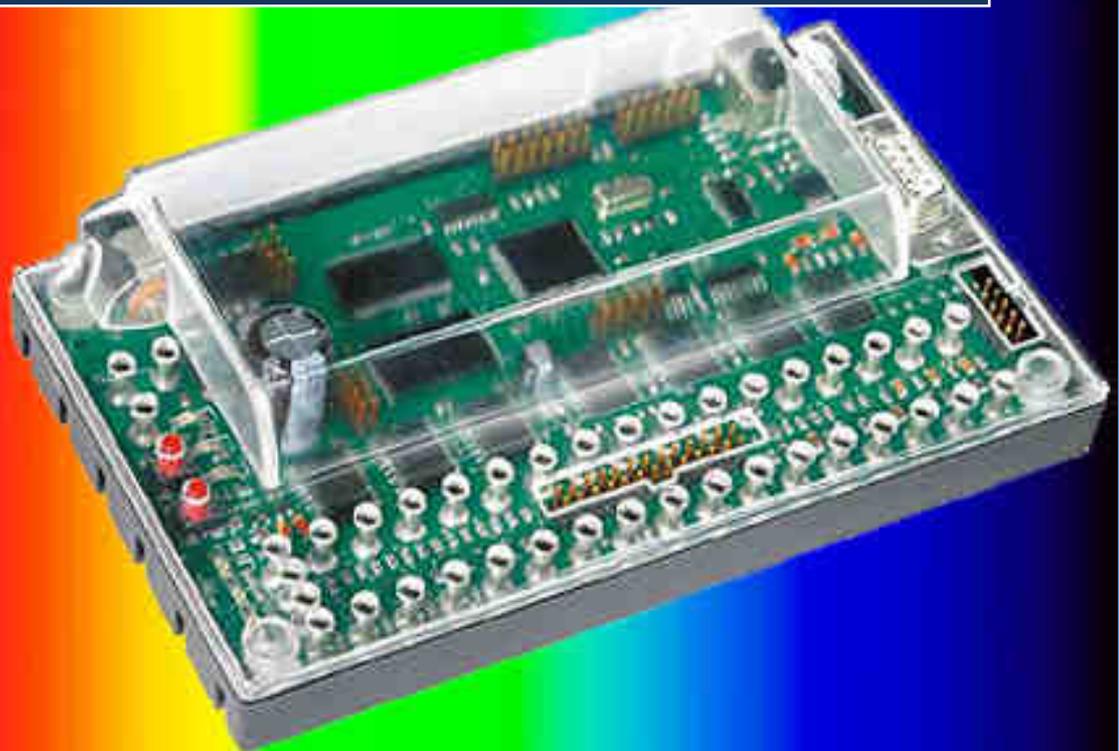


2008

Spektroskopische Messungen mit dem Fischertechnik Interface



Facharbeit

Leistungskurs Physik

Robert Reiter

25.01.2008

Inhalt

1	Einleitung	4
1.1	Einführung in die Spektroskopie	4
1.2	Das elektromagnetische Spektrum	4
2	Zielsetzung	6
3	Theoretische Grundlagen	7
3.1	Optisches Gitter und Prisma – Ein Vergleich	7
3.2	Brechung	8
3.3	Prisma	10
3.4	Die Leuchtdiode als Lichtquelle	13
3.5	Die Fotodiode als lichtempfindlicher Sensor	15
4	Versuch – Aufnahme von Spektren	17
4.1	Versuchsordnung	17
4.2	Bau der Messanordnung aus Fischertechnik	19
4.3	Programmierung des Messablaufs	22
4.4	Kalibrierung der x-Achse mit Hilfe des Quecksilberspektrums	22
4.5	Durchführung der Messungen	25

4.6	Ergebnisse.....	27
4.6.1	Spektren der Leuchtdioden	27
4.6.2	Spektren einer Glühwendel bei verschiedenen Temperaturen.	30
4.7	Diskussion	33
4.7.1	Fehlerquellen	33
4.7.2	Mögliche Verbesserungen.....	34
5	Anhang.....	36
5.1	Grafische Programmieroberfläche RoboPro	36
5.2	Geometrie Versuchsanordnung	38
5.3	Bei Messungen verwendete Objekte	38
5.4	Verwendete Software.....	39
6	Quellenverzeichnis	40

1 Einleitung

1.1 Einführung in die Spektroskopie

Die Spektroskopie, oder Spektrometrie, stellt einen Wissenschaftszweig dar, der die, von verschiedenen Stoffen emittierte, oder absorbierte elektromagnetische Strahlung beschreibt um den Stoff zu charakterisieren. Dabei bezeichnet man die Intensität dieser Strahlung als Funktion der Wellenlänge λ als Spektrum.¹

Die Spektroskopie ist eine der wichtigsten Säulen eines Analytikers und stellt die Grundlage der Spektralanalyse dar. Bei dieser werden Stoffe auf ihre chemischen Elemente untersucht, was durch die Zerlegung des von ihnen ausgestrahlten Lichts mit Hilfe eines Spektralapparates erfolgt. Durch die Untersuchung der Lage (qualitative Spektralanalyse) und der Stärke der Spektrallinien im Spektrum (quantitative Spektralanalyse) kann man auf verschiedene Elemente und ihre Konzentration im Messobjekt schließen. Die Spektralanalyse wurde erstmals 1859 von Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899) und Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) durchgeführt.²

Der spezifische Aufbau eines Spektrometers umfasst dabei eine Strahlungsquelle, ein Dispersionsmedium zur Zerlegung des Lichts und ein Detektionssystem zur Aufnahme des Spektrums.

1.2 Das elektromagnetische Spektrum

Das elektromagnetische Spektrum erstreckt sich von den längsten Radiowellen von 30 Kilometern bis zu den kurzwelligsten Photonen der kosmischen Strahlung mit 10^{-5} Metern Wellenlänge.

¹ [1], Band 2, S. 905

² [3], S. 117

Das elektromagnetische Spektrum verläuft fließend, wobei der sichtbare Bereich nur einen ganz geringen Teil des gesamten Spektrums ausmacht.³

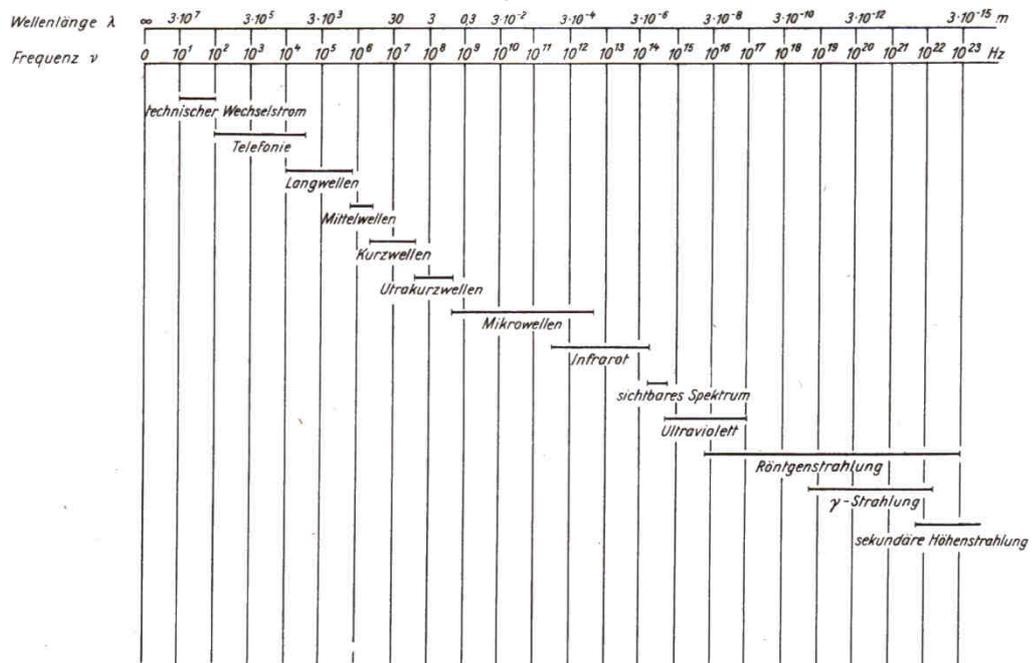


Abb. 1 Gesamtes elektromagnetisches Spektrum⁴

³ [1], Band 2, S. 905f

⁴ [19]

2 Zielsetzung

Das Ziel meiner Arbeit ist die Betrachtung der Prismenspektroskopie. Dies erfolgt sowohl in den notwendigen physikalischen Grundlagen, wie auch der Durchführung von Messungen. Dafür habe ich mit Hilfe des technischen Baukastensystems Fischertechnik eine Messanordnung entworfen, welche meine Zielsetzung einer automatisch-maschinellen Messung von Spektren verschiedener Lichtquellen erfüllt. Dabei soll ein lichtempfindlicher Sensor an der Projektionsfläche des Spektrums entlang geführt werden und die von dem Ort x abhängige Intensität der emittierten Wellenlängen aufnehmen, was später am PC verarbeitet wird. Die Ergebnisse werden Intensitätsverteilungen (Intensität= I) der jeweiligen, emittierten Wellenlängen von verschiedenen Lichtquellen sein.

Bei den Messobjekten lege ich dabei den Schwerpunkt der Messungen dieser Arbeit auf Leuchtdioden verschiedener Farbe. Leuchtdioden stellen eine aktuell sehr innovative Lichtquelle dar, die sich am Markt immer weiter ausbreitet, und sich so als interessante Messobjekte darstellen. Im Gegensatz dazu gehe ich kurz ebenso auf das Spektrum einer klassischen Glühwendel ein. Dabei ist das Ziel, durch verschiedene Spektren auf die Glühwendeltemperatur zu schließen, was eine der praktischen Anwendungen der Spektralanalyse darstellt.

3 Theoretische Grundlagen

Um die Funktion und die spezifischen Eigenschaften der wichtigsten Komponenten der Spektralmessung kennen zu lernen, werden im Folgenden theoretische Grundlagen der Optik, aber auch der Halbleiterphysik angesprochen.

3.1 Optisches Gitter und Prisma – Ein Vergleich

Bei der Zielsetzung einer Spektralmessung verschiedener Lichtquellen steht man vor der Wahl, mit welchen Hilfsmitteln das Licht in seine Bestandteile zerlegt werden soll. Dabei gibt es zwei wichtige dispersive Elemente, die, wie die Bezeichnung schon sagt, die Dispersion, also die wellenlängenabhängige Ablenkung (siehe 3.2), zur Aufspaltung des Lichts nutzen. Diese sind das optische Gitter und das Dispersionsprisma.

Das optische Gitter beruht auf der Beugung der Lichtstrahlen. Diese kann mit dem Huygens'schen Prinzip gedeutet werden. Dabei geht man davon aus, dass jeder Punkt einer Wellenfront Ausgangspunkt einer Elementarwelle ist. Wenn die Wellenfront nun auf ein Gitter zuläuft, können die einzelnen Elementarwellen hinter dem Gitter miteinander interferieren, woraus konstruktive Interferenz (Maxima) und destruktive Interferenz (Minima) entstehen.⁵ Der große Vorteil eines optischen Gitters ist, dass die Wellenlängenablenkung linear ist und so durch die Geometrie der Versuchsanordnung einfach aus einem Ort x die zugehörige Wellenlänge λ bestimmt werden kann. Auch sind optische Gitter billiger in der Herstellung und erreichen ein besseres Auflösungsvermögen als Dispersionsprismen.

Diese arbeiten mit der Brechung von Lichtstrahlen (siehe 3.2). Die Ablenkung von verschiedenen Wellenlängen im Prisma ist nicht linear, da sich der Brechungsindex mit der Wellenlänge ändert (siehe 3.2). Dies erschwert eine rechnerische Umsetzung der abgelenkten Wellenlänge aus dem gegebenen Ort. Aber der Vorteil eines Dispersionsprismas ist, dass beim Durchgang des

⁵ Inhaltlich nach [4]

Lichtes keine Verluste hingenommen werden müssen. Bei der Interferenz am optischen Gitter geht das meiste Licht ungehindert durch und wird als 0. Maximum in der optischen Achse abgebildet. Der kleine Rest teilt sich noch in symmetrisch links und rechts der optischen Achse folgenden Maxima der 1., 2., 3., ... Ordnung auf. Da man nur mit dem Maximum der 1. Ordnung einer Seite arbeitet, muss man hier immense Helligkeitsverluste in Kauf nehmen.

