

# Aufbau einer durchstimmbaren UV-Lichtquelle für das KATRIN-Experiment

Set up of a tunable UV light source for the KATRIN  
experiment

## Bachelorarbeit

von

Alexander Potthoff

Themensteller: Prof. Dr. Christian Weinheimer  
Zweitgutachter: Prof. Dr. Johannes P. Wessels  
Westfälische-Wilhelms-Universität Münster  
Institut für Kernphysik  
AG Prof. Dr. C. Weinheimer



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1. Das KATRIN-Experiment . . . . .	3
1.2. MAC-E Filter . . . . .	4
1.3. Elektronenkanone . . . . .	6
1.4. Durchstimbare UV-Lichtquelle . . . . .	6
1.5. Gliederung . . . . .	7
<b>2. Theoretische Vorüberlegungen</b>	<b>9</b>
2.1. Halbleiter . . . . .	9
2.1.1. UV-LEDs . . . . .	11
2.1.2. Photodiode . . . . .	12
2.2. Funktionsweise eines Monochromators . . . . .	12
2.2.1. Optische Gitter . . . . .	12
2.2.2. Implementierung eines optischen Gitters in einem Monochromator . . . . .	13
2.2.3. Horiba H10 Monochromator . . . . .	14
2.3. Schrittmotor . . . . .	15
2.3.1. Motor QMOT QSH-4218-41-10-035 . . . . .	15
2.3.2. Controller TCM-110-42 . . . . .	16
2.4. Beam Sampler . . . . .	17
2.5. Quecksilberdampfampe . . . . .	17
2.5.1. Gasentladungslampen . . . . .	18
2.5.2. Spezifisches Spektrum . . . . .	19
<b>3. Aufbau</b>	<b>21</b>
3.1. Intensitätsüberwachung und Einkopplung in das Glasfaserkabel . . . . .	21
3.1.1. UV-LEDs mit Monochromator . . . . .	21
3.1.2. Laser . . . . .	23
3.2. Anbringung des Schrittmotors . . . . .	24
3.3. Kalibrationsaufbau . . . . .	25
3.4. Programmierung des Schrittmotors am Monochromator . . . . .	26
3.4.1. »Ansteuerung.vi« . . . . .	26
3.4.2. »Durchfahren.vi« . . . . .	28
3.5. Konstruktion der fernsteuerbaren LED-Halterung . . . . .	29
3.6. Programmierung des Schrittmotors an der LED-Halterung . . . . .	30
<b>4. Durchführung und Auswertung</b>	<b>33</b>
4.1. Messungen mit dem Beam Sampler . . . . .	33
4.1.1. Monochromatoraufbau . . . . .	33
4.1.2. Laseraufbau . . . . .	34
4.2. Kalibrierung des Aufbaus mit einer Quecksilberdampfampe . . . . .	34
4.3. Überprüfung der Kalibrierung mit einer Natriumdampfampe . . . . .	36
<b>5. Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>39</b>
<b>6. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>43</b>

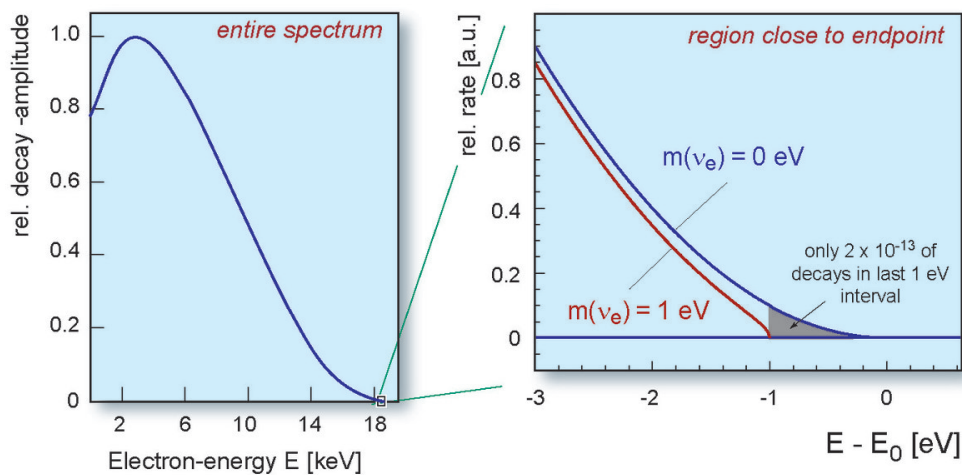


# 1. Einleitung

## 1.1. Das KATRIN-Experiment

Im Jahr 1930 wurde von W. Pauli die Existenz des Elektron Neutrinos vorhergesagt. Reines und Cowan gelang 1956 dann der Nachweis.

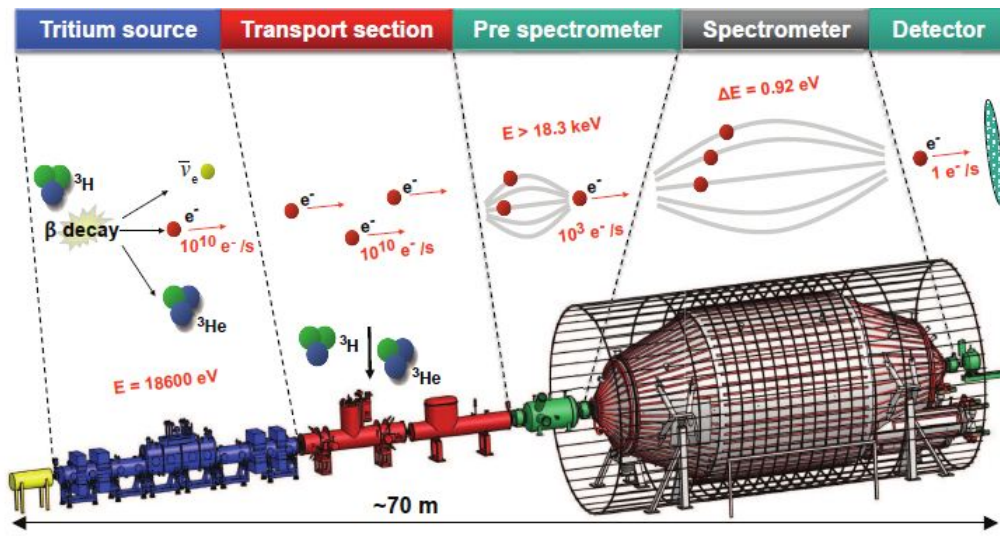
Mit dem KARlsruher TRItium Neutrino (KATRIN) Experiment wird nun versucht die Neutrinomasse mithilfe des Betazerfalls von Tritium ( $^3\text{H}$ ) zu bestimmen. Hierzu wird das Energiespektrum der Elektronen, die aus dem Zerfall von  $^3\text{H}$  entstehen, gemessen.



**Abbildung 1.1.** – Links: Relative Anzahl der aus dem Tritiumzerfall entstandenen Elektronen in Abhängigkeit der Energie der Elektronen. Rechts: Ausschnitt des Endpunktbereichs des Gesamtspektrums. Hierbei ist die rote Kurve der erwartete Messwert für Neutrinos ohne Ruhemasse und die blaue Kurve die Erwartung für Neutrinos mit einer Ruhemasse von 1 eV. (Abbildung aus [KIT13])

Abbildung 1.1 zeigt das erwartete Energiespektrum der Elektronen aus dem Betazerfall von Tritium. Es sind die berechneten Kurven für Neutrinos ohne Ruhemasse und Neutrinos mit einer Ruhemasse von 1 eV eingetragen. Nur ein Anteil von  $2 \cdot 10^{-13}$  der im Zerfall entstandenen Elektronen weist Energien im Bereich des letzten 1 eV des Spektrums auf.

Das Ziel des KATRIN Experiments ist es nun genau den in Abbildung 1.1 gezeigten Endpunkt des Energiespektrums mit höchster Präzision zu betrachten, da dieser Bereich besonders sensitiv auf Änderungen der Neutrinomasse reagiert.

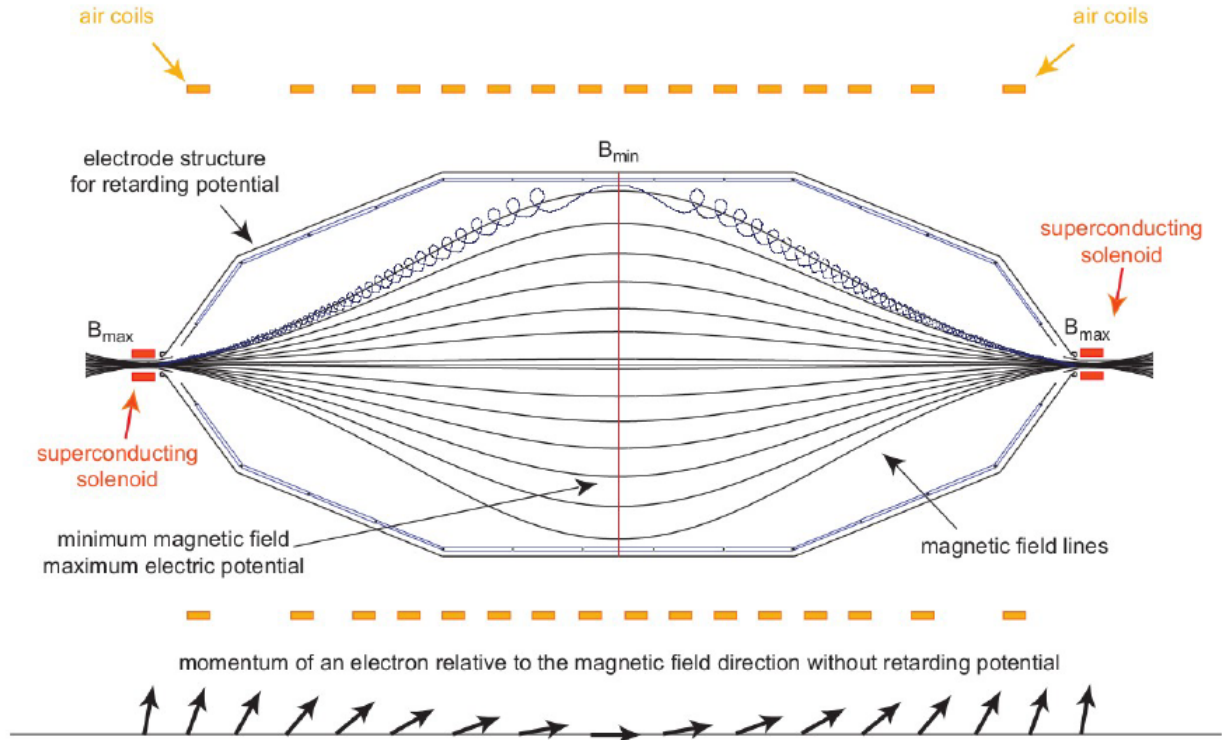


**Abbildung 1.2.** – Skizze des Aufbaus des KATRIN Experiments. Es ist hier der komplette Weg der Elektronen von der Quelle zum Detektor beschrieben. Zusätzlich ist ein Schema auf Ebene der Elektronen angegeben. Es wird der Zerfall und die Energiefilterung dargestellt. [KIT13]

In Abbildung 1.2 ist der Weg der Elektronen dargestellt. In der »Tritium source« werden die Elektronen durch Betazerfall emittiert. Auf dem Weg durch die »Transport section« werden Elektronen magnetisch geführt und Gasmoleküle sowie Ionen aus den Zerfällen reduziert. Im »Pre spectrometer« werden nun Elektronen, deren Energie kleiner als  $18,3 \text{ keV}$  ist, herausgefiltert. Das »Spectrometer« ist wie das »Pre spectrometer« ein Hochpassfilter für die Energie der Elektronen. Der Hochpass wird schrittweise höher gesetzt, um möglichst genau das Spektrum der Elektronenenergie im Endpunktbereich aus Abb. 1.1 zu bestimmen. Die Elektronen, die auch das Hauptspektrometer passiert haben, werden im »Detector« detektiert.

## 1.2. MAC-E Filter

Die hohe Energieauflösung des Spektrometers wird durch die Technik des MAC-E Filter (Magnetic Adiabatic Collimation combined with an Electrostatic Filter) ermöglicht.



**Abbildung 1.3.** – Skizze des Hauptspektrometers. Es sind die Magnetfeldlinien im Innern, sowie die Flugbahn eines Elektrons eingezeichnet. (Abbildung aus [Zac13])

Abbildung 1.3 ist eine Skizze des Hauptspektrometers. Durch supraleitende Magnete wird ein Magnetfeld erzeugt, welches am Ein- und Ausgang des Spektrometers maximal und in der Mitte minimal ist.

Elektronen, die in das Spektrometer gelangen, vollführen Zyklotronbewegungen um die Magnetfeldlinien. Die kinetische Energie der Elektronen lässt sich demnach in einen zum Magnetfeld parallelen  $E_{\parallel}$  und transversalen  $E_{\perp}$  Anteil unterteilen. Da in der Mitte des Spektrometers das Magnetfeld minimal wird, ändert sich die Flugbahn der Elektronen und wird parallel zu den Feldlinien. Durch eine langsame Änderung des Magnetfelds, wird der Impuls adiabatisch transformiert. Das magnetische Moment  $\mu = \frac{E_{\perp}}{B}$  bleibt dadurch konstant und die Energie  $E_{\perp}$  aus der Zyklotronbewegung wird in  $E_{\parallel}$  umgewandelt.

Es ist in der Mitte des Spektrometers zusätzlich durch zylindrische Elektroden ein Potential angelegt. Um diesen »Potentialwall« zu passieren, ist lediglich die kinetische Energie des Elektrons in Richtung des Gradienten des Potentials relevant. Es muss daher

$$E_{\parallel} > eU_0 \quad (1.1)$$

sein, wobei  $e$  die Elementarladung ist und  $eU_0$  dem Potential in der Mitte des Spektrometers entspricht.

Elektronen, die den »Potentialwall« passieren, werden wieder auf die ursprüngliche Geschwindigkeit beschleunigt, während Elektronen mit zu geringer kinetischer Energie reflektiert werden. Die durch einen MAC-E Filter erreichte Energieauflösung entspricht dem Verhältnis von minimalem  $B_{\min}$  und maximalem  $B_{\max}$  Magnetfeld:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{B_{\min}}{B_{\max}} \quad (1.2)$$

Die theoretisch erreichbare Energieauflösung des KATRIN Experiments beträgt  $\Delta E = 0,92 \text{ eV}$  (vgl. [KIT13]).

### 1.3. Elektronenkanone

Mithilfe der Elektronenkanone werden die Eigenschaften des Hauptspektrometers vermessen. Es können Elektronen mit definierten Energien emittiert werden. Auch der Winkel der Flugbahn der Elektronen zu den Magnetfeldlinien des Hauptspektrometers kann gewählt werden. (vgl. [VH13])

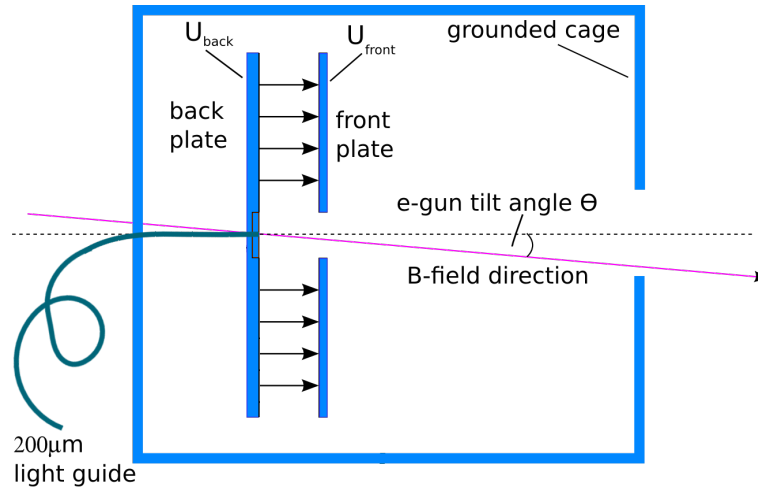


Abbildung 1.4. – Skizze der Elektronenkanone.

Abbildung 1.4 zeigt eine Zeichnung der Elektronenkanone. Ein Glasfaserkabel, auf dessen Ende sich eine ca. 40 nm dicke Silberschicht befindet, wird an die »back plate« angebracht. Mithilfe des Photoelektrischen Effekts werden Elektronen aus der Silberschicht emittiert. Die »back plate« wird auf eine Spannung  $U_{\text{back}}$  gesetzt. Durch eine Beschleunigungsspannung  $U_{\text{back}} - U_{\text{front}}$  werden die Elektronen beschleunigt. Das Gehäuse ist geerdet. Nach Passieren der »front plate« werden die Elektronen durch die verbleibende Potentialdifferenz zwischen »front plate« und Erde weiter beschleunigt. Durch Drehung der Elektronenkanone kann der Winkel der Elektronenflugbahn zu den Magnetfeldlinien geändert werden. Eine Anpassung der Spannung  $U_{\text{back}}$  resultiert in unterschiedlichen kinetischen Energien der emittierten Elektronen.

Die Energie  $E_e$ , die ein Elektron unmittelbar nach dem Austritt aus dem Silber besitzt, ist durch

$$E_e = E_{\text{Photon}} - W_{\text{Austritt}} \quad (1.3)$$

gegeben. Hierbei ist  $E_{\text{Photon}}$  die Energie der für den Photoeffekt verwendeten Photonen und  $W_{\text{Austritt}}$  die Austrittsarbeit der Elektronen.

Die Austrittsarbeit ist eine Materialkonstante. Literaturwerte für  $W_{\text{Austritt}}$  berücksichtigen jedoch eine perfekt glatte und ablagerungsfreie Oberfläche. In früheren Messungen mit der Elektronenkanone zeigte sich, dass die reale Austrittsarbeit stark von den Literaturwerten abweicht.

### 1.4. Durchstimbare UV-Lichtquelle

Damit die von der Elektronenkanone emittierten Elektronen eine möglichst scharfe Energieverteilung haben, muss die Startenergie  $E_e$  der Elektronen möglichst klein sein. Die Richtung der Bewegung, welche diese Überschussenergie enthält, ist nicht festgelegt. Die Minimierung dieser verringert demnach die Energiegenauigkeit der Elektronen.



Aus (1.3) ist der Zusammenhang zwischen Photonenenergie und Startenergie der Elektronen zu entnehmen. Die Photonen des UV-Lichts, welche über den Photoeffekt zur Emission von Elektronen benutzt werden, müssen demnach eine möglichst geringe Energie haben. (Gleichzeitig muss jedoch  $E_{\text{Photon}} > W_{\text{Austritt}}$  gelten, da sonst keine Elektronen emittiert werden.) Über die Relation

$$E_{\text{Photon}} = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.4)$$

entspricht dies möglichst großen Wellenlängen  $\lambda$ .

Die Wellenlänge des Lichts sollte demnach variabel sein, während die spektrale Verteilung möglichst klein ist. In früheren Versuchen wurde ein Laser der Wellenlänge 266 nm verwendet. Die durchstimmbare Lichtquelle soll daher UV-Licht mit Wellenlängen von 266 nm bis hin zu einigen 10 nm größeren Wellenlängen liefern. Auch die Intensität des Lichts soll zu überwachen sein, da mögliche Schwankungen der Lichtintensität Änderungen der Rate von in der Elektronenkanone erzeugten Elektronen zur Folge haben.

## 1.5. Gliederung

In Kapitel 2 werden zunächst die Komponenten, welche zum Aufbau der UV-Lichtquelle verwendet wurden, erklärt. Hierbei wird erst die generelle Funktionsweise erläutert, woraufhin eine Beschreibung des genauen Bauteils folgt.

Im Kapitel 3 wird erklärt, wie die einzelnen Aufbauten konstruiert wurden. Darüber hinaus werden die jeweiligen Anforderungen an die Geräte dargestellt.

Das vierte Kapitel behandelt die Durchführung und Auswertung der einzelnen Messungen. Auch die verwendeten Programme werden erklärt.

Gefolgt wird dieses Kapitel von der Diskussion der Ergebnisse in Kapitel 5. Darin werden die zuvor ermittelten Messwerte noch einmal aufgeführt und diskutiert.

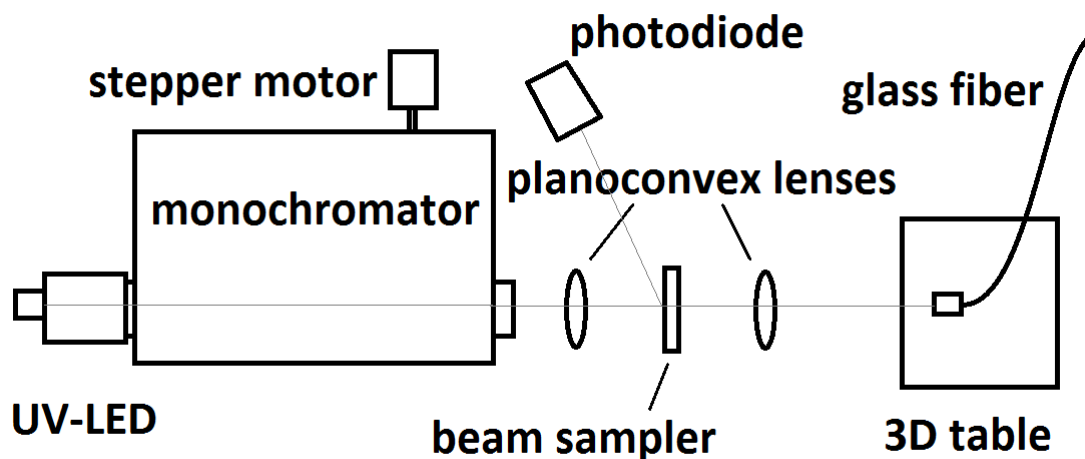
Abgeschlossen wird diese Arbeit mit einem zusammenfassenden Fazit.

