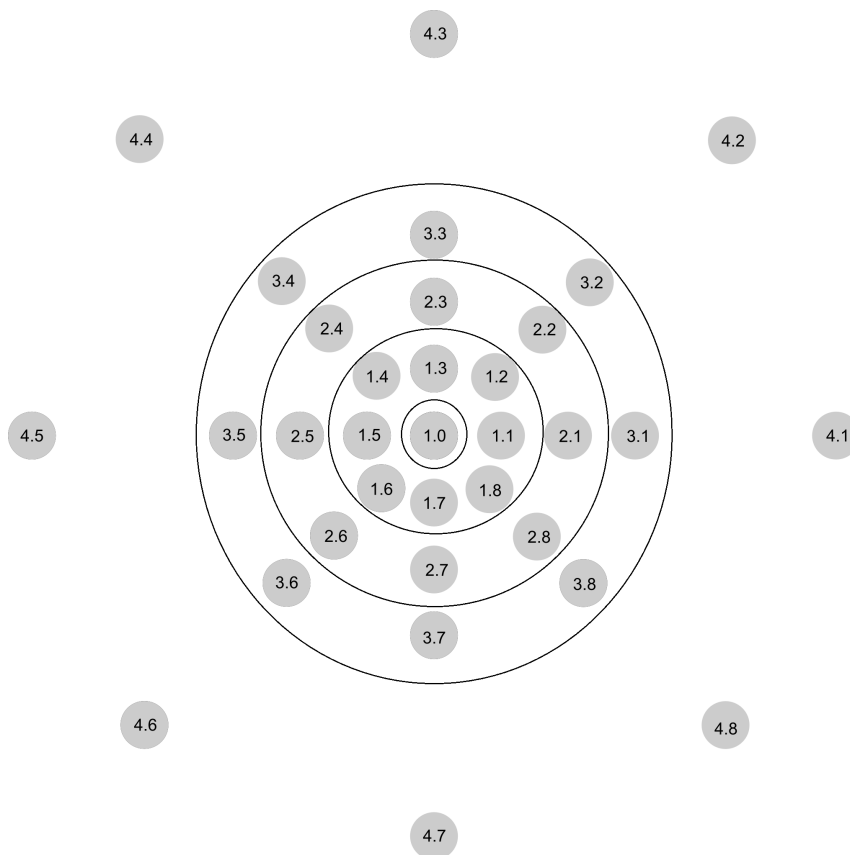


Abbildung 40: Auswahl der 33 Löcher für die Untersuchung von Intensitätsunterschieden beim Lichtaustritt. Die einzelnen Messebenen sind durch Kreise voneinander getrennt zu sehen.

In der Mitte (Messposition 1.0) wird die höchste Intensität erwartet. Zusätzlich werden in die acht Richtungen die drei nächsten Nachbarn untersucht. Danach werden zwei Löcher freigelassen und ein viertes in jeder Richtung untersucht. Außerhalb des Gebietes 1.0 werden also 4 verschiedene Messgebiete unterschieden. Es sind sowohl die Intensitätsverluste von Messgebiet zu Messgebiet als auch die Unterschiede innerhalb eines Messgebietes zu untersuchen. Die Untersuchung erfolgte für die doppelrote und- doppelblaue LED-Betriebskombination des LED-Driver-Boards.

### 6.1.1 Analyse der Messergebnisse bei doppelroter LED-Betriebskombination des LED-Driver-Board-Systems

Folgende Grafik (Abb. 41) zeigt das Ergebnis für die doppelrote LED-Betriebskombination. Die Lichtintensitäten der LED's wurden an den Oszilloskopaufnahmen (siehe Anhang C) abgelesen und gegen die entsprechende Bezeichnung der Messpositionen aufgetragen. Im Anschluss daran sind die Messwerte auch tabellarisch dargestellt, wobei alle Werte auch auf das Gebiet 1.0 normiert wurden. Der Fehler für die Pulshöhen wird für alle Messwerte mit 1mV gewählt.

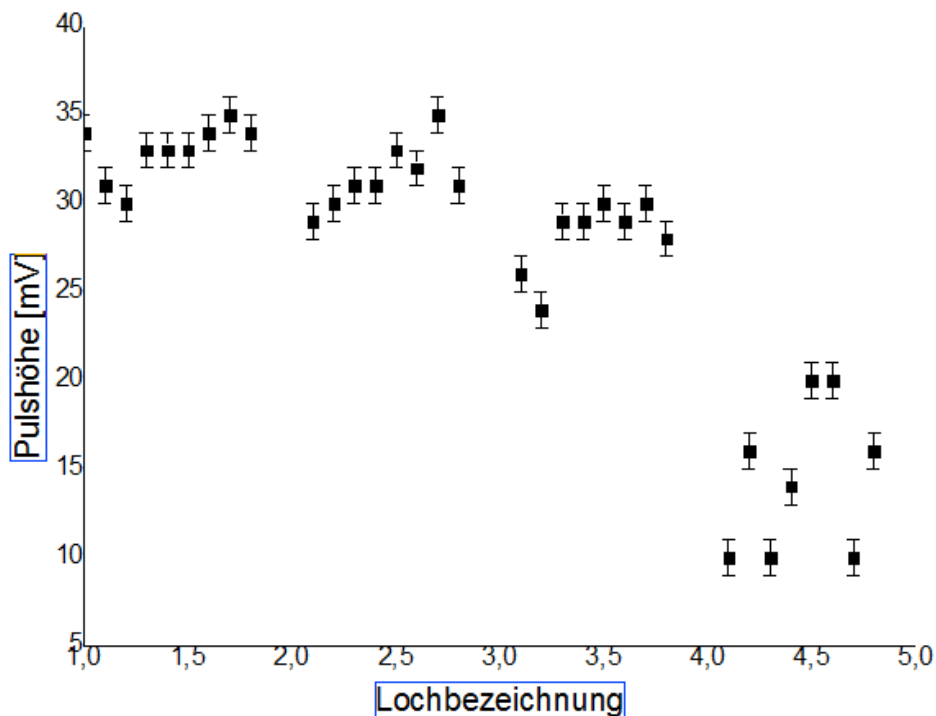


Abbildung 41: Die Lichtintensitäten aller Messebenen bei doppelroter LED-Betriebskombination des LED-Driver-Boards im Vergleich. Der Messwert auf der Y-Achse entspricht dem Gebiet 1.0.

Messposition	Pulshöhe [mV]	Normierung auf 1.0	Messposition	Pulshöhe [mV]	Normierung auf 1.0
1.0	34	1,00			
1.1	31	0,91	3.1	26	0,76
1.2	30	0,88	3.2	24	0,71
1.3	33	0,97	3.3	29	0,85
1.4	33	0,97	3.4	29	0,85
1.5	33	0,97	3.5	30	0,88
1.6	34	1,00	3.6	29	0,85
1.7	35	1,03	3.7	30	0,88
1.8	34	1,00	3.8	28	0,82
2.1	29	0,85	4.1	10	0,29
2.2	30	0,88	4.2	16	0,47
2.3	31	0,91	4.3	10	0,29
2.4	31	0,91	4.4	14	0,41
2.5	33	0,97	4.5	20	0,59
2.6	32	0,94	4.6	20	0,59
2.7	35	1,03	4.7	10	0,29
2.8	31	0,91	4.8	16	0,47

Tabelle 12: Messgebiete 1 und 2 (doppelrote LED-Betriebskombination) (Abb. 41).

Tabelle 13: Messgebiete 3 und 4 (doppelrote LED-Betriebskombination) (Abb. 41).

Auf dem Graphen (Abb. 41) sind die verschiedenen Gebiete, die wir gemessen haben, gut voneinander getrennt zu beobachten. Dabei ist noch zu bemerken, dass der Punkt, der die Y-Achse kreuzt dem Gebiet 1.0 mit einer Pulshöhe von  $(34 \pm 1)$ mV entspricht.

Am Verlauf der Messwerte sieht man, wie die Intensität von Gebiet zu Gebiet geringer wird. Der Sprung von Gebiet 1 zu Gebiet 2 sieht minimal aus. Allerdings verzeichnet Gebiet 4 einen überproportionalen Lichtintensitätsverlust. Nicht nur, weil dazwischen zwei Messgebiete übersprungen wurden, sondern weil die Pulshöhe um den Faktor 3 und damit teilweise auf bis zu  $(10 \pm 1)$ mV abfällt.