Dies ist auch der Grund, weshalb ich meine Messungen mit einem Dispersionsprisma –genauer, einem Geradsichtprisma (siehe 3.3)– durchführe, da hier 100% des emittierten Lichts in die Messung übergehen. Den Nachteil der nicht linearen Ablenkung der Wellenlängen behebe ich mit einer Kalibrierung der x-Achse der Messanordnung mit Hilfe des Quecksilberspektrums (siehe 4.4).

Im Folgenden wird nun die Brechung, das Prinzip, welches hinter dem Prisma steht, behandelt.

3.2 Brechung⁶

Brechung, also der Effekt, dass eine Welle beim Übergang zweier Medien, seine Richtung ändert, wird im Snelliusschen Brechungsgesetz beschrieben. Die Beobachtung des Effekts geht bis ins 10. Jahrhundert zurück, in dem er zum ersten Mal erwähnt wurde. Nach einer kurzen Wiederentdeckung 1601, folgte aber eine genaue Beschreibung erst 1618 von dem Holländer Willebrord van Roijen Snell und René Descartes.

Dem Gesetz liegt der Effekt zu Grunde, dass sich Licht in Medien verschiedener optischer Dichte auch verschieden schnell fortbewegen kann (natürlich stets kleiner-gleich der Vakuumlichtgeschwindigkeit). Die optische Dichte eines Mediums ist festgelegt durch dessen Brechzahl n . Diese gibt das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zur Geschwindigkeit des Lichts in Materie an.

⁶ Inhaltlich nach [10]

$$n = \frac{c_0}{c_m}$$

n = Brechzahl

c_0 = Vakuumlichtgeschwindigkeit

c_m = Lichtgeschwindigkeit in Materie

Die Brechzahl stellt also eine Materialkonstante dar, die allerdings von der Wellenlänge abhängig ist. Dies nennt man Dispersion, und diese Wellenlängenabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit führt dazu, dass blaues Licht stärker gebrochen wird als rotes Licht.

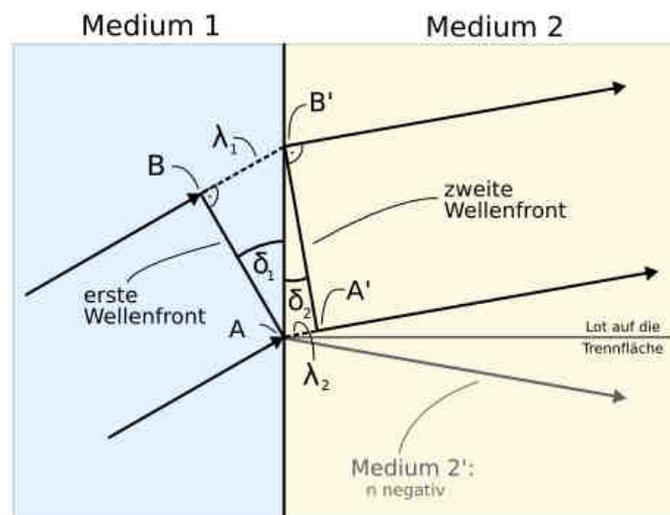


Abb. 2 Strahlengang Brechung⁷

Betrachtet man nun zwei parallele Lichtstrahlen, die von einem Medium ins andere übergehen, so erkennt man, dass geometrisch der Strahl 1 eine zusätzliche Wegstrecke von $\lambda_1 = c_1 \cdot \Delta t$ noch im Medium 1, und der Strahl 2 eine zusätzliche Wegstrecke von $\lambda_2 = c_2 \cdot \Delta t$ im Medium 2 hat.

Da rechtwinklige Dreiecke vorliegen, ergibt sich also

$$\sin \delta_1 = \frac{\lambda_1}{AB'} = \frac{c_1 \Delta t}{AB'}$$

$$\sin \delta_2 = \frac{\lambda_2}{AB'} = \frac{c_2 \Delta t}{AB'}$$

⁷ [20]

Setzt man die beiden Gleichungen gleich, ergibt sich:

$$\frac{\sin \delta_1}{\sin \delta_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\frac{c_0}{n_1}}{\frac{c_0}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1}$$

Als Veranschaulichung für die Brechung kann man sich als Wellenfront eine Reihe Sportler vorstellen, die zuerst laufen müssen, um dann noch eine Strecke zu schwimmen. Kommen die ersten am Wasser an, werden diese natürlich gebremst, während die anderen noch weiter laufen können, wodurch die Wellenfront gedreht wird.

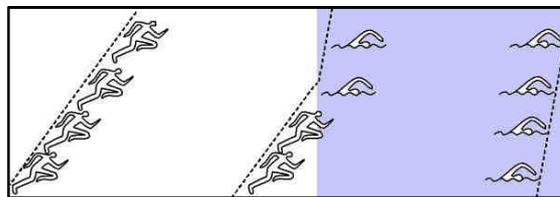


Abb. 3 Veranschaulichung der Brechung⁸

3.3 Prisma⁹

Ein optisches Prisma wird als ein Körper definiert, der zwei nicht parallele Oberflächen besitzt und meist die Form eines Keils aufweist.¹⁰ Dabei gibt es grundlegend zwei Arten von Prismen: Reflexionsprismen, die zur Umlenkung eines Strahls genutzt werden, und Dispersionsprismen.

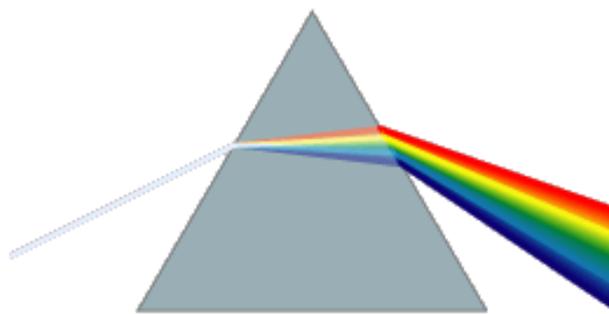


Abb. 4 Spektralzerlegung am Dispersionsprisma¹¹

⁸ [21]

⁹ Inhaltlich nach [2], S. 419ff

¹⁰ [11]

¹¹ [22]

Dispersionsprismen besitzen eine andere Brechzahl als ihre Umgebung, woraufhin beim Durchgang ein einfallendes Lichtbündel durch die Brechung an den beiden nichtparallelen Flächen von seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt wird. Da durch die wellenlängenabhängige Brechzahl die Stärke der Ablenkung von der Wellenlänge abhängt, ist es möglich, polychromatisches Licht in seine Bestandteile zu zerlegen.¹²

Zur einfacheren Verständigung finden sich die einzelnen Bezeichnungen eines Prismas in der folgenden Abbildung.

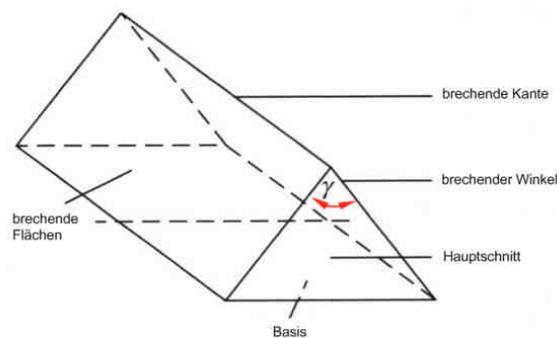


Abb. 5 Bezeichnungen Prisma¹³

Zur Bestimmung der Ablenkung in einem Prisma wird gesagt, dass es in einem Medium der Brechzahl n eingebettet ist. Ein Lichtstrahl fällt mit dem Winkel i_e gegenüber dem Lot der brechenden Fläche auf das Prisma. Der Strahl erfährt beim Durchgang durch das Prisma eine Ablenkung von Δi . Zur Berechnung von Δi wird der Hauptschnitt des Prismas betrachtet.

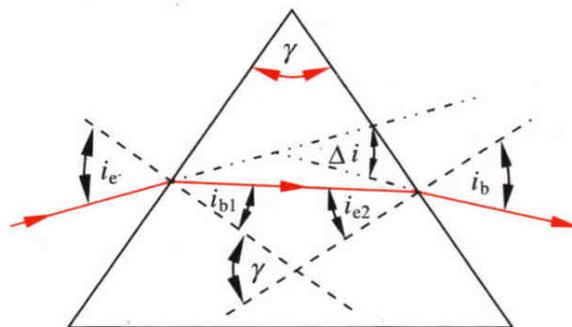


Abb. 6 Strahlengang durch den Hauptschnitt des Prismas¹⁴

¹² [12]
¹³ [23]
¹⁴ [24]

Dabei gilt:

$$\Delta i = i_e - i_{b1} + i_b - i_{e2}$$

$$\gamma = i_{b1} + i_{e2} \quad (*)$$

oder

$$\Delta i = i_e + i_b - \gamma$$

Mit Hilfe des Brechungsgesetzes (siehe 3.2), der Gleichung (*), $\sin(x_1 \mp x_2) = \sin x_1 \cos x_2 \mp \cos x_1 \sin x_2$ und $(\sin x)^2 + (\cos x)^2 = 1$ erhält man nach einigen Umformungen, die ich in dieser Arbeit vernachlässige, für die Strahlablenkung

$$\Delta i = i_e - \gamma + i_b.$$

Für sehr kleine Einfallswinkel und einem sehr kleinen brechenden Winkel kommt man näherungsweise auf

$$i_b = \gamma \frac{n_{Pr}}{n} - i_e$$

und damit auf $\Delta i = \gamma \left(\frac{n_{Pr}}{n} - 1 \right)$; ($\gamma \ll 1$, $i_e \ll 1$)

Δi = Ablenkung im Prisma

γ = brechender Winkel

n_{Pr} = Brechzahl des Prismas

n = Brechzahl des Medium, welches das Prisma umgibt.

Bei den meisten Anwendungen, also in Luft, kann man n vernachlässigen, weshalb man die Ablenkung im Prisma auch als

$$\Delta i = \gamma (n_{Pr} - 1)$$

schreiben kann.

Für meine Messungen verwende ich eine spezielle Art von Dispersionsprisma, ein Geradsichtprisma nach Amici. Dieses von Giovanni Battista Amici erfundene Prisma besteht aus drei zusammengekitteten Prismen mit jeweils 60°Winkeln. Die drei Prismen bestehen aus zwei unterschiedlichen Materialien. Typisch sind dabei die Materialien A – Flintglas und B – Kronglas. Das besondere ist, dass das entstehende Spektrum breiter und fast symmetrisch zur optischen Achse verläuft, was

einen Aufbau der Versuchsanordnung entlang der optischen Achse möglich macht.¹⁵ Die Merkmale und Eigenschaften eines Prismas bleiben dabei völlig erhalten, das heißt, dass auch hier blaues, kurzwelligeres Licht stärker gebrochen wird als rotes, langwelligeres Licht.

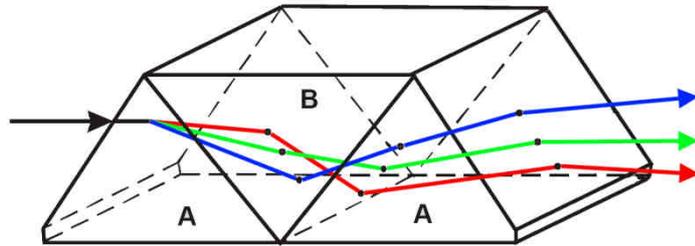


Abb. 7 Strahlengang durch ein Geradsichtprisma nach Amici¹⁶

3.4 Die Leuchtdiode als Lichtquelle¹⁷

Da ich als Messobjekte in dieser Arbeit hauptsächlich Leuchtdioden benutze, werde ich in diesem Punkt das Prinzip und die Wirkweise einer Leuchtdiode erläutern. Dies wird, um den Rahmen der Arbeit nicht zu sprengen, nur auf sehr allgemeinem Niveau stattfinden, aber um die ermittelten Spektren zu verstehen, ist es nicht unwichtig zu wissen, auf welche Weise das Licht einer Leuchtdiode erzeugt wird.

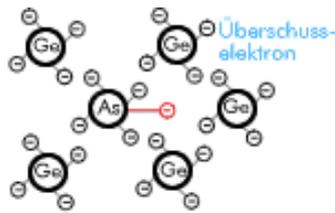
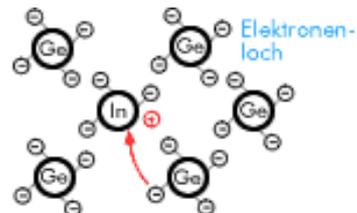
Leuchtdioden sind Halbleiterdioden, die nach Anlegen einer Durchlassspannung aus der Sperrschicht heraus Licht emittieren.