Im Anhang befinden sich zusätzliche Graphen und Skizzen, die für das Verständnis der Aufbauten und Messungen nützlich sind.



## 2. Theoretische Vorüberlegungen

In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Bauteile der UV-Lichtquelle eingeführt. Dazu wird zunächst die generelle Funktionsweise erklärt, worauf eine genaue Beschreibung des individuellen Modells folgt.



**Abbildung 2.1.** – Skizze des Aufbaus der durchstimbaren UV-Lichtquelle

In Abbildung 2.1 ist der Aufbau der durchstimbaren UV-Lichtquelle skizziert. Durch UV-LEDs wird UV-Licht erzeugt. Im Monochromator wird ein ausgewählter Wellenlängenbereich durchgelassen, während der Rest des Lichts herausgefiltert wird. Mithilfe des Schrittmotors lässt sich der Monochromator ansteuern.

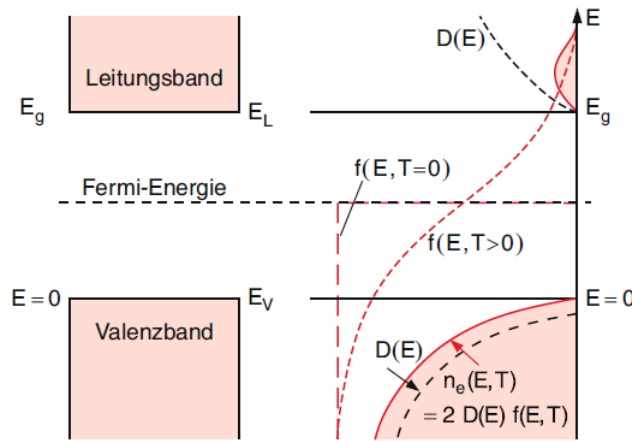
Die Linsen werden zur Fokussierung des Lichts auf den Eingang eines Glasfaserkabels benötigt. Dieser ist zur besseren Justierungsmöglichkeit auf einem 3D-Tisch montiert.

Mit einem Beam Sampler und einer Photodiode wird die Intensität des Lichts während Messungen überwacht.

Die einzelnen Bestandteile werden im Folgenden behandelt.

### 2.1. Halbleiter

Halbleiter haben im Gegensatz zu Metallen eine Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband. Diese ist jedoch kleiner als die von Isolatoren. Bei dem Isolator Diamant beträgt die Bandlücke beispielsweise 5,60 eV, während bei dem Halbleiter Silizium nur eine Bandlücke  $E_G$  von 1,11 eV vorliegt [Dem10].



**Abbildung 2.2.** – Skizzierte Darstellung des Bändermodells eines reinen Halbleiters. Es ist die Fermi-Energie in der Mitte zwischen Leitungs- und Valenzband eingezeichnet. Die rechts eingetragene Elektronendichte  $n_e$  ist das Produkt aus Zustandsdichte  $D(E)$ , Fermi-Verteilung  $f(E)$  und möglicher Spinorientierung der Elektronen. (Abbildung aus [Dem10, p.489])

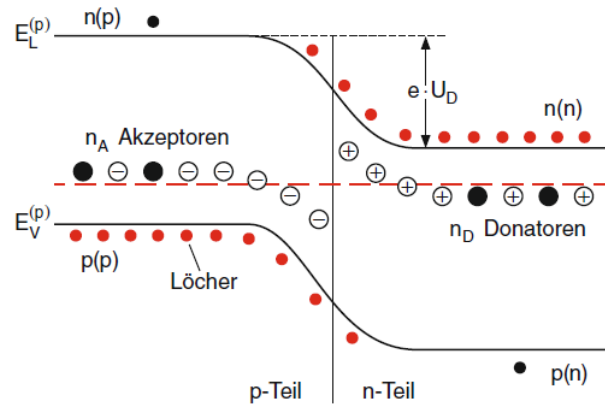
Bei Temperaturen über dem absoluten Nullpunkt, wie etwa bei Raumtemperatur, gelangen die Elektronen am energiereichen Ende der Fermi-Verteilung vom Valenzband ins Leitungsband. Dieser Zustand ist in Abbildung 2.2 (rechts) dargestellt.

Durch Einbringen von Fremdatomen mit einer anderen Wertigkeit als der des Halbleiters (Dotierung) können die Eigenschaften verändert werden.

Ein Beispiel ist die Dotierung eines vierwertigen Halbleiters mit einem fünfwertigen Element. Die Fremdatome werden ins Kristallgitter eingebunden, wobei vier der Elektronen zum Aufbau der kovalenten Bindungen benötigt werden. Das letzte Elektron erfährt nun lediglich eine schwache Coulombanziehung zu dem Atom. Es entstehen so zusätzliche Energieniveaus (Donatorniveaus) direkt unterhalb des Leitungsbands. Die Fermi-Energie liegt dann zwischen Donatorniveau und Leitungsband. Diese Dotierung nennt man n-Dotierung und die freien Elektronen Donatoren.

Bei Dotierung eines höherwertigen Halbleiters mit einem tieferwertigen Element liegen folglich »Löcher« (Akzeptoren) im Kristallgitter vor. Es entstehen Energieniveaus direkt über dem Valenzband (Akzeptorniveaus). Die Fermi-Energie befindet sich bei so dotierten Halbleitern (p-Dotierung) zwischen dem Akzeptorniveau und dem Valenzband.

Bringt man nun einen p- und einen n-dotierten Halbleiter aneinander, so entsteht ein p-n-Übergang.



**Abbildung 2.3.** – Darstellung eines p-n-Übergangs. Links ist der p-dotierte Halbleiter und rechts der n-dotierte Halbleiter. Die Energieniveaus der Bänder sind gegeneinander um  $e \cdot U_D$  verschoben. (Abbildung aus [Dem10, p.493])

Abbildung 2.3 zeigt das Bandmodell eines solchen Übergangs. Die Elektronen des n-Halbleiters diffundieren zu den Löchern des p-Halbleiters ( $\hat{=}$  Diffusionsstrom). Es entsteht folglich eine negative Raumladungsdichte im p-Teil, sowie eine positive Raumladungsdichte im n-Teil. Das dadurch erzeugte elektrische Feld wirkt diesem Diffusionsstrom entgegen, bis sich ein Gleichgewicht einstellt. In diesem Gleichgewicht liegt nun eine Diffusionsspannung  $U_D$  vor, was in einer Verschiebung der Energieniveaus an dem Übergang von  $e \cdot U_D$  resultiert.

Ein solcher p-n-Übergang wird als Diode bezeichnet.

Legt man nun eine positive Spannung  $U_a$  an den p-Teil an,<sup>1</sup> so fließt zunächst ein exponentiell ansteigender Strom. Dieser geht in Sättigung, sobald  $U_a = U_D$  gilt. Diese Schaltungsweise wird auch als »Durchlassrichtung« bezeichnet.

Wenn an den p-Teil eine negative Spannung angelegt wird, so wird die Diffusionsspannung des Übergangs vergrößert. Es fließt lediglich ein sehr geringer Strom, der durch den Tunnel-effekt zustande kommt. Diese Schaltungsweise wird auch »Sperrrichtung« genannt. Erst bei einer Spannung  $U_{\text{Durchbruch}}$  (»Durchbruchspannung«) steigt der Strom exponentiell an. Durch Ionisation des Materials wird es leitfähig. Bei diesem Vorgang kann die Diode zerstört werden.

### 2.1.1. UV-LEDs

UV-LEDs werden zur Erzeugung von UV-Licht benötigt. Es liegen LEDs mit unterschiedlichen mittleren Wellenlängen vor, sodass mit einem Array von LEDs in einem gewissen Bereich beliebige Wellenlängen erzeugt werden können.

LEDs (light-emitting diode) bestehen aus einem p-n-Übergang, an den eine Spannung in Durchlassrichtung angelegt wird. Die Elektronen gehen vom Valenzband des p-Teils in das Leitungsband des n-Teils über. Bei Zurückfallen auf das Valenzband des n-Halbleiters werden Photonen emittiert. Die Energie  $E_{\text{Photon}}$  der entstehenden Photonen der Wellenlänge  $\lambda$  ist abhängig von der Bandlücke des Halbleiters  $E_G$ :

$$E_G = E_{\text{Photon}} = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.1)$$

Um mit LEDs Licht im UV-Bereich zu erzeugen, wird eine Diode aus Indiumgalliumnitrid verwendet. Für die durchgeführten Versuche wird eine LED des Modells UVTOP280 der Firma Roithner LaserTechnik verwendet. Diese LED hat eine mittlere Wellenlänge von 285 nm, wobei die Halbwertsbreite der spektralen Verteilung 12 nm beträgt. Im Anhang in Abbildung A.1 ist

<sup>1</sup>Der n-Teil wird als geerdet betrachtet.

das vom Hersteller angegebene Spektrum enthalten.

Es wurde die LED Variante mit einer »ball lens« gewählt. Das emittierte Licht wird demnach in einer Brennweite von 15 mm bis 20 mm fokussiert. In dem Datenblatt [Roi13] finden sich weitere technische Details.

Zusätzlich zu dem Modell UVTOP280 sind noch die Modelle UVTOP260, UVTOP270, UVTOP290, UVTOP300 und UVTOP310 vorhanden, um eine größere Bandbreite an Wellenlängen zur Verfügung zu haben.

### 2.1.2. Photodiode

Eine Photodiode wird verwendet, um die Intensität des durch einen Beam Sampler (teildurchlässiger Spiegel, siehe Abschnitt 2.4) reflektierten Lichts zu messen.

Bei Einfall von Licht auf einen p-n-Übergang regen Photonen der Frequenz  $\nu$  die Elektronen mit der Energie  $E_P = h\nu$  an. Wenn  $E_P > E_G$ , so werden Elektronen vom Valenzband ins Leitungsband angehoben. Es wird folglich die Zahl der Elektronen im Leitungsband und die Zahl der Löcher im Valenzband erhöht, was eine Minderung der Diffusionsspannung  $U_D$  zur Folge hat. Die Elektronen driften nun in den n-Teil und die Löcher in den p-Teil. Dadurch entsteht eine Photospannung  $U_{Ph}$ , welche der Minderung von  $U_D$  entspricht.

Schaltet man eine Photodiode nun parallel zu einem Widerstand  $R$ , so fließt durch ihn ein Photostrom  $I_{Ph}$ . Die an  $R$  gemessene Spannung ist proportional zur Intensität des auf die Photodiode gelenkten Lichts.

In dieser Arbeit wird eine Photodiode der Serie UV-EQ der Firma OSI optoelectronics verwendet. Diese Photodiode ist speziell für den Bereich zwischen 200 nm bis 400 nm ausgelegt. Weitere technische Details können in [OSI] nachgelesen werden.

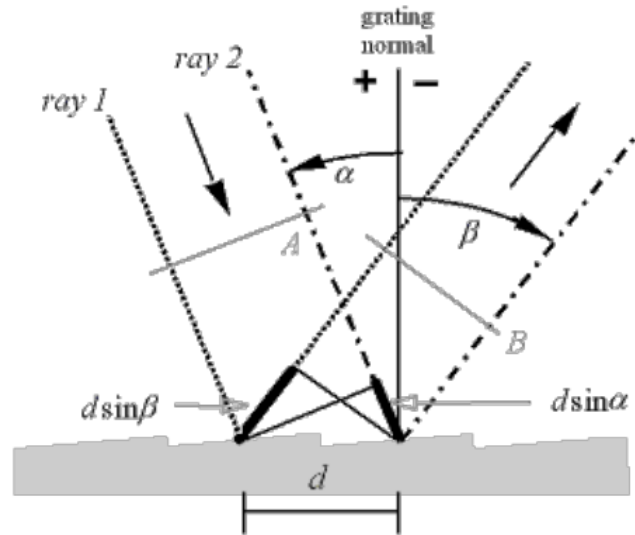
## 2.2. Funktionsweise eines Monochromators

Da die UV-LEDs eine gewisse spektrale Verteilung haben, wird ein Monochromator verwendet. Damit kann ein schmaler Wellenlängenbereich aus dem Spektrum der LEDs ausgewählt werden. Andere Wellenlängen werden herausgefiltert.

Ein Monochromator ist ein optischer Bandpass für Wellenlängen. Ein einfallendes Lichtbündel wird an einem Gitter reflektiert, sodass unter einem gegebenen Winkel für bestimmte Wellenlängen konstruktive Interferenz vorliegt, während andere Wellenlängen ausgelöscht werden. Durch Veränderung des Winkels zwischen Strahl und Flächennormalen des Gitters kann die Wellenlänge des Bandpasses geändert werden.

### 2.2.1. Optische Gitter

Ein optisches Gitter reflektiert unter einem Winkel  $\alpha$  zur Flächennormalen einfallendes Licht. Es wird zunächst monochromatisches Licht der Wellenlänge  $\lambda$  unter einem Winkel  $\beta$  zur Normalen betrachtet.



**Abbildung 2.4.** – Skizze eines optischen Gitters mit einfallendem Strahl A unter dem Winkel  $\alpha$  und reflektiertem Strahl B unter dem Winkel  $\beta$ . Es ist der Gangunterschied  $d \sin \beta + d \sin \alpha$  eingezeichnet. Es wird die Näherung ebener Wellenfronten benutzt. (Abbildung aus [Gra])

Abbildung 2.4 zeigt den Vorgang der Reflexion an einem optischen Gitter. Die eingezeichnete Länge  $d$  ist der Abstand zwischen zwei Kerben. Aus dem aufgeführten Gangunterschied lässt sich die »grating equation« aufstellen:

$$Gm\lambda = \sin \alpha + \sin \beta \quad (2.2)$$

Hierbei ist  $G = 1/d$  und  $m$  die Ordnung des Interferenzmaximums.

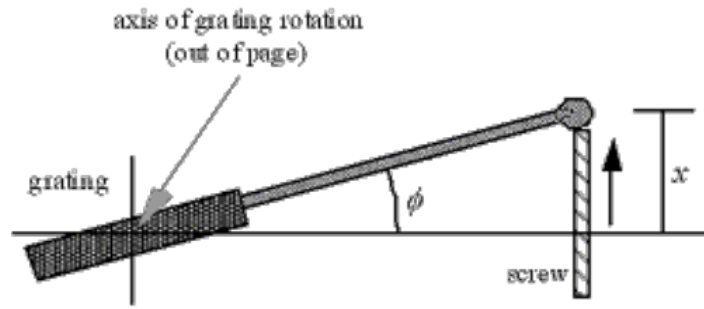
Es werden nun zwei neue Parameter definiert: Der Abweichungswinkel  $2\Phi = \alpha + \beta$  und der Ablenkungswinkel  $2K = \alpha - \beta$  ( $K$  ist bei dem hier verwendeten Monochromator eine Konstante). Hierbei sind die Vorzeichen aus Abbildung 2.4 zu beachten. Es lässt sich (2.2) nun schreiben als

$$Gm\lambda = 2 \cos K \sin \Phi. \quad (2.3)$$

### 2.2.2. Implementierung eines optischen Gitters in einem Monochromator

Betrachtet man nun Licht eines kontinuierlichen Spektrums, das auf ein optisches Gitter fällt, so ist aus (2.3) zu erkennen, dass bei festem  $m$  und  $K$  die durchgelassene Wellenlänge nur von  $\sin \Phi$  abhängt.<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Es ist zu beachten, dass das erste Maximum  $m = 1$  von Licht der Wellenlänge  $\lambda$  unter dem selben Winkel wie das zweite Maximum  $m = 2$  von Licht der Wellenlänge  $\lambda/2$  reflektiert wird.



**Abbildung 2.5.** – Drehung des Gitters durch eine Mikrometerschraube. (Abbildung aus [Gra])

Wie in Abbildung 2.5 dargestellt, wird das Gitter durch eine Mikrometerschraube, welche durch einen Stab der Länge  $l$  mit dem Gitter verbunden ist, gedreht. Eine Auslenkung  $x$  des Stabs durch die Mikrometerschraube resultiert daher in einer Drehung des Gitters um den Winkel  $\Phi$ .

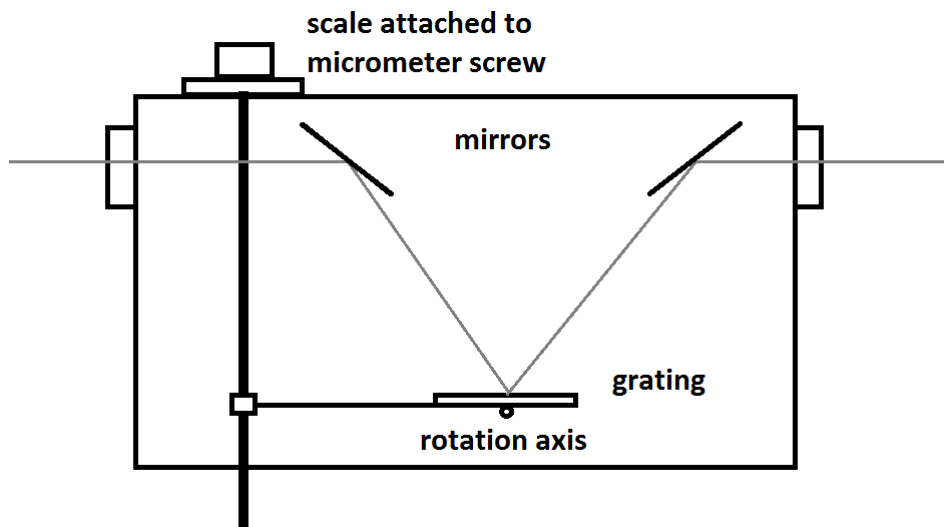
Es lässt sich über trigonometrische Betrachtung berechnen:

$$l \sin \Phi = x \quad (2.4)$$

Aus (2.3) und (2.4) ist zu erkennen, dass eine lineare Auslenkung  $z$  der Mikrometerschraube zu einer linearen Änderung der durchgelassenen Wellenlänge  $\lambda$  führt.

### 2.2.3. Horiba H10 Monochromator

In dieser Arbeit wurde der H10 Monochromator von Horiba verwendet.



**Abbildung 2.6.** – Schematische Zeichnung der Funktionsweise des Horiba H10 Monochromators.

Abbildung 2.6 zeigt eine Skizze des verwendeten Monochromators. Der Verlauf des Lichts im Innern des Geräts ist eingetragen. Ein Spiegel reflektiert das Licht zunächst auf ein optisches Gitter, während ein zweiter Spiegel das Licht vom Gitter zum Ausgang reflektiert. Die durchgelassene Wellenlänge wird, wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, kontrolliert.

Im Anhang (Abbildung A.7) befinden sich technische Zeichnungen dieses Geräts.



Specifications	H10	H20	DH10
Focal length	100 mm	200 mm	100 mm
Aperture ratio	f / 3.5	f / 4.2	f / 3.5
Grating size	32 X 32 mm	45 X 45 mm	32 X 32 mm
Linear dispersion with 1200 g/mm grating	8 nm / mm	4 nm / mm	4 nm / mm
Bandpass with standard slits (0.5, 1.0, 2.0 mm) and 1200 g/mm grating	4, 8, 16 nm	2, 4, 8, nm	2, 4, 8, nm
Resolution with 0.1 mm slits, 1200 g/mm grating	1.0 nm	0.5 nm	0.5 nm
Stray light rejection, 8 bandpasses from laser, and integrated light at 230 nm, with 270 nm cutoff filter and 150 W xenon lamp	10 <sup>-5</sup> @ 8 band-passes from laser ≤ .5% integrated at 230 nm.	10 <sup>-5</sup> @ 8 band-passes from laser. ≤ .5% integrated at 230 nm.	2 X 10 <sup>-5</sup> @ 8 band-passes from laser.
Wavelength accuracy (linearity over 500 nm range, with 1200 g/mm)	± 1.0 nm	± 1.0 nm	± 1.0 nm
Reproducibility with 1200 g/mm grating and backlash corrected with motor drive	± 0.25 nm	± 0.25 nm	± 0.25 nm
Weight	2 Kg (4.5 lb.)	3.2 Kg (7 lb.)	4 Kg (9 lb.)

**Abbildung 2.7.** – Herstellerangaben zu den H10, H20 und DH10 Monochromatoren. Der in dieser Arbeit verwendete Monochromator ist das Modell H10. (Abbildung aus [Hor])

Die Tabelle in Abbildung 2.7 zeigt die technischen Details der Monochromatoren von Horiba. Es wurden Schlitze mit einer Breite von 0,5 mm verwendet. Das resultiert in einem Wellenlängenbandpass von  $\pm 2$  nm Breite.

## 2.3. Schrittmotor

Um den Monochromator zu steuern wird ein Schrittmotor verwendet. Der Motor ist an die Achse zum Ändern der Wellenlänge angebracht.

Ein Schrittmotor ist ein Elektromotor, der mithilfe eines Controllers so angesteuert werden kann, dass er zu bestimmten Positionen gedreht werden kann. Der Abstand zwischen zwei ansteuerbaren Positionen ist konstant und wird als die Schrittweite des Motors bezeichnet. Die technischen Details und Einzelheiten zur Funktionsweise des Schrittmotors bzw. des Controllers wurden aus [TR1c] bzw. [TR1b] zusammengetragen. Weitere Informationen können in den beiden Anleitungen nachgelesen werden.

