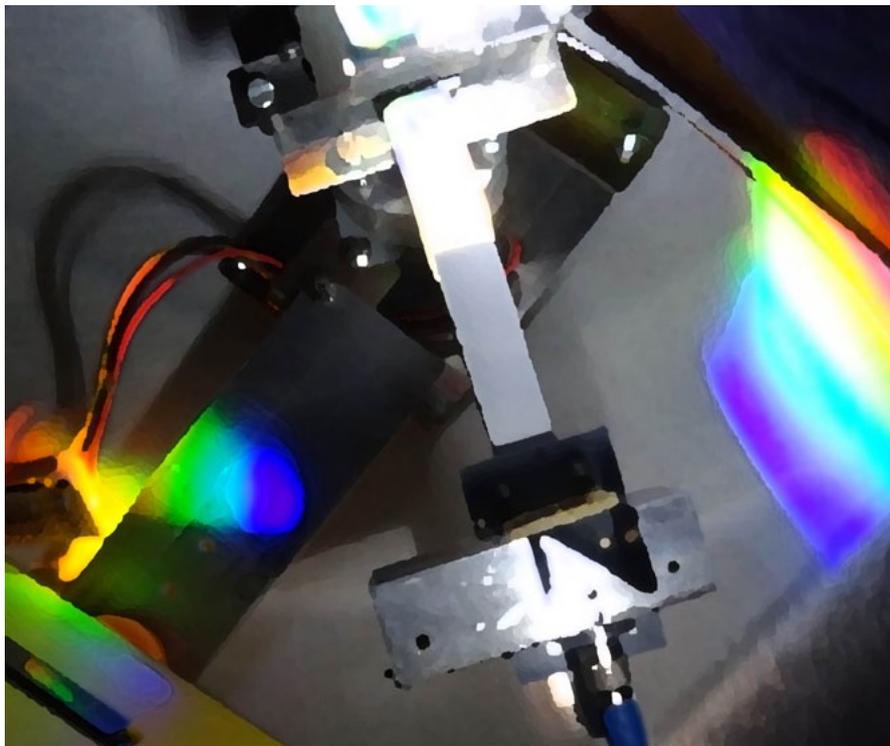


Selbstgebautes PIC-gestütztes Spektrometer



Wettbewerb „Jugend Forscht“ 2012

Lucas Jürgens (16)

Arbeitsgemeinschaft „Jugend Forscht“
des Christian-Gymnasiums Hermannsburg
Leitung: StD Thomas Biedermann

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen	1
1.1 Was ist ein Spektrometer?	1
1.2 Beugung und Interferenz am Gitter	1
2 Optik	2
2.1 Das Gitter	2
2.2 Aufbau	3
2.3 Lichtwellenleiter	4
2.4 Der CCD-Sensor	4
2.5 Der Spalt	4
2.6 Bestimmen der Wellenlängen	5
3 Elektronik	6
3.1 Hauptplatine	6
3.2 CCD-Platine	6
3.3 Schrittmotor-Treiber	8
4 Software	8
4.1 PIC	8
4.1.1 Programmstruktur	8
4.1.2 Ansteuerung des RAM-Speichers	8
4.1.3 Ansteuerung des CCD-Sensors	9
4.2 PC	10
5 Praxis	11
5.1 Messungen	11
5.1.1 Helium-Neon- und Halbleiterlaser	11
5.1.2 Leuchtstofflampe	12
5.1.3 Grüner Halbleiterlaser	13
5.1.4 Weiße LED	13
5.1.5 Blaue LED	13
5.2 Ausblick	14
6 Quellen, Literatur, Werkzeuge	15
7 Danksagung	15

1 Grundlagen

Ziel meines Projektes ist es, ein digitales Spektrometer zu bauen, welches gute Messergebnisse liefert. Dazu wird sowohl ein geeigneter optischer Aufbau konstruiert als auch eine passende Elektronik entworfen und eine Software entwickelt. Zur Erprobung des Spektrometers werden geeignete Lichtquellen analysiert.

1.1 Was ist ein Spektrometer?

Ein Spektrometer ist ein Apparat, mit dem die verschiedenen Farben des sichtbaren Lichtes beobachtet werden können. Dafür zerlegt es das Licht durch dispersive Komponenten nach Wellenlängen und bildet das dadurch entstandene Spektrum so auf eine Bildebene ab, dass jeder Wellenlänge später eine Intensität zugeordnet werden kann. Ich werde in diese Bildebene einen CCD-Bildsensor bringen, sodass das Spektrum direkt digitalisiert und dann ausgewertet werden kann.

Ein Spektrometer kann z.B. zur Analyse von fluoreszierenden Stoffen dienen. Da das bei Fluoreszenz abgestrahlte Spektrum für jeden Stoff spezifisch ist, kann man beispielsweise Leuchtstoffe in Leuchtmitteln wie Straßenlaternen oder Leuchtstoffröhren eindeutig identifizieren. Des Weiteren lassen sich Absorptionsspektren von verschiedenen lichtdurchlässigen Stoffen oder Lösungen erstellen, sodass man auf die chemische Zusammensetzung schließen kann.

Bei Spektrometern kann u.a. zwischen zwei Arten unterschieden werden: Den Prismen- und Gitterspektrometern. Prismenspektrometer besitzen ein auf Prismen aus Glas basierendes System als dispersives Element. Diese Dispersion allerdings ist nicht linear und nimmt zu den höheren Wellenlängen hin ab. Für die spektrale Zerlegung des Lichtes beim Gitterspektrometer hingegen wird ein Beugungsgitter verwendet. Hier kann die Dispersion eindeutig berechnet werden. Ich habe mich für den Bau eines Gitterspektrometers entschieden.

Zu den wichtigen Kenndaten eines Spektrometers gehören der messbare Wellenlängenbereich und das Auflösungsvermögen.

1.2 Beugung und Interferenz am Gitter

Ein optisches Gitter besteht aus sehr kleinen Elementen, die eine regelmäßige Struktur bilden und das einfallende Licht entweder reflektieren oder absorbieren. Bei den reflektierenden Elementen handelt es sich um Reflexionsgitter, bei absorbierenden Elementen um Transmissionsgitter. Bei Letzterem könnte man somit von kleinen Spalten oder und beim anderen von Spiegeln reden, die in regelmäßigen Abständen angeordnet sind. Um die Beugung am Gitter zu beschreiben, betrachten wir zuerst einen Doppelspalt (Abb. 1). Die wichtigste Größe des Doppelspaltes ist der Spaltabstand d . Das Licht der entstehenden Wellensysteme fällt auf einen

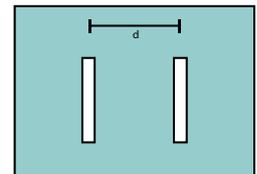


Abb. 1: Doppelspalt

Schirm. Je nach Überlagerung der Wellen an den Punkten des Schirms entstehen Orte an denen destruktive- (Dunkelheit) und konstruktive Interferenz (Helligkeit) auftritt. Um die zu erwartenden Überlagerungen zu berechnen, betrachtet man die Wegstrecken, die die Wellen hinter den Spaltöffnungen bis zum Ort auf dem Schirm zurücklegen (Abb. 2). Die Weglänge des einen Spaltes (S_2) ist hier länger als die Wegstrecke der Wellen des anderen Spaltes (S_1). Wenn der hierdurch entstandene Gangunterschied Δs einem ganzzahligen Vielfachen der bekannten Wellenlänge λ entspricht, erhält man konstruktive Interferenz, unterscheiden sie sich um eine halbe Wellenlänge, so erhält man destruktive Interferenz, dazwischen erhält man eine mehr oder minder starke Auslöschung. Für konstruktive Interferenz muss also gelten:

$$\Delta s = (s_2 - s_1) = n \cdot \lambda$$

Da die Entfernung des Schirms zum Spaltabstand sehr groß ist, verlaufen die beiden Lichtwege S_1 und S_2 angenähert parallel. Beide Lichtwege schließen nun mit der optischen Achse den Winkel φ ein. Dieser Winkel findet sich auch in dem Dreieck wieder, das aus der Strecke Δs , dem Abstand d und der Senkrechten auf S_1 und S_2 besteht. Somit gilt:

$$\Delta s = d \cdot \sin(\varphi)$$

Und damit für konstruktive Interferenz auch:

$$\sin(\varphi) = \frac{n \cdot \lambda}{d} \quad (1)$$

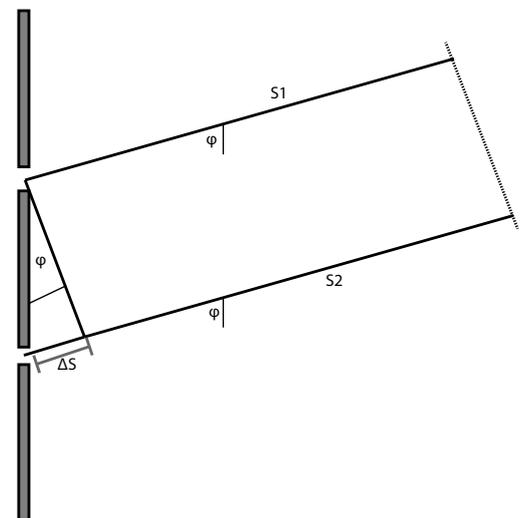


Abb. 2: Parallele Lichtwege hinter dem Doppelspalt

Die natürliche Zahl n wird dabei als Ordnung der Interferenz bezeichnet. Es gibt mehrere Ordnungen, da das ganzzahlige Vielfache einer Wellenlänge mit steigendem Winkel φ mehrmals eintreten kann.