Bei der Betrachtung der einzelnen Messgebiete untereinander, ist auffällig, dass die Fluktuationen der Messwerte mit zunehmender Entfernung vom Mittelpunkt (1.0) sich erhöhen. Je weiter die Messebene vom Mittelpunkt entfernt ist, desto mehr schwanken die Messwerte. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für äußere Gebiete auf der Kreisscheibe der Anteil der diffusen Reflexionen den der gerichteten Reflexionen deutlich überwiegt. Dadurch wird das Licht im Raum des Zylinders beliebig gestreut und nur ein geringer Teil erreicht die äußeren Messstellen auf der Kreisscheibe. Da n verschiedene Messungen für ein bestimmtes Messgebiet durchgeführt wurden ist im Folgenden das arithmetische Mittel für jedes einzelne Gebiet angegeben. Die Anzahl der Messungen pro Messgebiet ist  $n=8$ :

$$\bar{x} = \frac{1}{8} \left( \sum_{i=1}^8 \right) x_i$$

Der mittlere Fehler der Einzelmessung wird mit der Standardabweichung s angegeben:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Der mittlere Fehler des Mittelwerts  $\Delta(\bar{x})$  ist um den Faktor  $1/\sqrt{8}$  im Vergleich zur Standardab-

weichung reduziert:

$$\Delta(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{8}}$$

Größe	Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4
Mittelwert $\bar{x}$ [mV]	32,9	31,5	28,1	14,5
Standardabweichung $s$ [mV]	1,7	1,9	2,1	4,2
Mittlerer Fehler des Mittelwerts $\Delta(\bar{x})$ [mV]	0,6	0,7	0,7	1,5

Tabelle 14: Errechnete Werte von  $\bar{x}$ ,  $s$  und  $\Delta\bar{x}$  für die doppelrote LED-Betriebskombination

Bei der Betrachtung der Normierung der Messwerte auf 1.0 lässt sich die Behauptung, dass von Gebiet zu Gebiet die Lichtintensität geringer wird, in quantifizierter Form wiedererkennen. In den ersten beiden Messgebieten bleibt die Intensität bis auf drei kleine Ausreißer der Gebiete 1.2, 2.1 und 2.2 immer oberhalb von 90% (Tabelle 12). In Ebene 3 verlieren sich durchschnittlich weitere 10% an Lichtintensität. In Ebene 4 findet ein überproportionaler aber stark fluktuierender Abfall statt. Die geringste Intensität wurde an 4.1, 4.3, und 4.7 mit  $(10\pm 1)$ mV gemessen. Dieser Wert ist nicht mal um den Faktor zwei größer als der Dunkelstrom, den wir gemessen haben, wodurch dessen Relevanz anzuzweifeln ist.

Die für jedes Gebiet zunehmende Standardabweichung bestätigt unsere Vermutung, dass die Fluktuationen der Intensitäten innerhalb eines Messgebietes mit der Entfernung vom Mittelpunkt (1.0) zunehmen.

Es wurden außerdem auch Werte gemessen, die leicht oberhalb der von uns vermuteten höchstmöglichen Intensität von 34mV liegen, obwohl unsere errechneten Mittelwerte für die ersten beiden Gebiete doch leicht unter den 34mV von 1.0 liegen. An 1.7 und 2.7 wurden sogar  $(35\pm 1)$ mV gemessen. Diese liegen damit aber auch im Fehlerbereich von 1.0.

Dennoch, ist es gut möglich Werte im ganz nahen Bereich von  $(34\pm 1)$ mV oder auch darüberliegende, in den ersten beiden Messgebieten zu messen. Da der Abstand zwischen zwei Messpositionen nur 4mm beträgt, ist es sogar wahrscheinlich, dass das Licht gerade im Umkreis der ersten beiden Messgebiete irgendwo in diesem Bereich mit maximaler Intensität hinreflektiert wird. So ist es praktisch gesehen nicht richtig im absoluten Vergleich einzelner Messungen von einer maximalen Intensität des Lichts in 1.0 auszugehen.

Außerdem ist auffällig, dass in jedem beliebigen Gebiet für die Positionen x.5, x.6, x.7 und x.8 die Werte für die Pulshöhen tendenziell ansteigen. Es scheint trotz gleichen Gebietes innerhalb eines jeden Gebietes einen Bereich zu geben, wo intensiveres Licht hinreflektiert wird. In Abb. 40 entspricht dies damit dem unteren und sich eher links befindenden Bereich der gesamten PVC-Kreisscheibe. Diese Feststellung muss auch bei den Messergebnissen der doppelblauen Betriebskombination untersucht werden.

### 6.1.2 Analyse der Messergebnisse bei doppelblauer LED-Betriebskombination des LED-Driver-Board-Systems

Die Ergebnisse für die doppelblaue Betriebskombination sind im Folgenden entsprechend der Vorgehensweise für die doppelrote Betriebskombination dargestellt:

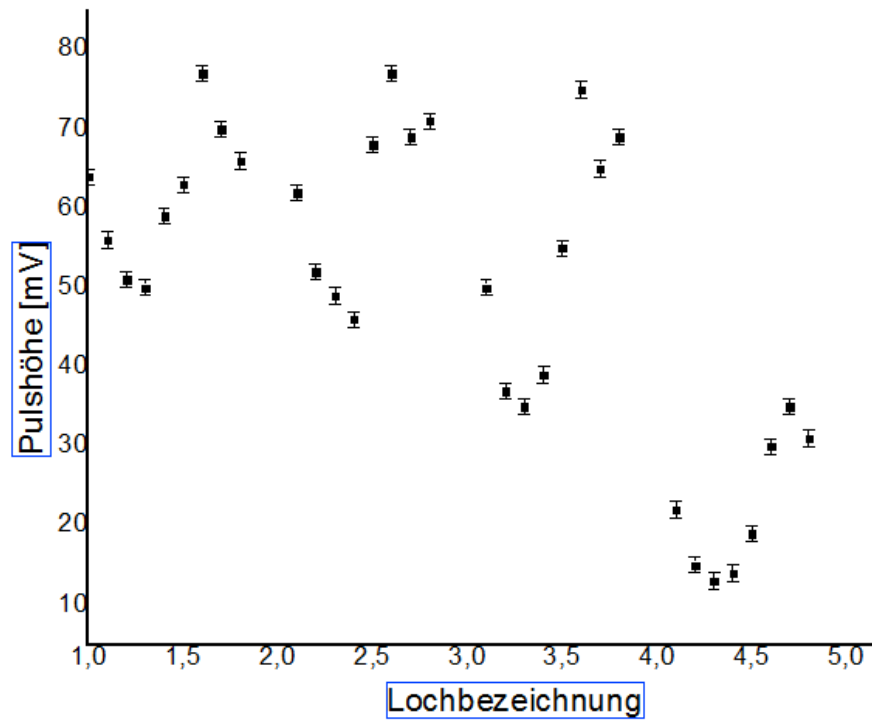


Abbildung 42: Die Lichtintensitäten aller Messebenen bei doppelblauer LED-Betriebskombination des LED-Driver-Boards im Vergleich. Der Messwert auf der Y-Achse entspricht dem Gebiet 1.0.

Messposition	Pulshöhe [mV]	Normierung auf 1.0
1.0	64	1,00
1.1	56	0,88
1.2	51	0,80
1.3	50	0,78
1.4	59	0,92
1.5	63	0,98
1.6	77	1,20
1.7	70	1,09
1.8	66	1,03
2.1	62	0,97
2.2	52	0,81
2.3	49	0,77
2.4	46	0,72
2.5	68	1,06
2.6	77	1,20
2.7	69	1,08
2.8	71	1,11

Tabelle 15: Messgebiete 1 und 2 (doppelblaue LED-Betriebskombination) (Abb. 42).

Messposition	Pulshöhe [mV]	Normierung auf 1.0
3.1	50	0,78
3.2	37	0,57
3.3	35	0,55
3.4	39	0,61
3.5	55	0,86
3.6	75	1,17
3.7	65	1,02
3.8	69	1,08
4.1	22	0,35
4.2	15	0,23
4.3	13	0,20
4.4	14	0,22
4.5	19	0,30
4.6	30	0,47
4.7	35	0,55
4.8	31	0,48

Tabelle 16: Messgebiete 3 und 4 (doppelblaue LED-Betriebskombination) (Abb. 42).