Halbleiter haben einen kristallinen Aufbau und man unterscheidet zwischen zwei Schichten. Dem n-Leiter und dem p-Leiter. Bei einem n-Leiter sind in das regelmäßige Atomgitter Fremdatome mit einer höheren Wertigkeit eingebettet. Man sagt, der Leiter ist n-dotiert. Im Gegensatz dazu sind bei einem p-Leiter Fremdatome einer geringeren Wertigkeit eingebettet, der Leiter ist p-dotiert. Der n-dotierte Halbleiter besitzt dadurch freie Elektronen, der p-dotierte Halbleiter besitzt sogenannte Löcher, das heißt im Atomgitter fehlende Elektronen.

¹⁵ [12]

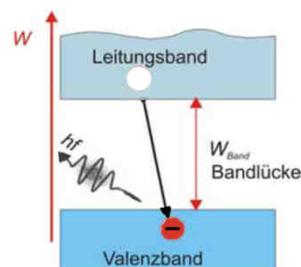
¹⁶ [25]

¹⁷ Inhaltlich nach [14]

Abb. 8 n-dotierter Halbleiter¹⁸Abb. 9 p-dotierter Halbleiter¹⁹

Stoßen, wie in einer Halbleiterdiode, zwei Halbleiterzonen verschiedener Leitungsart zusammen, so entsteht ein pn-Übergang, die Grenzschicht zwischen einem p-Leiter und einem n-Leiter. Die freien (negativ geladenen) Elektronen rekombinieren mit den (positiv geladenen) Löchern, wobei die freien Leitungselektronen zu gebundenen Valenzelektronen werden und die Löcher verschwinden. Diese Rekombination an der Grenzschicht würde nach einer Zeit durch ein sich dort aufbauendes Kräftegleichgewicht stoppen, da die Diode aber in Durchlassrichtung an einer Spannung angelegt ist, wird immer weiter eine Rekombination stattfinden.

Bei der Rekombination fällt ein Elektron vom energetisch höheren Leitungsband in das energetisch niedrigere Valenzband hinab, das die Energie der gebundenen Elektronen der Atome repräsentiert (siehe Quantenbahnen, beziehungsweise Quantensprung). Bei diesem Übergang von einem höheren Energieband in ein Niedrigeres wird eine bestimmte Energie in Form eines Photons frei. Das heißt, die Farbe einer Leuchtdiode wird durch den Bandabstand, welcher durch die Wahl der Halbleiterstoffe mit einem entsprechenden Dotiermaterial definiert wird, festgelegt. Das bedingt, dass Leuchtdioden Licht nur in einem sehr begrenzten Spektralbereich emittieren.

Abb. 10 Bändermodell Leuchtdiode²⁰

¹⁸ [26]
¹⁹ [27]
²⁰ [28]

Die Ausnahme stellt eine weiße Leuchtdiode dar. Um eine weiße Leuchtdiode erzeugen zu können, gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder man fasst mehrere Leuchtdioden unterschiedlicher Farbe zu Einer zusammen, oder man versieht eine blaue Leuchtdiode mit einer internen Leuchtschicht (ähnlich einer Leuchtstoffröhre), die einen Teil des blauen Lichts in gelbes Licht umwandelt, um so alle Spektralanteile zu erzeugen, die für weißes Licht verantwortlich sind. Ergebnis ist ein kontinuierliches Spektrum bei dem der Blauanteil noch deutlich zu erkennen ist. (siehe 4.6.1)

3.5 Die Fotodiode als lichtempfindlicher Sensor

Als Sensor für meine Messanordnung entschied ich mich für eine Fotodiode. Ein Fotowiderstand kam nicht in Frage, da dieser bei den geringen Helligkeiten einen zu großen Widerstand besaß, als dass ich ihn mit dem Fischertechnik Interface hätte messen können. Der Vorteil gegenüber einem Fototransistor liegt darin, dass diese Fotodiode (siehe 5.3) einen spektralen Empfindlichkeitsbereich von 350 bis 820 Nanometer besitzt²¹, im sichtbaren Spektrum. Fototransistoren für diese Wellenlängen sind sehr schwer zu finden.

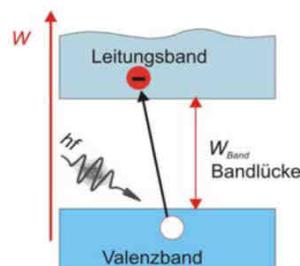


Abb. 11 Bändermodell Fotodiode²²

Fotodioden sind Halbleiterdioden, die am pn-Übergang durch den inneren Fotoeffekt freie Ladungsträger erzeugen, welche zu einem Stromfluss führen.²³ Beim inneren Fotoeffekt werden durch die Einstrahlung von Photonen in einen Halbleiter, feste, ortsgebundene Valenzelektronen in das

²¹ [7]
²² [28]
²³ [16]

Leitungsband gehoben. Dies erfolgt immer dann, wenn die Energie der absorbierten Photonen $W = h \cdot f$ größer als die der Bandlücke W_{Band} zwischen dem Valenz- und dem Leitungsband ist. Die in das Leitungsband gehobenen Elektronen verhalten sich nun als freie Elektronen und bilden einen Stromfluss.²⁴ Arbeitet die Fotodiode im Kurzschlussbetrieb, so liefert sie einen über viele Größenordnungen linear von der Bestrahlungsstärke abhängigen Strom. Dieser ist sehr gering (10^{-8} Ampere-Bereich) und muss verstärkt werden.

Man kann also sagen, dass eine Fotodiode gewissermaßen das Gegenteil zur Leuchtdiode darstellt, da sie dieselben Prinzipien zur Stromerzeugung nutzt, wie die Leuchtdiode umgekehrt zur Lichtemission.

²⁴ [17]

4 Versuch – Aufnahme von Spektren

4.1 Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung wird entlang der optischen Achse aufgebaut. Bei den Leuchtdioden als Messobjekte, welche zur Befestigung an kleine Holzplättchen montiert und verdrahtet wurden, kann man die sonst folgende Sammellinse zur Bündelung der Lichtstrahlen weglassen, da bei Leuchtdioden der spezielle kugelförmige Kopf die emittierten Lichtstrahlen schon angemessen auf den folgenden Spalt bündelt. Der Kohärenzspalt lässt das auf ihn gebündelte Licht nur in einem eng begrenzten Öffnungswinkel hindurch. Der Anordnung folgend ist ein Objektiv angebracht, welches das vom Kohärenzspalt kommende Licht auf die Projektionsebene der Fischertechnik-Messanordnung abbildet. Inmitten dieses Strahlenganges ist das Geradsichtprisma angebracht, welches das auftreffende Licht spektral zerlegt und auf die Projektionsfläche der Messanordnung verteilt.

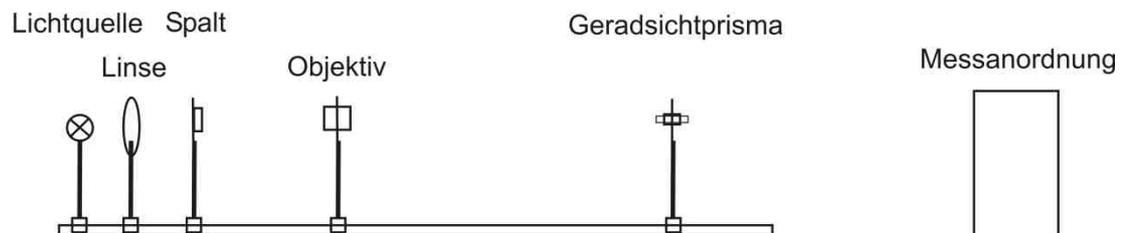


Abb. 12 Schematische Versuchsanordnung

Dieser Aufbau stellt eine vereinfachte Anordnung dar, da die Strahlen vom Objektiv kommend nicht exakt parallel auf das Geradsichtprisma treffen, aber durch den im Verhältnis großen Abstand zwischen Objektiv und Projektionsebene als nahezu parallel angesehen werden können. Dadurch muss keine weitere Sammellinse angebracht werden, welche die vom Prisma kommenden Lichtstrahlen wieder auf die Projektionsfläche bündelt.

Der lichtabhängige Fotostrom der Fotodiode, welche als Sensor dient, wird mit einem Messverstärker verstärkt und in einen Messbereich von 0 bis 10

Volt umgewandelt. Dieser Messbereich wird schließlich am analogen Spannungseingang des Fischertechnik Interfaces gemessen, welches die Helligkeitsverteilung registriert. Die Position der Fischertechnik-Messanordnung ist so festgelegt, dass mindestens das komplette sichtbare Spektrum der Messobjekte registriert wird.

Genauere Angaben zur Geometrie der Versuchsanordnung finden sich im Anhang.