Betrachtet man den Lichtweg zum Schirm, fallen S_1 und S_2 zusammen, da $d \ll l$. (Abb. 3) Es gilt dann:

$$\tan(\varphi) = \frac{a}{l} \quad (2)$$

Mithilfe dieser Gleichungen kann man mit den Umkehrfunktionen von Tangens und Sinus alle wichtigen Größen berechnen. So könnte man z.B. den erwarteten Abstand eines Lichtpunktes auf dem Schirm bei bekanntem Spaltabstand d für eine Wellenlänge bestimmen.

Diese Gleichungen darf man Intensitätsüberlegungen zufolge auf zweidimensionale Gitter übertragen, wenn sie mehr als ungefähr 100 solcher Spalte besitzen.

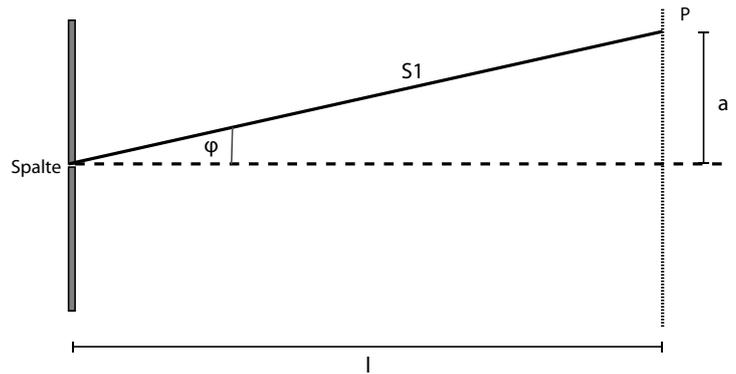


Abb. 3: Lichtweg von den Spalten zum Schirm

2 Optik

2.1 Das Gitter

Für meinen Aufbau verwende ich ein reflektierendes Konkavgitter. Dieses Gitter hat eine konkave Form wie ein Hohlspiegel, sodass es einfallendes Licht nicht nur beugt, sondern auch abbilden kann. Durch diese gekrümmte Form würde sich mit zunehmendem Abstand von der Spiegelmitte für senkrecht einfallendes Licht allerdings auch die Gitterkonstante ändern, weswegen die Rillenordnung von dem Hersteller so korrigiert wurde, dass trotzdem ein korrektes Spektrum erzeugt wird. Während bei Plangittern abbildende Optiken in Form von Hohlspiegeln oder Sammellinsen benötigt werden, kommt man bei Konkavgittern komplett ohne diese aus. Das hat nebenbei auch den Vorteil, dass das Spektrum nicht durch Absorption im Glas der Linsen verfälscht wird. Da dem Gitter nun auch eine abbildende Funktion zukommt, ist es für den gesamten geometrischen Aufbau des Spektrometers maßgebend. Um den Aufbau zu berechnen, müssen die daher optischen Parameter des Gitters genau bestimmt werden.

Um die Brennweite des sphärischen Hohlspiegels zu bestimmen, wird ein Aufbau, wie in Abbildung 5 verwendet. Dabei wird der Strahl eines Lasers mithilfe einer Sammellinse großer Brennweite über eine große Strecke aufgeweitet, sodass das Gitter vollständig ausgefüllt ist.

Nachdem die optische Achse parallel zu dem näherungsweise parallelen Strahl des Lasers ausgerichtet ist, kann der Brennpunkt mithilfe eines weißen Blattes bestimmt werden. Es ergibt sich eine Brennweite von 58 mm (+/- 2mm). Der Kreisradius eines Hohlspiegels beträgt das Doppelte seiner Brennweite, folglich 116 mm.

Ein weiterer wichtiger optischer Parameter des Gitters ist der spezifische Spaltabstand d . Er lässt sich aus dem beobachteten Beugungsbild beim Beleuchten des Gitters mit einer monochromatischen Lichtquelle berechnen. Dazu dient Versuchsaufbau (Abbildung 6):



Abb. 4: Gitter in Halterung (oben), darunter einstellbare Plattform, darunter Schrittmotor montiert auf einer weiteren Plattform

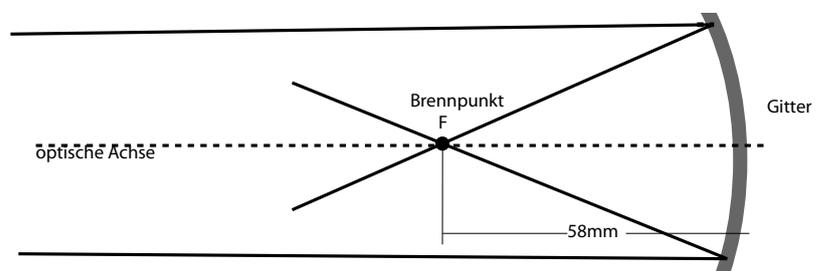


Abb. 5: Strahlengänge des Versuchsaufbaus zur Bestimmung des Brennpunktes

In die optische Achse des Gitters wird ein möglichst monochromatischer Laser gebracht. Ich verwende hierzu einen Helium-Neon-Laser. Senkrecht zur optischen Achse wird nun ein weißes Blatt gebracht und der Abstand l vom Gitter und der Abstand a vom Leuchtpunkt der 1. Ordnung zur optischen Achse ausgemessen. Nach Gleichung (2) aus Kapitel 1.2 ergibt sich bei verschiedenen Schirmabständen ein Durchschnittswinkel von 49° .

Mit Gleichung (1) kann nun d bestimmt werden:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{a}{l}\right)$$

$$d = \frac{n \cdot \lambda}{\sin(\varphi)} \quad d = \frac{1 \cdot 632,816 \text{ nm}}{\sin(49^\circ)} = 838 \text{ nm}$$

Das Gitter hat also einen „Spaltabstand“ von 838 nm und somit eine Gitterkonstante von 1192 mm^{-1} (Gitterspalte pro Millimeter).

2.2 Aufbau

Zum Einspeisen des Lichtes in das Spektrometer verwende ich einen ca. 2 m langen Lichtwellenleiter (LWL) (a). Dies hat den Vorteil, dass nur die Spitze des LWLs und nicht der ganze Aufbau in den Strahlengang der Probestrahlung gebracht werden muss. Während das eine Ende die Probestrahlung aufnimmt, ist das andere Ende des Lichtwellenleiters über einen speziellen Stecker mit dem Aluminiumblock (b) verbunden. Weil das Licht aus dem LWL einen relativ großen Austrittswinkel hat, wird es von einer Kugellinse gesammelt und auf den Spalt fokussiert, der hinter der Kugellinse am Aluminiumblock angebracht ist. Beide Elemente befinden sich immer auf der optischen Achse des Gitters, da sie über ein Aluminiumprofil mit der einstellbaren Plattform von diesem fest verbunden sind. Das Licht vom Spalt fällt dann auf das Gitter (c), wo es je nach Wellenlänge unterschiedlich gebeugt wird und durch die Hohlspiegelform auf den Bildsensor (d) abgebildet wird.

Um verschiedene Wellenlängenbereiche selektieren zu können, ist das Gitter auf einem Schrittmotor montiert. Dieser kann das Gitter zusammen mit dem Spalt reproduzierbar schrittweise um genau $7,5^\circ$ um den Gitterscheitelpunkt drehen. An der Drehachse befindet sich ein Endpunktaster, der dann schaltet, wenn die nahste Position zum Steuergerät erreicht ist.