Größe	Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4
Mittelwert $\bar{x}$ [mV]	61,5	61,8	53,1	22,4
Standardabweichung $s$ [mV]	9,4	11,4	15,1	8,6
Mittlerer Fehler des Mittelwerts $\Delta(\bar{x})$ [mV]	3,3	4,0	5,3	3,0

Tabelle 17: Errechnete Werte von  $\bar{x}$ ,  $s$ , und  $\Delta\bar{x}$  für die doppelblaue LED-Betriebskombination

Auf dem Graphen der Abb. 42 sind erneut die vier verschiedenen Messgebiete zu erkennen. Diesmal sind sie allerdings schwieriger als in der vorigen Messung (Abb. 41) zu unterscheiden, da die Messwerte innerhalb eines Gebietes viel stärker schwanken und kein einheitliches Gebilde für sich ergeben. Wenn man eine beliebige der vier Messgebiete genauer betrachtet, stellt man innerhalb jedes Gebietes zwei Bereiche fest. Zunächst fällt die Lichtintensität von Messung zu Messung in den Gebieten x.1, x.2, x.3 und x.4. Für die Gebiete danach steigt die Lichtintensität sehr stark an (x.5, x.6, x.7, x.8). Dieses Phänomen wurde bereits für die doppelrote Betriebskombination beobachtet, doch diesmal in einer deutlicheren Form. Vor allem Gebiet x.6 und x.7 kriegen sehr intensives Licht ab, welches in den ersten drei Messgebieten Lichtintensitäten im Bereich von 70-77mV ausmacht. Im Gebiet 1.0 (Mittelpunkt) wurde eine Lichtintensität von  $(64\pm 1)$ mV gemessen, die damit fast doppelt so hoch liegt wie für die doppelrote Betriebskombination  $(34\pm 1)$ mV. Anhand der auf 1.0 normierten Werte lassen sich die enormen Schwankungen denen die doppelblaue Betriebskombination unterliegt, quantifizieren. Das Spektrum der relativen Schwankungen reicht



über alle Gebiete hinweg von 1,20 (Messpos. 2.6, 1.6)) bis 0,20 (Messpos. 4.3) und ist damit deutlich größer als für die doppelrote Betriebskombination (Spektrum realtiver Schwankungen: 1,03-0,29). Die berechneten Werte für die Standardabweichungen  $s$  charakterisieren genau diese im Vergleich zur vorigen Messung enormen Streuungen bzw. Fluktuationen um die Mittelwerte  $\bar{x}_i$ .

Dass die Intensitäten für die doppelblaue Betriebskombination höher liegen als für die doppelrote, überrascht nicht. Dies deckt sich mit unseren Beobachtungen im Abschnitt „Vorbereitende Testmessungen zur Auswahl geeigneter LED's“, wo sich die doppelblaue Betriebskombination mit größeren Pulshöhen als intensiver auszeichnete.

Ein Grund für die hohen Schwankungen der Intensitäten innerhalb eines Messgebietes liegt ebenfalls in den benutzten LED's. Die blaue LED von Kingbright hat einen sehr hohen Abstrahlwinkel von  $60^\circ$  (Tabelle 2). Dadurch kommen die Lichtstrahlen früher in Kontakt mit der Außenoberfläche des Plexiglaszylinders, was die Anzahl der diffusen Reflexionen und Streuungen im Zylinder erhöht. Dies bewirkt letztlich eine breitere und ungenauere Verteilung der Intensitäten beim Lichtaustritt. Die Messwerte für die Intensitäten unterlagen im Vergleich zur Testmessung im vorigen Abschnitt weniger starken Schwankungen. Dies liegt an der Genauigkeit mit der der Photomultiplier die Intensitäten im Vergleich zur Photodiode auslesen konnte. Aus diesem Grund wurde nur ein Ablesefehler von einer halben Skaleneinheit angegeben. Bei der Bestimmung der oberen Grenzspannung für die maximale Intensität im Unterabschnitt 6.1 entspricht dies einem Wert von 100mV. Die Intensitäten, die an den verschiedenen Messpositionen in diesem Unterabschnitt gemessen wurden, sind somit mit einem Fehler von 1mV behaftet.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Der SYMB-Luminositätsmonitor des OLYMPUS-Experiments detektiert Moller/Bhabha-Streuprozesse. Er besteht aus einer Anordnung von 2x9 symmetrisch zueinander platzierten Bleifluorid-Kristallen und Photomultipliern, deren Kalibration durch geeignete Lichtpulse unseres „Monitoring Systems“ permanent beobachtet werden soll. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Konzept und der Aufbau eines auf LED basierenden externen Lichtkalibrationssystems für den SYMB-Luminositätsmonitor im OLYMPUS-Experiment untersucht. Der Aufbau besteht aus einem LED-Driver-Board System, dessen LED's Licht über einen Lichtmischblock und Glasfaserkabel in Photomultiplier senden. Beim Austritt des Lichts entstehen aufgrund diffuser Reflexionen im Lichtmischblock unterschiedliche Intensitätsbereiche. Nachdem das LED-Driver-Board System durch den Einsatz von LED's mit schnellen Lichtsignalen optimiert wurde, wurden diese Intensitäten gemessen. Die Intensitätsstärksten 18 Messpositionen könnten in Zukunft dann mit den Detektoren des SYMB-Luminositätsmonitors verbunden werden. Die Intensitäten wurden an einem Oszilloskop ausgelesen. Das LED-Lichtpulsersystem konnte hierfür mit entweder zwei roten oder zwei blauen LED's jeweils simultan betrieben werden. Für die doppelblaue LED-Betriebskombination wurden Pulshöhen in der Größenordnung von  $\approx 70\text{mV}$  gemessen, wohingegen die Pulshöhen für die doppelrote LED-Betriebskombinationen bei  $\approx 30\text{mV}$  liegen.

Das System ist insgesamt einsatzbereit und alle geplanten Voruntersuchungen konnten nach dem Bau des LED-Lichtpulsersystems auch durchgeführt werden. Das System bietet darüber hinaus ein breites Spektrum an Optimierungsmöglichkeiten. Bei der Einkopplung des Glasfaserkabels am Lichtmischblock und der Fixierung des anderen Endes der Faser am Photomultiplier treten sehr wahrscheinlich Verluste der Lichtintensität auf. Diese beiden Komponenten des Aufbau könnten verbessert werden. Eine weitere Homogenisierung der Fasereinkopplung beispielsweise durch eine Ulbricht-Kugel ist eine zusätzlich Optimierungsmöglichkeit. Ferner, wäre es gemäß den zukünftigen Experimentierbedingungen am DORIS angebracht das System einem Langzeittest zu unterziehen. Die gemessenen Werte für die Pulshöhen bei der doppelroten LED-Betriebskombination ( $\approx 30\text{mV}$ ) sind deutlich geringer als die der doppelblauen LED-Betriebskombination. Da am DORIS den 20m Glasfaserkabel noch 10m Quarzfaserkabel (Typ F-MS-C-5FC, Marke Newport) hinzugefügt werden ist mit einer zusätzlichen Abschwächung des Signals zu rechnen. Die Dämpfung von Licht im roten Wellenlängenbereich liegt bei  $0,007\text{dB/m}$  [7] ( $0,07\text{dB}$  Dämpfung für 10m). Da auch die Transmissionswerte beim Bleifluorid-Kristall für Wellenlängen im blauen Bereich ( $\lambda \approx 420\text{-}490\text{nm}$ ) besser sind (Abb. 7), bietet es sich an in Zukunft nur die doppelblaue LED-Betriebskombination des LED-Driver-Boards zu verwenden.