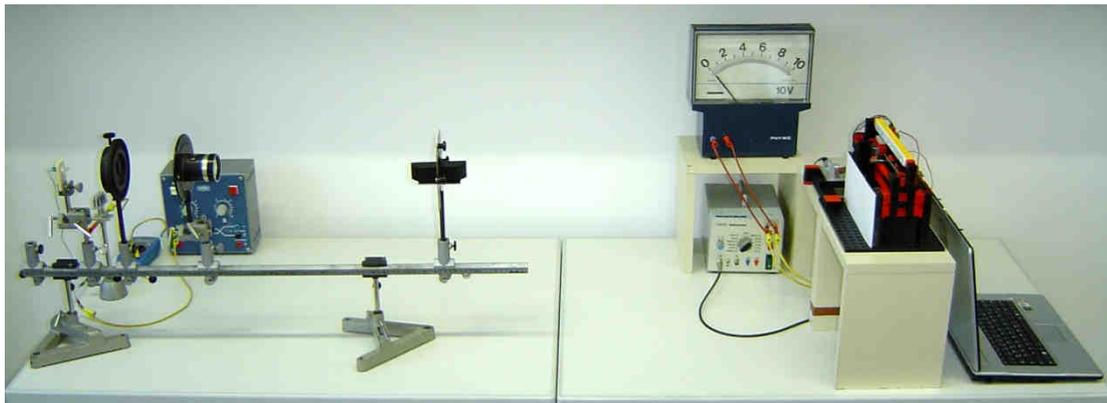


Abb. 13 Versuchsanordnung gesamt

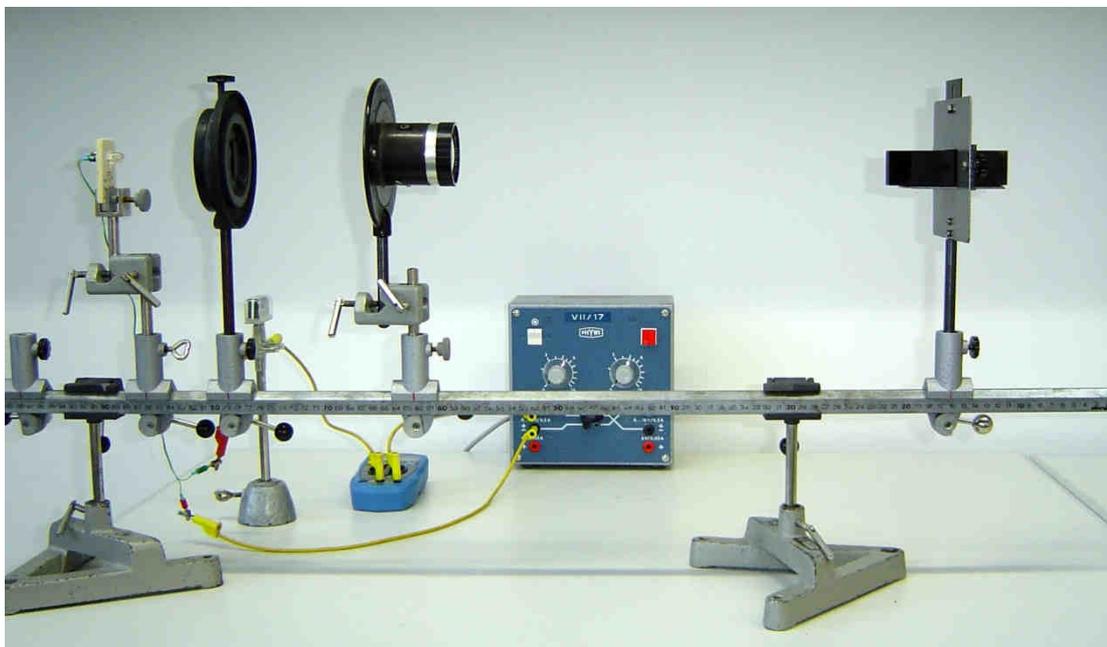


Abb. 14 optische Geräte

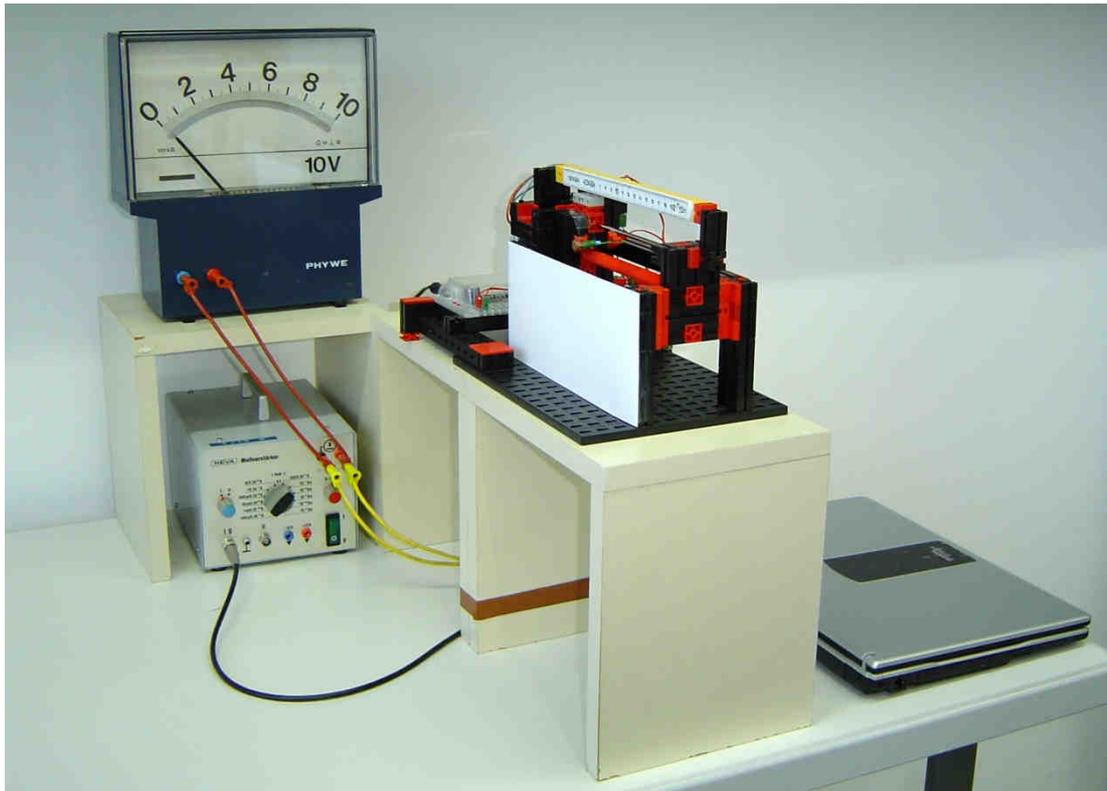


Abb. 15 Messanordnung

4.2 Bau der Messanordnung aus Fischertechnik

Die Aufgabe der Messanordnung besteht darin, sichtbare Spektren verschiedener Lichtquellen maschinell zu messen. Das heißt, der Lichtsensor fährt von einem Motor betrieben an der Projektionsebene in x-Richtung entlang und gibt die Helligkeitsverteilung über einen definierten x-Abschnitt aus. Diese ausgegebenen Werte sollen daraufhin mit dem PC verarbeitet werden.

Zum Bau dieser maschinellen Messanordnung habe ich mich für das technische Baukastensystem Fischertechnik entschieden, da mit diesem 1965 von Arthur Fischer gegründeten Systems, das seinen Schwerpunkt auf die Funktion und technische Umsetzung der Modelle legt²⁵, alle technisch nötigen Voraussetzungen realisierbar sind. Fischertechnik ist weit über den Kinderzimmer-Bereich hinaus bekannt für sehr gute Umsetzbarkeit technischer Abläufe und eine hohe Flexibilität in der Kombination mit

²⁵ [13]

modernen Hilfsmitteln, wie Sensoren und Computern. Nicht zuletzt aus diesem Grund arbeiten bekannte Firmen mit diesem System zusammen, um so beispielsweise neue Funktionen einer Taktstraße realistisch zu erproben. Ich besitze Fischertechnik seit 11 Jahren, und habe so auch einige Erfahrung in der Umsetzung bestimmter Probleme gesammelt.

Im Folgenden gehe ich kurz auf wichtige Bestandteile im Bau der Messanordnung ein.

Um eine gleichmäßige, lineare Bewegung des Sensors in x-Richtung zu gewährleisten, wird er durch zwei gleichlaufende horizontale Schnecken bewegt, die so die Rotationsbewegung des fest installierten Motors in eine geradlinig, horizontale Bewegung übertragen.

Angetrieben werden die Schnecken von einem Schrittmotor der Firma Crouzet ($P=7,5$ Watt; $R=10,7$ Ohm; Schrittweite= $7,5$ Grad). Die Vorteile gegenüber einem Servomotor liegen in der Genauigkeit der Bewegung und der Möglichkeit die Drehungen des Motors und so den Ort des Sensors zu bestimmen. Einem Schrittmotor werden nach einem bestimmten Schema „Strom-Impulse“ auf die einzelnen Spulen gegeben. Jeder dieser Impulse bewirkt eine kleine Drehung, die von der charakteristischen Schrittweite eines jeden Schrittmotors festgelegt ist. Sobald keine Impulse mehr gesendet werden, bleibt der Motor auf der Stelle stehen. So kann durch die Anzahl der Impulse genau bestimmt werden, wie weit der Motor drehen soll. Das setzt allerdings voraus, dass ein Schrittmotor immer mit einer Elektronik, beziehungsweise eines Computers angesteuert wird.

So ist das Fischertechnik Interface in Verbindung mit einem Computer der dritte wichtige Bestandteil, der den gezielten Messablauf gewährleistet. Das Interface dient zur Übertragung und Umwandlung der am PC programmierten Signale an die angeschlossenen Komponenten und umgekehrt. Es besitzt dazu, für die Messanordnung relevante, zwei Motorausgänge, über die der Schrittmotor angesteuert wird und einen analogen Spannungseingang, mit einem Messbereich von 0 bis 10 Volt, an dem der Lichtsensor angeschlossen wird. Dabei wird die gemessene Spannung in einen Zahlenwert zwischen 0 und 1023 umgewandelt. Das

Interface ist mit einem 16 Bit Prozessor, Typ: M30245, mit einer Taktfrequenz von 16 MHz ausgestattet.²⁶

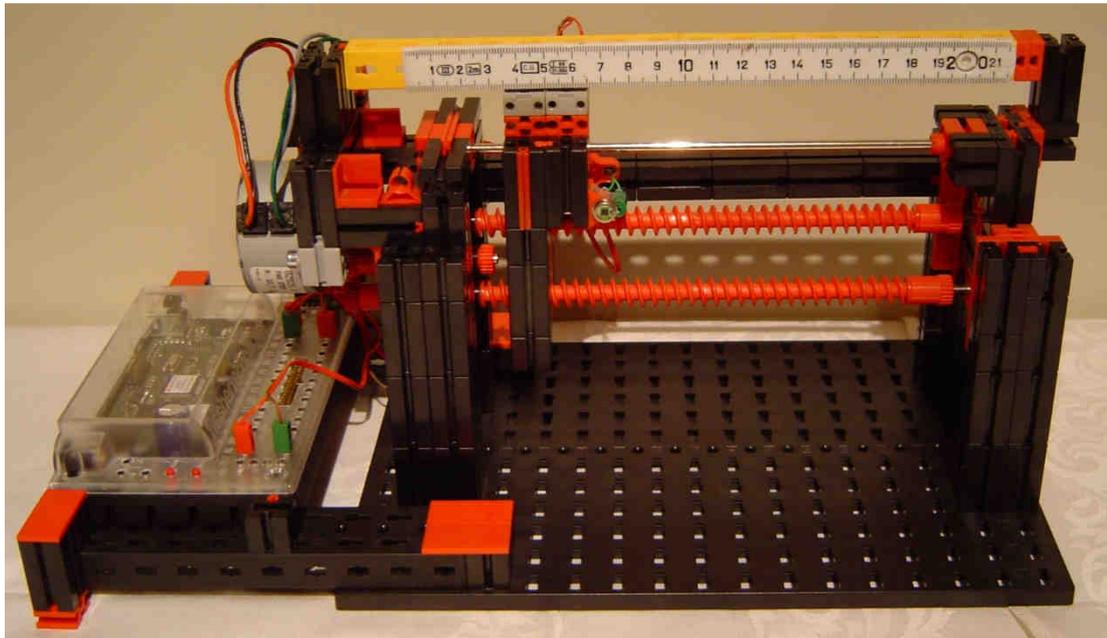


Abb. 16 Fischertechnik-Messanordnung

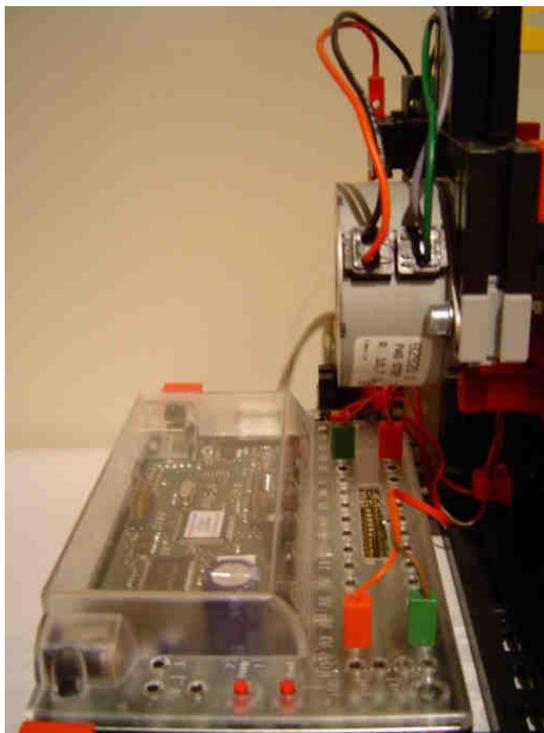


Abb. 17 Fischertechnik Interface mit
Schrittmotor

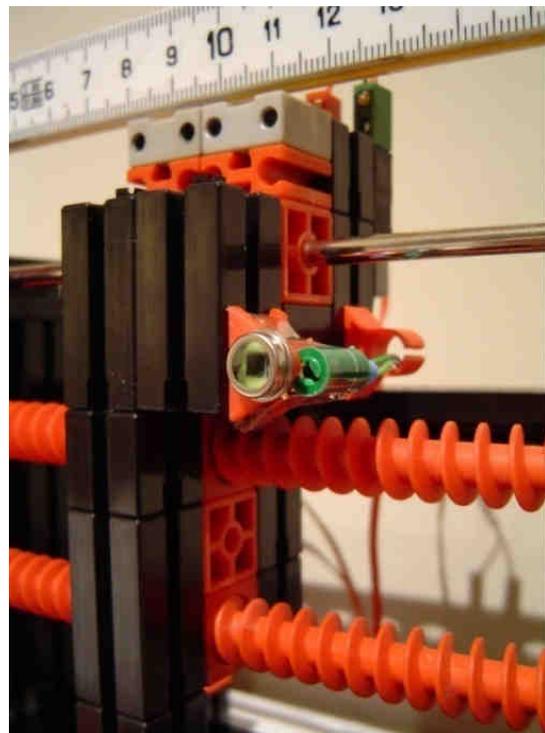


Abb. 18 Sensorschlitten

²⁶ [5]

4.3 Programmierung des Messablaufs

Die Ansteuerung des Interfaces und so die Programmierung des Messablaufs erfolgen über die grafische Programmierungssoftware RoboPro von Fischertechnik. Mit deren Hilfe kann man den Ablauf mit grafischen Symbolen beschreiben ohne eine Programmiersprache beherrschen zu müssen.

Im Groben lässt sich der Programmablauf wie folgt aufzeichnen:

```

Programmstart
├─ Warten auf Startbefehl
├─ Schleife mit 320 Wiederholungen
│   ├─ Abfragen des Sensors
│   ├─ Anfügen des Sensorwerts in Liste
│   └─ 1 Schritt nach rechts
└─ Ende der Schleife
    └─ Zurückfahren des Sensors auf Startposition
Programmende
  
```

Die grafische Programmieroberfläche ist mit einer Beschreibung im Anhang beigelegt.

4.4 Kalibrierung der x-Achse mit Hilfe des Quecksilberspektrums

Das Ziel einer Kalibrierung der x-Achse der Messanordnung ist der Zusammenhang zwischen der Position des Sensors in Zentimetern und der dorthin abgelenkten Wellenlänge λ in Nanometern, um schließlich die λ -I-Verteilungen aufzeichnen zu können.