Die Strahlengänge eines Hohlspiegels lassen sich auf gleiche Weise wie die einer Sammellinse berechnen. Wenn die Gegenstandsweite g (Entfernung Spalt - Gitter) und die Bildweite g (Entfernung Sensor - Gitter) der doppelten Brennweite f entsprechen, dann ist die Bildgröße B (Abbildung auf den Sensor) gleich der Gegenstandsgröße G (Spaltbreite). Beide Abstände entsprechen somit dem Krümmungsradius des Gitters von 116 mm.

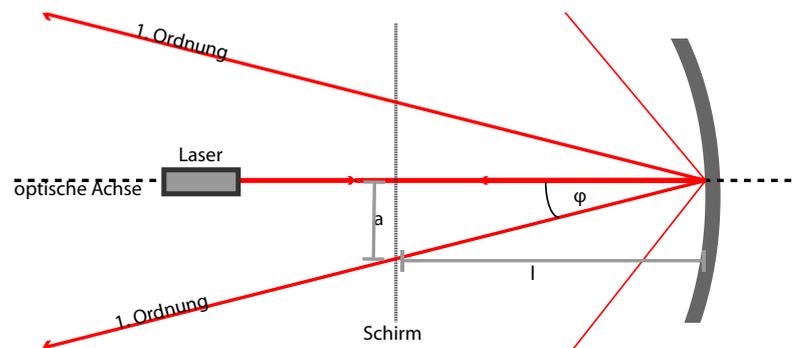


Abb. 6: Strahlengänge des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Spaltabstände d des Gitters

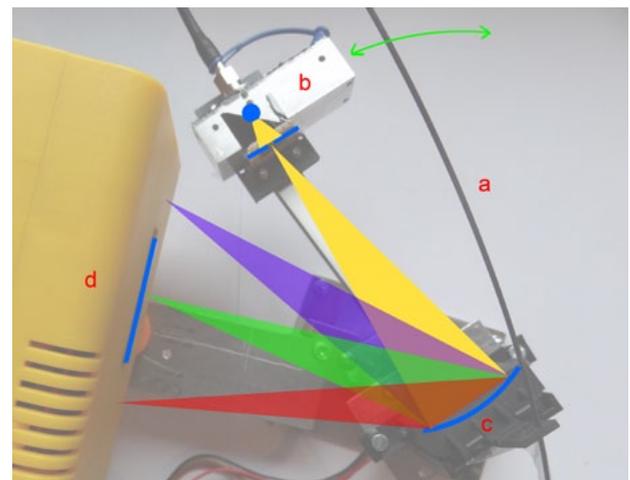


Abb. 7: Optischer Aufbau von oben. a: Lichtwellenleiter. b: Anschluss für Lichtwellenleiter mit Kugellinse zur Entkopplung und anschließendem Spalt. c: Gitter. d: Bildfläche des CCD-Sensors im Steuergerät



Abb. 8: Komplettes Spektrometer im Koffer-Gehäuse

Der gesamte Aufbau ist fest in einem Aluminiumkoffer eingebaut (Abb. 8), wodurch der Aufbau leicht durch zuklappen der anderen Koffer hälfte abgedunkelt werden kann, was eine schnelle iterative manuelle Justierung der Optik und einfaches Transportieren des Aufbaus ermöglicht. Mithilfe einer geeigneten Schraubverbindung wird das Ende des LWL durch die Kofferwand nach außen geführt, wo ein weiterer LWL mit einem Stecker angeschlossen werden kann. An der selben Seite befindet sich auch eine Hohlsteckerbuche für die Spannungsversorgung und eine PC-Schnittstelle zur Datenübertragung.

2.3 Lichtwellenleiter

Der von mir verwendete LWL ist eine sogenannte Multimodenfaser mit einem Kern aus Quarzglas und einem Durchmesser von 600 µm.

Strahlenoptisch wird das Licht folgendermaßen geführt (Abb. 9): Mantel und Kern besitzen einen unterschiedlichen Brechungsindex, wodurch bis zu einem maximalen Eintrittswinkel Totalreflexion stattfindet und der Strahl innerhalb des Leiters reflektiert wird. Wird dieser Winkel überschritten, wird der Strahl im Mantel absorbiert. Es ergibt sich somit ein Akzeptanzwinkel, der nicht überschritten werden darf. LWL haben vor allem im UV-Bereich materialspezifische Absorptionsbanden, die in genaueren Messungen berücksichtigt werden sollten.

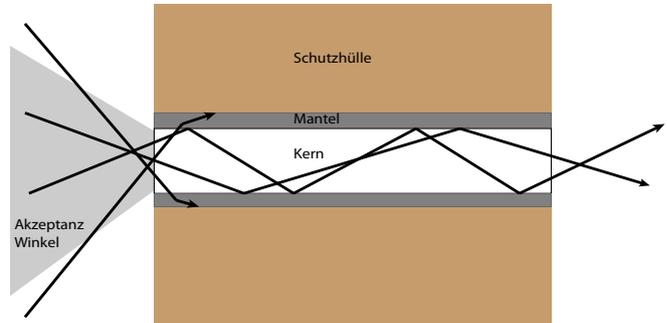


Abb. 9: Lichtführung in einer Multimode Glasfaser

2.4 Der CCD-Sensor

Zum Aufzeichnen des Spektrums verwende ich den CCD-Sensor TCD1201 der Firma Toshiba. Es handelt sich hierbei um einen Single-Line-Sensor, da er nur über eine 2,86 cm lange Zeile mit 2048 Bild-Elementen verfügt. Jedes Element ist 14 µm breit und 200 µm hoch. Die Empfindlichkeit kann durch die frei einstellbare Belichtungszeit sehr hoch sein.

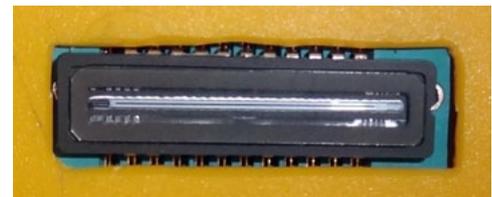


Abb. 10: CCD-Sensor eingebaut in Steuergerät

2.5 Der Spalt

Die Aufgabe des Spaltes ist es, eine scharfe optische Abbildung zu erzeugen. Die Spaltbreite gibt also vor, wie genau sich das Spektrum mit dem Hohlspiegel maximal auf dem Sensor abbilden lässt. Da die Vergrößerung der Abbildung des Spaltes auf den Sensor bei der gewählten Anordnung im Maßstab 1:1 erfolgt, wäre eine Spaltbreite sinnvoll, die der Breite eines Bildelements von 14 µm entsprechen würde.

Da ich über keinen so kleinen Spalt verfügte, fertigte ich selbst einen durch dichtes Anordnen und Aufkleben der schmalen Schneidflächen zweier Rasierklingenstücke an. Die Schneidflächen von Rasierklingen sind sehr eben und eignen sich deswegen hervorragend. Da das Einstellen einer bestimmten Spaltbreite so nicht möglich ist, habe ich diese hinterher durch ein Beugungsexperiment bestimmt. Dazu dient folgender Versuchsaufbau: (Abbildung 12)



Abb. 11: Verwendeter Spalt

Der Spalt wird mit einem Laser beleuchtet und das entstehende Beugungsbild auf einem Schirm beobachtet.

Man wählt dabei einen möglichst großen Schirmabstand und misst die Entfernung des Lichtpunktes des 5. Beugungsmaximums zur optischen Achse, um den Ablesefehler gering zu halten. Als Lichtquelle wurde diesmal ein normaler roter Laserpointer mit einer Wellenlänge von ca. 670 nm verwendet. Da das Beugungsbild eines Einfachspaltes im Gegensatz zum Doppelspalt wesentlich schwieriger zu erklären ist, muss die Spaltbreite anders berechnet werden:

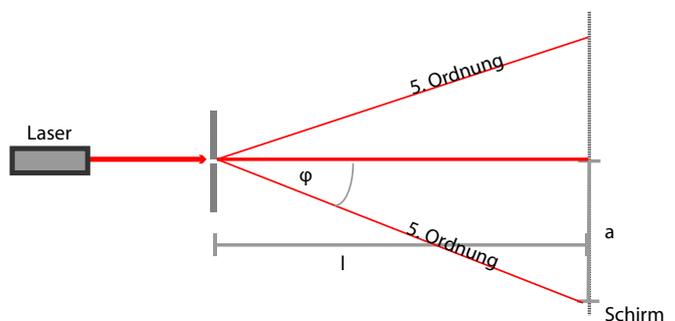


Abb. 12: Strahlenwege des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Spaltbreite d durch Beugung und Interferenz

$$d = \frac{(2n+1) \cdot \frac{\lambda}{2}}{\sin\left(\arctan\left(\frac{a}{l}\right)\right)} \quad d = \frac{(2 \cdot 5 + 1) \cdot \frac{670 \text{ nm}}{2}}{\sin\left(\arctan\left(\frac{20,5 \text{ cm}}{320 \text{ cm}}\right)\right)} \approx 57 \mu\text{m}$$

Die errechnete Spaltbreite von ca. 57 µm ist zwar um Faktor 5 größer als die gewünschte, allerdings lässt sich ein Spalt noch geringerer Breite von Hand nur schwer anfertigen.