# 8 Anhang

## Anhang A

Schaltplan des Operationsverstärkers (OP)(Typ THS 3201) der Firma Texas

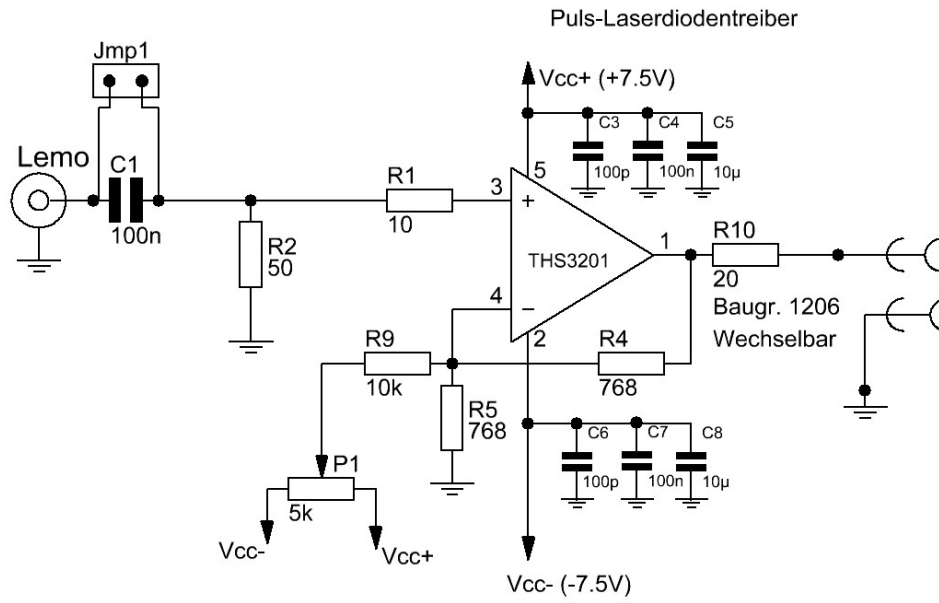


Abbildung 43: Elektrischer Schalten des OP's (Typ THS 3201) der Firma Texas

## Anhang B

### Oszilloskopaufnahmen zur Maximierung des Spannungsflusses des LED-Driver-Boards mit einem Photmultiplier

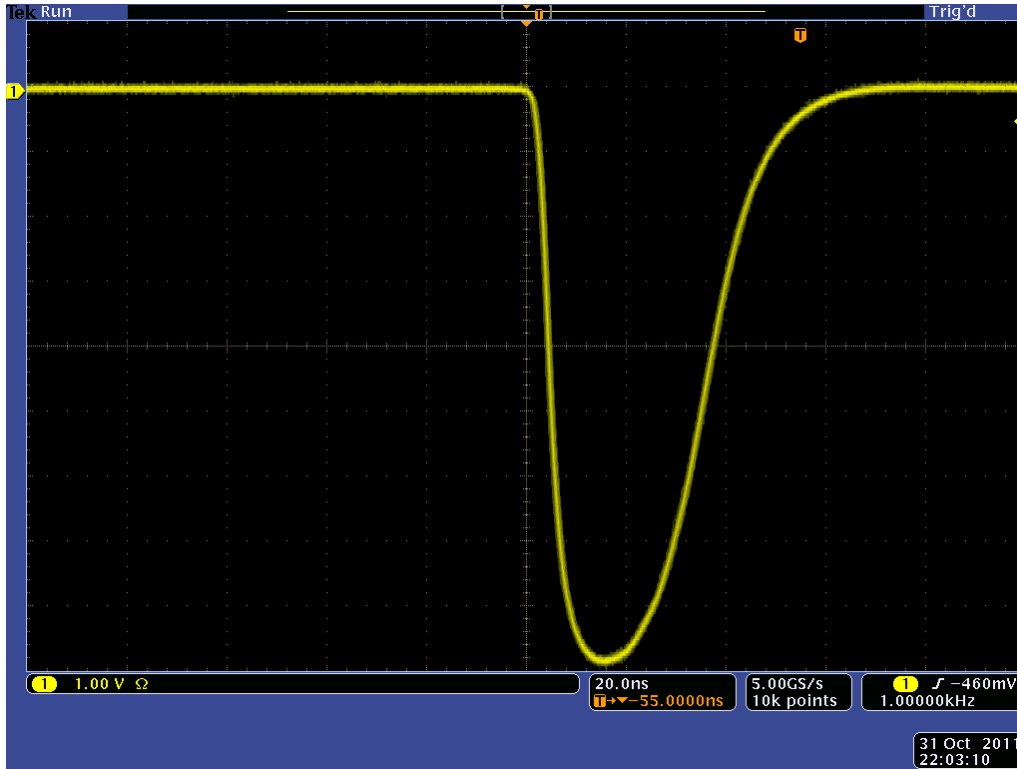


Abbildung 44: Dieses Photomultipliersignal ergibt sich beim maximalen Flussbereich des LED-Driver-Board Systems (doppelblaue LED-Betriebskombination) und bei einem Quelle-Detektor-Abstand von 25cm.

(Zeitachse: 20ns/div. Intensität: 1V/div.)

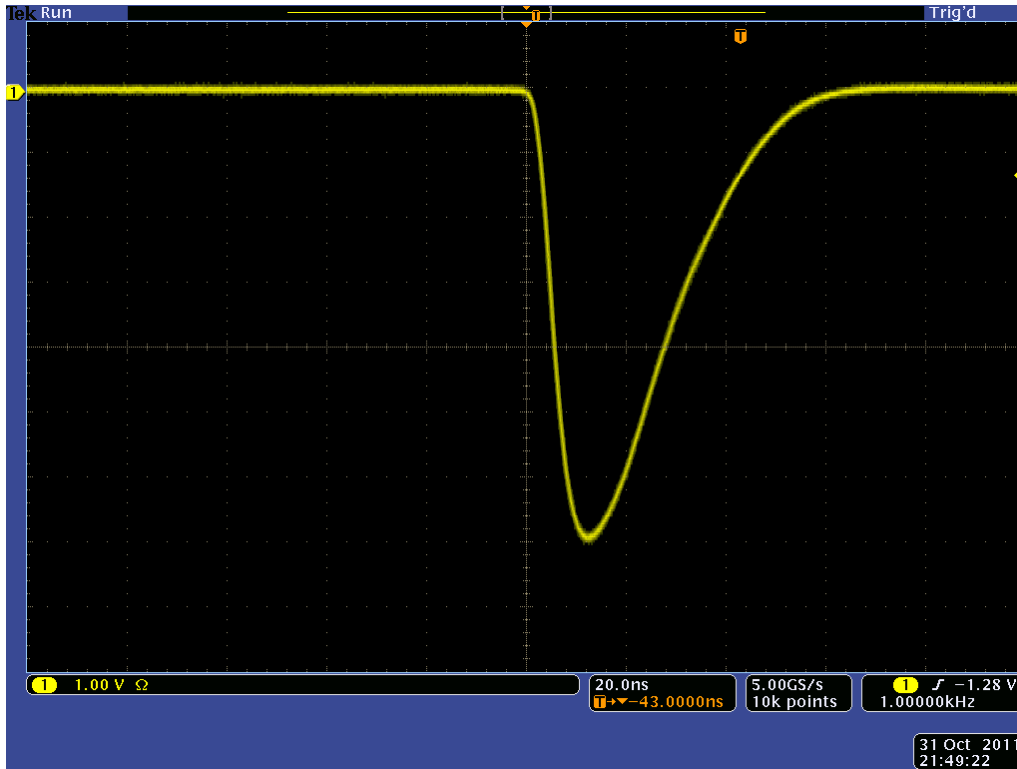


Abbildung 45: Dieses Photomultipliersignal ergibt sich beim maximalen Flussbereich des LED-Driver-Board Systems (doppelrote LED-Betriebskombination) und bei einem Quelle-Detektor-Abstand von 25cm.  
(Zeitachse: 20ns/div. Intensität: 1V/div.)

## Anhang C.1

Messaufnahmen der Intensitäten an den 33 Messpositionen bei doppelroter Betriebskombination des LED-Driver-Boards

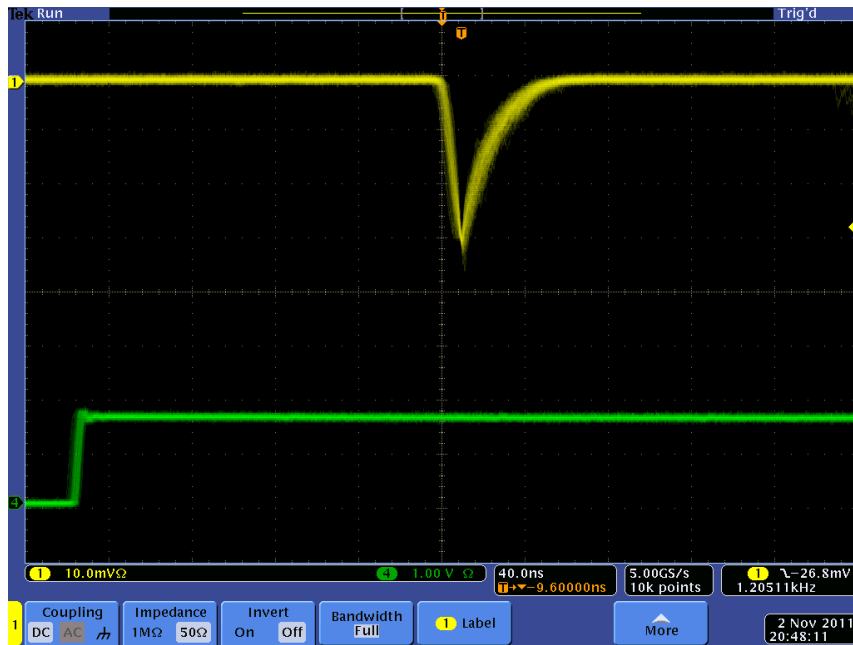


Abbildung 46: Intensität an Messposition 1.0 (Zeitachse: 40ns/div. Intensität: 10mV/div.)