Wie schon erwähnt ist die Ablenkung in einem Prisma wellenlängenabhängig und verläuft nicht linear. Da für den Zusammenhang zwischen Ablenkung und der abgelenkten Wellenlänge keine eindeutigen Formeln zu finden waren, habe ich mich für eine Kalibrierung meiner Messanordnung mit Hilfe des Quecksilberspektrums entschieden.

Die Sensorbewegung ist bisher nur durch die einzelnen Schritte des Schrittmotors definiert. Hieraus kann man nun den Zusammenhang zwischen den gefahrenen Schritten und der dabei zurückgelegten Strecke, also die Strecke pro Schritt errechnen. Beginnen möchte ich mit der experimentellen Ermittlung.

Dabei werden verschieden lange Strecken mit dem Sensorschlitten abgefahren. Diese reichen von 255 bis 719 Schritte sowohl nach links, als auch nach rechts. Jeweils danach wird die abgefahrte Strecke mit einem Lineal abgemessen und auf einen halben Millimeter genau angegeben. Nach zehn Wiederholungen ergeben sich so folgende Ergebnisse in Zentimeter pro Schritt:

$$\frac{317}{8080}, \frac{101}{2550}, \frac{237}{5990}, \frac{791}{19960}, \frac{553}{13980}, \frac{263}{6640}, \frac{561}{14180}, \frac{557}{14080}, \frac{109}{2756}, \frac{142}{3595} \text{ cm/Schritt}$$

Bildet man nun aus den zehn Ergebnissen den Mittelwert, erhält man einen Wert von

$$\begin{aligned} & \frac{\left(\frac{317}{8080} + \frac{101}{2550} + \frac{237}{5990} + \frac{791}{19960} + \frac{553}{13980} + \frac{263}{6640} + \frac{561}{14180} + \frac{557}{14080} + \frac{109}{2756} + \frac{142}{3595} \right) \text{ cm/Schritt}}{10} \\ & = 0,03954 \text{ cm/Schritt} \\ & = 3,954 \cdot 10^{-4} \text{ m/Schritt} \end{aligned}$$

Der Wert der gefahrenen Strecke pro Schritt kann mit folgenden, festen Größen aber auch rein rechnerisch ermittelt werden:

Steigung der Schnecke:	5 mm pro Umdrehung
Schrittwinkel des Schrittmotors:	7,5° pro Impuls
1 Schritt im Programmablauf:	4 Impulse

Dies bedeutet also für die Rechnung:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Umdrehung} & \Leftrightarrow 12 \text{ Schritte} \\ 1 \text{ Umdrehung} & \Leftrightarrow 5 \text{ mm Steigung} \\ 12 \text{ Schritte} & \Leftrightarrow 5 \text{ mm Steigung} \\ 1 \text{ Schritt} & \Leftrightarrow \frac{5}{12} \text{ mm/Schritt} \approx 4,167 \cdot 10^{-4} \text{ m/Schritt} \end{aligned}$$

Es lässt sich eine erkennbare Abweichung zwischen dem experimentell und dem rechnerisch ermittelten Wert aufzeigen. Dabei beläuft sich der absolute Fehler auf

$$\frac{1}{2400} \text{ m/Schritt} - 3,954 \cdot 10^{-4} \text{ m/Schritt} \approx 2,127 \cdot 10^{-5} \text{ m/Schritt},$$

und als prozentualer Fehler zwischen den beiden Werten ergeben sich

$$\frac{3,954 \cdot 10^{-4} \text{ mm/Schritt} - \frac{1}{2400} \text{ m/Schritt}}{\frac{1}{2400} \text{ m/Schritt}} \cdot 100\% \approx -5,104\%,$$

einen, für einen Schulversuch, durchaus vertretbaren Wert. Aufgrund der in der Realität allerdings eindeutig stimmigeren Werte, entscheide ich mich das Ergebnis der experimentellen Ermittlung in dieser Arbeit weiter zu verwenden, also den Wert von $0,03954 \text{ cm/Schritt}$.

Zur weiteren Kalibrierung der jetzigen Zentimeter-Skala in eine Wellenlängen-Skala wird das Quecksilberspektrum mit seinen charakteristischen Spektrallinien verwendet. Die bekannten Spektrallinien geben die Möglichkeit auf eine mathematische Zusammenhangsbestimmung zwischen dem zurückgelegten Weg und der dorthin abgelenkten Wellenlänge. Dazu wird als Lichtquelle eine Quecksilberdampfampe verwendet und deren Spektrum zweimal abgefahren –den Ablauf am PC über die Programmierungssoftware RoboPro startend und verfolgend (siehe 4.5). Mit Hilfe der speicherbaren Listen der Sensorwerte vor jedem Schritt wird ein Zentimeter-Intensitäts-Diagramm erstellt.

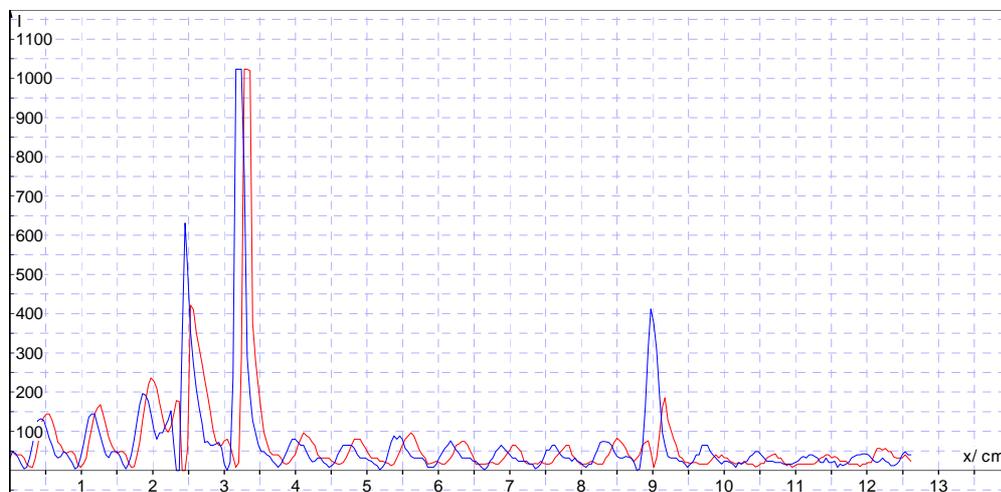


Abb. 19 x-I-Diagramm Hg-Spektrum (rot=Messung 1, blau=Messung 2)

Man erkennt die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, wobei die geringe x-Wert-Verschiebung durch den Schrittmotor bedingt ist.

Nun können den vier Maxima der Intensitätsverteilung vier Spektrallinien des Quecksilberspektrums zugeordnet werden. Dabei verwende ich die Messung 2, da dort deutlichere Ergebnisse erzielt wurden.

x/cm	Hg-Spektrallinie	λ /nm der Spektrallinien ²⁷
2,45	1. Linie - rot	578,55
3,20	2. Linie - grün	546,1
8,98	3. Linie - blau	435,8
12,53	4. Linie - violett	404,7

Lässt man mit Hilfe des Kalkulationsprogrammes Vivitab eine optimale quadratische Regression durch diese Wertepaare legen, erhält man den Zusammenhang zwischen der zurückgelegten Strecke x in Zentimetern und der dortigen Wellenlänge λ in Nanometer in der Funktion

$$\lambda = 1,33 \cdot x^2 - 36,6 \cdot x + 655$$

Diesen Funktionsterm kann man auf die folgenden Messungen übertragen und kann so der x-Richtung des Sensors eine λ -Skala versehen, um schließlich Diagramme der einzelnen Spektren zeichnen zu können.

4.5 Durchführung der Messungen

Mit der nun kalibrierten Anordnung können die Spektren der Leuchtdioden und der Glühwendel bei verschiedenen Temperaturen ausgemessen werden.

Dazu spannt man diese in der Versuchsanordnung vor dem Kohärenzspalt ein, so dass ihr Licht auf den Spalt gebündelt wird. Die Leuchtdioden werden mit einem Vorwiderstand von 100 Ohm betrieben und die Durchlassstromstärke direkt gemessen. Mit der Stromstärke wird deren Helligkeit so eingestellt, dass an der Messanordnung der Messbereich von 0

²⁷ [6], S. 88

bis 10 Volt möglichst gut ausgenutzt wird. Die Messungen werden bei völliger Dunkelheit durchgeführt, um sämtliches Störlicht zu vermeiden. Gestartet werden sie über das am PC laufende Programm. Der Sensor beginnt –durch den Schrittmotor angetrieben– in einzelnen kurzen Schritten an der Projektionsebene entlangzufahren, wobei der Ort des Sensors und dessen aktuell übermittelter Wert am Bildschirm angezeigt werden. Nachdem der Sensor wieder auf seine Startposition gefahren wurde, wird am PC die Liste der Sensorwerte zur weiteren Verarbeitung gespeichert. Eine Messung dauert so etwa 55 Sekunden.

Die einzelnen Leuchtdioden maß ich jeweils etwa viermal mit unterschiedlicher Helligkeit um den Messbereich jeweils optimal auszunutzen.

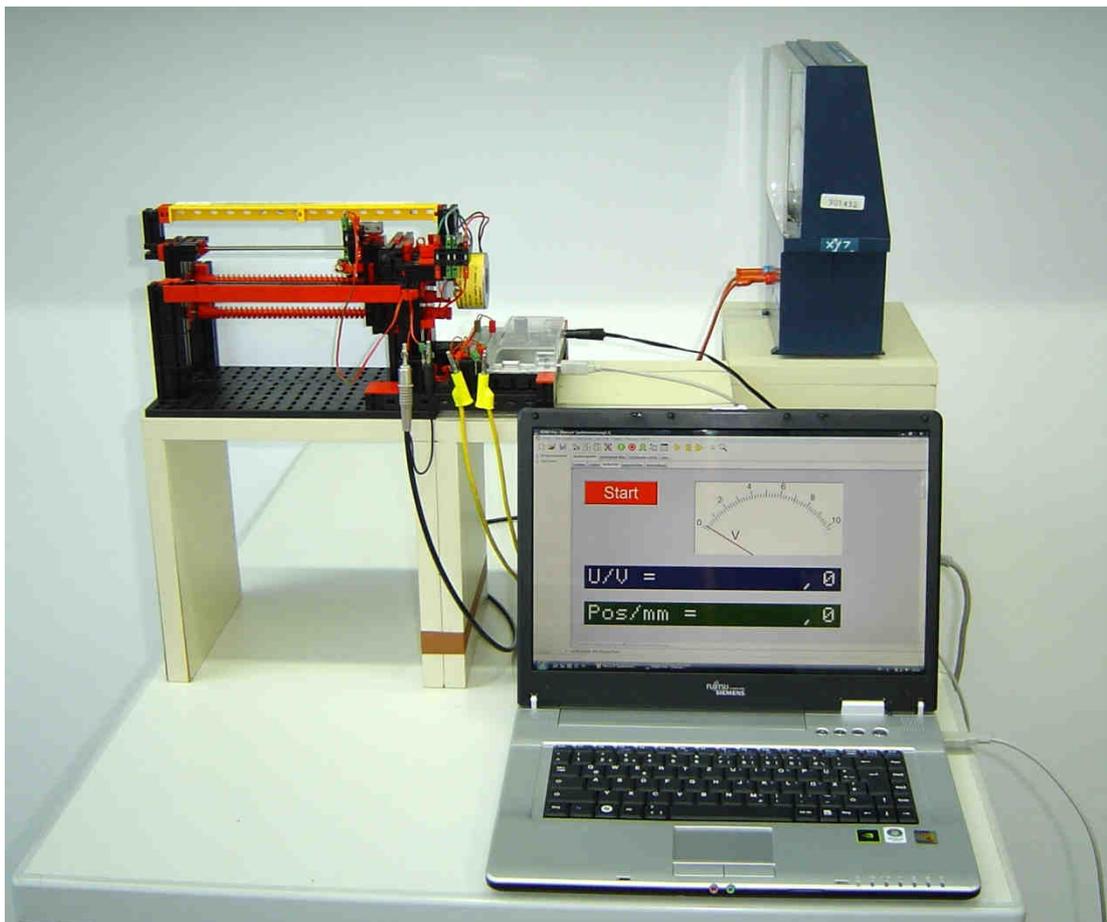


Abb. 20 PC mit Bedienfeld zur Durchführung der Messungen

Um die Spektren der Glühwendel bei verschiedenen Temperaturen messen zu können, muss der Abstand zwischen Geradsichtprisma und

Messanordnung verkürzt werden um das gesamte Spektrum zu erreichen. Dies fordert eine zweite Kalibrierung mit dem Quecksilberspektrum, woraufhin ebenfalls diese Spektren, wie oben, ausgemessen werden. Dabei wird von Messung zu Messung die angelegte Spannung an der Glühwendel variiert.