2.6 Bestimmen der Wellenlängen

Um den messbaren Wellenlängenbereich des Spektrometers anzugeben, müssen λ_{max} (siehe Abb. 13) und λ_{min} und deren zugehörige Winkel φ bestimmt werden. φ ist dabei wieder der Winkel von der optischen Achse des Gitters zum 1. Beugungsmaximum der jeweiligen Wellenlänge.

φ_{max} wird durch den Halterahmen des Gitters beschränkt und beträgt 88°. λ_{max} kann berechnet werden:

$$\lambda = \frac{d \cdot \sin(\varphi)}{n} \quad \lambda_{max} = 838 \text{ nm} \cdot \sin(88^\circ) = 837,5 \text{ nm}$$

φ_{min} ist durch die dichteste Position des letzten Bildelements des Sensors zum Spalt (Abstand a) mechanisch bedingt beschränkt. Bei a=50mm und l=116mm beträgt $\varphi_{min} = 23,3^\circ$ und $\lambda_{min} = 331,46 \text{ nm}$.

Der berechnete theoretisch messbare Wellenlängenbereich von 331 nm bis 837 nm reicht also von der nahen bis mittleren Ultraviolettstrahlung bis in die nahe Infrarotstrahlung.

Um zu bestimmen, welchem Bildelement des Sensors welche Wellenlänge zuzuordnen ist, nehme ich an, dass seine Bildlinie auf dem Abbildungskreis des Gitters liegt. In eine Gleichung muss auch die Drehposition des Schrittmotors (m) einbezogen werden, wobei φ_{min} der Position 0 entspricht. Daraus ergibt sich die Position des ersten Pixels: $\varphi_{1,px} = \varphi_{min} + m \cdot 7,5^\circ$. Für die Position der anderen Pixel mit der Pixelbreite P_b und der Pixelnummer n kommt folgendes hinzu: $\varphi_p = \varphi_{min} + m \cdot 7,5^\circ + \arctan(n \cdot P_b / l)$. Für die Wellenlänge λ auf Pixel p in Position m ergibt sich dann folgende Gleichung:

$$\lambda(m, n) = d \cdot \sin(\varphi_{min} + m \cdot 7,5^\circ + \arctan(\frac{n \cdot P_b}{l}))$$

Und nach Einsetzen der Werte meines Aufbaus ergibt sich:

$$\lambda(m, n) = 838 \text{ nm} \cdot \sin(23,3^\circ + m \cdot 7,5^\circ + \arctan(\frac{n \cdot 0,014 \text{ mm}}{116 \text{ mm}}))$$

Damit lassen sich 8 mögliche Wellenlängenbereiche angeben, die in der nebenstehenden Tabelle aufgelistet sind.

m	1. Pixel	2048. Pixel
0	331,5 nm	506,4 nm
1	429,1 nm	589,2 nm
2	519,4 nm	661,9 nm
3	600,8 nm	723,4 nm
4	671,9 nm	772,4 nm
5	731,5 nm	808,2 nm
6	778,6 nm	830,2 nm
7	812,4 nm	838,0 nm

Falls der Aufbau leicht verändert wird und der Winkel und Abstand zum Gitter geändert wird gilt:

$$\lambda(l, n) = 838 \text{ nm} \cdot \sin(\varphi_{min} + \arctan(\frac{n \cdot 0,014 \text{ mm}}{l})) \quad (3)$$

und um φ_{min} mithilfe einer bekannten Wellenlänge λ_n und zugehörigen Pixel n zu bestimmen ergibt sich nach Umformen:

$$\varphi_{min} = \arcsin(\frac{\lambda}{838 \text{ nm}}) - \arctan(\frac{n \cdot 0,014 \text{ mm}}{l}) \quad (4)$$

Die Differenz der Wellenlängen zweier benachbarter Pixel gibt die theoretische Auflösung des Spektrometers an. Es ergibt sich ein durchschnittlicher Wert von ca. 0,08 nm/px. Durch die 4-fache Spaltbreite ergibt sich eine realistische Auflösung von ca. 0,32 nm.

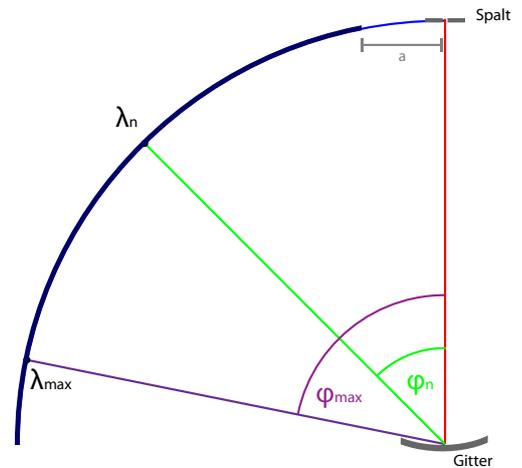


Abb. 13: Beugungswinkel zur Bildfläche: rot: optische Achse. grün: beliebige Wellenlängen n. violett: maximaler Winkel. Dunkelblau: erreichbarer Bereich des CCD-Sensors.

3 Elektronik

Abbildung 14 zeigt die Frontplatte des Steuergerätes, in dem auch der CCD-Sensor angebracht ist. Oben links befindet sich eine Hohlbuchse zum Anschluss eines Universal-Netzteils, welches 9V für die Steuerelektronik liefert. Darunter ist eine SUB-D Buchse zum Anschluss eines PC-Com-Kabels zur Datenübertragung montiert. Rechts davon befindet sich eine weitere SUB-D Buchse zur Programmierung des Mikrocontrollers und darüber die Buchse für den Anschluss der Schrittmotor-Treiberelektronik.

Innerhalb des Steuergerätes befinden sich die CCD- und die Hauptplatine. Auf Abbildung 15 ist die CCD-Platine zu sehen, auf der sich der CCD-Sensor, montiert in einem Nullkraft-Steckkontakt befindet und mit einem 10-poligen Flachbandkabel mit der Hauptplatine auf Abbildung 16 verbunden ist. Auf ihr befindet sich der Mikrocontroller, der die Daten verarbeitet und die CCD- und Schrittmotor-Treiberelektronik ansteuert.

Die Platinen habe ich mit der CAD-Software Eagle der Version 5.11.0 layoutet und anschließend per Tonerverfahren auf eine Kupferplatine aufgebracht, geätzt und gebohrt. Zahlreiche Verbindungen mussten außerdem mit Fädeldraht hergestellt werden, da sich die Herstellung einer doppelseitigen Platine zu aufwendig gestaltet hätte.

3.1 Hauptplatine

Abbildung 17 zeigt den Schaltplan der Hauptplatine.

Die gesamte Spektrometer-Elektronik wird gesteuert von einem PIC-Mikrocontroller von Microchip. Ich verwende den PIC18F452 in der DIP-Bauform. Da die Software des Mikrocontrollers zum Zwischenspeichern der CCD-Daten viel Speicher benötigt, verwende ich den RAM-Baustein HM6264 von Hitachi mit 8192 Byte Speicher (IC2). Der 8 Bit breite Datenport des RAMs ist direkt mit PORTD des PICs verbunden und kann über die Leitungen WE(Write-Enable), OE(Output-Enable) und CS1(Chipselect) gesteuert werden.

Da der PIC nur über eine begrenzte Anzahl an Digitalports verfügt, sind ein Teil der Adresseingänge des RAM-IC mit einem Binär-Counter verbunden (V1). So können die unteren 8 Adressbits mit nur 2 Bit angesteuert werden, in dem der Counter heraufgezählt oder auf Null zurückgesetzt wird. Die oberen 4 Adressbits werden direkt vom PIC gesetzt, um Platz auf der Platine zu sparen und schnelleren Zugriff auf Datensätze an verschiedenen Orten im RAM zu ermöglichen. Das RAM kann dadurch in verschiedene Speicherbänke aufgeteilt werden, die durch die 4 Adressbits ausgewählt werden können. Der Pegelwandler MAX232 (IC3) wandelt den TTL(0-5V)-Pegel der Datensignale des PICs in dem vom PC verwendeten Pegel des PC-Ports um.