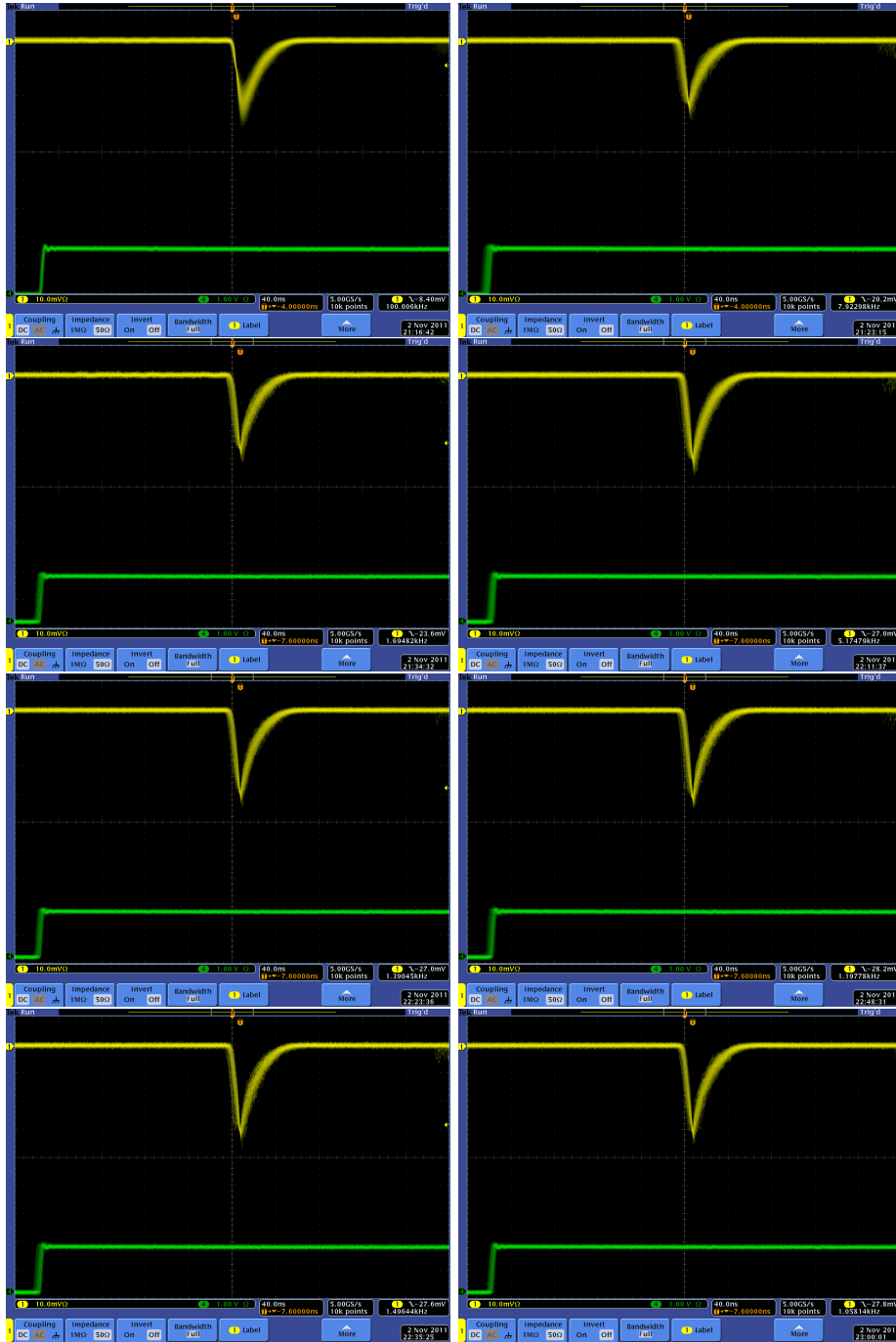


Abbildung 47: Intensitäten aller Messpositionen (1.0-1.8) der Messebene 1 der Reihe nach geordnet (Zeitachse: 40ns/div. Intensität: 10mV/div.).

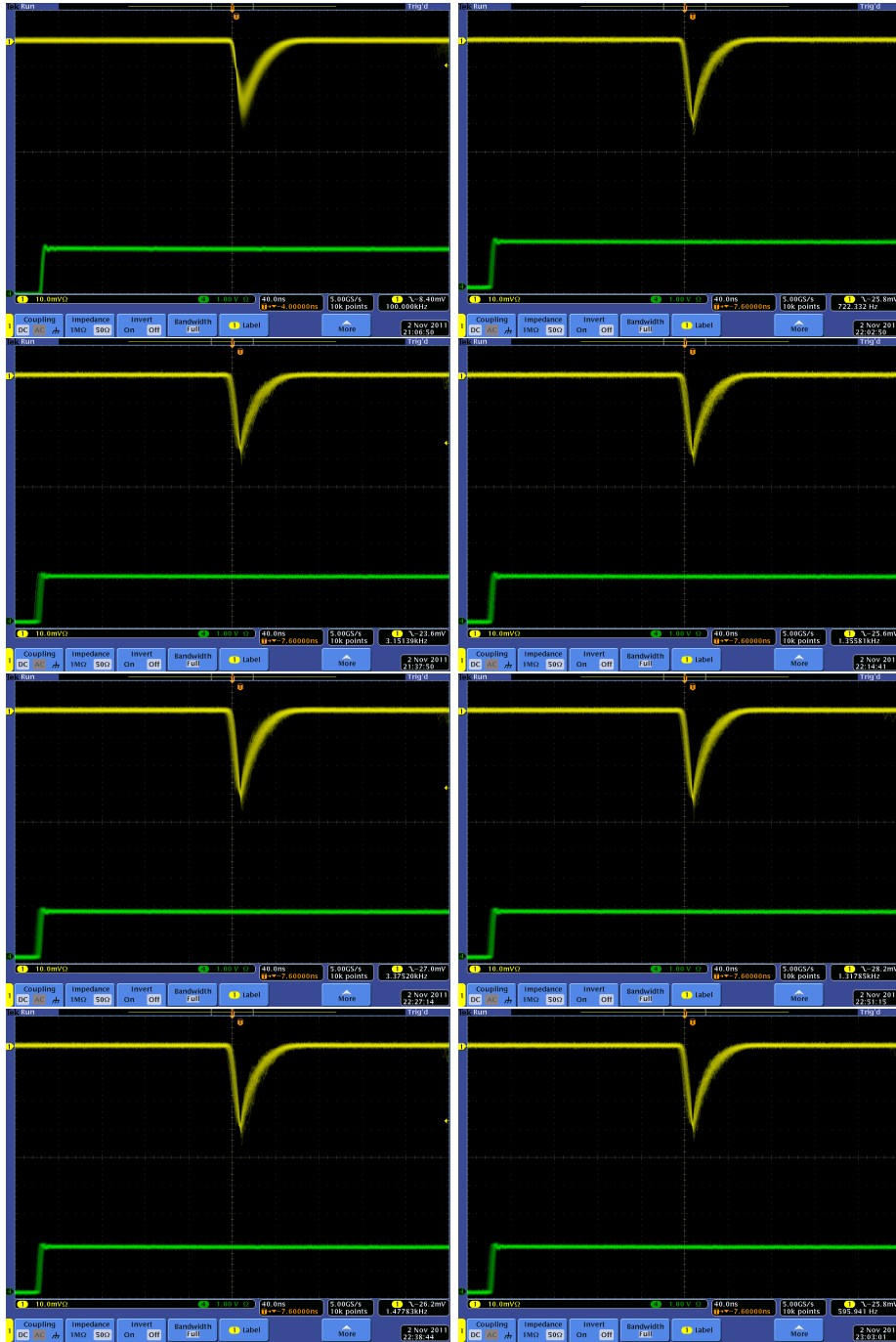


Abbildung 48: Intensitäten aller Messpositionen (2.0-2.8) der Messebene 2 der Reihe nach geordnet (Zeitachse: 40ns/div. Intensität: 10mV/div.).