### 2.3.1. Motor QMOT QSH-4218-41-10-035

Es werden Schrittmotoren des Typs QMOT QSH-4218-41-10-035 und QSH-4218-41-10-027 der Firma Trinamic verwendet.

Specifications	Units	QSH4218		
		-35-10-027	-41-10-035	-51-10-049
Rated Voltage	V	5.3	4.5	5.0
Rated Phase Current	A	1.0	1.0	1.0
Phase Resistance at 20°C	Ω	5.3	4.5	5.0
Phase Inductance (typ.)	mH	6.6	7.5	8.0
Holding Torque (typ.)	Ncm	27	35	49
	oz in	38	50	69
Detent Torque	mNm	22	25	28
Rotor Inertia	g cm <sup>2</sup>	35	54	68
Weight (Mass)	Kg	0.22	0.28	0.35
Insulation Class		B	B	B
Dielectric Strength (for one minute)	VAC	500	500	500
Connection Wires	N°	4	4	4
Step Angle	°	1.8	1.8	1.8
Step angle Accuracy (max.)	%	5	5	5
Flange Size (max.)	mm	42.3	42.3	42.3
Motor Length (max.)	mm	33.5	38	47
Rear shaft hole depth	mm	5.0	5.0	5.0
Rear shaft hole diameter	mm	3.0	3.0	3.0
Axis Diameter	mm	5.0	5.0	5.0
Axis Length (typ.)	mm	24	24	24
Axis D-cut (0.5mm depth)	mm	20	20	20
Maximum Radial Force (20 mm from front flange)	N	28	28	28
Maximum Axial Force	N	10	10	10
Ambient temperature	°C	-20...+50	-20...+50	-20...+50

**Abbildung 2.8.** – Technische Details der Schrittmotoren der Serie QSH4218. Die in dieser Arbeit benutzten Motoren sind -41-10-027 und -41-10-035. (Abbildung aus [TR1b])

Die Tabelle in Abbildung 2.8 zeigt die Spezifikationen der beiden verwendeten Schrittmotoren. Die Anzahl der Schritte pro Drehung um 360° beider Modelle beträgt

$$\frac{360^\circ}{\text{Winkel pro Schritt}} = \frac{360^\circ}{1,8^\circ \text{ pro Schritt}} = 200 \text{ Schritte.} \quad (2.5)$$

Um einen fehlerfreien Betrieb des Motors zu garantieren, wird der vom Hersteller vorgesehene Controller benutzt.

### 2.3.2. Controller TMCM-110-42

Der Controller TMCM-110-42 benötigt eine angelegte Spannung zwischen 12 V und 30 V. Es ist möglich die einzelnen Schritte in weitere Microsteps zu unterteilen. Die verwendete Einstellung beträgt 64 Microsteps pro Schritt des Motors. Damit kann die Position des Motors feiner als ohne Verwendung von Microsteps eingestellt werden. Es ergibt sich somit für die Anzahl der Microsteps pro Drehung um 360° des Motors:

$$200 \text{ Schritte} \cdot 64 \frac{\text{Microsteps}}{\text{Schritt}} = 12800 \text{ Microsteps} \quad (2.6)$$

Dies ist die standardmäßige Einstellung des Controllers. In der Ansteuerung des Motors mit LabView wird dieser Wert verwendet. Wie im Manual des Motors nachzulesen ist, wird durch diese Einstellung in der Praxis jedoch nur eine Anzahl von ca. 24 Microsteps pro Schritt aufgelöst. Das entspricht demnach 4800 Schritten pro Umdrehung.

Der Controller speichert die aktuelle Position. Solange die Stromversorgung gegeben ist, kann direkt die gewünschte absolute Position angesteuert werden.

Nachdem die Stromversorgung unterbrochen wurde, wird die aktuelle Position als absolute Position null angesehen. Es muss daher in jedem Aufbau ein mechanischer Anschlag gegeben sein. Nach durchgeführter Messung muss der Motor demnach auf die Position null gefahren werden. Sollte dies nicht möglich sein, so kann bei ausgeschalteter Stromversorgung der Motor per Hand zur absoluten Position null gefahren werden.

Die Programmierung und die Inbetriebnahme des Motors werden in Abschnitt 3.2 beschrieben.

## 2.4. Beam Sampler

Ein Beam Sampler ist ein halbdurchlässiger Spiegel. Er wird benötigt, um die Überwachung der Lichtintensität der UV-LEDs während eines laufenden Experiments zu ermöglichen.

Wenn ein Beam Sampler in einen Strahlengang gebracht wird, so wird ein bestimmter Anteil des Lichts reflektiert. Der Rest des Lichts wird unverändert transmittiert. Die Anteile von reflektiertem und transmittiertem Licht sind abhängig von dem Winkel  $\Theta$ . Dies ist der Winkel zwischen der Flächennormalen des Beam Samplers und dem Strahlengang.

In dieser Arbeit werden Beam Sampler des Typs BSF05-UV der Firma Thorlabs verwendet. Diese bestehen aus synthetischem Quarzglas.

Nach Herstellerangaben [Tho12] ist im Bereich von  $30^\circ \leq \Theta \leq 40^\circ$  ein Reflexionsvermögen  $R$  von  $(3 \pm 2)\%$  zu erwarten.

Wie im Anhang auf der Katalogseite in Abbildung A.8 zu sehen, ist das hier verwendete Modell für Wellenlängen von 250 nm bis 420 nm vorgesehen. Die Rückseite des Beam Samplers ist mit einer Antireflexschicht versehen, um ungewollte Reflexionen zu vermeiden.

Um das Reflexionsvermögen  $R$  zu bestimmen, muss die Intensität des Lichts ohne Beam Sampler im Strahlengang  $I_{\text{ohne}}$  und die Intensität des Lichts mit Beam Sampler im Strahlengang  $I_{\text{mit}}$  gemessen werden.

Für das Transmissionsvermögen  $T$  gilt:

$$T = \frac{I_{\text{mit}}}{I_{\text{ohne}}} \quad (2.7)$$

Durch die Relation  $T + R = 1$  kann nun das Reflexionsvermögen bestimmt werden. Es gilt

$$R = 1 - T = 1 - \frac{I_{\text{mit}}}{I_{\text{ohne}}}. \quad (2.8)$$

Gleichung (2.8) gilt nur für die Annahme, dass keine Verluste durch Absorption entstehen (vgl. [Dem09, p.236-240]).

## 2.5. Quecksilberdampfampe

Quecksilberdampflampen emittieren Licht, dessen Wellenlängenspektrum Liniencharakteristik hat. Die Lichtintensität hat somit klar definierte Maxima bei festen Wellenlängen. Diese Eigenschaft lässt sich für die Kalibrierung des Monochromators ausnutzen. Dazu wird das Spektrum der Quecksilberdampfampe aufgenommen. Die Linien des Spektrums werden identifiziert, worauf eine neue Kalibrierung erstellt werden kann.

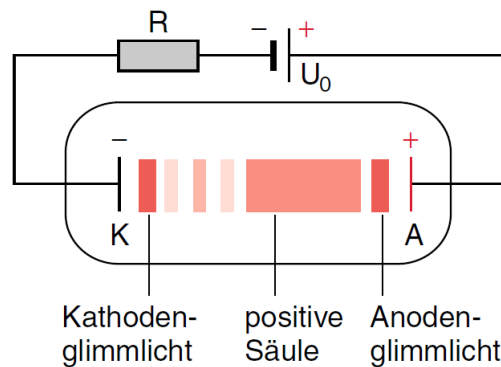
Atome können durch Wechselwirkung mit Elektronen angeregt werden. Abhängig von der übertragenen Energie  $E$  können bei Zurückfallen des Atoms in den Grundzustand Photonen

emittiert werden. Bei einem Energieübertrag, der im Bereich der Bindungsenergie der Elektronen eines Atoms ist, wird nach einiger Zeit (im Bereich von  $10^{-8}$  s) die Anregungsenergie durch die Emission eines Photons abgegeben. Die Frequenz  $\nu$  des emittierten Photons lässt sich durch die Beziehung

$$E = h\nu \quad (2.9)$$

berechnen.

### 2.5.1. Gasentladungslampen



**Abbildung 2.9.** – Skizze des Aufbaus einer Gasentladungslampe (Abbildung entnommen aus [Dem09, p.70])

Eine Quecksilberdampf Lampe ist eine Gasentladungslampe. Der Aufbau ist schematisch in Abbildung 2.9 dargestellt. Die Lampe besteht aus einer Röhre, die mit Quecksilber gefüllt ist. An den Enden der Röhre sind eine Anode  $A$  und eine Kathode  $K$  angebracht.

Um die Lampe zu zünden, ist noch ein weiteres Element in der Röhre enthalten. Bei der in dieser Arbeit verwendeten Lampe ist dies Cadmium. Zusätzlich ist eine dritte Elektrode in der Nähe einer der beiden Hauptelektroden angebracht. Zwischen dieser Elektrode und einer Hauptelektrode wird eine Spannung angelegt, die groß genug ist, um die Atome des Cadmiums zu ionisieren. Das Innere der Röhre wird durch diesen Vorgang soweit aufgeheizt, dass das bei Raumtemperatur flüssige Quecksilber verdampft und ionisiert wird. Im Innern der Röhre entsteht somit ein Plasma aus Quecksilberionen und freien Elektronen.

Durch die an die beiden Hauptelektroden angelegte Spannung  $U_0$  werden ionisierte Gasatome zur Kathode beschleunigt. Beim Aufprall auf die Kathode werden Elektronen emittiert. Diese werden von der Kathode zur Anode beschleunigt.

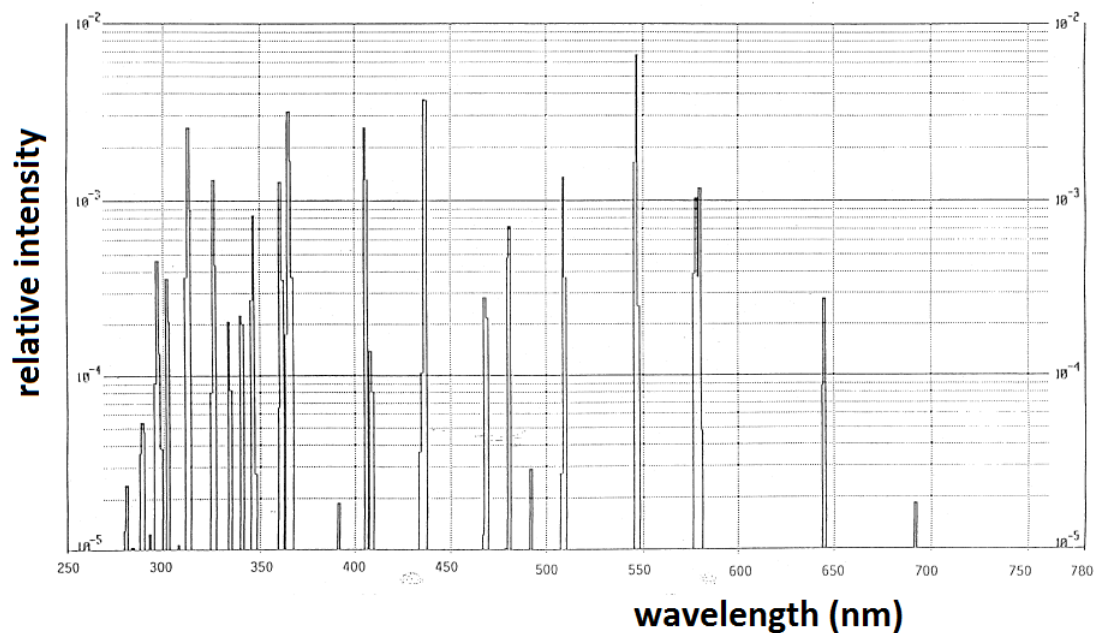
Wenn die Elektronen eine genügend große kinetische Energie erhalten haben, können sie Atome des Gases anregen. Dadurch entsteht das »Kathodenglimmlicht«. Dies ist der am hellsten leuchtende Bereich der Lampe.

Nach einer größeren Beschleunigungsstrecke bis zu einem Punkt  $D$  haben die Elektronen genug Energie, um die Gasatome zu ionisieren. Da die Ionen eine größere Masse als die Elektronen haben, werden sie langsamer abtransportiert. Dadurch entsteht vor  $D$  eine positive Raumladungszone. Zwischen Kathode und  $D$  liegt somit ein großer Spannungsabfall, der »Kathodenfall«, vor. Die Elektronen im Gebiet zwischen  $D$  und Anode werden folglich nicht mehr so stark beschleunigt.

Nach dem Kathodenfall erfahren die Elektronen nun eine kleinere Beschleunigung. Bei Erreichen einer genügend großen kinetischen Energie werden nun wiederum Gasatome angeregt. Diesen Bereich bezeichnet man als die positive Säule. (vgl. [Dem09, p.64ff])

### 2.5.2. Spezifisches Spektrum

Da die Energie der emittierten Photonen charakteristisch für die im Gas enthaltenen Atome ist, besteht das Wellenlängenspektrum des abgestrahlten Lichts aus diskreten Linien.



**Abbildung 2.10.** – Wellenlängenspektrum der verwendeten Quecksilber Cadmium Lampe. Die Abbildung wurde entnommen aus dem Datenblatt des Herstellers Osram [Osr].

Abbildung 2.10 zeigt das Spektrum der verwendeten Quecksilber Cadmium Lampe. Die genaue Position der Linien einer Quecksilberdampf Lampe kann in [RCW83] nachgelesen werden. In Tabelle 2.1 sind die für die Kalibrierung des Monochromators in Abschnitt 4.2 verwendeten Linien zu finden.

**Tabelle 2.1.** – Linien des Quecksilberspektrums. Es sind nur die für die Auswertung relevanten Linien (die mit der größten Intensität) aufgeführt. [RCW83]

Wavelength	relative intensity
546,07 nm	1100
435,83 nm	4000
404,66 nm	1800
365,16 nm	2800



## 3. Aufbau

### 3.1. Intensitätsüberwachung und Einkopplung in das Glasfaserkabel

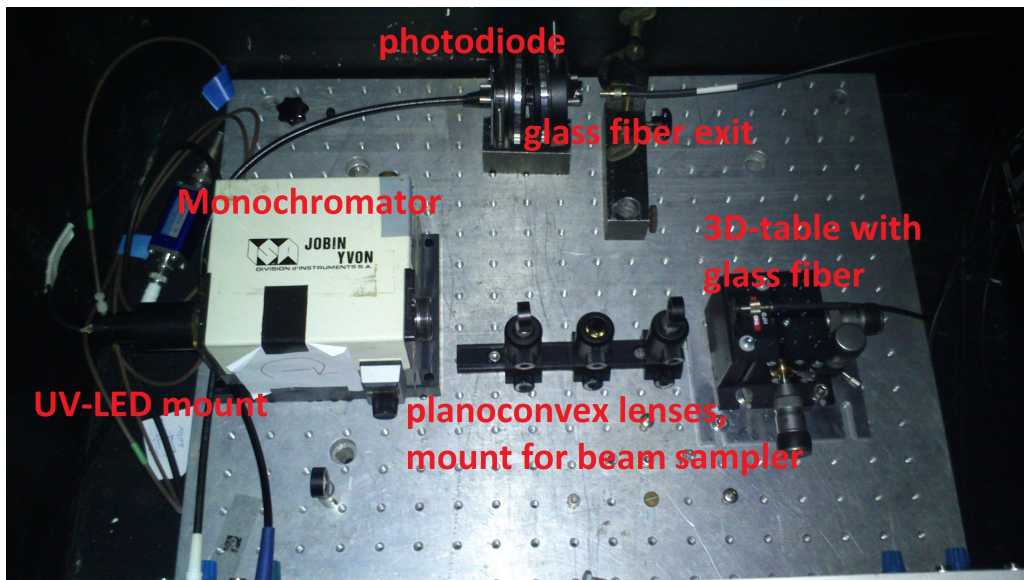
#### 3.1.1. UV-LEDs mit Monochromator

Die durchstimmbare UV-Lichtquelle wird mithilfe von UV-LEDs betrieben. Aus [Roi13] ist zu entnehmen, dass bei Gleichspannungsbetrieb der LEDs ein durch die LED fließender Strom von 30 mA nicht überschritten werden darf. Es wird daher ein Vorwiderstand  $R$  mit  $267,5 \Omega$  in Reihe geschaltet. Es wird angenommen, dass der Widerstand der LED im Vergleich zu  $R$  bei genügend großen Spannungen (im Bereich von 7 V) vernachlässigbar ist. Nach dem Ohmschen Gesetz lässt sich die maximal verwendbare Spannung  $U_{\max}$  berechnen:

$$U_{\max} = 267,5 \Omega \cdot 30 \text{ mA} \approx 8,0 \text{ V} \quad (3.1)$$

Um einen fehlerfreien Betrieb der LEDs zu gewährleisten wird eine Gleichspannungsquelle mit einer Ausgangsspannung von 7 V benutzt. Diese Betriebsspannung entspricht einem Durchgangsstrom von ca. 26 mA.

Da die LEDs eine gewisse spektrale Bandbreite haben (siehe Abschnitt 2.1.1), wird ein Monochromator benutzt. Es werden 0,5 mm Ein- und Ausgangsslitze am Monochromator verwendet. Es ergibt sich demnach ein Wellenlängenbandpass von  $\pm 2 \text{ nm}$  (siehe Abschnitt 2.2.3).



**Abbildung 3.1.** – Erste Version des Aufbaus der durchstimmbaren UV-Lichtquelle. Die Intensitätsüberwachung durch die Photodiode und den Beam Sampler ist zunächst nicht eingebaut.

Abbildung 3.1 zeigt die erste Version der durchstimmbaren UV-Lichtquelle. An den Eingang des Monochromators ist eine Halterung für eine UV-LED angebracht. Der Abstand der LED

beträgt ca. 20 mm (Brennweite der LEDs, siehe Abschnitt 2.1.1) zum Eingang. Die Entfernung lässt sich variieren, sodass eine genaue Fokussierung des Lichts der LED auf den Eingang möglich ist.

Hinter dem Monochromator befindet sich eine Konstruktion aus zwei plankonvexen Linsen mit einer Brennweite von 50 mm. Die erste Linse kollimiert das Licht, welches aus dem Ausgang des Monochromators tritt. Der kollimierte Strahl wird danach von der zweiten plankonvexen Linse auf den 3D-Tisch mit dem Glasfaserkabel fokussiert.

Die Linsen sind auf einer optischen Schiene montiert. Die Position zu den anderen Komponenten und untereinander kann somit variiert werden. Darüber hinaus sind die Halterungen der Komponenten auch in der Höhe variierbar. Zwischen den beiden Linsen ist die Halterung für den Beam Sampler zu sehen. Dieser ist allerdings noch nicht eingebaut.

Mithilfe einer Photodiode wird testweise die Intensität des in das Glasfaserkabel eingekoppelten Lichts gemessen.<sup>1</sup> Der durch die Photodiode erzeugte Strom wird in ein Spannungssignal gewandelt, mit einem einstellbaren Verstärker (Verstärkung von  $\cdot 10^1$  bis  $\cdot 10^9$  wählbar) verstärkt und zunächst auf einem Oszilloskop dargestellt.

Die Fehlerangaben zu jedem Messwert berechnen sich jeweils aus dem Wert »Spitze-Spitze«, der vom Oszilloskop ausgegeben wird. Hierbei wird der Abstand von Maximum und Minimum der Schwankungen während einer Messung ausgegeben. Der Fehler wird als ein Drittel des Wertes »Spitze-Spitze« angenommen.

### Justierung

Der Aufbau muss zunächst justiert werden, damit eine möglichst große Lichtintensität in das Glasfaserkabel eingekoppelt wird. Ultraviolettes Licht ist nicht sichtbar. Es wurde herkömmliches Druckerpapier verwendet, um den Lichtspot sichtbar zu machen. Aufheller in diesem Papier fluoreszieren. Es lässt sich daher ein blaues Leuchten erkennen, wenn UV-Licht auf solch ein Papier trifft.

Um die bestmögliche Justierung zu erreichen, werden folgende Schritte befolgt:

1. Die Photodiode wird direkt vor den Ausgang des Monochromators gebracht. Der Abstand zwischen LED und Eingang des Monochromators wird nun so eingestellt, dass die größtmögliche Lichtintensität durch die Photodiode nachgewiesen wird.
2. Die Photodiode wird neben den Aufbau gesetzt. Der Ausgang des Glasfaserkabels wird wie in Abbildung 3.1 vor der Photodiode fixiert. Eine genaue Justage ist hier nicht nötig. Die für Licht sensitive Fläche der Diode ist genügend groß, um das gesamte aus dem Glasfaserkabel austretende Licht zu detektieren.
3. Die erste plankonvexe Linse wird so in den Strahlengang gebracht, dass das Licht hinter der Linse kollimiert ist. Es wird dafür ein Papierblatt in großer Entfernung<sup>2</sup> hinter der Linse platziert. Der Abstand zwischen Linse und Monochromator ist dann richtig, wenn der beobachtete Strahlenquerschnitt möglichst klein ist. Bei dieser Einstellung ist das Licht in geringer Entfernung von der Linse näherungsweise kollimiert.  
Die Höhe der Linse in vertikaler Richtung muss darüber hinaus so gewählt werden, dass der Verlauf des Strahls waagerecht ist.
4. Die zweite Linse wird nun in den Strahlengang gebracht. Auch der 3D-Tisch mit der Einkopplung in das Glasfaserkabel wird, wie in Abbildung 3.1 gezeigt, fixiert. Der Ab-

---

<sup>1</sup>In der endgültigen Version wird die Intensität des am Beam Sampler reflektierten Lichts gemessen.