3.2 CCD-Platine

In Abbildung 18 ist der Schaltplan der CCD-Platine zu finden.

Die CCD-Platine verbindet den 10-poligen Flachbandkabelstecker mit den Pins des CCD-Sensors. Dieser wird zwar von dem PIC direkt mit digitalen Signalen angesteuert, liefert den Wert der Pixel allerdings als analoges Signal an Pin 1 (OS) und mit einem dynamischen Offset an Pin 2 (DOS) zurück. Damit der PIC dieses Signal mit einem AD-Wandler erfassen kann, muss es zunächst an dessen Analog-Eingang angepasst werden. Dazu befindet sich auf der Platine eine Analogelektronik, bestehend aus einem Impedanzwandler (Q1, Q2) und einem Differenzverstärker (IC1). Dieser wird dabei als nicht invertierender Verstärker mit Offset beschaltet. D.h. von der zu verstärkenden Eingangsspannung OS wird DOS abgezogen und dann verstärkt. Die Verstärkung beträgt dabei ungefähr 2. Der Ausgang des OPs geht dann an den Eingang des AD-Wandlers des PICs.

Um ein stabiles Signal zu erhalten, werden die +/- 12V Versorgungsspannungen für den OP über einen spannungsstabilen DC/DC-Wandler (PWS1) zur Verfügung gestellt.



Abb. 14: Frontplatte des Steuergeräts

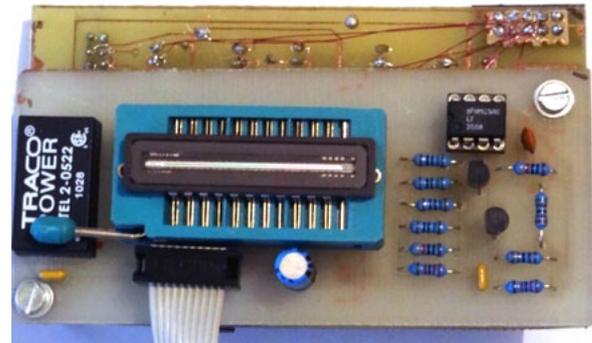


Abb. 15: CCD-Platine

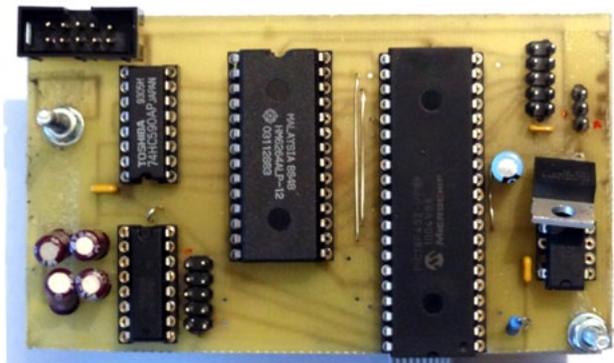


Abb. 16: Hauptplatine

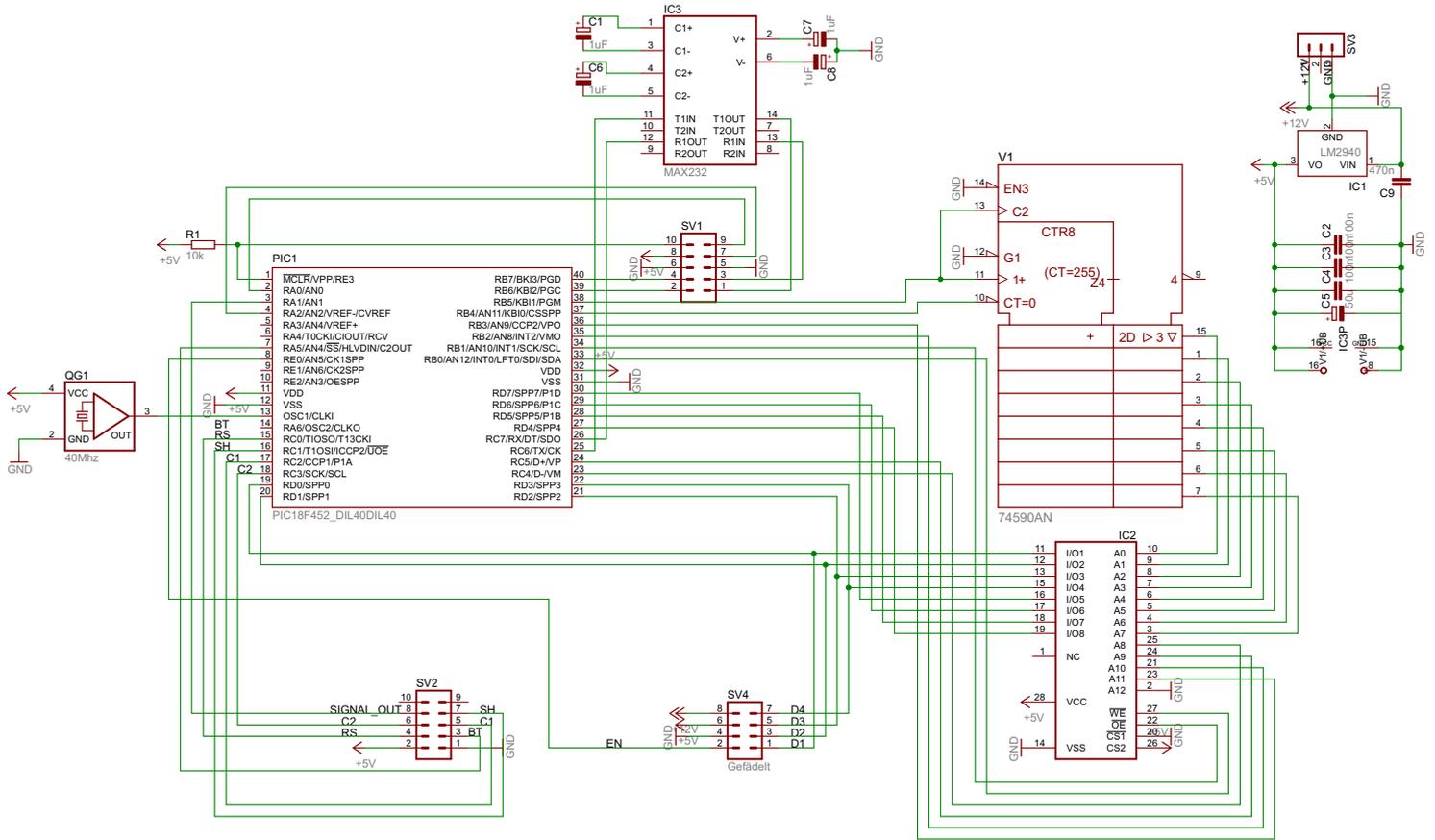
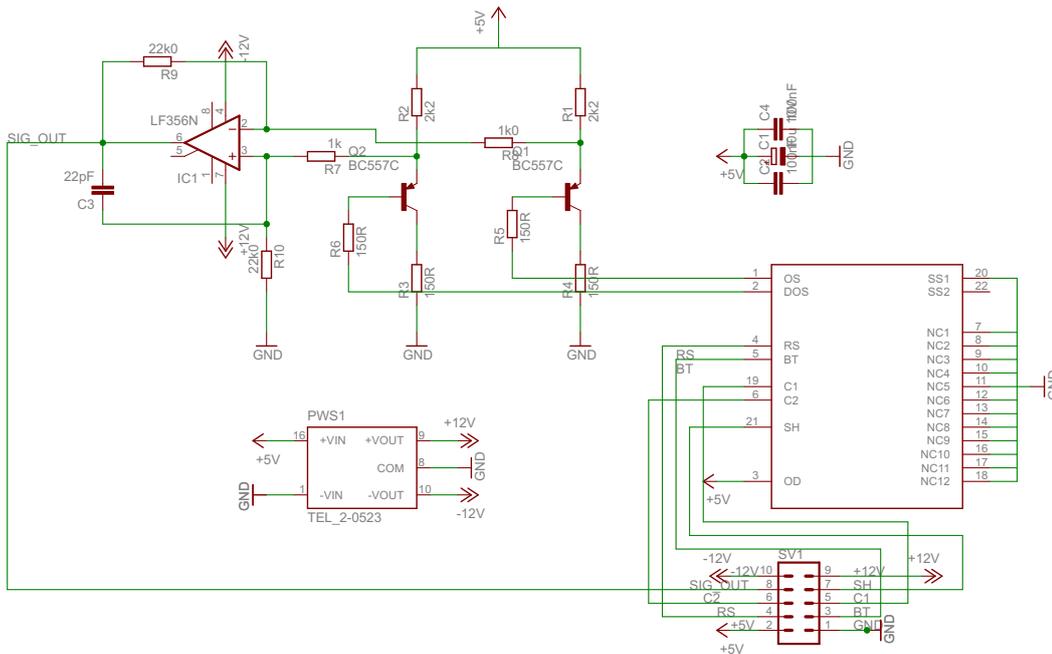