Mit dem Kalkulationsprogramm Vivitab, in das jeweils die Listen der Sensorwerte eingefügt werden, werden nun λ -I-Wertepaare erstellt, die in einem λ -I-Diagramm gezeichnet, die Spektren der Lichtquellen darstellen.

4.6 Ergebnisse

Die Intensitätswerte, welche für verschiedene Wellenlängen gemessen wurden, sind in folgenden Diagrammen unabhängig von der spektralen Empfindlichkeit der Fotodiode (siehe 5.3) aufgezeichnet.

Jede Fotodiode besitzt einen spektralen Wellenlängenbereich, in der sie einsetzbar ist. In diesem gibt es aber dennoch nur eine Wellenlänge, bei der die Fotodiode eine maximale Empfindlichkeit besitzt. Außerhalb dieser nimmt die spektrale Empfindlichkeit ab. Deshalb werden die Intensitätswerte der jeweiligen Wellenlängen genommen und durch die bei dieser Wellenlänge herrschende, prozentuale Empfindlichkeit der Fotodiode geteilt. Als Ergebnis erhält man die reellen Intensitäten der einzelnen Wellenlängen, unabhängig von der Empfindlichkeit der Fotodiode, mit der sie diese Wellenlängen registriert.

4.6.1 Spektren der Leuchtdioden

Im Folgenden sind die einzelnen Spektren der gemessenen Leuchtdioden aufgeführt. Ich verwendete dabei die Farben Rot, Orange, Gelb, Grün und Blau der Leuchtdioden. Man erkennt deutlich den schmalen Spektralbereich, den die farbigen Leuchtdioden, durch den Übergang von Elektronen aus dem Leitungsband in das Valenzband, emittieren (siehe 3.4).

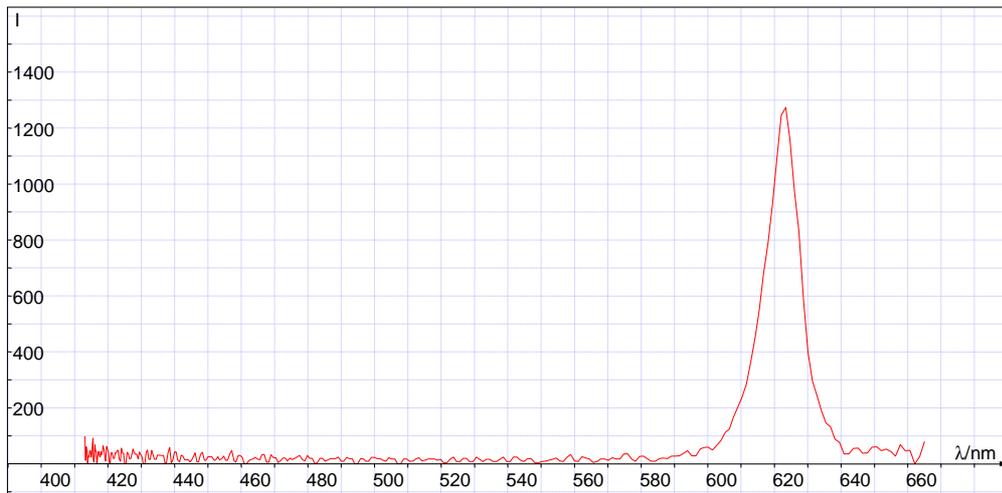


Abb. 21 Spektrum LED rot

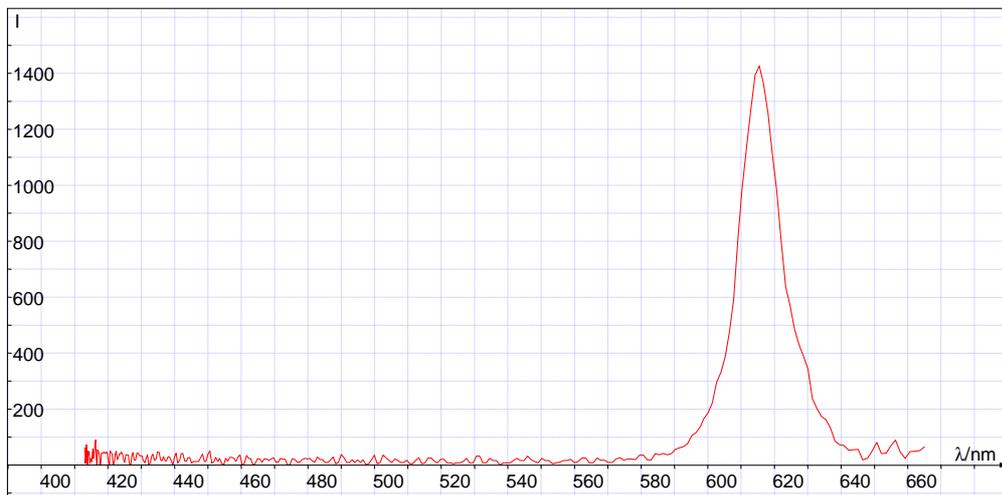


Abb. 22 Spektrum LED orange

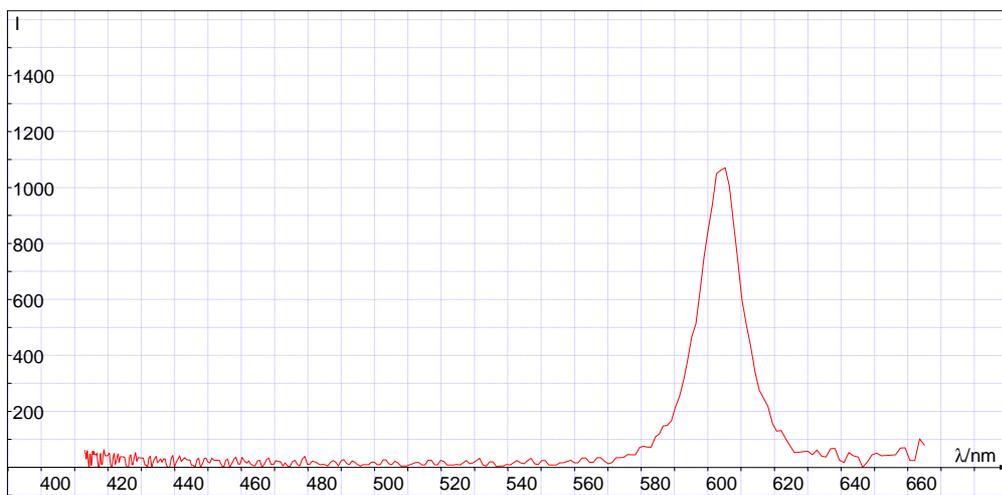


Abb. 23 Spektrum LED gelb

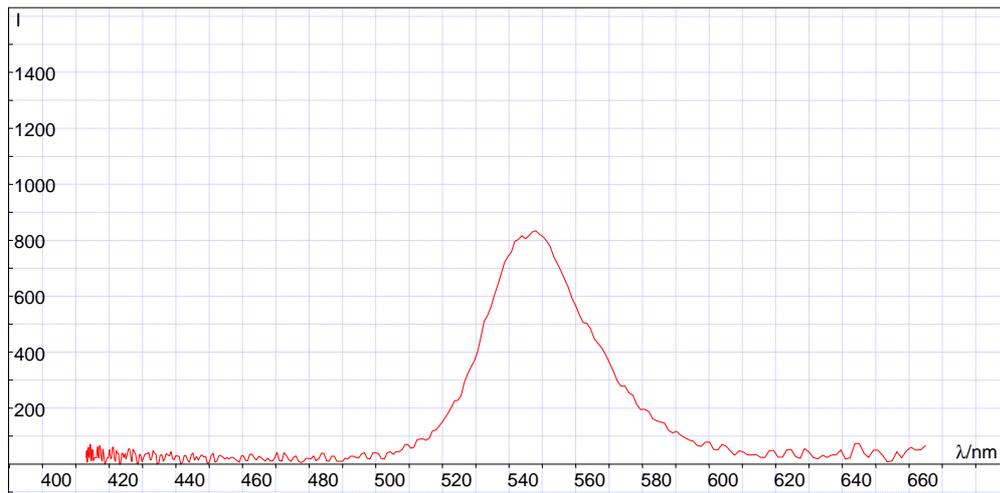


Abb. 24 Spektrum LED grün

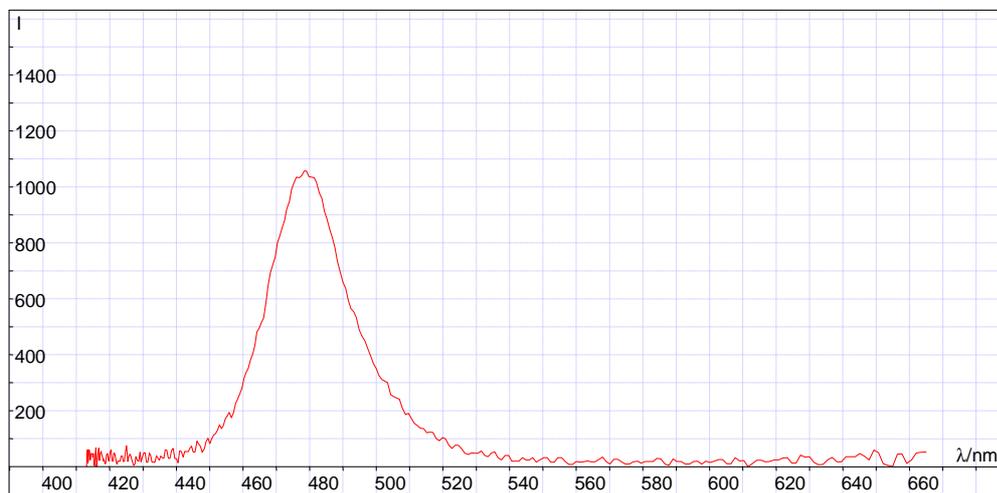


Abb. 25 Spektrum LED blau

Die verwendeten Leuchtdioden stellen die zurzeit erhältlichen Farben von Leuchtdioden dar, welche ihre Farbe ohne Leuchtstoffe erzeugen. Für Farben zwischen Gelb und Grün sind noch keine effektiven Halbleiter gefunden worden.²⁸

²⁸ [14]

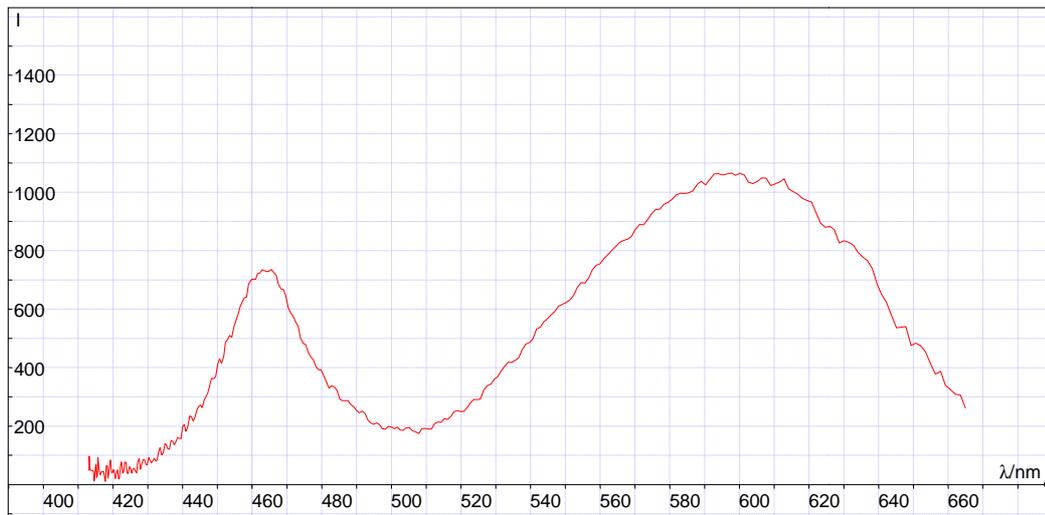


Abb. 26 Spektrum LED weiß

Da das kontinuierliche Spektrum einer weißen Leuchtdiode meist durch eine, mit einem gelben Leuchtstoff versehene, blaue Leuchtdiode erzeugt wird (siehe 3.4), kann man im obigen Spektrum deutlich noch den Blauanteil erkennen, den das erste Maximum repräsentiert.