<sup>2</sup>Die Gegebenheiten erlauben hier einen Abstand von ca. 50 cm.

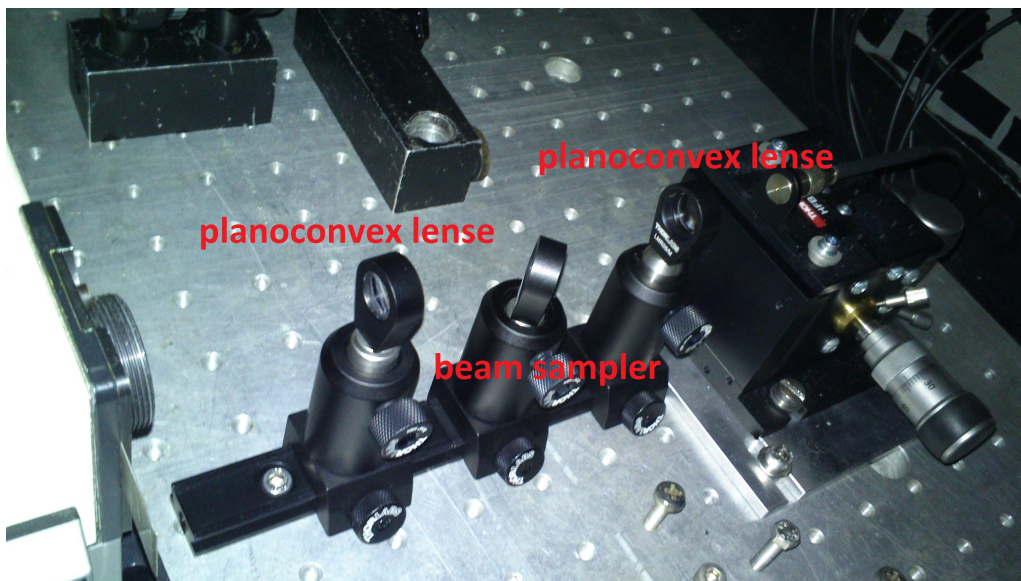


stand zwischen Tisch und Linse wird so gewählt, dass das Licht durch die Linse auf das Kabel fokussiert ist. Dies wird wieder mithilfe eines Papierstücks kontrolliert.

5. Zum Schluss wird die Feinjustage des 3D-Tischs überprüft. Durch Mikrometerschrauben kann der Tisch in drei Dimensionen bewegt werden. Es wird nun nacheinander jede Schraube so eingestellt, dass auf dem Oszilloskop eine maximale Spannung zu sehen ist. Dieser Vorgang muss mehrfach wiederholt werden, bis der 3D-Tisch in allen Raumrichtungen korrekt positioniert ist.

### Anbringen des Beam Samplers.

Um die Intensität des Lichts während der Durchführung eines Experiments zu messen, wird ein Beam Sampler verwendet.



**Abbildung 3.2.** – Anbringung des Beam Samplers auf der optischen Schiene zwischen den beiden plankonvexen Linsen.

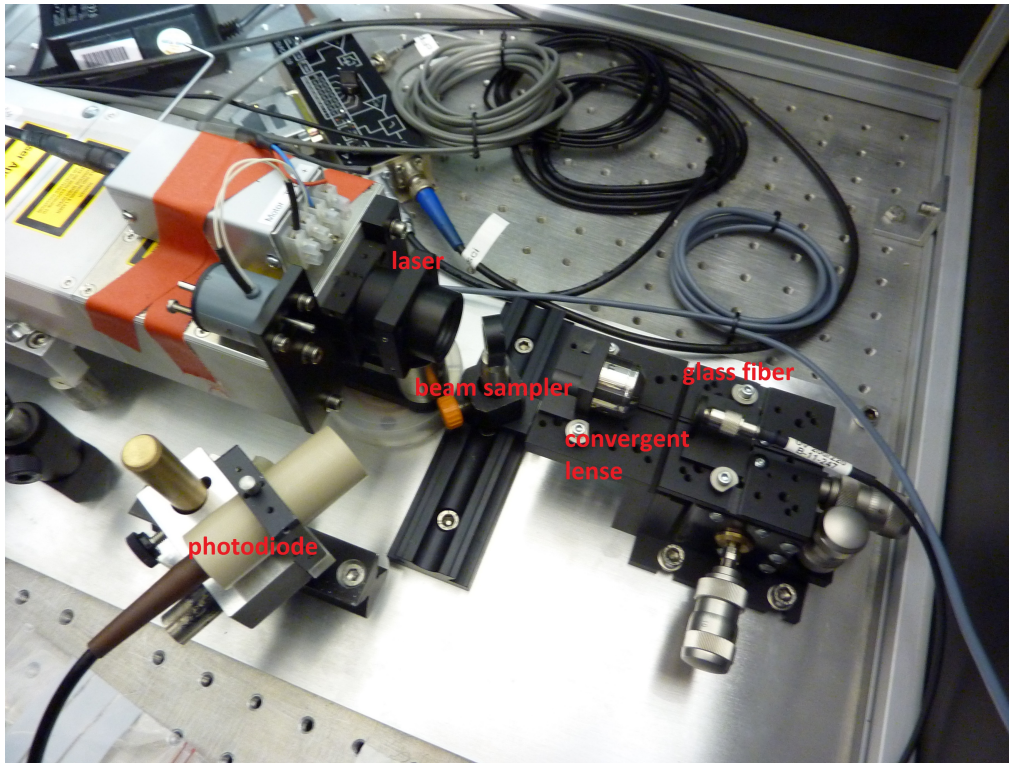
Abbildung 3.2 zeigt einen Ausschnitt des Aufbaus aus Abbildung 3.1. Es ist dargestellt, wie der Beam Sampler zwischen den beiden Linsen eingebaut wird.

Der Winkel zwischen Flächennormalen des Beam Samplers und Strahlengang beträgt ca.  $30^\circ$ . Nach [Tho12] ist hier keine genauere Justage erforderlich. Der Winkel darf lediglich nicht zwischen zwei Messungen verändert werden, da die Ergebnisse sonst nicht vergleichbar sind. Das Licht, welches durch den Beam Sampler reflektiert wird, wird mithilfe einer Photodiode detektiert. Der Verlauf des Strahlengangs wird durch Anbringung des Beam Samplers nicht geändert.

### 3.1.2. Laser

Zusätzlich zu den UV-LEDs der durchstimmbaren UV-Lichtquelle wird auch ein gepulster ND:YAG Laser mit einer Wellenlänge von 266 nm zur Erzeugung von Elektronen in der Elektronenkanone verwendet.

Der Aufbau des Lasers wurde bereits von Daniel Winzen und Michael Zacher fertiggestellt. Zu diesem Zeitpunkt wurde der Laser mit einer Sammellinse in das Glasfaserkabel eingekoppelt. Der bestehende Aufbau soll nun erweitert werden, sodass bei einer laufenden Messung die Intensität des Lasers gemessen werden kann.



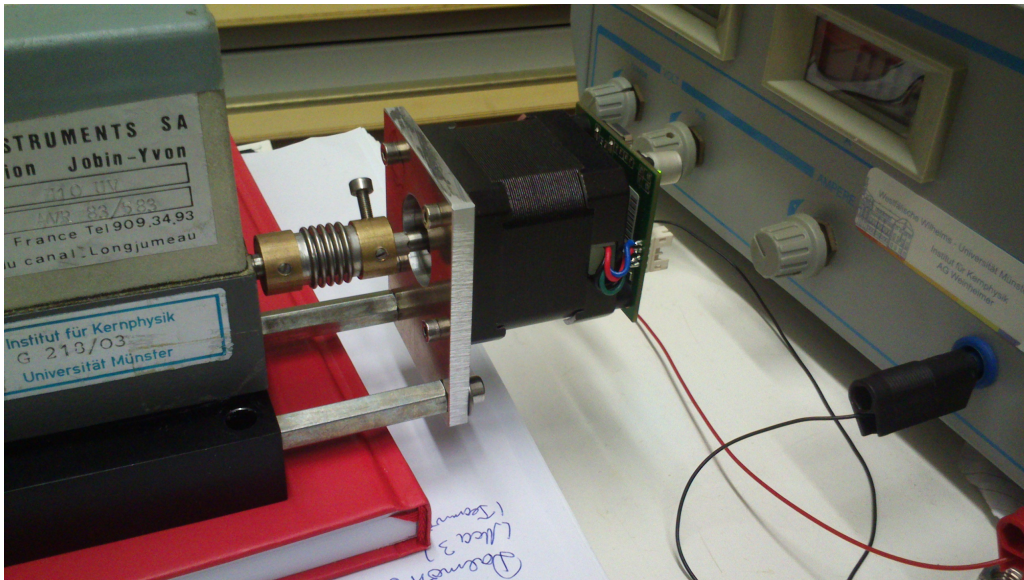
**Abbildung 3.3.** – Aufbau des Lasers mit Intensitätsüberwachung durch eine Konstruktion aus Beam Sampler und Photodiode. (Foto: Dr. Miroslav Zboril)

Abbildung 3.3 zeigt den Aufbau der Messung. Wie in Abschnitt 3.1.1 wird dazu ein Beam Sampler verwendet. Dieser wird zwischen den Laser und die Sammellinse in den Strahlengang gebracht. Der Einfallswinkel des Lichts auf den Beam Sampler beträgt hier ebenfalls ca.  $30^\circ$ . Das reflektierte Licht wird wie in Abschnitt 3.1.1 mit einer Photodiode gemessen. Die Methode zur Auslese der Messwerte ist die gleiche.

### 3.2. Anbringung des Schrittmotors

Nach Angaben des Herstellers wird für eine möglichst genaue Funktionsweise des Monochromators und reproduzierbare Ergebnisse beim Einstellen einer bestimmten Wellenlänge ein Schrittmotor empfohlen [Hor].

Wie in Abschnitt 2.3 erwähnt, wurde der Motor QMOT QSH-4218-41-10-035 und dazu der Controller TMCM-110-42 der Firma Trinamic verwendet. Die Verkabelung von Motor und Controller wurde mithilfe der Elektronik Werkstatt des Instituts für Kernphysik der Westfälischen Wilhelms-Universität realisiert. Es wurden dafür die Anweisungen in den Anleitungen zu beiden Komponenten befolgt ([TR1c] und [TR1b]). Um den Schrittmotor zu verwenden und anzusteuern, ist für Stromversorgung des Controllers und dessen Anschluss durch ein dreiadriges serielltes Kabel an den COM-Port des für die Experimentsteuerung verwendeten PCs zu sorgen.



**Abbildung 3.4.** – Anbringung des Schrittmotors (mitte) an den Monochromator (links). Auf der Rückseite des Schrittmotors befindet sich der Controller. Die Stromversorgung wird durch ein Netzgerät mit variabler Spannung realisiert (rechts).

Abbildung 3.4 zeigt den an den Monochromator angebrachten Schrittmotor. Es wurde dabei angepasst auf die Abmessungen des Motors (vgl. [TRIC]) eine individuelle Halterung erstellt. Die Konstruktion der Halterung wurde in Zusammenarbeit mit Hans-Werner Ortjohann fertiggestellt. Das einstellbare Netzgerät wird mit einer Spannung von 24 V betrieben, da für die spätere Verwendung des Aufbaus ein Netzteil mit einer nicht variablen Spannung von 24 V vorgesehen ist.

### 3.3. Kalibrationsaufbau

Die in den Monochromator eingebaute Anzeige der Wellenlänge ist ungenügend: Bei vorherigen Versuchen wurde bereits eine Verschiebung zwischen Anzeige und durchgelassener Wellenlänge festgestellt. Auch die Reproduzierbarkeit von beliebigen Einstellungen ist nicht gegeben. Mithilfe einer Quecksilberdampfampe wird der Monochromator neu kalibriert. Die Skala wird durch die Positionsangabe des Schrittmotors ersetzt. Es muss eine Funktion, welche den Zusammenhang zwischen Position des Schrittmotors und durch den Monochromator durchgelassener Wellenlänge angibt, bestimmt werden.



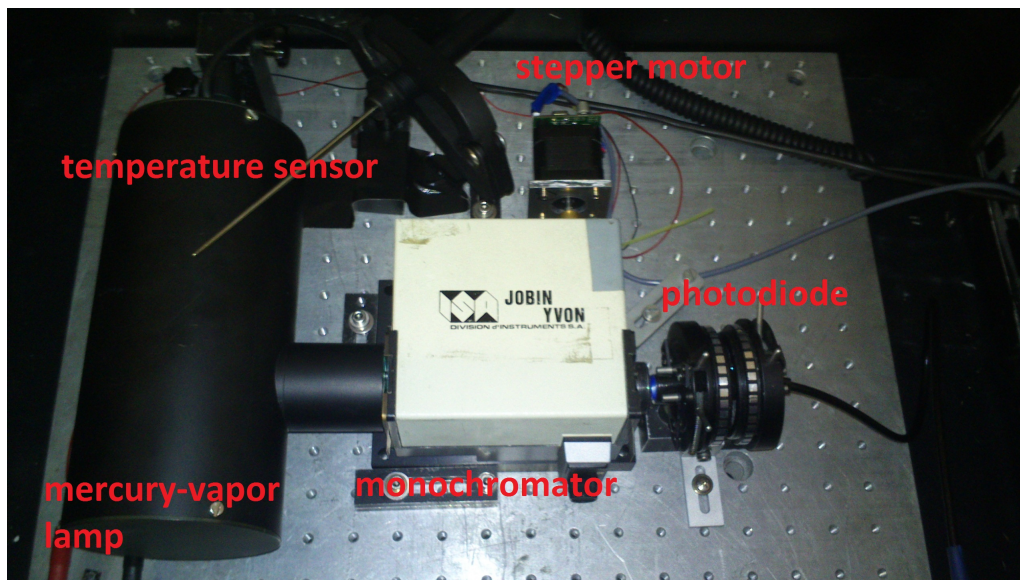


Abbildung 3.5. – Aufbau zur Kalibrierung des Monochromators.

Für die Kalibration wird eine Quecksilberlampe so fixiert, dass das emittierte Licht in den Eingang des Monochromators gelangt. An den Ausgang des Monochromators wird die Photodiode gestellt. Die durch den Monochromator durchgelassene Wellenlänge wird mithilfe des Schrittmotors kontrolliert.

Ein Temperatursensor überwacht die Temperatur der Quecksilberdampfampe. Der Aufbau befindet sich in einer Kiste, die das von außen einfallende Licht abschirmt. Es muss daher überwacht werden, dass die Temperatur der Quecksilberdampfampe in etwa konstant bleibt.<sup>3</sup> Bei zu großem Anstieg der Temperatur im Innern der Kiste können sich die Eigenschaften der Bauteile verändern. Es werden daher noch Lüfter in der Kiste angebracht (diese sind auf Abbildung 3.5 nicht zu sehen).

Es muss darüber hinaus darauf geachtet werden, dass kein Licht der Quecksilberdampfampe direkt oder durch Reflexion auf die Photodiode gelangt.

Das Spektrum der Quecksilberdampfampe wird mithilfe des Programms »Durchfahren.vi« aufgenommen. Der Schrittmotor am Monochromator fährt dabei durch einen einstellbaren Bereich des Spektrums. Es wird die durch die Photodiode erzeugte Spannung am Verstärker und die Position des Motors an jedem Messpunkt ausgegeben. Eine genaue Beschreibung des Programms ist in Abschnitt 3.4.2 zu finden.

### 3.4. Programmierung des Schrittmotors am Monochromator

Der Controller wird über ein RS232 Interface an einen COM-Port des Rechners angeschlossen. Der Controller des Schrittmotors setzt binäre Befehle in Aktionen um. Die vom Controller verwendete Syntax wird in [Tria] beschrieben. Mit LabView wurde ein Programm zur Ansteuerung des Motors geschrieben. Zur Umwandlung von Befehlen in den Binärcode wurden Teile eines vom Hersteller Trinamic bereitgestellten Beispiel-VIs verwendet.

#### 3.4.1. »Ansteuerung.vi«

Der Schrittmotor soll zu jeder beliebigen Position gefahren werden können. Dies wird, nach Bestimmung einer linearen Kalibrationsgleichung, in die eingestellte Wellenlänge des Mono-

<sup>3</sup>Die Lampe wird eine Stunde vor Start der Messungen eingeschaltet. Es stellt sich eine konstante Temperatur von ca. 50 °C ein.

chromators umgerechnet. Darüber hinaus muss das Programm eine Drehung des Motors über die mechanischen Grenzen des Monochromators verhindern.

Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, ist es notwendig, dass ein mechanischer »Anschlag« existiert, der der absoluten Nullposition des Motors entspricht. Bei der Schraube zum Einstellen des Monochromators liegt bei Drehung gegen den Uhrzeigersinn ein mechanischer Anschlag vor. Zu diesem Punkt wird der Monochromator nach jeder Messung gedreht.

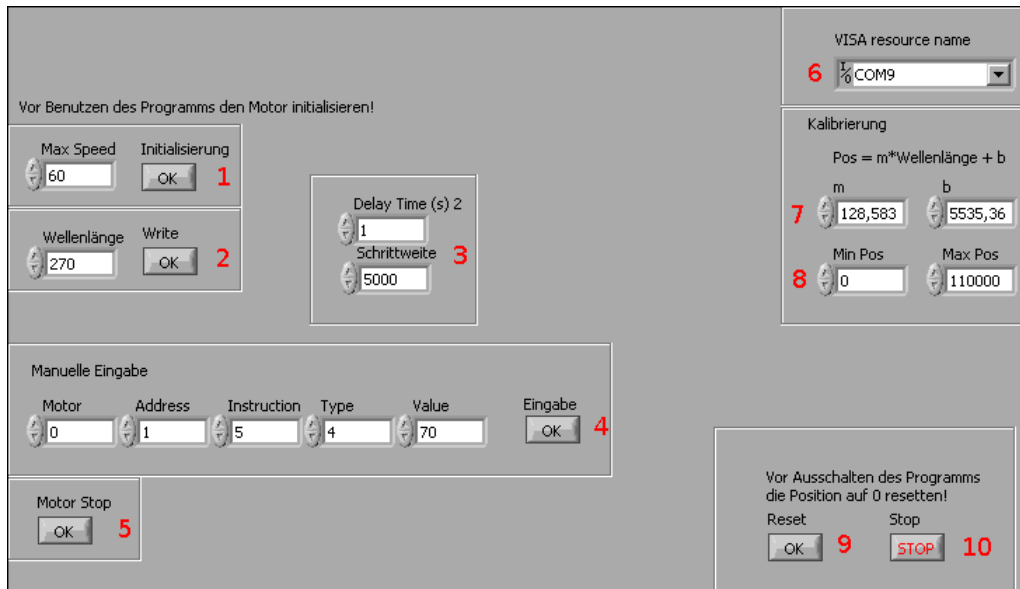


Abbildung 3.6. – Interface des Programms »Ansteuerung.vi«.

Abbildung 3.6 zeigt das Interface des zur Ansteuerung des Schrittmotors verwendeten Programms »Ansteuerung.vi«. Das Blockdiagramm ist im Anhang in Abbildung A.9 enthalten. Es wird nun die Funktionsweise des Programms mithilfe der in Abbildung 3.6 eingetragenen Markierungen erklärt:

1. Hier wird die Drehgeschwindigkeit des Motors auf den gewünschten Wert gesetzt. Dies muss nach jedem neuen Einschalten des Motors durchgeführt werden. Ein angemessener Wert ist 60. Eine zu große Drehgeschwindigkeit kann zum Schrittverlust und damit zu dem Verlust der absoluten Position führen.
2. Hier wird der Motor zu der gewünschten Wellenlänge gefahren. Die Position wird mithilfe der bei 7 eingetragenen Kalibrierung berechnet.
3. Diese Funktion gleicht den Gangunterschied der Mechanik des Monochromators aus. Bei kleinen Rückschritten läuft der Motor zuerst um die bei »Schrittweite« eingetragenen Positionen zurück, um sich dann auf die in 2 festgelegte Position vorzubewegen. Die »Delay Time« ist die Zeitspanne in Sekunden, in der der Motor diesen Rückschritt durchführen kann. Bei einem großen Rückschritt ( $>10$  nm) ist es demnach sinnvoll, den Motor erst mit 2 auf die gewünschte Wellenlänge fahren zu lassen. Danach muss noch einmal 2 betätigt werden, damit der Motor sich von der richtigen (linken) Seite der Position nähert.
4. Das ist eine manuelle Eingabezeile, die dem Motor den dort eingetragenen Befehl zusendet. Die Syntax für diese Befehle ist in [Tri] zu finden.
5. Hiermit wird dem Motor ein Stop-Befehl gesendet.
6. Hier kann der COM-Port, an dem der Motor angeschlossen ist, ausgewählt werden.

7. Dies ist die Kalibrierung, die für die Berechnung der Position des Motors aus der bei 2 eingetragenen Wellenlänge benötigt wird. Die Kalibrierung wird in Abschnitt 4.2 bestimmt. (Die dort ermittelten Werte sind  $m = 128,542$  und  $b = 5551,49$ .)
8. Hier kann die minimale und maximale anfahrbare Position des Motors eingetragen werden. Die Werte 0 für »Minpos« und 110000 für »Maxpos« decken einen Wellenlängenbereich vom Anfang der Skala bis ca. 800 nm ab.
9. Bevor der Motor ausgeschaltet wird, muss seine Position hiermit auf 0 zurückgesetzt werden.
10. Stoppt das Programm.