Abb. 17: Schaltplan Hauptplatine

- QG1: 40MHz Quarzgenerator
- PIC1: PIC-Mikrocontroller
- V1: Counter-Baustein
- IC1: 5V Spannungsregler
- IC2: RAM-Baustein
- IC3: Pegelwandler
- SV1: Steckverbinder zur Frontplatte: RS232 und PIC-Kit
- SV2: Steckverbinder CCD-Platine
- SV3: Steckverbinder zur Frontplatte: Spannungsversorgung
- SV4: Steckverbinder zur Frontplatte: Schrittmotor-Treiberplatine

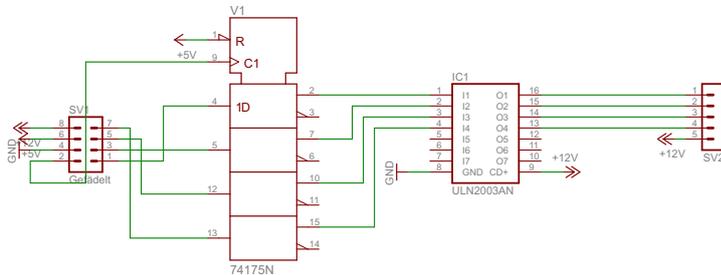


- PWS1: Spannungsreglung +/- 12 V
- IC2: CCD-Sensor
- IC1: Operationsverstärker

Abb. 18: Schaltplan CCD-Platine

3.3 Schrittmotor-Treiber

Der von mir verwendete Schrittmotor besitzt 4 Spulengruppen, die nacheinander angeschaltet werden müssen. Um Ports des PICs zu sparen, verwende ich ein Latch-Register, das mit 4 Leitungen am RAM-Port angeschlossen ist. Sobald das Latch-Register eine High-Flanke am Clock-Eingang registriert, werden die Daten vom Eingang am Ausgang übernommen, welcher wiederum mit dem Transistor-Array (IC1) verbunden ist. Wenn ein Eingang auf High-Level liegt, wird der zugehörige Ausgang gegen Masse geschaltet und es fließt ein Strom über die Spule des Motors.



V1: 4-Bit-Latch
IC1: Transistor Array

SV1: Steckverbinder zum PIC
SV2: Steckverbinder Schrittmotor

Abb. 19: Schaltplan Schrittmotor-Treiber

4 Software

4.1 PIC

Damit der PIC-Mikrocontroller arbeitet, muss er vorher mit einem geeigneten Programm versehen werden. Ich verwende dazu die Software MPLAB und den MC18-Compiler von Microchip. Der Compiler wandelt den in „C“ geschriebenen Code in Maschinencode um, welcher anschließend über das USB-Programmierinterface „PIC-Kit 3“ von Microchip in den Mikrocontroller geschrieben wird. Dieses Interface ermöglicht auch einen „In-Circuit“ Debugging-Modus, über den z.B. Variablen im Speicher des Mikrocontrollers beobachtet und Breakpoints gesetzt werden können, was die Fehlersuche bedeutend erleichtert.

4.1.1 Programmstruktur

Nach dem Einschalten initialisiert sich der PIC, d.h., es werden Variablen definiert und Ports gesetzt. Danach geht das Hauptprogramm in eine Endlosschleife, in der über eine Eventsteuerung aus der Interrupt-Funktion verschiedene relativ zeitintensive Routinen, wie z.B. das Auslesen des Sensors oder die Datenübertragung ausgeführt werden können.

Parallel zu dieser Main-Schleife kann durch ein Ereignis die Interrupt-Routine ausgelöst werden. Dies passiert entweder, wenn ein neues Zeichen am USART-Port empfangen wurde (vom PC) oder wenn der Timer auslöst. In Abbildung 20 ist die Grundstruktur der Interrupt-Routine in Form eines Struktogramms dargestellt: Wenn ein Zeichen empfangen wurde, steht das USART-Flag auf „1“ und das Zeichen wird gelesen, ein Befehl aufgebaut, dem entsprechend ein Event gesetzt und das USART-Flag zurückgesetzt. Ein Event, das durch den PC gesetzt werden kann, ist z.B. die Datenübertragung oder das Bewegen des Schrittmotors. Wenn das Timer-Flag gesetzt wurde, wird ein Counter hochgezählt. Wenn dieser nach einer bestimmten Zeit höher als eine gewisse Konstante ist, wird ein Event-Ereignis gesetzt, damit der CCD-Sensor in regelmäßigen Abständen ausgelesen wird. Timer und Timer-Flag werden zurückgesetzt.

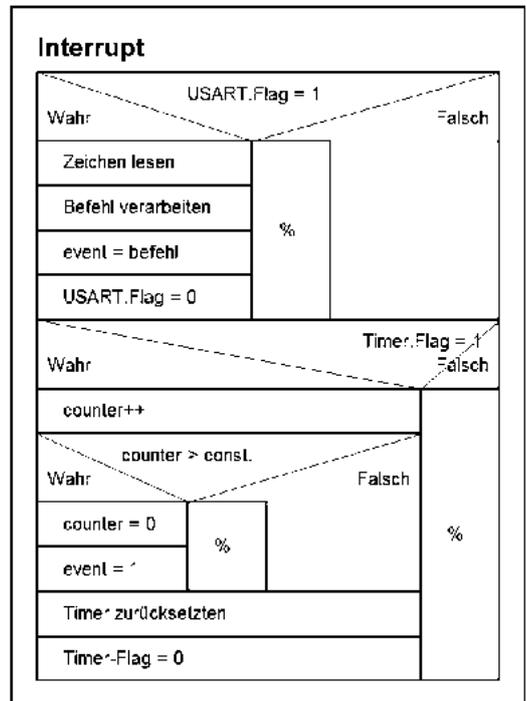


Abb. 20: Allgemeines Struktogramm der Interruptroutine

4.1.2 Ansteuerung des RAM-Speichers

Abbildung 21 zeigt den Code der Funktion „RAM_ReadNext()“, die ein nächstes Zeichen aus dem RAM-Speicher liest. Dazu wird zunächst das WE auf „1“ gesetzt, was bedeutet, dass WE nicht aktiv ist. Danach wird das gesamte TRIS-Register für den PortD auf „1“ gesetzt, was bedeutet, dass er jetzt als digitaler Eingang funktioniert.

Danach folgt das High-Low-Setzen des Counter-Clock-Pin wodurch der aktuelle Wert des Binärcounters um 1 erhöht wird. Auch der interne Adresszähler ADR_CNT wird erhöht, damit eindeutig bestimmt ist, wie die restlichen 4 Adressleitungen vom PIC zum RAM gesetzt werden müssen. Dies geschieht im nächsten Schritt: Wenn das 4. Bit im internen Counter „1“ ist, wird auch die 8. Adressleitung des RAMs auf 1 gelegt. Für die nächsten 3 Bits verfährt man genau so. Im Anschluss wird der Output des RAMs aktiviert, der aktuelle PortD-Zustand in die temp-Variable übertragen, der Ausgang wieder deaktiviert und das Byte aus der Funktion zurückgegeben. Die Funktion „RAM_WriteNext()“ verläuft ähnlich (Abb. 22): Der Ausgang des RAMs wird deaktiviert, der Interne- und der Hardwarecounter werden hochgezählt und die restlichen Adressports gesetzt. Danach wird PortD als Ausgang geschaltet und Write-Enable deaktiviert. Jetzt wird das zu schreibende Byte auf PortD geschrieben und Write-Enable wieder aktiviert, wodurch der RAM das Byte übernimmt.