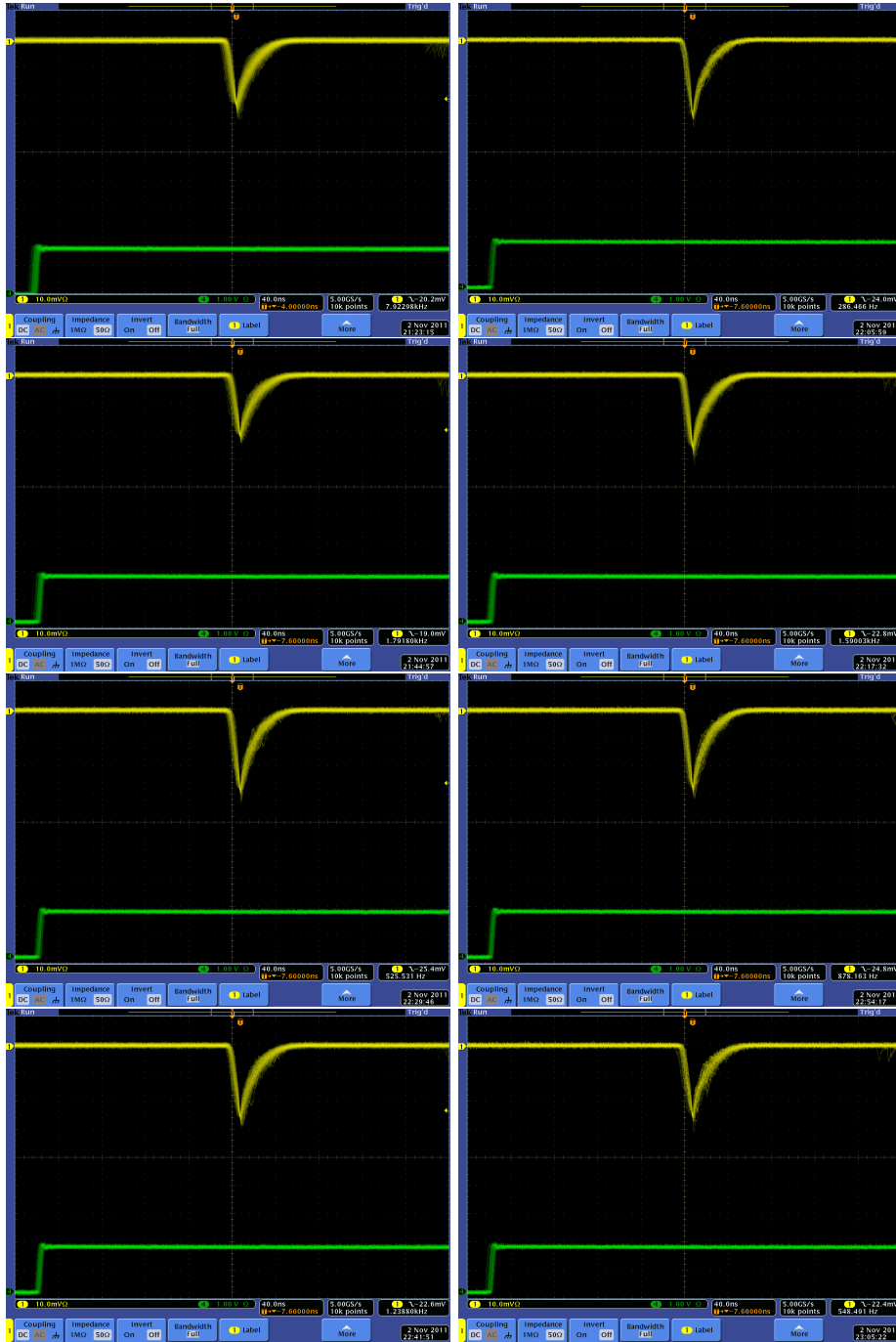


Abbildung 49: Intensitäten aller Messpositionen (3.0-3.8) der Messebene 3 der Reihe nach geordnet (Zeitachse: 40ns/div. Intensität: 10mV/div.).

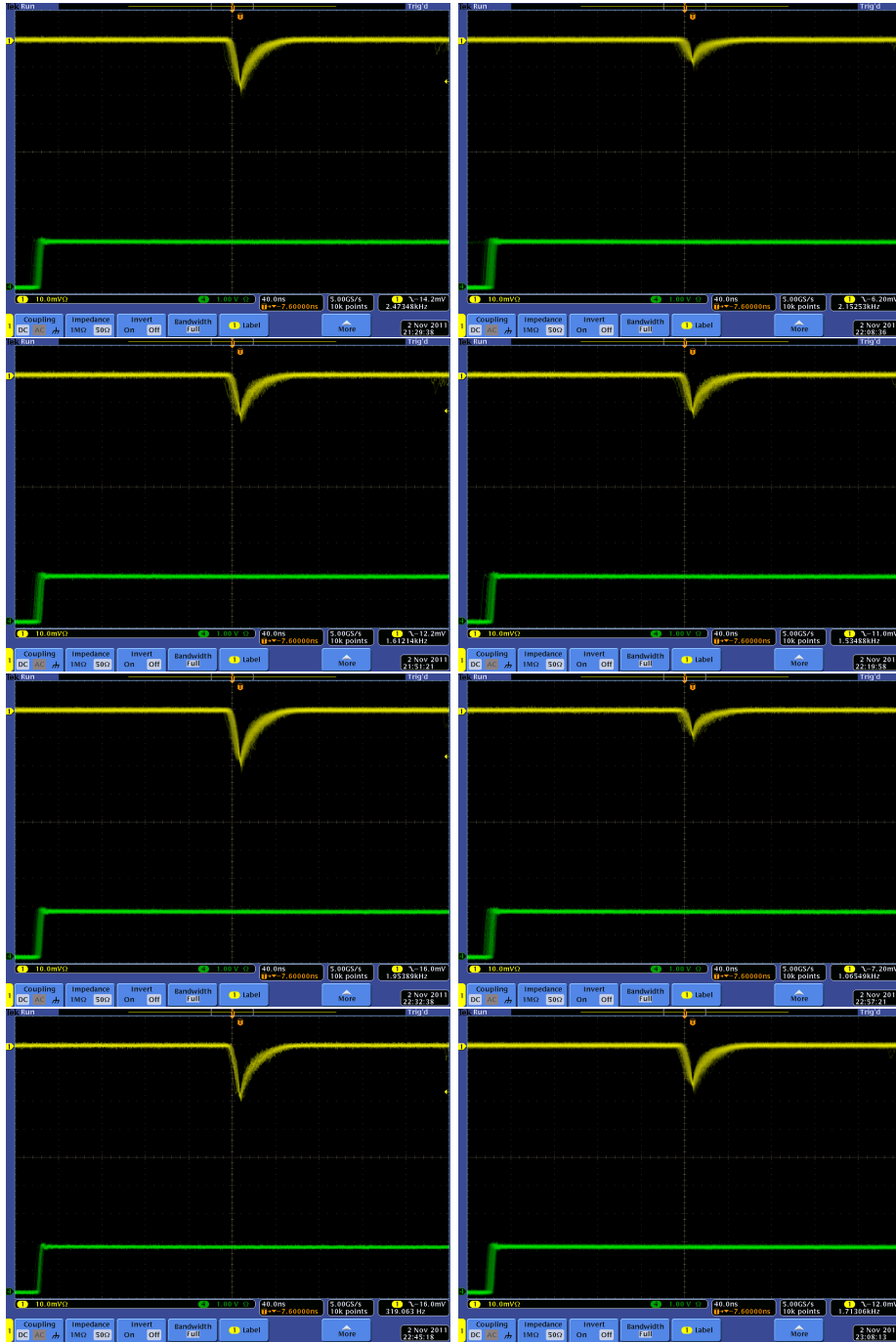


Abbildung 50: Intensitäten aller Messpositionen (4.0-4.8) der Messebene 4 der Reihe nach geordnet (Zeitachse: 40ns/div. Intensität: 10mV/div.).

## Anhang C.2

Messaufnahmen der Intensitäten an den 33 Messpositionen bei doppelblauer Betriebskombination des LED-Driver-Boards

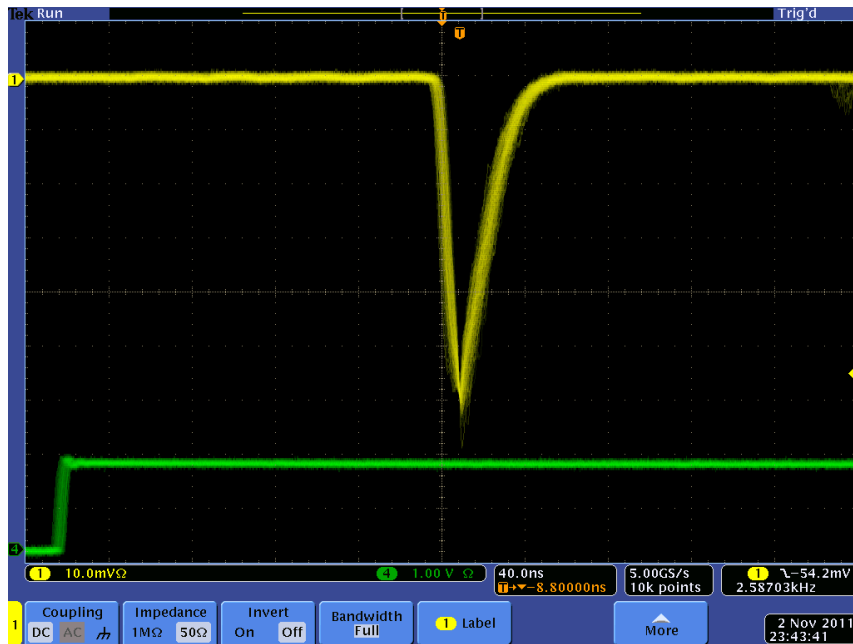


Abbildung 51: Intensität an Messposition 1.0 (Zeitachse: 40ns/div. Intensität: 10mV/div.)