### 3.4.2. »Durchfahren.vi«

Um die Kalibrierung mit der Quecksilberdampfampe durchzuführen, wird außerdem ein Programm benötigt, das einen beliebigen Bereich des Monochromators mit Messpunkten wählbaren Abstands abtastet. Es muss möglich sein die mit der Photodiode gemessene Intensität des den Monochromator passierenden Lichts an jedem Messpunkt aufzunehmen. Die Ausgabe soll in einer Datei erfolgen, die zu jedem Punkt die aktuelle Motorposition und die durch die Photodiode erzeugte Spannung enthält.

Der durch die Photodiode erzeugte Strom wird in eine Spannung umgewandelt und, wie bei den vorangegangenen Messungen, durch einen einstellbaren Verstärker verstärkt. Mit einem Datenerfassungsmodul NI USB-6008 der Firma National Instruments<sup>4</sup> wird die vom Verstärker ausgegebene Spannung aufgenommen.

Nachdem der gewünschte Messbereich durchfahren wurde, wird der Motor auf die absolute Nullposition zurückgesetzt.

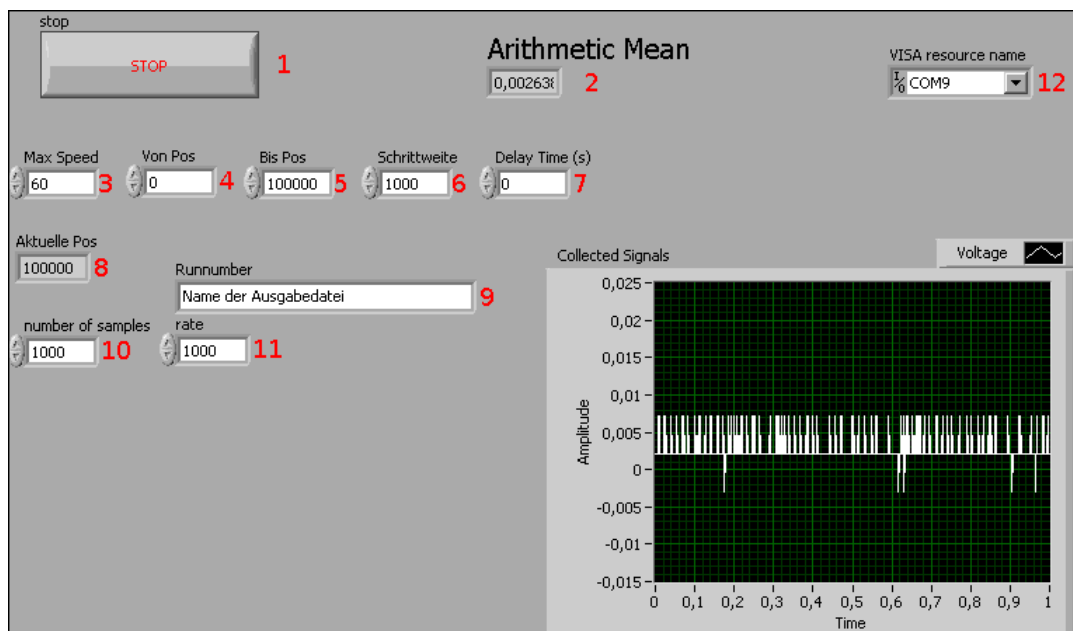


Abbildung 3.7. – Interface des Programms »Durchfahren.vi«.

Abbildung 3.7 zeigt das Interface des Programms »Durchfahren.vi«, welches die oben genannten Anforderungen erfüllt. Das Blockdiagramm ist im Anhang unter Abbildung A.10 zu finden. Im Folgenden werden die Funktionen des Programms anhand der Markierungen aus Abbildung 3.7 erläutert:

<sup>4</sup>Technische Details sind in [Nat] zu finden.

1. Stoppt das Programm
2. Zeigt den Mittelwert der Messwerte an der aktuellen Position an.
3. Legt die Positionierungsgeschwindigkeit des Motors fest. Wie in »Ansteuerung.vi« ist 60 ein angemessener Wert.
4. Dies ist die untere Grenze des durchfahrenen Bereichs.
5. Dies ist die obere Grenze des durchfahrenen Bereichs. Um einen bestimmten Wellenlängenbereich auszuwählen, muss die Wellenlänge erst durch die Kalibrierungsfunktion (siehe Abschnitt 4.2) in eine Position umgerechnet werden.
6. Hier kann der Abstand zwischen zwei Messpunkten bestimmt werden.
7. Dies ist der zeitliche Abstand in Sekunden zwischen zwei Messpunkten.
8. Zeigt die aktuelle Position des Motors an.
9. Hier kann der Name der Ausgabedatei festgelegt werden.
10. Das ist die Anzahl an Messwerten, die an jedem Messpunkt aufgenommen werden.
11. Ist die Rate in der die Messwerte aufgenommen werden.
12. Ist der Name des COM-Ports, an dem der Controller des Motors angeschlossen ist.

Es ist zu beachten, dass die »Delay Time« groß genug gewählt werden muss. Es ist notwendig, dass

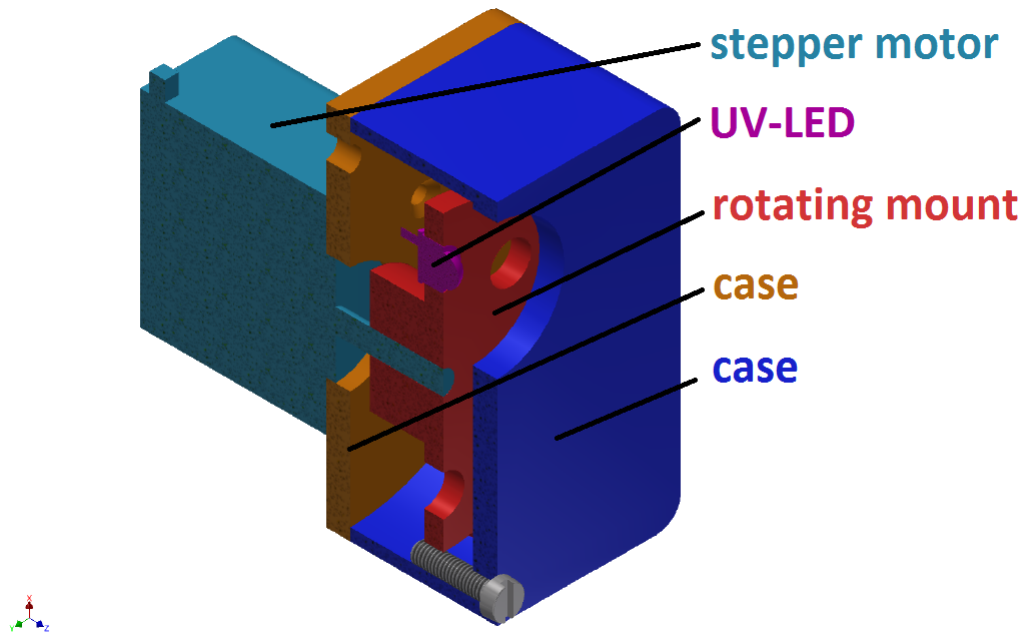
$$\text{Delay Time} > \frac{\text{number of samples}}{\text{rate}} + t_{\text{Positionierung}} \quad (3.2)$$

gilt. Hierbei ist  $t_{\text{Positionierung}}$  die Zeit, die der Motor benötigt, um die bei »Schrittweite« eingetragenen Positionen zu fahren. Nach Ablauf der »Delay Time« wird die nächste Messung gestartet.

Bei Drehung des Schrittmotors zum Anschlag (auf die absolute Nullposition) wird die Wellenlänge 0 nm auf der Skala des Monochromators passiert. Es ist anzumerken, dass erst ab einer Motorposition von ca. 30000 physikalisch sinnvolle Messwerte zu erwarten sind. Dies entspricht auf der Skala des Monochromators einer Wellenlänge von ca. 200 nm.

### 3.5. Konstruktion der fernsteuerbaren LED-Halterung

Bei Messungen mit der Elektronenkanone wird Licht unterschiedlicher Wellenlängen im UV-Bereich benötigt. Um dies zu gewährleisten sind UV-LEDs mit sechs unterschiedlichen mittleren Wellenlängen im Bereich von 265 nm bis 315 nm vorgesehen. Die Kiste zur Abschirmung von äußerem Licht muss zum Austausch der LEDs geöffnet werden. Um ein Öffnen der Kiste und damit eine Unterbrechung der Messung zu vermeiden, wurde eine fernsteuerbare Halterung entworfen. Mithilfe eines Schrittmotors soll eine von acht in die Halterung eingebauten LEDs vor den Eingang des Monochromators gebracht werden. Nur die »aktive« LED soll an die Stromversorgung angeschlossen sein.



**Abbildung 3.8.** – Zeichnung der fernsteuerbaren LED-Halterung. (Zeichnung erstellt mit Investor)

Abbildung 3.8 zeigt eine Zeichnung der fernsteuerbaren LED-Halterung. In einer Hülle bestehend aus zwei Elementen befindet sich eine drehbare Scheibe. In diese können bis zu acht LEDs eingebaut werden. Die Aussparung rechts an der Hülle dient zur Anbringung an den Eingang des Monochromators.

Der Schrittmotor muss nun so programmiert werden, dass die gewünschte LED direkt vor den Eingang des Monochromators gedreht wird.

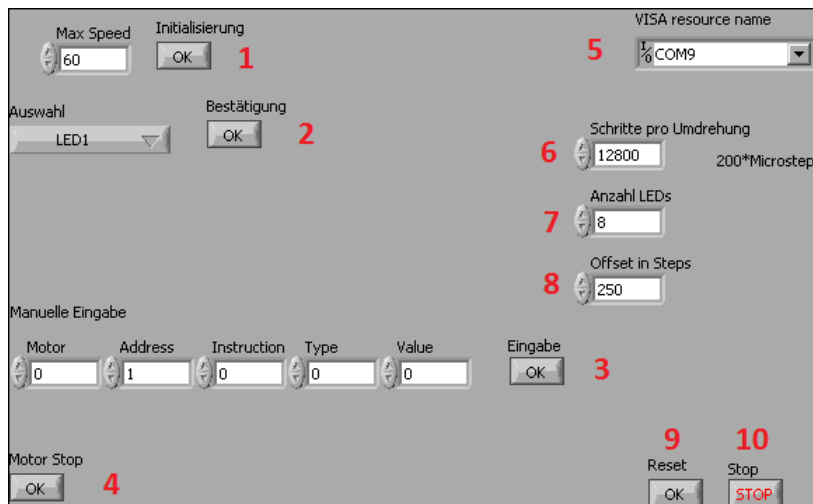
Der Aufbau wurde mit Hans-Werner Ortjohann geplant und konstruiert.

Zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit wurde die Halterung noch nicht fertiggestellt. Die Bauteile, die in Abbildung 3.8 aufgeführt sind, sind vorhanden und montiert. Die Stromversorgung der LEDs ist jedoch noch nicht realisiert worden.

### 3.6. Programmierung des Schrittmotors an der LED-Halterung

Der Schrittmotor für die in Abbildung 3.8 (siehe Abschnitt 3.5) gezeigte LED Halterung soll programmiert werden. Es muss möglich sein eine beliebige in der Halterung befindliche LED vor den Eingang des Monochromators zu drehen. Darüber hinaus ist es notwendig, dass ein manueller Offset implementiert wird. Dadurch kann die Konstruktion so justiert werden, dass sich die ausgewählte LED exakt vor dem Eingang des Monochromators befindet.





**Abbildung 3.9.** – Interface des Programms »LED.vi«.

Mithilfe des Programms »LED.vi« wird der Controller des Schrittmotors angesteuert. Das Interface ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Es wird anhand der Abbildung und der Nummerierung nun kurz die Funktionsweise erläutert.

1. Setzt die maximale Geschwindigkeit des Motors auf den gewählten Wert.
2. Mit dem drop-down Menü lässt sich eine der acht LEDs auswählen. Mit Klick auf Bestätigung wird der Befehl zur Positionierung an den Motor gesendet.
3. Eine manuelle Eingabezeile für Befehle in der Syntax der Firmware.
4. Sendet ein Stop-Signal an den Motor.
5. Hier kann der COM-Port, an dem der Controller angeschlossen ist, ausgewählt werden.
6. Aus den Angaben 6 und 7 wird die Anzahl an Positionen berechnet, die der Motor bis zur nächsten LED fahren muss. An diesem Punkt kann die Anzahl an Microsteps pro Umdrehung des Motors eingestellt werden. Für den hier benutzten Motor ergibt sich 12800. (siehe dazu Abschnitt 2.3)
7. Hier muss angegeben werden, wie viele Plätze für LEDs vorgesehen sind. Bei der hier verwendeten Halterung sind dies acht Plätze.
8. Der »Offset in Steps« ist für die oben erwähnte genaue Justage der LED-Halterung notwendig. Nach Messung verschiedener Offsets muss hier der optimale Wert (der Offset, für den die meiste Lichtintensität in den Monochromator gelangt) eingetragen werden.
9. Vor Beenden des Programms wird hiermit der Motor zur absoluten Nullposition gefahren.
10. Stoppt das Programm.

Messungen mit der LED-Halterung konnten zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch nicht durchgeführt werden, da, wie in Abschnitt 3.5 bereits erwähnt, die Stromversorgung der LEDs noch nicht fertiggestellt wurde.



## 4. Durchführung und Auswertung

### 4.1. Messungen mit dem Beam Sampler

#### 4.1.1. Monochromatoraufbau

Für die Elektronenkanone wird eine möglichst große in das Glasfaserkabel eingekoppelte Lichtintensität benötigt. Zusätzlich soll die Möglichkeit gegeben sein, die Intensität des in das Glasfaserkabel eingekoppelten Lichts zu überwachen. Es wird nun überprüft, ob der Beam Sampler den Angaben des Herstellers entspricht. Des Weiteren muss die Intensität dieses Lichts ausreichend sein, da die Rate der in der Elektronenkanone erzeugten Elektronen proportional zur Lichtintensität ist.

In früheren Messungen am Teststand der e-Gun in Münster wurde das Glasfaserkabel direkt am Ausgang des Monochromators angebracht. Die mit dem Aufbau aus Abschnitt 3.1.1 in das Glasfaserkabel eingekoppelte Lichtintensität sollte daher höher als die zuvor erreichte Intensität sein, damit eine genügend große Elektronenrate in der Elektronenkanone vorliegt. (vgl. Abschnitt 1.2)

Es werden Messwerte mit unterschiedlichen Konfigurationen der optischen Komponenten aufgenommen:

1. Glasfaserkabel direkt vor dem Ausgang des Monochromators<sup>1</sup>
2. in das Glasfaserkabel eingekoppeltes Licht nach Fokussierung durch beide plankonvexen Linsen, Beamsampler nicht im Strahlengang
3. in das Glasfaserkabel eingekoppeltes Licht nach Fokussierung durch beide plankonvexen Linsen, Beamsampler im Strahlengang zwischen den Linsen
4. durch den Beamsampler reflektiertes Licht, gleicher Aufbau wie bei 3.

Der Winkel der Flächennormalen des Beamsamplers zum Strahlengang beträgt ca.  $30^\circ$ .<sup>2</sup>

**Tabelle 4.1.** – Gemessene Spannung an der Photodiode bei  $10^8$ -facher Verstärkung. Es wurde die Spannung bei Messung des direkten Strahls (direct) und des Streulichts bzw. des Untergrunds in der Kiste (stray) gemessen. Für die Untergrundmessung wurde die Photodiode von dem Strahl abgewendet. Es wurde die LED mit einer mittleren Wellenlänge von 285 nm benutzt und eine Spannung von  $(7,0 \pm 0,1)$  V angelegt. Die Skala des Monochromators wurde auf 288 nm eingestellt.<sup>3</sup>

position	1	2	3	4
voltage direct	$(64 \pm 3)$ mV	$(105 \pm 2)$ mV	$(100 \pm 2)$ mV	$(132 \pm 2)$ mV
voltage stray	$(3 \pm 3)$ mV	$(4 \pm 2)$ mV	$(3 \pm 2)$ mV	$(3 \pm 2)$ mV
corrected voltage	$(61 \pm 4)$ mV	$(101 \pm 3)$ mV	$(97 \pm 3)$ mV	$(129 \pm 3)$ mV

<sup>1</sup>So wurde ursprünglich das Licht in das Kabel eingekoppelt.

<sup>2</sup>Nach [Tho12] ist hier keine genauere Justage erforderlich.

<sup>3</sup>Bei dieser Einstellung des Monochromators wurde die maximale Intensität gemessen. Die am Monochromator angebrachte Skala wird neu kalibriert (siehe dazu Abschnitt 4.2).

Die Messwerte der verschiedenen Konfigurationen sind in Tabelle 4.1 zu finden. Die Fehler entsprechen einem Drittel des Werts »Spitze-Spitze« auf dem Oszilloskop (siehe Abschnitt 3.1.1). Der Wert corrected voltage ist dabei die Differenz von voltage direct und voltage stray. Es ist zu beachten, dass die an Position 4 gemessene Lichtintensität größer als die Lichtintensität an Position 2 ist. Dies ist durch Verluste, die beim Einkoppeln des Lichts in das Glasfaserkabel auftreten, zu erklären.

Nach (2.8) lässt sich nun das Reflexionsvermögen des Beam Samplers berechnen:

$$R = 1 - \frac{\text{Messwert von Position 3}}{\text{Messwert von Position 2}} = 1 - \frac{(97 \pm 3) \text{ mV}}{(101 \pm 3) \text{ mV}} = (4,0 \pm 4,1) \% \quad (4.1)$$

#### 4.1.2. Laseraufbau

Auch am Laseraufbau werden Messungen mit dem Beam Sampler durchgeführt. Dazu wird die Intensität des Lasers an drei verschiedenen Stellen gemessen:

1. in das Glasfaserkabel eingekoppeltes Licht ohne Beam Sampler im Strahlengang
2. in das Glasfaserkabel eingekoppeltes Licht mit Beam Sampler im Strahlengang
3. direkt von dem Beam Sampler reflektiertes Licht

**Tabelle 4.2.** – Gemessene Spannung an der Photodiode bei  $10^7$ -facher Verstärkung. Es wurde die Spannung des Strahls (direct) und das Streulicht bzw. der Untergrund in der Kiste (stray) gemessen. Dazu wurde die Photodiode von dem Strahl abgewendet. Einstellungen des Lasers: 6 A Diodenstrom, 100 kHz Pulswiederholfrequenz.

position	1	2	3
voltage direct	$(671 \pm 11) \text{ mV}$	$(648 \pm 11) \text{ mV}$	$(139 \pm 2) \text{ mV}$
voltage stray	$(1 \pm 1) \text{ mV}$	$(1 \pm 1) \text{ mV}$	$(6 \pm 1) \text{ mV}$
corrected voltage	$(670 \pm 11) \text{ mV}$	$(647 \pm 11) \text{ mV}$	$(133 \pm 2) \text{ mV}$

In Tabelle 4.2 sind die Ergebnisse der Messungen mit dem Beam Sampler am Laser aufgeführt. Auch hier wurde die corrected voltage aus der Differenz aus voltage direct und voltage stray berechnet.

Wie in Abschnitt 4.1 ist auch hier die Intensität des durch den Beam Sampler reflektierten Lichts deutlich größer, als die direkt in das Glasfaserkabel eingekoppelte Lichtintensität. Die Begründung sind auch hier Verluste, die beim Einkoppeln in das Glasfaserkabel auftreten.

Um das Reflexionsvermögen  $R$  des Beam Samplers im Laseraufbau zu bestimmen, wird (2.8) verwendet:

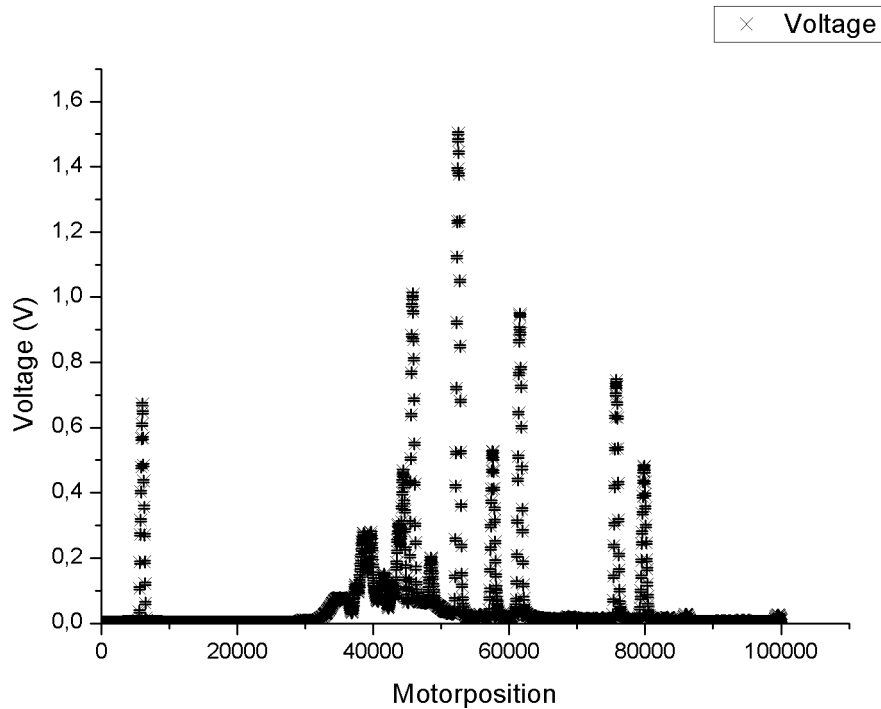
$$R = 1 - \frac{\text{Messwert von Position 2}}{\text{Messwert von Position 1}} = 1 - \frac{(647 \pm 11) \text{ mV}}{(670 \pm 11) \text{ mV}} = (3,4 \pm 1,6) \% \quad (4.2)$$

Der Fehler wurde durch Gaußsche Fehlerfortpflanzung berechnet.