Mit der Funktion „RAM_Clear()“ kann der Adresszähler für Write- und Readnext zurückgesetzt werden, sodass das RAM wieder von vorne gelesen oder beschrieben werden kann. Dazu werden der interne Adresszähler sowie die restlichen Adresspins zurückgesetzt. Des weiteren wird der Hardware-Counter über den RAM-Clear-Pin zurückgesetzt und Write- und Output-Enable in die Standby-Kombination gebracht.

Zum Speichern und Auslesen von Integer-Werten habe ich weitere Funktionen geschrieben, die diese vorher in 2 Bytes zerlegen oder aus 2 Bytes zusammensetzen und dann byteweise speichern oder auslesen.

4.1.3 Ansteuerung des CCD-Sensors

Damit der CCD-Sensor die Pixelwerte in Form eines analogen Signals ausgibt, benötigt er mehrere Takt- und Steuersignale (Abbildung 24), um die interne „Eimerkette“ des CCD-Arrays anzusteuern. Ein kompletter Auslesevorgang beinhaltet 2094 Flankenwechsel des C1-Taktes. C2 muss sich dabei exakt differenziell verhalten, wobei der Kreuzpunkt beider Signale über 2,5V liegen muss. Gleichzeitig muss vor jedem dieser Flankenwechsel das BT-Signal „0“ und nach ca. 1/3 C1-Länge mindestens 20 ns vor diesem Flankenwechsel wieder „1“ werden. Das RS-Signal verhält sich zu BT komplementär, wobei es mindestens um 50ns zu RS verzögert sein muss. Beim Start des Auslesevorgangs verhalten sich BT und RS wie im Auslesevorgang. Das C1-Signal muss hierbei jedoch über ca. 4 Taktphasen aktiv bleiben und das SH-Signal „1“ und mindestens 2000 ns vor der C1-Lowflanke wieder „0“ werden.

Die gültigen Bilddaten liegen bei richtiger Ansteuerung dann als analoges Signal an OS nach jeder C1-Flanke an. Neben den 2048 Nutzpixeln werden davor und danach insgesamt 46 weitere Dummypixel zur relativen Intensitätskalibrierung übertragen.

Zur Software-Umsetzung lässt sich das Timing in ein 10-bit-Raster unterteilen: Abbildung 25 zeigt den Codeausschnitt zur Erzeugung des Taktsignals während des Auslesevorgangs, der in regelmäßigen Abständen (Grundtakt) aufgerufen wird. Vor jeder Ausführung wird die cnt-Variable um 1 erhöht, wodurch die einzelnen Case-Bedingungen nacheinander aufgerufen werden. Zuerst wird BT auf 1, RS auf 0, C2 auf 1 und C1 auf 0 gesetzt. Da diese Bits direkt hintereinander gesetzt werden, geschieht dies mit der maximalen Geschwindigkeit des Mikrocontrollers. Entsprechende Messungen haben ergeben, dass die Zeit zwischen dem Setzen zweier Signale 60 ns beträgt. Dadurch ist der Versatz von RS zu BT gewährleistet und der Kreuzpunkt von C1 und C2 liegt weit über 2,5V. Nach 3 Grundtaktten Pause wird der BT-Takt wieder auf „0“ und RS auf „1“ gesetzt.

```
unsigned char RAM_ReadNext(){
    char temp;
    weRAM = 1; //kein WriteEnable
    tRAM = 255; //RAM_PORT ist Input
    pCNT=1; //Highflanke für Counter
    pCNT=0;
    ADR_CNT++; //Hochzählen des internen Adre

    if((ADR_CNT&0x0100)==0x0100)A8RAM=1;
    else A8RAM=0;
    if((ADR_CNT&0x0200)==0x0200)A9RAM=1;
    else A9RAM=0;
    if((ADR_CNT&0x0400)==0x0400)A10RAM=1;
    else A10RAM=0;
    if((ADR_CNT&0x0800)==0x0800)A11RAM=1;
    else A11RAM=0;

    oeRAM = 0; //Output aktivieren
    temp = rRAM; //daten an RAM-Port lesen
    oeRAM = 1; //Output wieder deaktivieren
    return (rRAM); //Werte zurückgeben
}
```

Abb. 21: Funktion zum Lesen aus dem RAM

```
void RAM_WriteNext(unsigned char data){
    oeRAM = 1; //Ausgang deaktivieren
    pCNT=1; //High-Flanke für den Counter
    pCNT=0;
    ADR_CNT++; //Internen Adresszähler hochzählen

    if((ADR_CNT&0x0100)==0x0100)A8RAM=1;
    else A8RAM=0;
    if((ADR_CNT&0x0200)==0x0200)A9RAM=1;
    else A9RAM=0;
    if((ADR_CNT&0x0400)==0x0400)A10RAM=1;
    else A10RAM=0;
    if((ADR_CNT&0x0800)==0x0800)A11RAM=1;
    else A11RAM=0;

    tRAM = 0; //PORTD ist Ausgang
    weRAM = 0; //Write-Enable deaktiviert
    sRAM = data; //data-Byte wird auf PortD ausgegeben
    weRAM = 1; //Write-Enable aktiviert
}
```

Abb. 22: Funktion zum Schreiben in das RAM

```
void RAM_Clear(){
    ADR_CNT=0;
    A8RAM=A9RAM=A10RAM=A11RAM=0;
    tRAM=1;
    pCNT=0;
    rCNT=1;
    rCNT=0;
    rCNT=1;
    weRAM = 0;
    oeRAM = 1;
}
```

Abb.23: Funktion zum zurücksetzen des Adresszählers

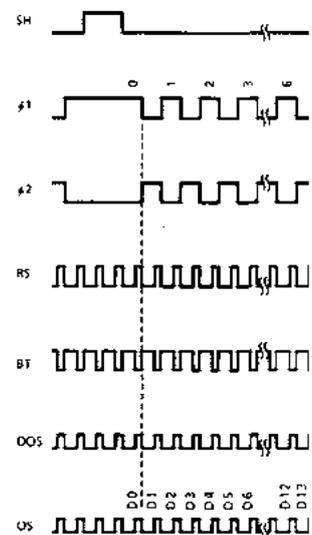


Abb. 24: Zeitdiagramme der Taktsignale zur Ansteuerung des CCD-Sensors

Dazwischen wird das OS-Signal aufgenommen. Einen Takt später erfolgt der Flankenwechsel des C1-Taktes, wobei zur Einhaltung des Kreuzpunktes C1 zuerst gesetzt werden muss. Nach derselben Wartezeit wie oben werden wieder BT und RS gesetzt und es erfolgt die Erfassung des nächsten Bildpunktwertes. Nun wird auch der Counter wieder zurückgesetzt. Dieser Programmabschnitt muss 1047-mal durchlaufen werden. Zum Start des Auslesevorgangs muss außerdem einmal die Startsequenz, die nach selbem Schema aufgebaut ist, durchlaufen werden. Die takeMes()-Funktion zeichnet den Wert eines Bildelementes mithilfe des 10-bit-AD-Wandlers auf und speichert diesen als Integer-Wert im RAM zwischen.

```
switch(cnt) {
  case 0: BT=1; RS=0; C2=1; C1=0; break;
  case 1: break;
  case 2: break;
  case 3: break;
  case 4: BT=0; takeMes(); RS=1; break;
  case 5: BT=1; RS=0; C1=1; C2=0; break;
  case 6: break;
  case 7: break;
  case 8: break;
  case 9: BT=0; takeMes(); RS=1; cnt=-1; cnt2++; break;
}
```