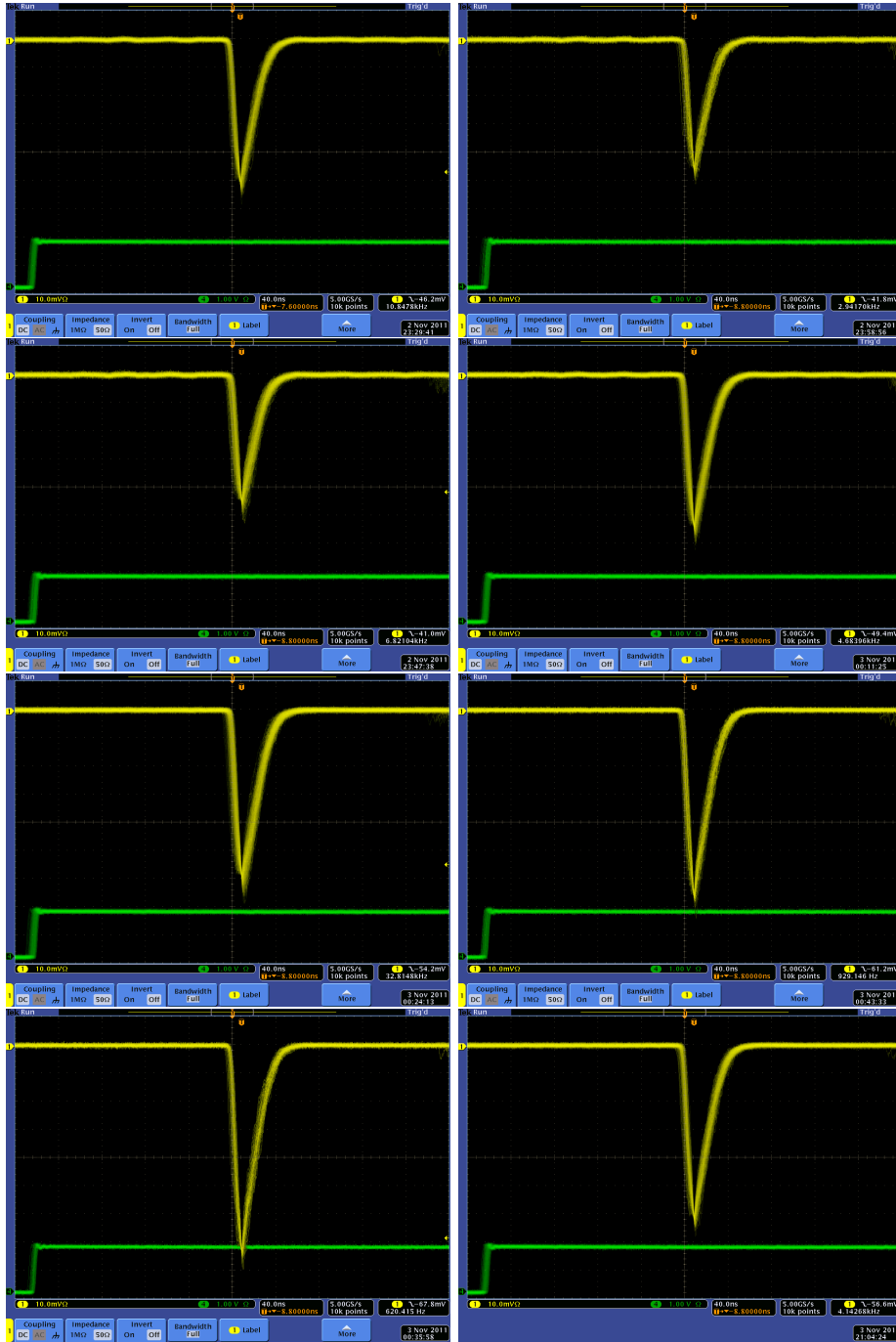


Abbildung 52: Intensitäten aller Messpositionen (1.0-1.8) der Messebene 1 der Reihe nach geordnet (Zeitachse: 40ns/div. Intensität: 10mV/div.).

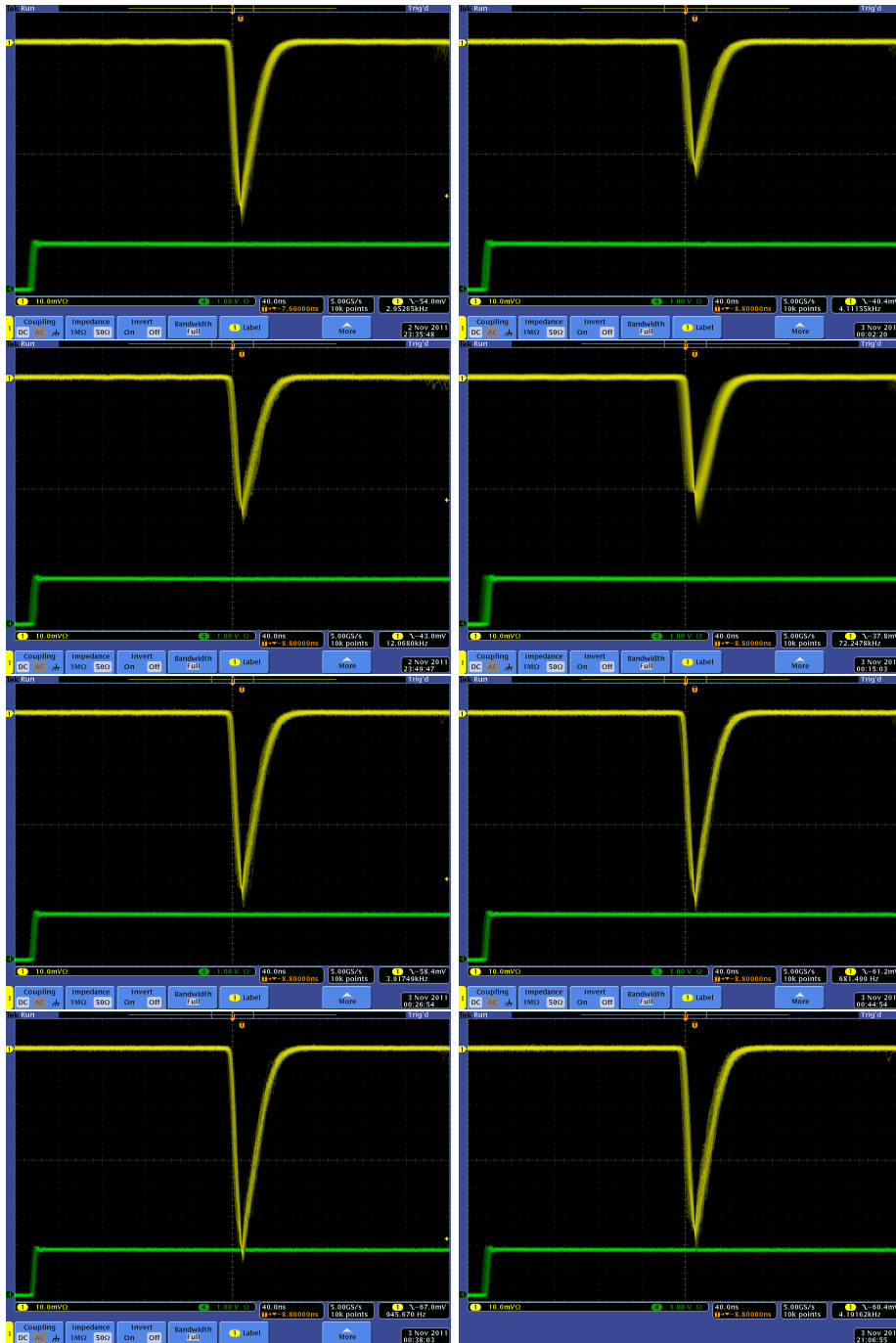


Abbildung 53: Intensitäten aller Messpositionen (2.0-2.8) der Messebene 2 der Reihe nach geordnet (Zeitachse: 40ns/div. Intensität: 10mV/div.).