## 4.2. Kalibrierung des Aufbaus mit einer Quecksilberdampfampe

Der Schrittmotor ist an der Achse, welche die Drehung des optischen Gitters wie in Abschnitt 2.2 beschrieben bewirkt, angebracht. Daher ist ein linearer Zusammenhang zwischen Position des Schrittmotors und der Wellenlänge, die den Monochromator passiert, zu erwarten. Es

wird der Kalibrationsaufbau aus Abschnitt 3.3 verwendet. Mithilfe des Programms »Durchfahren« wird das Spektrum der Quecksilberdampfampe in Abhängigkeit der Motorposition aufgenommen.



**Abbildung 4.1.** – Messung des Spektrums der Quecksilberdampfampe. Es ist die am Verstärker gemessene Spannung in Volt in Abhängigkeit der Position des Schrittmotors aufgetragen. Der Verstärkungsfaktor wurde auf  $10^6$  gesetzt. Der Abstand zwischen den Messpunkten beträgt 50 Positionen. Der Fehler für die Spannung wurde zu 0,04 V abgeschätzt.

Abbildung 4.1 zeigt das gemessene Spektrum der Quecksilberdampfampe. Die gut definierten Peaks (die Peaks, die in einem Bereich mit möglichst wenig Untergrund liegen) werden nun jeweils durch eine Gauss-Funktion gefittet und mit Literaturwerten identifiziert. Die Fits wurden mithilfe des Programms Origin erstellt. Im Anhang befinden sich die Fits der einzelnen Peaks (Abbildung A.3-A.6).

Wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben, ist der Bereich vor einer Motorposition von 30000 nicht aussagekräftig. Dem Peak bei einer Position von ca. 6000 liegt der »Nulldurchlauf« der Skala des Monochromators zu Grunde.

**Tabelle 4.3.** – Ergebnisse der Fits der Peaks aus Abbildung 4.1 mit zugehörigem Literaturwert der Wellenlänge aus Tabelle 2.1.

motorposition	fit error	literature wavelength
52494,76	1,39	365,16 nm
57583,72	3,00	404,66 nm
61564,05	1,56	435,83 nm
75751,16	2,07	546,07 nm

In Tabelle 4.3 sind die Peaks mit zugehörigen Literaturwerten eingetragen. Der fiterror (Fehler für die Motorposition) und der Wert für red. chisquare wurden mit Origin ermittelt.

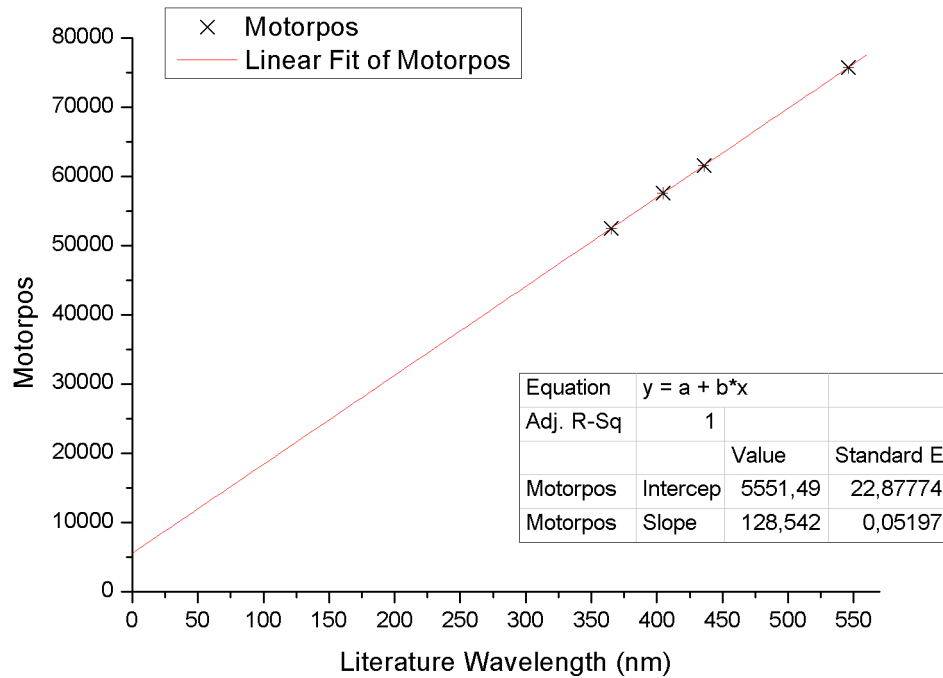


Abbildung 4.2. – Linearer Fit für die Punkte aus Tabelle 4.3.

Der Fit in Abbildung 4.2 zeigt den in Abschnitt 2.2 erwarteten linearen Zusammenhang zwischen Motorposition und durch den Monochromator durchgelassener Wellenlänge  $\lambda$ . Mithilfe von Origin ergibt sich damit die Kalibrierungsgleichung:

$$\text{motorposition} = (128,542 \pm 0,052) \frac{1}{\text{nm}} \cdot \lambda + (5551,49 \pm 22,88) \quad (4.3)$$

### 4.3. Überprüfung der Kalibrierung mit einer Natriumdampflampe

Um die mithilfe der Quecksilberdampflampe erstellte Kalibrierung zu überprüfen, wird das Spektrum einer Natriumdampflampe aufgenommen. Hierfür wird, wie bei den Messungen zur Kalibrierung, das Programm »Durchfahren.vi« verwendet.

Das Natriumspektrum besitzt zwei Linien mit großer Intensität. Diese liegen bei 589,00 nm und 589,59 nm. Die relativen Intensitäten betragen 80000 und 40000. Die Intensitäten der übrigen Linien des Spektrums sind um einige Größenordnungen kleiner. Lediglich bei 313,55 nm und 819,48 nm liegen Linien vor, deren Intensität nur um eine Größenordnung kleiner ist, als die zuerst erwähnten. Es wird daher der Bereich um 589,00 nm und 589,59 nm betrachtet. (vgl. [RCW83])

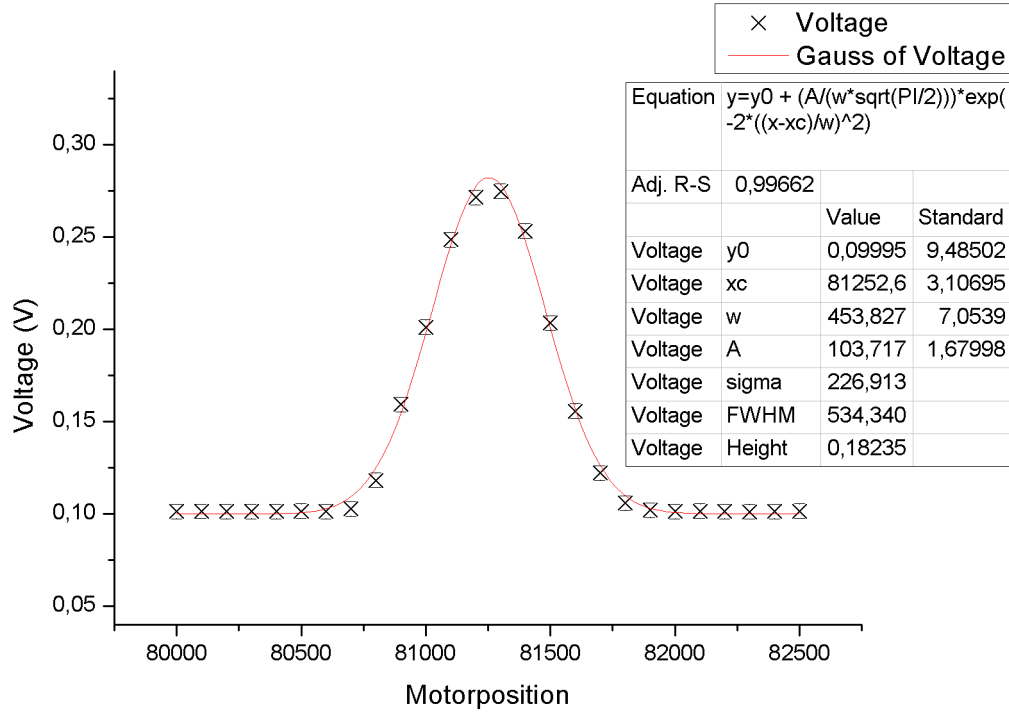
Wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben, erlaubt der Monochromator keine Auflösung von 0,59 nm. Da die Peaks mithilfe des Monochromators demnach nicht unterscheidbar sind, wird der Mittelwert der Wellenlängen der beiden Linien gebildet und ein entsprechender Fehler angenommen:

$$\lambda_{\text{Na}} = (589,3 \pm 0,5) \text{ nm} \quad (4.4)$$

Hierbei ist  $\lambda_{\text{Na}}$  die Wellenlänge, bei der im aufgenommenen Spektrum der Natriumdampflampe ein Peak zu erkennen sein muss.

Mithilfe der Kalibrierungsgleichung (4.3) lässt sich die Motorposition  $P_{\text{Na}}$  berechnen, an welcher der Peak der Wellenlänge  $\lambda_{\text{Na}}$  zu erwarten ist.

$$\begin{aligned} P_{\text{Na}} &= (128,542 \pm 0,052) \frac{1}{\text{nm}} \cdot (589,3 \pm 0,5) \text{ nm} + (5551,49 \pm 22,88) \\ &= (81301 \pm 75) \end{aligned} \quad (4.5)$$



**Abbildung 4.3.** – Ausschnitt (Position 80000 bis 82500) des mithilfe von »Durchfahren.vi« aufgenommenen Spektrums der Natriumdampflampe. Die Verstärkung wurde auf  $10^8$  gesetzt. Der Abstand zwischen zwei Messpunkten beträgt 100 Schritte. Der Fehler für die Spannung wurde auf 0,004 V gesetzt. (red.  $\chi^2 = 0,7835$ ;  $N_{\text{dof}} = 22$ )

Abbildung 4.3 zeigt einen Ausschnitt des Spektrums der Natriumdampflampe. Der Fit ist eine Gaußfunktion und wurde mit Origin erstellt. Zuerst wurde ein Fit der Funktion mit einem abgeschätzten Fehler von 0,04 V erstellt. Hierbei ergab sich red.  $\chi^2 = 0,00783$ . Der oben verwendete Fehler für die Messpunkte wurde aus  $\text{Fehler}_{\text{neu}} = \text{Fehler}_{\text{alt}} \cdot \text{red. } \chi^2$  berechnet. Mithilfe des Fits ergibt sich für die Position des Peaks:

$$P_{\text{Peak}} = (81252,7 \pm 3,1) \quad (4.6)$$





## 5. Diskussion der Ergebnisse

### Beam Sampler

Das Reflexionsvermögen des Beam Samplers wurde mithilfe des Monochromator- und des Laser-Aufbaus bestimmt.

**Tabelle 5.1.** – Ergebnisse der Messungen des Reflexionsvermögens am Aufbau des Monochromators mit den UV-LEDs und des Laser.

Aufbau	UV-LED	Laser
Reflexionsvermögen	$(4,0 \pm 4,1) \%$	$(3,4 \pm 1,6) \%$

Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Aus dem Katalog des Herstellers geht ein Reflexionsvermögen von  $(3 \pm 2) \%$  hervor. Beide Ergebnisse erfüllen diese Erwartung. Es ist demnach davon auszugehen, dass die Beam Sampler wie beabsichtigt funktionieren.

Bei den Messungen ist zu erkennen, dass die addierten Intensitäten von reflektiertem und transmittiertem Strahl einen höheren Wert ergeben, als die vom direkten Strahl, welcher ins Glasfaserkabel eingekoppelt wird. Bei der Einkopplung in das Glasfaserkabel und innerhalb dessen treten Verluste auf. Der reflektierte Strahl (Position 4 in Tabelle 4.1 und Position 3 in Tabelle 4.2) wurde ohne ein zwischengeschaltetes Glasfaserkabel gemessen, folglich sind an dieser Position erheblich kleinere Verluste zu erwarten und der dort gemessene Wert kann nicht direkt mit den Messwerten am Ausgang des Glasfaserkabels (Positionen 1, 2 und 3 in Tabelle 4.1 und Positionen 1 und 2 in Tabelle 4.2) verglichen werden. Da die bei 1 und 2 gemessenen Intensitäten die gleiche Abschwächung erfahren, sind diese Messwerte jedoch vergleichbar.

### Kalibrierung des Monochromators

In Abschnitt 4.2 wurde eine Kalibrierungsgleichung für den Monochromator mit angebrachtem Schrittmotor erstellt. Es wurden hierbei Peaks aus dem aufgenommenen Spektrum der Quecksilberdampfampe (siehe Abschnitt 4.2) angefitet. In Abbildung A.3 bis A.6 ist zu erkennen, dass ein großer Wert für  $\text{red. } \chi^2$  erreicht wird. Der Fehlerbereich ist angemessen, jedoch das Modell eines Gaußförmigen Peaks passt nicht vollständig. Die Abweichungen von der Gauß-Form treten allerdings lediglich im Randbereich der Peaks auf. Das Zentrum des Fits stimmt demnach mit dem Zentrum des Peaks überein.

Der lineare Zusammenhang zwischen Motorposition des Schrittmotors und durch den Monochromator gelassener Wellenlänge  $\lambda$  ist gegeben durch (4.3):

$$\text{motorposition} = (128,542 \pm 0,052) \frac{1}{\text{nm}} \cdot \lambda + (5551,49 \pm 22,88) \quad (5.1)$$

Wird  $\lambda$  als  $\lambda_{\text{max}} = 315 \text{ nm}$  angenommen<sup>1</sup>, so ergibt sich für den nach der Gaußschen Fehlerfortpflanzung berechneten Fehler der Motorposition ein Wert von  $\Delta_{\text{Pos}} = 36,27$  Positionen. Der Offset von  $(5551,49 \pm 22,88)$  Positionen kann dabei ignoriert werden, da keine absolute Position, sondern ein relativer Bereich berechnet werden soll. Der Fehler des Offsets von  $\pm 22,88 \text{ nm}$  wird jedoch berücksichtigt.

---

<sup>1</sup>Das entspricht der größten mittleren Wellenlänge der vorhandenen LEDs.

Dieser Positionsbereich kann nun in einen Wellenlängenbereich  $\Delta_\lambda$  am Monochromator umgerechnet werden. Dazu wird (4.3) verwendet.

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{Pos}} &= 128,542 \frac{1}{\text{nm}} \cdot \Delta_\lambda \\ \Leftrightarrow \Delta_\lambda &= \frac{\Delta_{\text{Pos}}}{128,542} \text{ nm} \approx 0,28 \text{ nm}\end{aligned}\quad (5.2)$$

Die Ungenauigkeit  $\Delta_\lambda$  ist der durch den Schrittmotor verschuldete Fehler. Wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben, hat der verwendete Monochromator eine Ungenauigkeit  $\Delta_{\lambda, \text{Mon}}$  von 2 nm. Diese ist um eine Größenordnung größer, als  $\Delta_\lambda$  und kann damit vernachlässigt werden. Insgesamt kann für die gesamte Ungenauigkeit der durchstimmbaren UV-Lichtquelle

$$\Delta_{\text{Ges}} = \pm 2 \text{ nm} \quad (5.3)$$

angenommen werden.

Vor Anbringung des Schrittmotors wurde die Skala des Monochromators zum Einstellen von Wellenlängen benutzt. Ungenauigkeiten durch einen Offset in der Skala oder beim Ablesen dieser können bei Betrieb mit dem Schrittmotor unterdrückt werden.

Die Kalibrierung wurde in Abschnitt 4.3 mit einer Natriumdampfampe überprüft. Die zu erwartende Motorposition  $P_{\text{Na}}$  des Mittelwerts der beiden Hauptlinien des Natriumspektrums wurde auf

$$P_{\text{Na}} = (81301 \pm 75) \quad (5.4)$$

berechnet. Die gemessene Position des Peaks beträgt

$$P_{\text{Peak}} = (81252,7 \pm 3,1). \quad (5.5)$$

Die erwartete und gemessene Position stimmen im Rahmen der Messungenauigkeit überein.

Der Fit des Peaks der Natriumdampfampe in Abbildung 4.3 hat eine Standardabweichung von 226,913 Positionen. Dieser Positionsbereich lässt sich analog zu (5.2) in einen Wellenlängenbereich umrechnen. Es ergibt sich demnach eine Standardabweichung  $\sigma_{\text{NaFit}}$  von

$$\sigma_{\text{NaFit}} = \pm \frac{226,913}{128,542} \text{ nm} \approx \pm 1,8 \text{ nm}. \quad (5.6)$$

Bei Betrachtung der Ungenauigkeit des Monochromators ( $\pm 2,0 \text{ nm}$ ) und des Fehlers, welcher durch den doppelten Peak zustande kommt ( $\pm 0,5 \text{ nm}$ , vgl. Abschnitt 4.3), ergibt sich ein theoretisch berechneter Fehler  $\sigma_{\text{NaTheo}}$  von

$$\sigma_{\text{NaTheo}} = \sqrt{(\pm 2,0 \text{ nm})^2 + (\pm 0,5 \text{ nm})^2} \approx \pm 2,1 \text{ nm}. \quad (5.7)$$

Die Standardabweichung des Fits ist geringer als die theoretisch berechnete Standardabweichung. Die Ungenauigkeit des Monochromators ist demnach kleiner als zuvor angenommen. Um die tatsächliche Standardabweichung des Bandpasses  $\sigma_{\text{real}}$  zu berechnen, wird folgende Gleichung aufgestellt:

$$\begin{aligned}\pm 1,8 \text{ nm} &= \sqrt{\sigma_{\text{real}}^2 + (\pm 0,5 \text{ nm})^2} \\ \Leftrightarrow \sigma_{\text{real}} &= \sqrt{(\pm 1,8 \text{ nm})^2 - (\pm 0,5 \text{ nm})^2} = \pm 1,7 \text{ nm}\end{aligned}\quad (5.8)$$

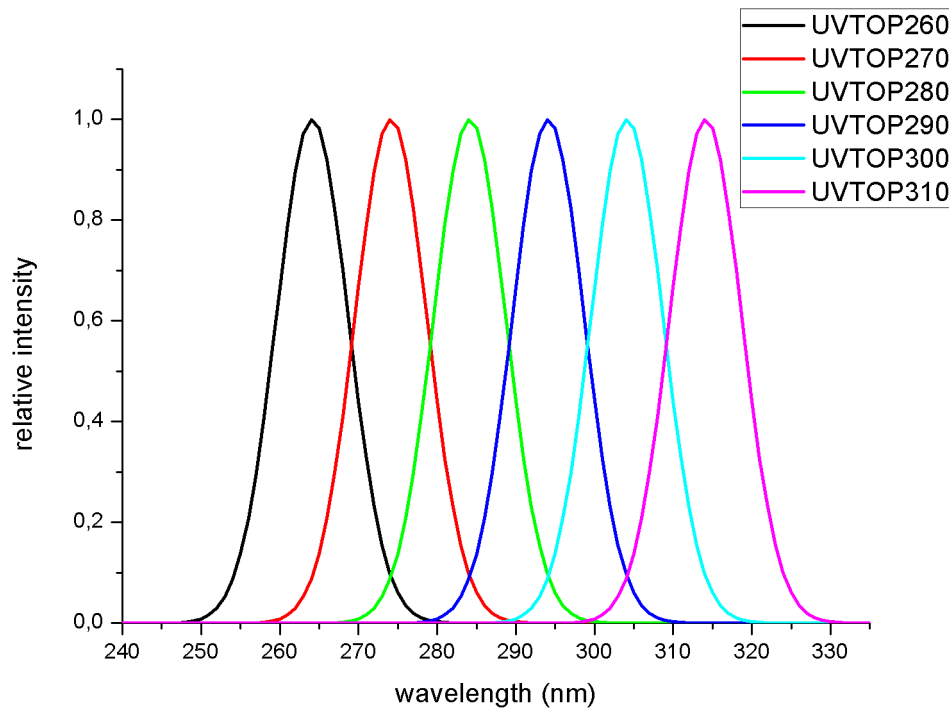
Es wird hier auf Grundlage der gaußschen Fehlerfortpflanzung berechnet, wie groß die Standardabweichung  $\sigma_{\text{real}}$  sein muss, damit der gemessene Wert von  $\pm 1,8 \text{ nm}$  erreicht wird.

### Berechnung des emittierten Spektrums

Es wird nun berechnet, welche Form das Spektrum des durch die UV-Lichtquelle emittierten Lichts hat.

Die spektrale Verteilung der LED UVTOP280 wurde im Anhang in Abbildung A.2 angefitet. Diese Verteilung lässt sich in guter Näherung durch eine Gaußfunktion mit Standardabweichung  $\sigma_{\text{LED}} = 4,59 \text{ nm}$  beschreiben.

Für die anderen Modelle der UV-LEDs wird diese Standardabweichung nun übernommen. Des Weiteren wird angenommen, dass die Zentren der Verteilungen um jeweils 10 nm zueinander verschoben sind. Die emittierte Intensität wird so normiert, dass das Maximum jeder Funktion bei 1 liegt.