4.6.2 Spektren einer Glühwendel bei verschiedenen Temperaturen

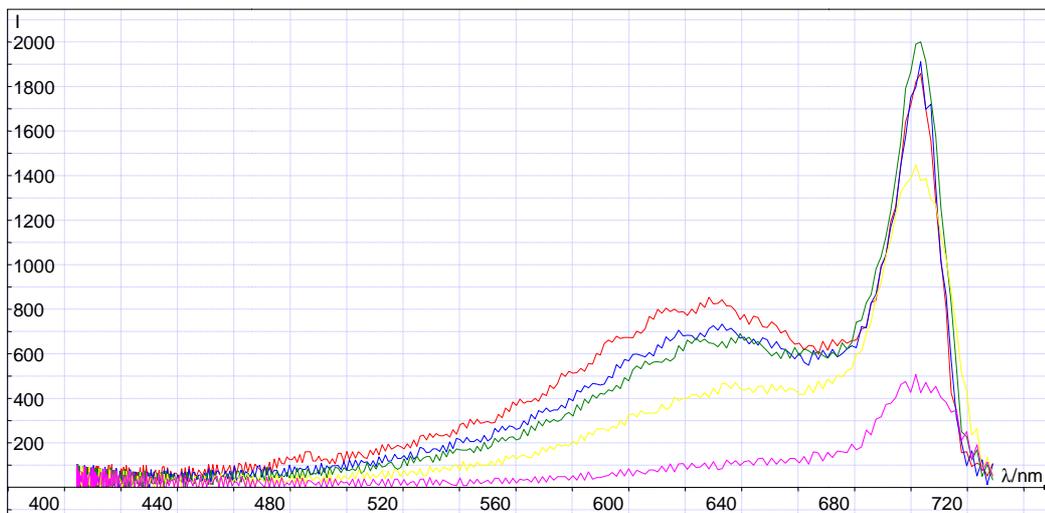


Abb. 27 Spektren Glühwendel

Dies sind die aufgenommenen Spektren einer Glühwendel, wobei jeweils die Versorgungsspannung variiert wurde.

Rote	Kurve	12 Volt
Blaue	Kurve	10 Volt
Grüne	Kurve	8 Volt
Gelbe	Kurve	6 Volt
Violette	Kurve	4 Volt

Das hohe und gleichbleibende Maximum im Bereich um 700 Nanometer ist mit der Literatur nicht erklärbar. Ebenso das Zusammenfallen der Kurven in einem Punkt, bei 729 Nanometer. Dieser Effekt muss durch einen oder mehrere Faktoren der Versuchsanordnung hervorgerufen werden. Um den Grund herauszufinden, müssten die Messungen zu allererst einmal mit einer anderen Fotodiode durchgeführt werden, um so diesen Faktor vergleichen zu können. Diese und andere Kontrollversuche führe ich in dieser Arbeit nicht mehr aus. Auf Grund der Kenntnis über Literaturwerte werde ich in folgenden Berechnungen das „Hauptmaximum“ vernachlässigen und arbeite mit den „Nebenmaxima“, welche im kürzeren Wellenlängenbereich liegen, da diese mit der Literatur vergleichbare Werte liefern.

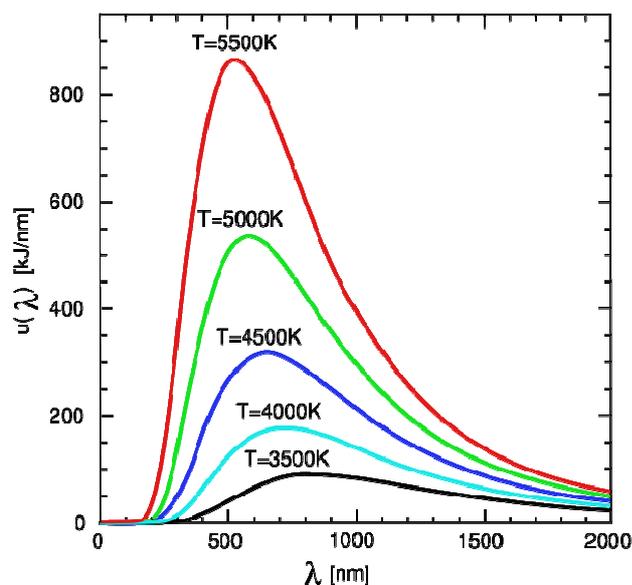


Abb. 28 Spektrum eines Schwarzen Körpers bei unterschiedlichen Temperaturen²⁹

²⁹ [29]

Die Intensitätsmaxima kann man nutzen, um mit Hilfe des Wienschen Verschiebungsgesetzes die Temperatur eines strahlenden Körpers über dessen Spektrum zu errechnen.

Dieses ist nach Wilhelm Wien benannt, und gibt an, bei welcher Wellenlänge λ_{max} ein schwarzer Körper, je nach seiner Temperatur, die größte Strahlungsleistung abgibt. Ein Schwarzer Körper emittiert ein kontinuierliches Spektrum. (siehe Abb. 28) Die Verteilung der Intensität wird durch das Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben. Diese Intensitätsverteilung weist ein deutliches Maximum auf, welches mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz berechnet werden kann.

Dieses lautet:

$$\lambda_{max} = \frac{2897,8 \mu m K}{T}$$

T = absolute Temperatur der strahlenden Fläche in K³⁰

Da eine Glühwendel in guter Näherung als ein Schwarzer Körper angenommen werden kann, besteht nun die Möglichkeit, durch ein gegebenes Intensitätsmaximum bei einer bekannten Wellenlänge, die ich aus dem Spektrum herauslese, die Temperatur der Glühwendel zu ermitteln.

$$T = \frac{2897,8 \mu m K}{\lambda_{max}}$$

Setzt man nun für λ_{max} die jeweiligen Wellenlängen ein, welche ein Intensitätsmaximum aufweisen, so erhält man in folgender Tabelle die Glühwendeltemperaturen für die jeweils angelegte Spannung.

U/V	λ_{max}/nm	T/K
12	628	4611
10	638	4543
8	639	4531
6	638	4543
4	651	4453

³⁰ [15]

4.7 Diskussion

Abschließen möchte ich meine Arbeit mit einer kritischen Betrachtung der Messergebnisse, unter Berücksichtigung der Fehlerquellen und möglicher Verbesserungen.

Betrachtet man die gemessenen Spektren der Leuchtdioden, kann man diese mit Literaturwerten vergleichen. Dazu nahm ich jeweils die Wellenlänge mit dem Intensitätsmaximum und verglich sie mit der Wellenlänge maximaler Intensität, die ich aus der Literatur entnahm.³¹

Dabei erhielt ich nach dem Vergleichen jeder Leuchtdiode bei der Messung des Spektrums der roten LED die größte prozentuale Abweichung mit

$$\frac{615 \text{ nm} - 630 \text{ nm}}{630 \text{ nm}} \cdot 100\% \approx -2,38\%,$$

einen durchaus annehmbaren Wert.

Die Messungen der restlichen Leuchtdioden weisen eine absolute Abweichung des Intensitätsmaximums von 2 bis 10 Nanometer auf, also einen prozentualen Fehler von unter 2%.

Bei den Spektren der Glühwendel erkennt man eine deutliche, oben genannte, Abweichung. Betrachtet man allerdings die Kurven ohne den jeweiligen Intensitätsausschlag im langwelligen Bereich, so stimmen sie sowohl im Intensitätsverlauf, als auch in der errechneten Temperatur dem Verhältnis entsprechend gut überein.³²

4.7.1 Fehlerquellen

Eine Abweichung von bis zu 5% ist in Schulversuchen durchaus vertretbar, da man nicht die Möglichkeit von absolut exakten Messungen der Forschung, beziehungsweise Wissenschaft besitzt. Nichts desto trotz gehe ich kurz auf die größten Fehlerquellen in meinem Versuchsaufbau ein.

³¹ [8], [9], [18]

³² [29]

a) Der Ausgangspunkt und der Schrittmotor

Der Ausgangspunkt des Sensorschlittens an der x-Achse meiner Messanordnung wird per Hand auf in etwa einen halben Millimeter eingestellt, was zu einer Ungenauigkeit führt. Wenn es zusätzlich bei der Impulsübertragung vom Interface auf den Schrittmotor dazu kommt, dass der Motor einen Schritt überspringt, kann so eine gewisse x-Wert-Verschiebung der Messwerte entstehen. Um dem zu begegnen, wurden sämtliche Messungen mehrmals durchgeführt um etwaige Verschiebungen auszusortieren.

b) Die Kalibrierung der x-Achse

Da bei der Kalibrierung der x-Achse das Quecksilberspektrum verwendet wurde, hatte man zwar deutliche Intensitätsmaxima, aber nur vier Wertepaare. Eine quadratische Regression –wie in dieser Arbeit– wird dem reellen Zusammenhang möglichst nahe kommen, darf aber selbstverständlich nicht als 100% angesehen werden. Dadurch wird in dem $\text{cm}-\lambda$ -Zusammenhang ebenso ein gewisser Fehler sein, der sich in obigen Fehlerrechnungen zeigt.

Der Grund für die Anomalie in den Glühwendelspektren müsste noch durch weitere Versuche mit verschiedenen, ausgewechselten oder veränderten Komponenten des Versuchsaufbaus aufgedeckt werden.

4.7.2 Mögliche Verbesserungen

- a) Der Ausgangspunkt des Sensorschlittens für jede neue Messung könnte beispielsweise durch eine Lichtschranke als Sensor eingestellt und so konstant gehalten und kontrolliert werden. Beim Antrieb bliebe nichts anderes übrig, als einen besseren und genaueren (Schrittweite) Schrittmotor zu verwenden, wie er zum Beispiel in Plottern oder Druckern Verwendung findet.
- b) Das Problem der Kalibrierung ließe sich durch die Verwendung mehrerer Spektrallampen verbessern, die mehrere Wertepaare zulassen um so eine genauere Kurve durch diese legen zu lassen und

die Abhängigkeit der Wellenlänge vom Ort genauer zu bestimmen. Dies war mir leider nicht möglich, da die mir zur Verfügung stehenden Spektrallampen eine zu geringe Helligkeit besitzen, als dass ich sie vernünftig in meine Kalibrierung mit einfließen hätte lassen können.

5 Anhang

5.1 Grafische Programmieroberfläche RoboPro

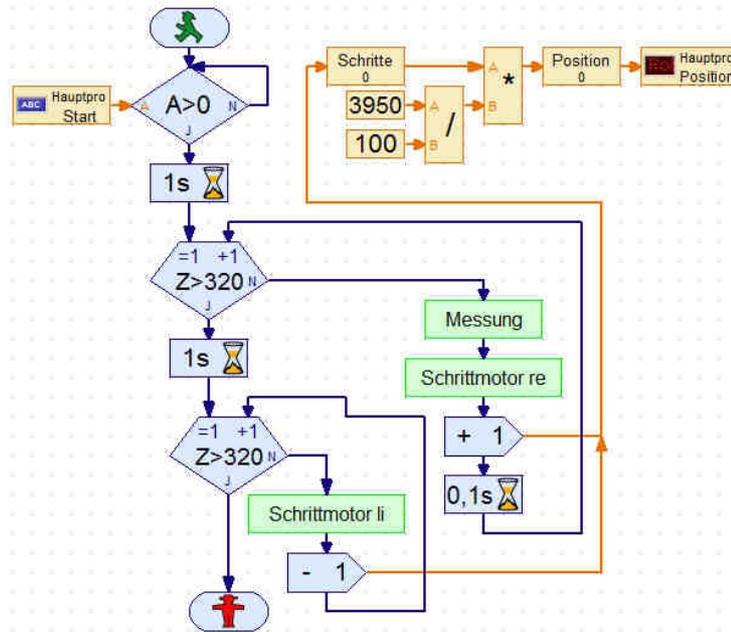


Abb. 29 Hauptprogramm

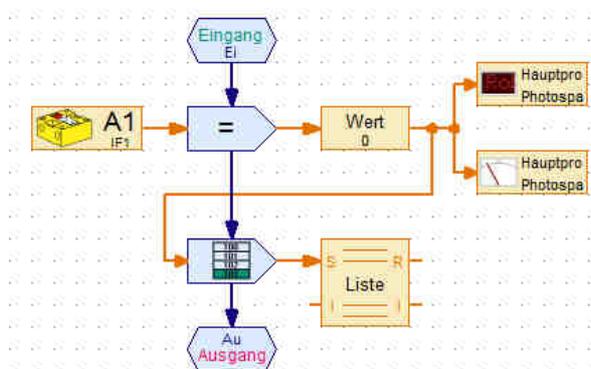


Abb. 30 Unterprogramm „Messung“

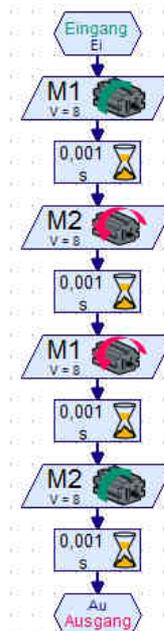


Abb. 31 Unterprogramm „Schrittmotor“

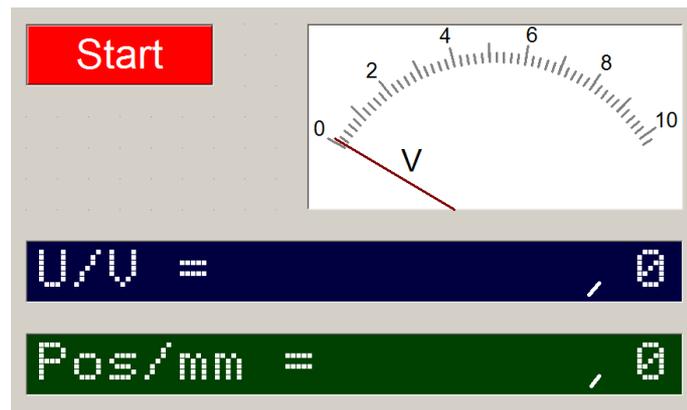


Abb. 32 Bedienfeld Hauptprogramm

Beschreibung des Programmablaufs:

Das Hauptprogramm beginnt mit einer Abfrage des im Bedienfeld des Hauptprogrammes positionierten Start-Knopfs. Wird dieser betätigt, geht das Programm in eine Zählschleife über, die jeden Durchgang mit einer +1 im internen Zählwerk registriert. Jeder Durchgang beginnt mit dem Unterprogramm „Messung“. In diesem wird der am Analogeingang 1 befindliche Sensor abgefragt und der gelieferte Wert sowohl in die Anzeigen (Schrift und Messgerät) des Bedienfeldes übertragen, als auch in einer Liste angefügt, die nach Programmende als csv.-Datei gespeichert werden kann. Danach erfolgt der Übergang in das Unterprogramm „Schrittmotor rechts“. In diesem werden durch abwechselndes Umpolen der beiden Spulen des Schrittmotors vier Impulse an den Motor geschickt, welche zu einer Drehung von $4 \times 7,5^\circ = 30^\circ$ der Motorachse führen. Dieser Ablauf der vier Impulse wird in dieser Arbeit als 1 Schritt bezeichnet. Durch den anschließenden +1-Befehl wird die derzeitige Position in Schritten, welche dann in Hundertstel-Millimeter umgerechnet wird, ebenfalls in eine Anzeige im Bedienfeld des Hauptprogrammes übertragen. Die 0,1 Sekunden Wartezeit bis zum Durchlaufen der nächsten Schleife dienen ausschließlich einer langsameren und saubereren Messung, da der Motor so geringer zum Überspringen von einzelnen Schritten neigt. Nach 320 Schritten, was einer Strecke von 12,65 Zentimetern entspricht, wird der Sensor durch eine Schleife mit ebenfalls 320 Wiederholungen des Unterprogramms „Schrittmotor links“ wieder an seine Startposition gefahren, während die Position stetig aktualisiert wird. Hier endet das Programm nach Durchlaufen und Aufnehmen eines Spektrums.

5.2 Geometrie Versuchsanordnung

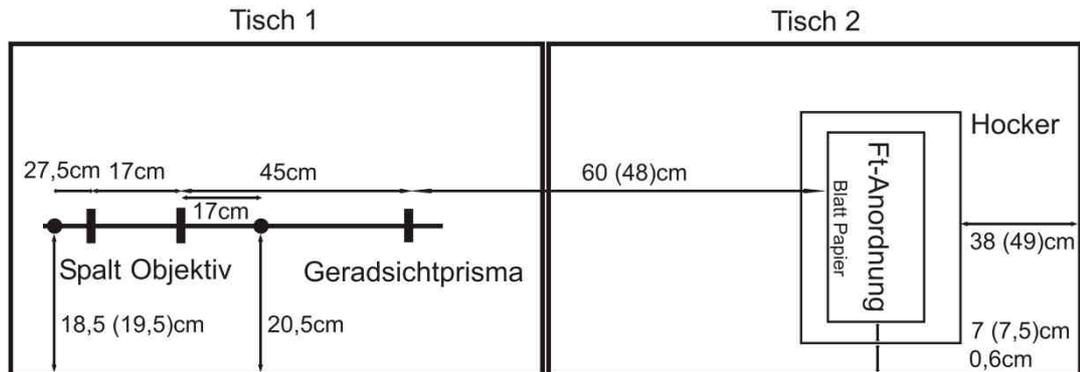


Abb. 33 Geometrie der Versuchsanordnung (Die in Klammern gesetzten Zahlen stellen die für die zweite Kalibrierung geänderten Abstände dar)

5.3 Bei Messungen verwendete Objekte

Als **Lichtquellen** verwendete ich folgende Lampen:

- (o.A.) LED-Lampe gelb 10mm
- (o.A.) LED-Lampe orange 10mm
- (o.A.) LED-Lampe rot 10mm
- Nichia LED gruen 5mm 16000mcd Typ 15°
- Nichia LED blau 5mm 4800mcd Typ 15°
- Phywe Glühlampe
- Phywe Quecksilberdampf Lampe (Kalibrierung)

Beim Versuchsaufbau benutzte ich folgende **optischen Geräte**:

- Phywe verstellbarer Kohärenzspalt
- Phywe Objektiv
- Phywe Geradsichtprisma
Querschnitt (mm): 30x30
Länge (mm): 106
2x Kronglas, 1x Flintglas

Als **Lichtsensor** kam eine Fotodiode zum Einsatz:

Siemens BPW21 Silizium-Fotodiode für den sichtbaren Spektralbereich

- Wellenlänge der max. Fotoempfindlichkeit: $\lambda_{S \max} = 550 \text{ nm}$
- Spektraler Bereich der Fotoempfindlichkeit $S = 10 \% \text{ von } S_{\max}$:
 $\lambda = 350 \dots 820 \text{ nm}$ ³³

³³ [7]

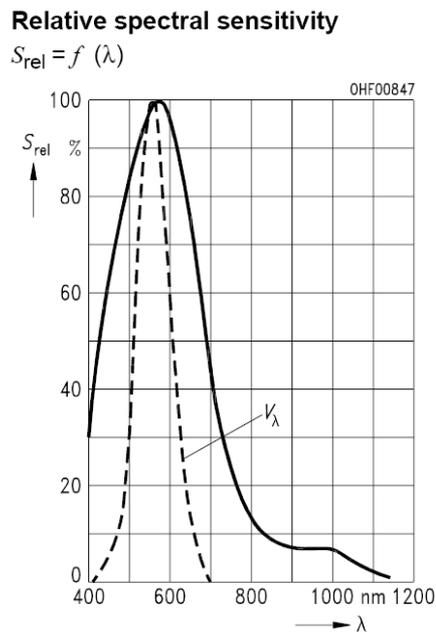


Abb. 34 Spektrale Empfindlichkeit der Fotodiode³⁴

Messverstärker:

Verstärkung: 1 Volt = 10^{-8} Ampere

Messanordnung:

- Fischertechnik
- Crouzet Schrittmotor (P=7,5W; R=10,7Ω; Schrittweite = 7,5°)
- Fischertechnik Interface

5.4 Verwendete Software

Als Hilfsmittel zur Ausführung der Messungen und der Verarbeitung der Ergebnisse habe ich folgende Software verwendet:

- Microsoft Word 2007
- Microsoft Excel 2007
- Vivitab 2000
- Fischertechnik RoboPro

³⁴ Aus [7], S. 4

6 Quellenverzeichnis

Printmedien:

- [1] Richard Lenk, Walter Gellert, Fachlexikon ABC Physik, Frankfurt 1989, Band 1+2
- [2] Horst Hänsel, Werner Neumann, Physik – Elektrizität, Optik, Raum und Zeit, Heidelberg, Berlin, Oxford 1993
- [3] Lexikon-Institut der Bertelsmann Lexikon Verlag GmbH, Bertelsmann Neues Lexikon, Gütersloh 1995, Band 9
- [4] Arbeitsblatt Huygens'sche Prinzip, AB_SW4a_Huygens.doc, Unterricht 12/2
- [5] Fischertechnik, Bedienungsanleitung Robo Interface
- [6] Dr. Anton Hammer, Dr. Hildegard Hammer, Dr. Karl Hammer, Physikalische Formeln und Tabellen, München 2005
- [7] Datenblatt zur Fotodiode Siemens BPW21 (Dokument 152977-da-01-ml-Photo-Diode_BPW21_de-en.pdf) bei www.conrad.de
- [8] Datenblatt zur Nichia LED blau 5mm 4800mcd Typ 15° (Dokument 187503-da-01-en-LED_BLAU_5MM_3460_MCD_TYP_15.pdf) bei www.conrad.de
- [9] Datenblatt zur LED gruen 5mm 16000mcd Typ 15° (Dokument 153921-da-01-en-LED_5mm_gruen.pdf) bei www.conrad.de

Websites:

- [10] Wikipedia – Die freie Enzyklopädie, Snelliussches Brechungsgesetz
URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Brechungsgesetz>
[Abrufdatum: 14.01.08]
- [11] Wikipedia – Die freie Enzyklopädie, Prisma (Optik)
URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Prisma_%28Optik%29
[Abrufdatum: 14.01.08]
- [12] DoroTek, Datenblätter Prismen, PDF 6. Prismen
URL:
<http://www.dorotek.de/cms/upload/pdf/optik/deutsch/Prismen.pdf>
[Abrufdatum: 14.01.08]
- [13] Wikipedia – Die freie Enzyklopädie, fischertechnik

URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Fischertechnik>

[Abrufdatum: 14.01.08]

- [14] Grundlagenwissen – Leuchtdioden LED-INFO: Das Leuchtdioden-Portal

URL: <http://www.led-info.de/grundlagen/leuchtdioden.html>

[Abrufdatum: 14.01.08]

- [15] Wikipedia – Die freie Enzyklopädie, Wiensches Verschiebungsgesetz

URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Wienske_Verschiebungsgesetz

[Abrufdatum: 14.01.08]

- [16] Elektronik-Kompodium – Fotodiode

URL: <http://www.elektronik-kompodium.de/sites/bau/0111021.htm>

[Abrufdatum: 14.01.08]

- [17] Uni Hannover – Versuche – PDF Fotoeffekt

URL: <http://www.iqo.uni-hannover.de/ap/versuche/D07b.pdf>

[Abrufdatum: 14.01.08]

- [18] Taunuslicht – Technische Informationen – PDF Single-LED

URL: <http://www.taunuslicht.de/content/pdf/Single-LED.pdf>

[Abrufdatum: 15.01.08]

Abbildungen:

- [19] Richard Lenk, Walter Gellert, Fachlexikon ABC Physik, Frankfurt 1989, Band 2, S.906

[20] <http://de.wikipedia.org/wiki/Brechungsgesetz>

[21] <http://de.wikipedia.org/wiki/Brechungsgesetz>

[22] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/06/Prism_rainbow_schema.png

[23] Horst Hänsel, Werner Neumann, Physik – Elektrizität, Optik, Raum und Zeit, Heidelberg, Berlin, Oxford 1993, S. 419

[24] Horst Hänsel, Werner Neumann, Physik – Elektrizität, Optik, Raum und Zeit, Heidelberg, Berlin, Oxford 1993, S. 421

[25] <http://www.dorotek.de/cms/upload/pdf/optik/deutsch/Prismen.pdf> +

<http://leifi.physik.uni->

muenchen.de/web_ph09/versuche/13newton/newton1/newton1.htm

- [26] <http://www.led-info.de/grundlagen/leuchtdioden/halbleiterwerkstoffe.html>
- [27] <http://www.led-info.de/grundlagen/leuchtdioden/halbleiterwerkstoffe.html>
- [28] <http://www.iqo.uni-hannover.de/ap/versuche/D07b.pdf>
- [29] http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Wiens_law.svg

Ich erkläre hiermit, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Danken möchte ich dabei meinem Kursleiter, Herrn Kühlewind, für seine stetige, sehr hilfreiche Unterstützung!

Berchtesgaden, den 25. Januar 2008