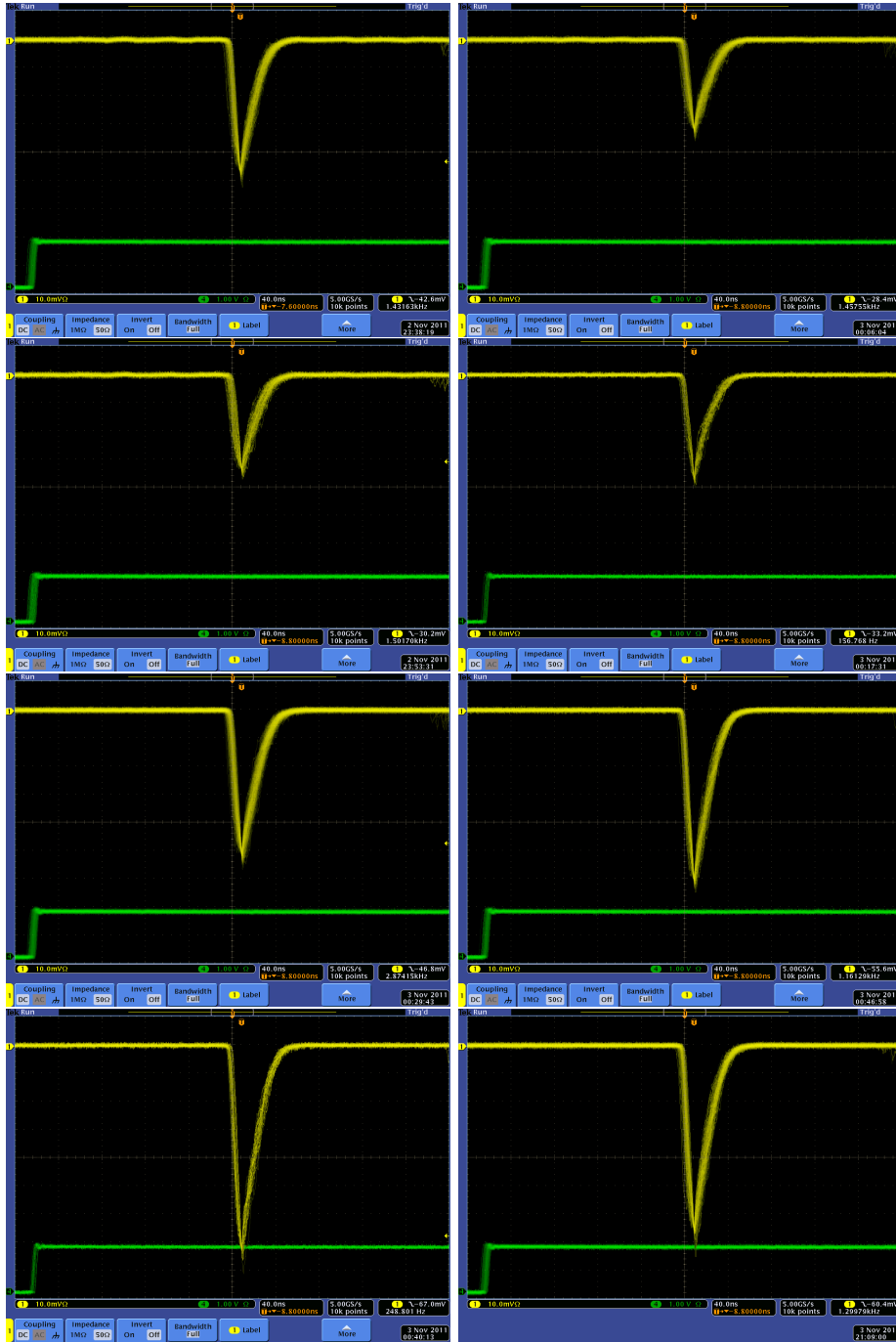


Abbildung 54: Intensitäten aller Messpositionen (3.0-3.8) der Messebene 3 der Reihe nach geordnet (Zeitachse: 40ns/div. Intensität: 10mV/div.).

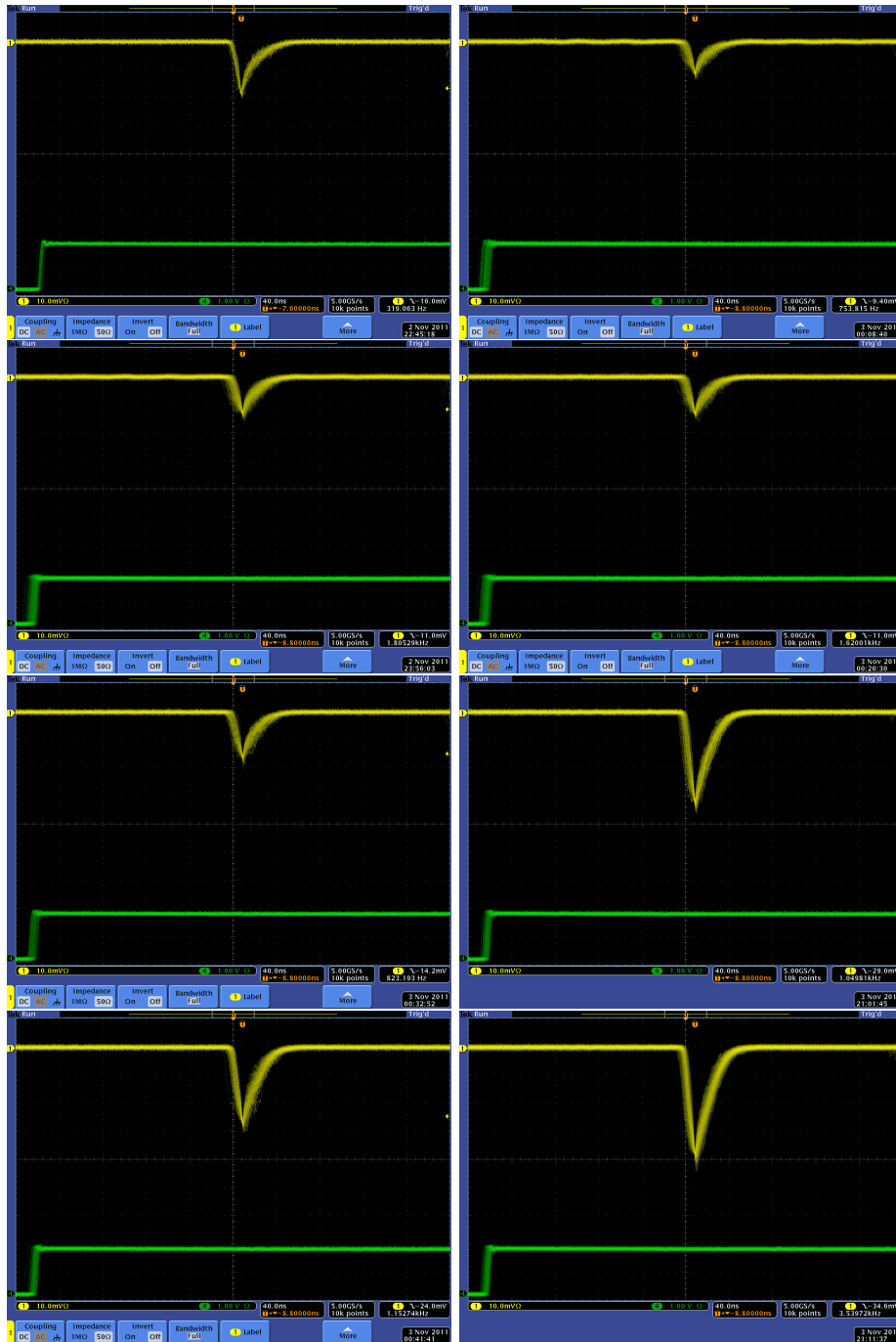


Abbildung 55: Intensitäten aller Messpositionen (4.0-4.8) der Messebene 4 der Reihe nach geordnet (Zeitachse: 40ns/div. Intensität: 10mV/div.).

## 9 Literaturnachweis

- [1] THE OLYMPUS COLLABORATION: TECHNICAL DESIGN REPORT FOR THE OLYMPUS EXPERIMENT (July 7, 2010)  
<http://web.mit.edu/OLYMPUS>
- [2] Richard G. Milner: The OLYPMUS Experiment <http://web.mit.edu/olympus>
- [3] Klaus Grimm: Aufbau eines Lichtauslesesystems für ein Bleifluorid-Kalorimeter zur Messung der Paritätsverletzung in der elastischen Elektronenstreuung (2002)  
<http://web.mit.edu/OLYMPUS>
- [4] Patrick Achenbach: Observation of Scattering and Absorption Centers in Lead Fluoride Crystals (2006)
- [5] [www.phynet.de/optik/brechung-und-totalreflexion](http://www.phynet.de/optik/brechung-und-totalreflexion)
- [6] Siemens, Semiconductor Group
- [7] Newport, Multimodenfasern zur Leistungsübertragung  
<http://www.newport.com/Multimodenfasern-zur-Leistungs%C3%BCbertragung/834322/1031/info.aspx>