**Abbildung 5.1.** – Relative Intensität des durch die UV-Lichtquelle emittierten Lichts zu einer bestimmten Wellenlänge. Es sind die Kurven für alle vorhandenen UV-LEDs eingezeichnet.

Abbildung 5.1 zeigt die so berechneten Funktionen. Es ist zu erkennen, dass im Bereich von 260 nm bis 320 nm jede Wellenlänge erzeugt werden kann. Die minimale emittierte Intensität in diesem Bereich liegt dabei bei 60 % der maximal erreichbaren Intensität.

Der Monochromator erfüllt die Funktion eines Wellenlängenbandpasses mit einer Breite von 4 nm (vgl. Abschnitt 2.2.3). Es wird somit ein Bereich von  $\pm 2 \text{ nm}$  um die am Monochromator eingestellte Wellenlänge emittiert. Die Ergebnisse aus den Messungen mit der Na-Lampe weisen auf eine geringere Breite des Bandpasses hin.



## 6. Zusammenfassung und Ausblick

In der Einleitung wurden verschiedene Anforderungen an die durchstimbare UV-Lichtquelle gestellt: Es soll Licht mit Wellenlängen im Bereich von 266 nm bis 310 nm emittiert werden. Die Intensität des Lichts soll dabei überwacht werden. Des weiteren soll die Variation der Wellenlänge durch Ansteuerung mit einem Computer möglich sein. Für den bereits vorhandenen Laseraufbau wurde ebenfalls eine Intensitätsüberwachung gefordert.

Die Intensitätsüberwachung wurde durch einen Beam Sampler in Verbindung mit einer Photodiode realisiert. Dazu wurde zunächst die Funktionsweise der Beam Sampler am Monochromator- und am Laseraufbau überprüft. Wie in Abschnitt 4.1 dargestellt, erfüllen beide die Spezifikationen des Herstellers.

Des Weiteren wurde die Anordnung der Linsen und der anderen optischen Komponenten der durchstimbaren Lichtquelle in Abschnitt 3.1.1 optimiert. Nach Durchlaufen des Aufbaus muss die Intensität des Lichts, welches in das Glasfaserkabel eingekoppelt wird, größer als die Intensität des Lichts ohne Linsenkonstruktion sein. Dieses Kriterium wurde erreicht.

Um die emittierte Wellenlänge mit einem Computer zu kontrollieren, wurde ein Schrittmotor an den Monochromator angebracht. Mit dem LabView Programm »Durchfahren.vi« wurde das Spektrum einer Quecksilberdampflampe gemessen. Dadurch konnte eine Kalibrierungsfunktion erstellt werden. Das Programm »Ansteuerung.vi« kann nun mithilfe dieser Funktion die Wellenlänge des emittierten Lichts steuern.

Der Monochromator hat nach Herstellerangaben eine Durchlassbreite von  $\pm 2$  nm, während der Fehler, welcher durch die Kalibration und die Ansteuerung mit dem Schrittmotor erzeugt wird, bei  $\pm 0,22$  nm liegt. Der durch die Ansteuerung produzierte Fehler ist demnach in Anbetracht der Durchlassbreite des Monochromators zu vernachlässigen.

Die verwendeten UV-LEDs haben eine spektrale Verteilung. Die Halbwertsbreite dieser Verteilung beträgt 12 nm. Ohne Austausch der LED kann die emittierte Wellenlänge der UV-Lichtquelle innerhalb dieses Bereichs variiert werden. Um einen größeren Bereich abzudecken wurde eine automatisch ansteuerbare LED-Halterung konstruiert. Die Stromversorgung der LEDs in der Halterung konnte noch nicht fertiggestellt werden. Daher war es nicht möglich, Messungen mit dieser Konstruktion durchzuführen.

Die in der Einleitung formulierten Anforderungen an die durchstimbare UV-Lichtquelle konnten erfüllt werden.

Die Überschussenergie, mit denen die durch das UV-Licht in der Elektronenkanone erzeugten Photoelektronen die Silberschicht der Photokathode verlassen, kann mithilfe der UV-Lichtquelle im gewünschten Bereich variiert werden. Die Überwachung der Lichtintensität ist ebenfalls umgesetzt worden. Nach Fertigstellung der LED-Halterung wird es ohne Umbau möglich sein, die emittierte Wellenlänge aus diesem Bereich auszuwählen.



## A. Anhang

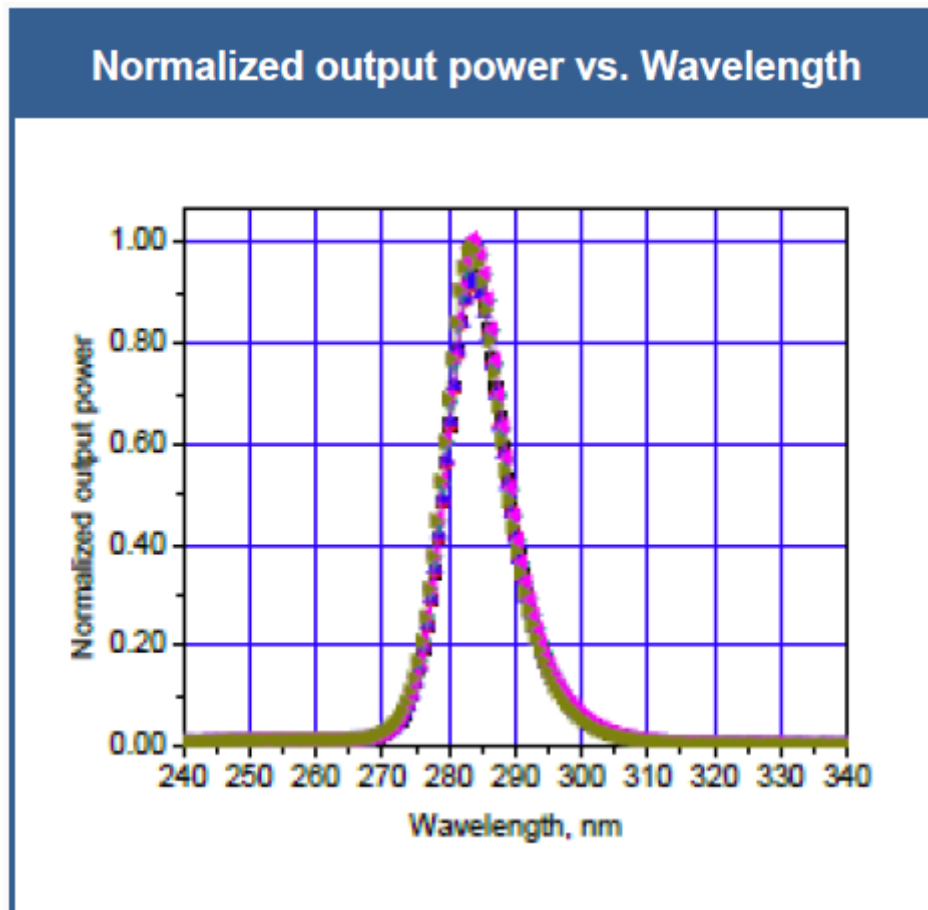
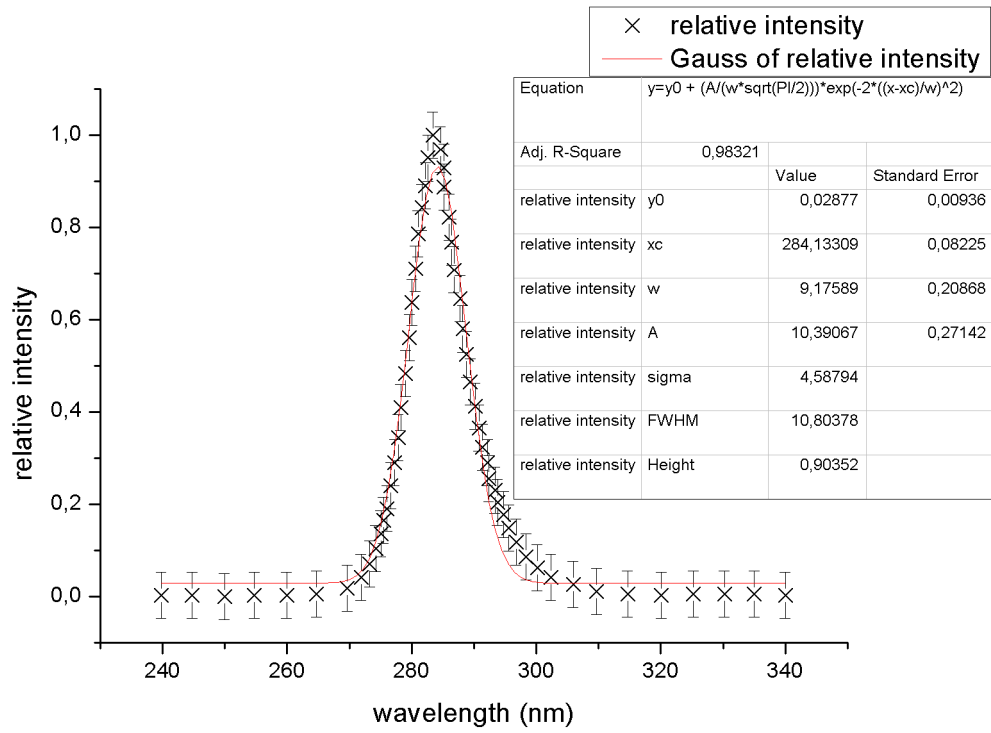
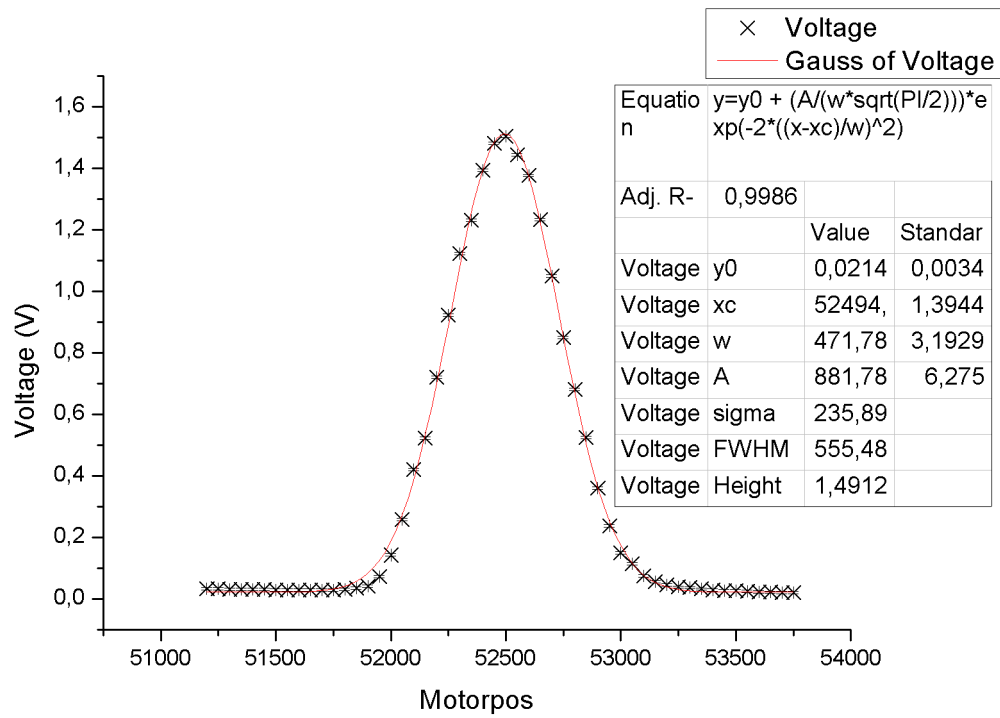


Abbildung A.1. – Spektrale Verteilung der UV-LED UVTOP280 von Roithner LaserTechnik.  
(Abbildung aus [OSI])

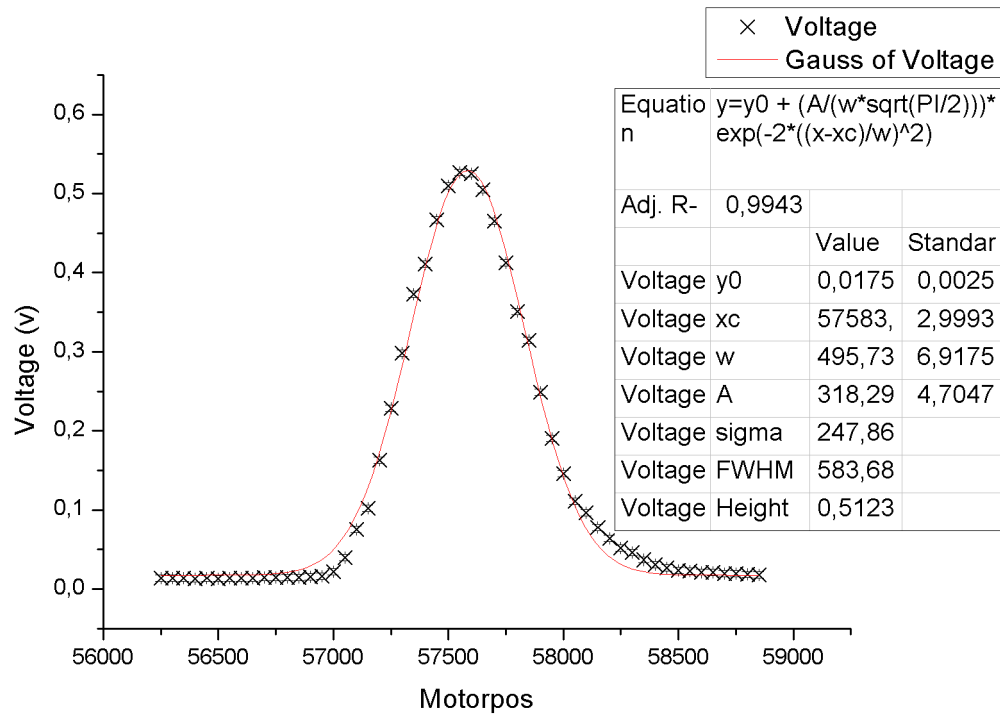


**Abbildung A.2.** – Spektrum der LED UVTOP280. Mithilfe von Abbildung A.1 wurden Datenpunkte ermittelt, welche durch Origin gefittet wurden. Der Fehler wurde auf 0,05 Einheiten der relativen Intensität gesetzt.  
(red.  $\chi^2 = 0,72394$ ;  $N_{\text{dof}} = 53$ )

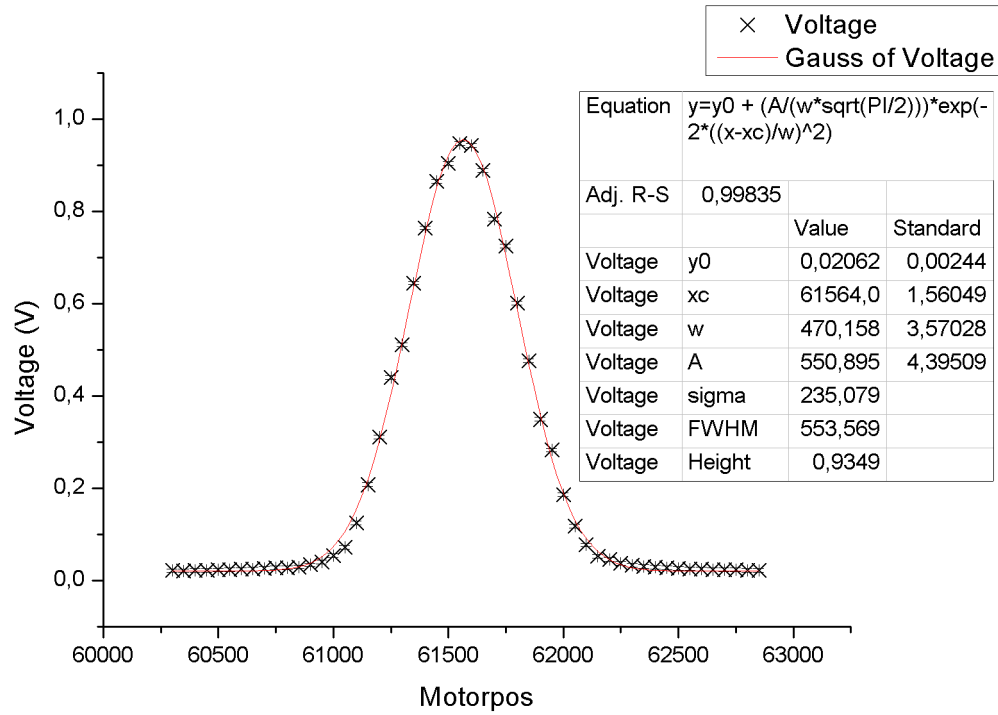




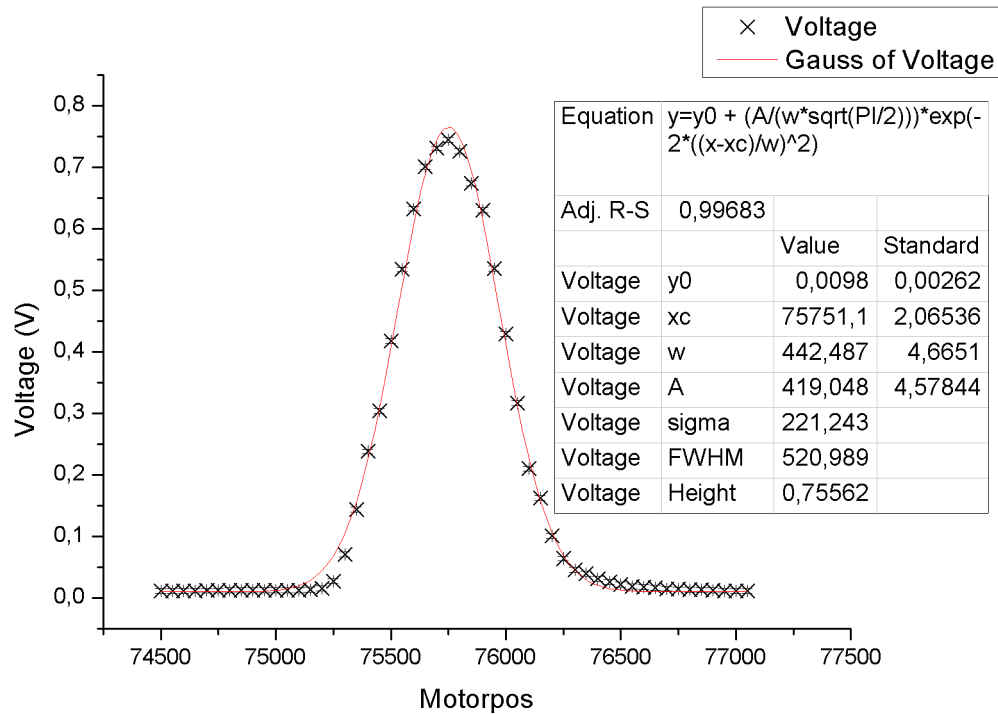
**Abbildung A.3.** – Ausschnitt des Spektrum aus Abbildung 4.1. Für den Fit wurde der Bereich von  $\pm 1300$  Positionen um das Zentrum des Peaks verwendet. (red.  $\chi^2 = 20,30929$ ;  $N_{\text{dof}} = 48$ )



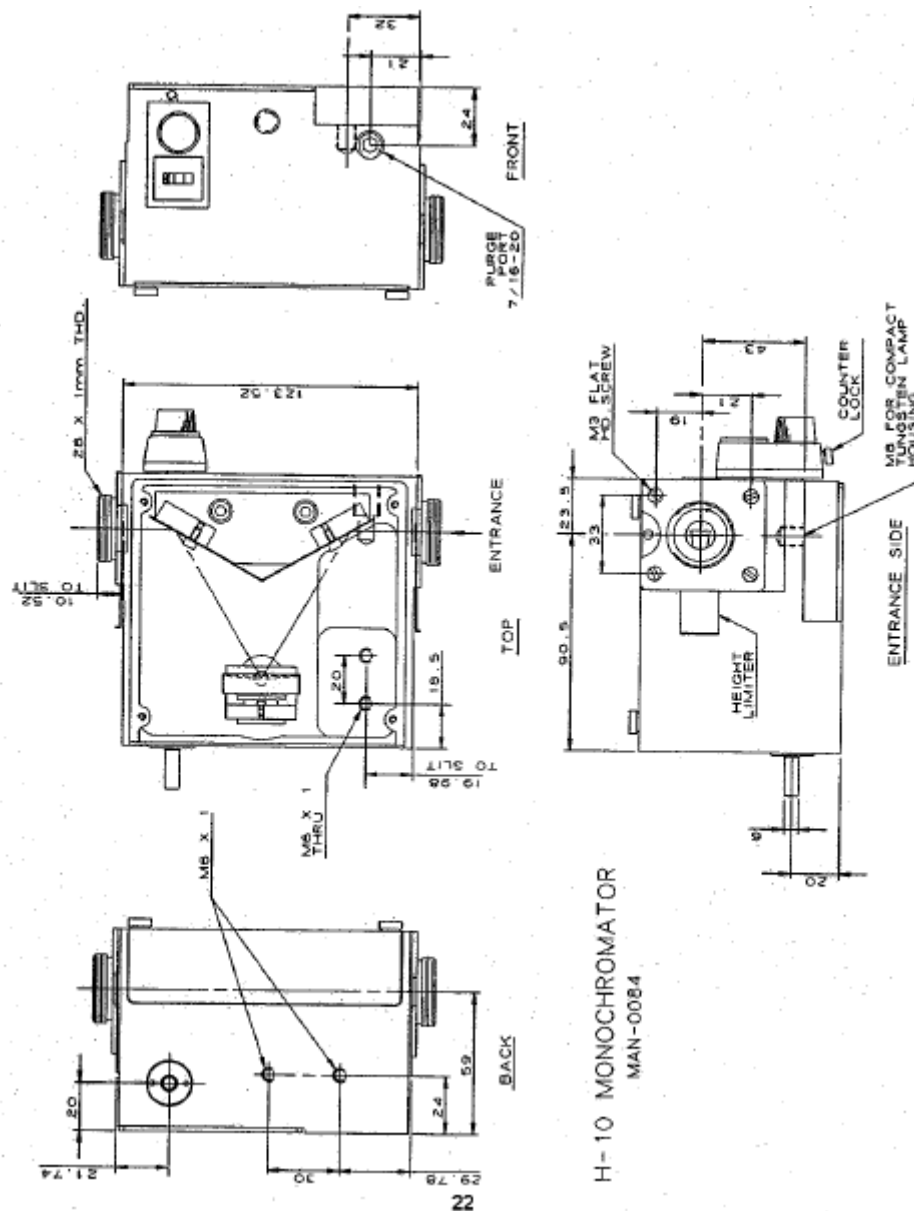
**Abbildung A.4.** – Ausschnitt des Spektrum aus Abbildung 4.1. Für den Fit wurde der Bereich von  $\pm 1300$  Positionen um das Zentrum des Peaks verwendet. (red.  $\chi^2 = 10,55175$ ;  $N_{\text{dof}} = 49$ )



**Abbildung A.5.** – Ausschnitt des Spektrum aus Abbildung 4.1. Für den Fit wurde der Bereich von  $\pm 1300$  Positionen um das Zentrum des Peaks verwendet (red.  $\chi^2 = 10,02984$ ;  $N_{\text{dof}} = 48$ )



**Abbildung A.6.** – Ausschnitt des Spektrum aus Abbildung 4.1. Für den Fit wurde der Bereich von  $\pm 1300$  Positionen um das Zentrum des Peaks verwendet (red.  $\chi^2 = 12,19503$ ;  $N_{\text{dof}} = 48$ )



**Abbildung A.7.** – Zeichnungen des verwendeten H10 Monochromators von Horiba. (Abbildung aus [Hor])

Optics

▼ CHAPTERS

Optical Elements

Polarization Optics

Optical Isolators

Optical Systems

Optics Kits

▼ SECTIONS

Spherical Lenses

Achromatic Lenses

Aspheric Lenses

Cylindrical Lenses

Mirrors

Spectral Filters

ND Filters

Beamsplitters

Prisms

Gratings

Windows

Diffusers

Updated  
1/23/12

### Beam Samplers for Beam Pick-off

#### Specifications


- Material: UV Fused Silica
- Clear Aperture: 90% of the Diameter
- Surface Flatness:  $\lambda/10$  at 633 nm
- Wedge:  $30 \pm 10$  arcmin
- Diameter Tolerance:  $+0.0/-0.2$  mm
- Center Thickness Tolerance:  $\pm 0.4$  mm
- Surface Quality: 20 - 10 Scratch-Dig

#### Surface Coatings

- Surface 1: Uncoated
- Surface 2: Broadband AR Coating,  $R_{avg} < 1.0\%$  Within Wavelength Range

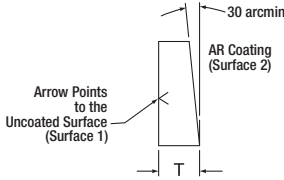
#### AR Coatings Ranges

- UV: 250 - 420 nm
- A: 350 - 700 nm
- B: 650 - 1050 nm
- C: 1050 - 1620 nm



These beam samplers, which are fabricated from UV fused silica, use Fresnel reflections to pick off 1 - 10% of the incident beam at 45° (see plot below). They are typically used for monitoring applications where the attenuation of the transmitted beam must be kept to a minimum. The back surface is wedged to minimize internal interference fringes and AR coated to remove ghosting.

- Ø12.7 mm (Ø1/2"), Ø25.4 mm (Ø1"), and Ø50.8mm (Ø2") Sizes Available
- 1 - 10% Reflectance at 45°
- AR-Coated Back Surface to Eliminate Ghosting
- 0.5° Wedge to Eliminate Interference Fringes



Arrow Points to the Uncoated Surface (Surface 1)

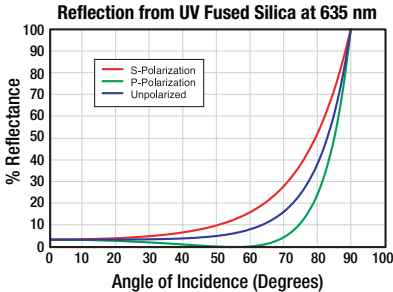
30 arcmin

AR Coating (Surface 2)

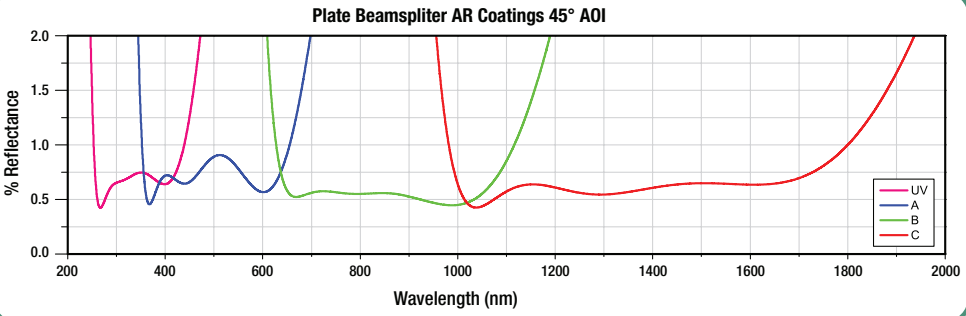
T

Please refer to our website for complete models and drawings.

#### Reflection from UV Fused Silica at 635 nm



#### Plate Beamsplitter AR Coatings 45° AOI



Please contact your local Thorlabs office for custom optical scans.

ITEM # (250 - 420 nm)	ITEM # (350 - 700 nm)	ITEM # (650 - 1050 nm)	ITEM # (1050 - 1620 nm)	DIAMETER	MATERIAL	T*	\$	£	€	RMB	SUGGESTED MOUNT
BSF05-UV	BSF05-A	BSF05-B	BSF05-C	12.7 mm (1/2")	UV Fused Silica	3 mm	\$ 33.60	£ 24.19	€ 29.23	¥ 267.79	LMR05
BSF10-UV	BSF10-A	BSF10-B	BSF10-C	25.4 mm (1")	UV Fused Silica	5 mm	\$ 56.70	£ 40.82	€ 49.33	¥ 451.90	LMR1
BSF20-UV	BSF20-A	BSF20-B	BSF20-C	50.8 mm (2")	UV Fused Silica	8 mm	\$ 88.10	£ 63.43	€ 76.65	¥ 702.16	LMR2

\*Thickness

846

www.thorlabs.com

THORLABS

Abbildung A.8. – Katalogseite zu Beam Samplern der Firma Thorlabs. Das verwendete Modell ist BSF05-UV. (Abbildung aus [Tho12])

50

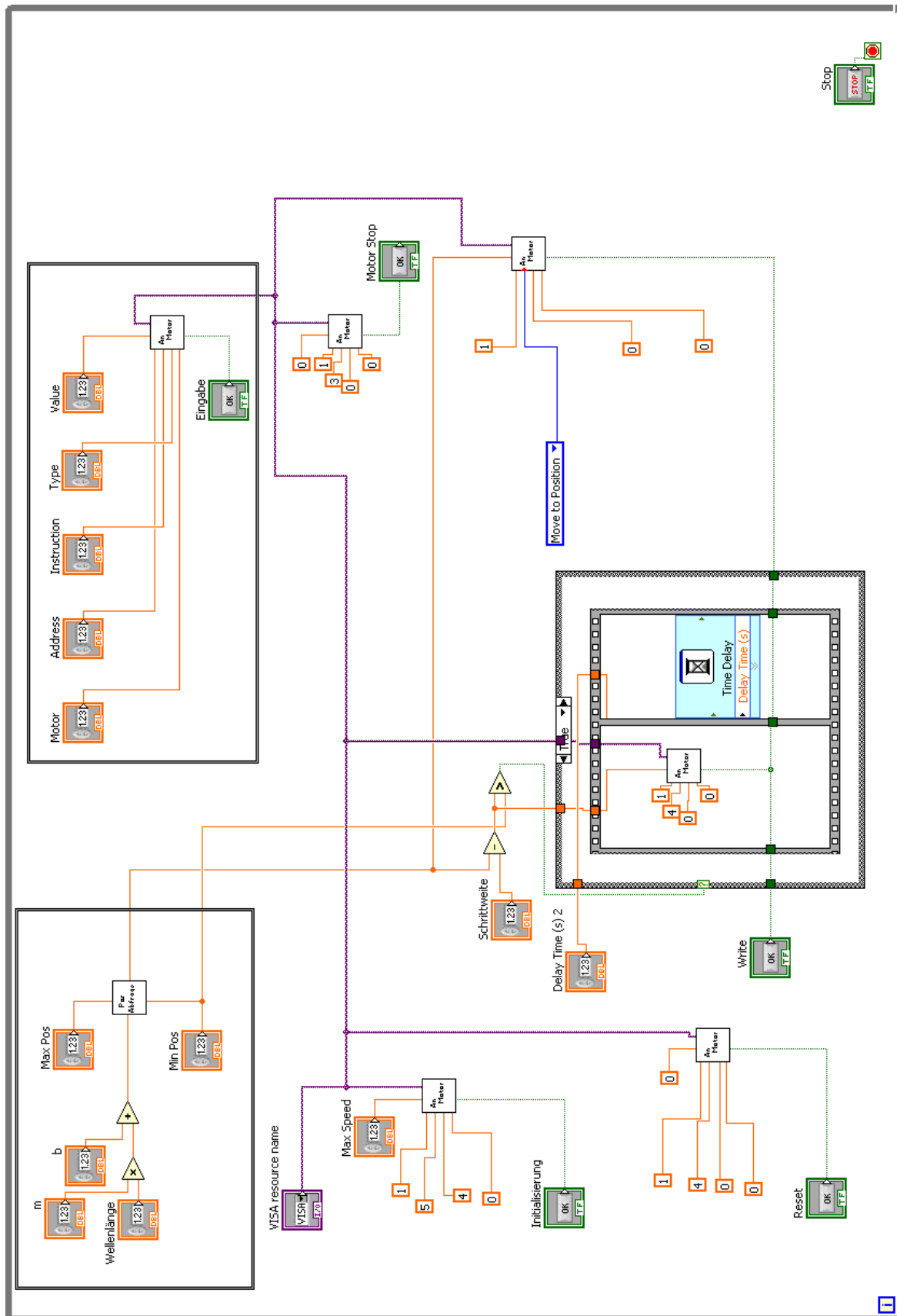


Abbildung A.9. – Blockdiagramm des Programms »Ansteuerung.vi«

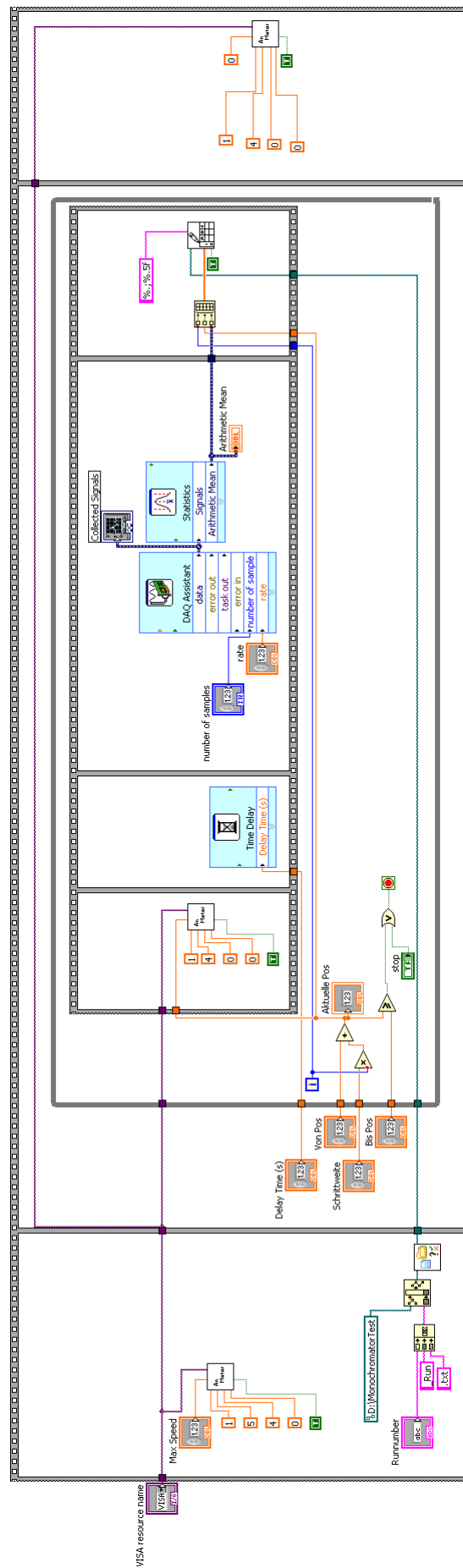


Abbildung A.10. – Blockdiagramm des Programms »Durchfahren.vi«

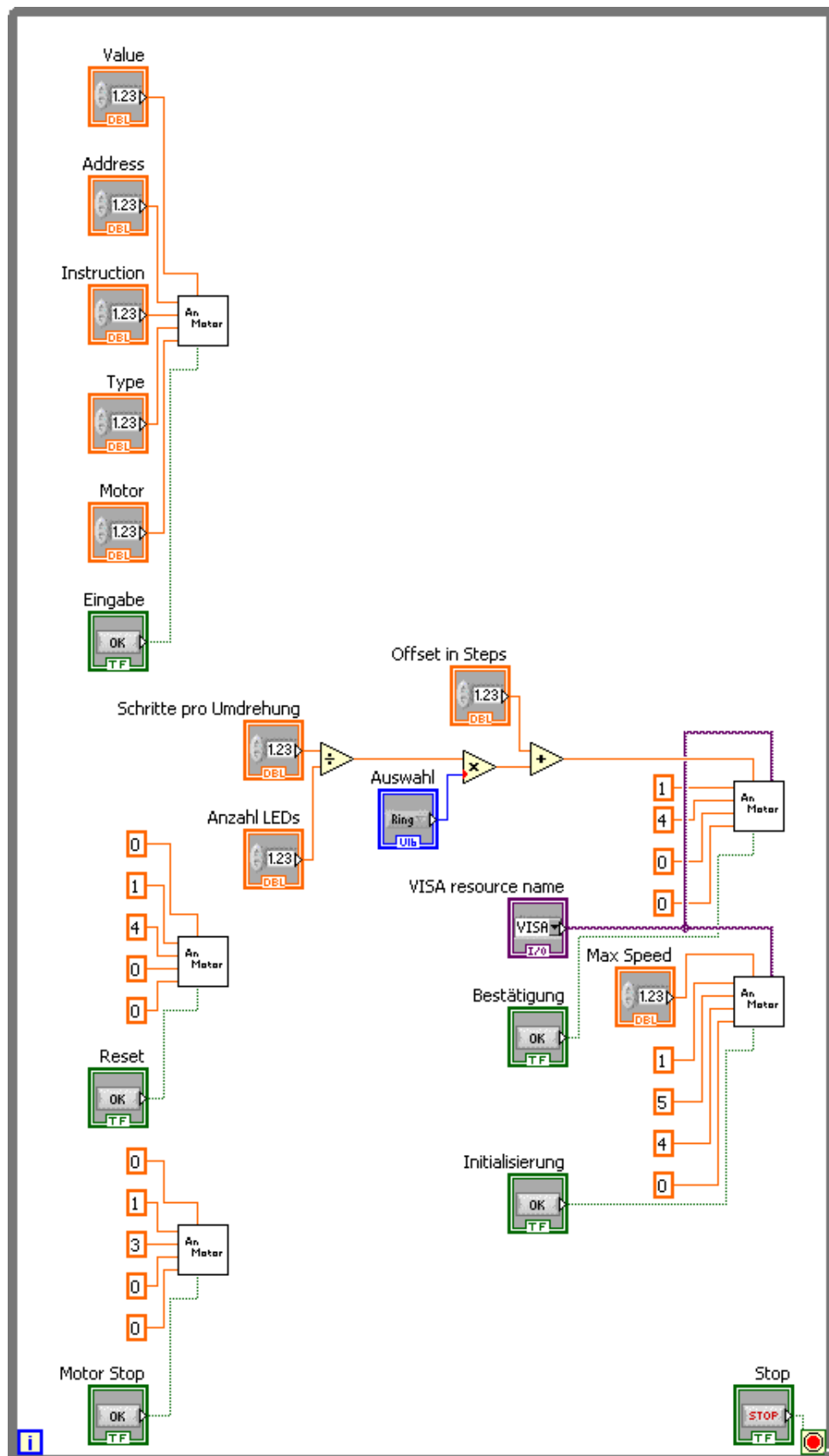


Abbildung A.11. – Blockdiagramm des Programms »LEDs.vi«





# Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst habe und dass ich keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt habe und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind.

---

Ort, Datum

Unterschrift



# Literaturverzeichnis

- [Dem09] W. Demtröder. *Experimentalphysik 2 - Elektrizität und Optik*. Springer, 5th edition, 2009.
- [Dem10] W. Demtröder. *Experimentalphysik 3 - Atome, Moleküle und Festkörper*. Springer, 4th edition, 2010.
- [Gra] Richardson Gratings. Diffraction grating handbook.
- [Hor] Horiba. *H10, H20 & DH10 - Compact Monochromators User Manual*.
- [KIT13] KIT. Homepage des katrin-experiments, <http://www.katrin.kit.edu/>, 02.09.2013.
- [Nat] National Instruments. *NI USB-6008, Kostengünstiges Multifunktions-Datenerfassungsmodul mit 10 kS/s, 12 bit*.
- [OSI] OSI optoelectronics. *UV-EQ / EQC / EK SERIES UV Enhanced, Suppressed NIR Photodiode*.
- [Osr] Osram. *Spektralverteilung der Osram-Spektrallampe Hg Cd/10*.
- [RCW83] William H. Beyer Robert C. Weast, Melvin J. Astle, editor. *Handbook of Chemistry and Physics*, chapter E. CRC Press, 64th edition, 1983.
- [Roi13] Roithner LaserTechnik GmbH. *Datenblatt zu UVTOP280*, 24.06.2013. v 2.0.
- [Tho12] Thorlabs. Catalog, 23.01.2012.
- [Tria] Trinamic. *TMCL<sup>TM</sup> Firmware Manual*. v 1.02.
- [TR Ib] TRINAMIC Motion Control. *Hardware Manual, TMCM-110-42*. v 1.3.
- [TR Ic] TRINAMIC Motion Control. *QMOT QSH4218 Manual*. v 1.06.
- [VH13] L. Josten H.-W. Ortjohann D. Winzen M. Zacher M. Zboril V. Hannen, S. Bauer. Main spectrometer electron-gun specification. Technical report, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, 27.02.2013.
- [Zac13] Michael Zacher. Vortrag: Electron gun tests and characteristics, 12.03.2013.



# Danksagung

Hiermit bedanke ich mich bei Allen, die mich beim Erstellen dieser Arbeit unterstützt haben. Zuerst möchte ich mich bei Prof. Dr. Christian Weinheimer bedanken, der mir ermöglicht hat, eine Thesis im Rahmen seiner Arbeitsgruppe zu schreiben. Ich konnte dadurch einen ausführlichen und sehr interessanten Einblick in die Forschungsarbeit der Kernphysik erhalten und einen Teil zu der KATRIN Kollaboration beitragen.

Besonderer Dank gilt Dr. Miroslav Zboril, der sehr viel Zeit aufgebracht hat, um mir mit seiner Erfahrung hilfreich zur Seite zu stehen. Auch Dr. Volker Hannen war jederzeit bereit, meine Fragen zu beantworten. Durch sein Korrekturlesen der Kapitel wurde die Arbeit in die richtige Richtung geführt.

Für die Einführung in das Thema und die bereits bestehenden Teile des Aufbaus möchte ich Daniel Winzen und Michael Zacher danken. Bei vielen Messungen konnte ich auf ihre Unterstützung zurückgreifen.

Des Weiteren danke ich Hans-Werner Ortjohann. Durch seine Hilfe war es möglich, Überlegungen in einen realen und funktionierenden Aufbau umzusetzen. In diesem Rahmen möchte ich mich auch bei der feinmechanischen und der Elektronikwerkstatt bedanken. Sowohl bei kleinen als auch bei großen Anliegen wurde mir stets schnell und äußerst zufriedenstellend weitergeholfen.

Ich bedanke mich auch bei der gesamten Arbeitsgruppe. Es herrschte immer eine freundliche Atmosphäre. Bei Fragen und Problemen wurde mir stets weitergeholfen.

Auch bedanken möchte ich mich bei Ann-Christine und Philip Zeh. Sie halfen mir dabei, die Arbeit möglichst frei von Rechtschreibfehlern und unverständlichen Formulierungen zu halten. Zum Schluß geht mein besonderer Dank an meine Eltern. Ihre Unterstützung ermöglicht mir das Studium und ich kann jederzeit auf Rückhalt vertrauen.