Abb. 25: Codeausschnitt: Erzeugung des CCD-Taktsignals

4.2 PC

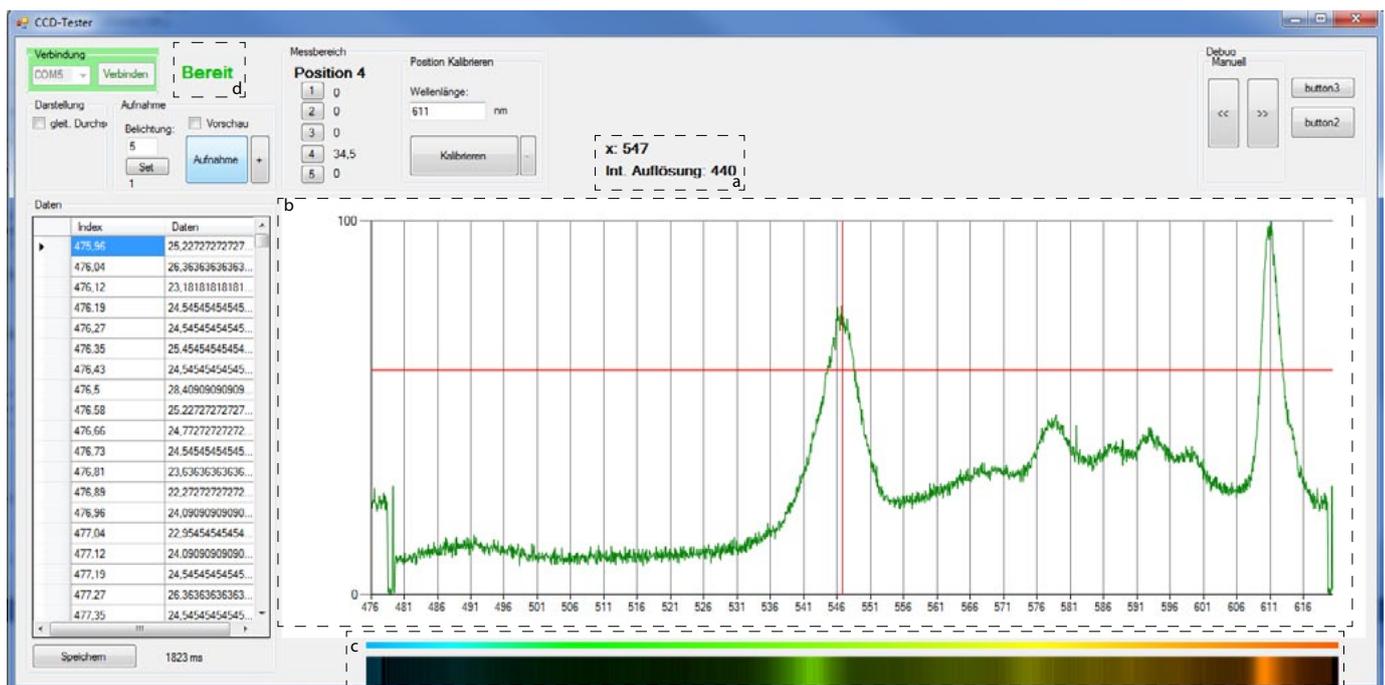


Abb. 26: Screenshot der PC-Software nach Aufnahmen und Kalibrierung einer Messung

Die PC-Software stellt die Benutzerschnittstelle für das Spektrometer dar. Sie kommuniziert über die COM-Schnittstelle mit dem Mikrocontroller. Die PC-Software wurde mit der Programmierumgebung „Microsoft Visual C# 2010 Express“ realisiert. Sie vereinfacht die Programmierung insofern, dass viele für meine Software wichtige Komponenten, wie die grafische Ausgabe der Daten (chart), die COM-Schnittstelle oder die Tabellenausgabe (dataGridView), bereits voll implementiert sind und einfach verwendet werden können.

Um mit der Software zu arbeiten, muss zuerst eine Verbindung mit dem Spektrometer hergestellt werden. Dazu muss bei „Verbinden“ der passende COM-Port ausgewählt und dann der „Verbinden“-Button betätigt werden. Wird die Box mit einer grünen Hintergrundfarbe versehen, so wurde die Verbindung erfolgreich aufgebaut, ist die rot, so konnte die Verbindung nicht hergestellt werden. Die Verbindungsüberprüfung wird auch weiterhin mithilfe eines Timers fortgeführt, indem regelmäßig ein Byte an den PIC gesendet wird, welches bis zur nächsten Timer-Ausführung beantwortet werden muss. Bei „Aufnahme“ kann die Belichtungszeit von 0-10 gesetzt werden und eine Aufnahme gestartet werden. Über die Check-Box „Vorschau“ werden beim Aufnahme-Vorgang nur 200 statt der 2048 Bildwerte übertragen, wodurch die Übertragungszeit verkürzt wird. Über den „+“-Button wird eine Aufnahme gestartet, die der vorherigen Aufnahme addiert wird. Durch diese Funktion können mehrere Messungen gemittelt und so das Rauschen des Sensors vermindert werden. Unter „Darstellung“ kann die Checkbox „gleitender Durchschnitt“ gewählt werden, sodass der gleitende Durchschnitt der Messwerte gebildet wird.

Die Messwerte werden zum einen in Tabellenform („Daten“) und zum anderen als XY-Diagramm (b) dargestellt.

Mit den Buttons „1,2,3,4,5“ unter „Messbereich“ kann die Position des Schrittmotors gewählt werden. Nach Betätigung wird der Motor so oft nach rechts bewegt, bis der Endtaster betätigt ist und der PC so ein Signal vom Spektrometer bekommt.

Die Referenzposition ist erreicht. Von hier aus wird der Schrittmotor des Positionswertes entsprechend nach links bewegt. Durch diese Vorgehensweise kann die Position reproduzierbar eingestellt werden.

Ist die Position ausgewählt und ein Spektrum aufgenommen, kann das Spektrum kalibriert werden. Dazu muss mit dem Cursor im XY-Diagramm ein Peak ausgewählt werden und in der „Wellenlänge“-Textbox bei „Position kalibrieren“ die bekannte Wellenlänge in nm eingetragen werden. Wenn der „Kalibrieren“-Button geklickt wird, wird wie in Kapitel 5.1.1 mithilfe der ausgewählten Pixel-nummer φ_{\min} ermittelt und für die momentane Position gespeichert. Die X-Werte werden dem Entsprechend in nm umgerechnet. Zudem wird der maximal und minimal Punkt der Datenreihe bestimmt und demnach die Y-Achse eingepasst und somit relativ in % angegeben.

Bei a wird die X-Cursor Position angezeigt. Darunter wird die Intensitäts-Auflösung angegeben. Sie ergibt sich aus dem absoluten Abstand des maximalen zum minimalen Wert des AD-Wandlers im aktuellen Spektrum. War die Intensität nicht besonders hoch, ist dieser Wert klein und die Messung ist sehr mit Rauschen behaftet.

Unter c wird im kalibrierten Modus das gemessene Spektrum so dargestellt, wie man es mit einem rein optischen Spektrometer beobachten würde. Dazu wird der zugehörige X-Achsen-Wert in nm mit einer entsprechenden Funktion in RGB-Werte umgewandelt und die Helligkeitsintensität dieser mit der relativen Intensität des Y-Wertes multipliziert.

Bei „d“ wird der aktuelle Programmstatus angezeigt.

Mit dem „Speichern“-Button kann das Spektrum kalibriert oder unkalibriert im universellen .csv Tabellenformat gespeichert und später zum Beispiel mit Excel geöffnet werden.

5 Praxis

5.1 Messungen

Zur Erprobung des Spektrometers werden Lichtspektren einiger Quellen aufgenommen. Dazu wurde der Aufbau iterativ per Hand justiert. Dabei wurde versucht, die bei einem Helium-Neon-Laser entstehende schmale Spektrallinie scharf auf dem Sensor abzubilden. Bei Aufnahme eines Spektrums muss darauf geachtet werden, dass kein Pixelwert des Sensors den maximal möglichen überschreitet, da sonst keine Aussage über die Peakbreite getroffen werden kann.

5.1.1 Helium-Neon- und Halbleiterlaser

Zur Bestimmung des Spektrums zweier verschiedener Laser gleichzeitig, wurden die beide Laserstrahlen und das Ende des LWL auf einen Punkt auf einem Blatt Papier gerichtet. Die gleichzeitige Erfassung hat den Vorteil, dass die beiden recht monochromatischen Lichtquellen direkt verglichen werden können. Während der Helium-Neonlaser eine sehr genau bestimmte Wellenlänge von 632,8 nm abstrahlt, müsste der weniger monochromatische rote Halbleiterlaser laut Herstellerangaben im Wellenlängenbereich um die 660 nm liegen. Die gemessenen Rohdaten sind in Abb. 27 dargestellt.

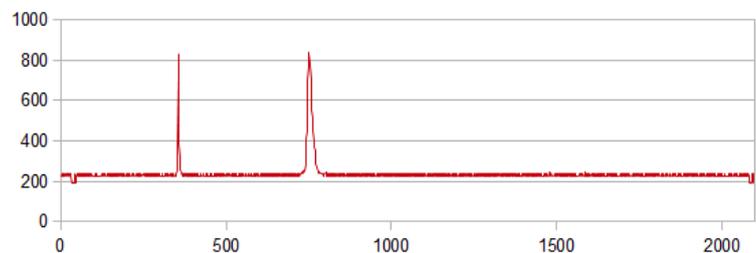


Abb. 27: Spektrum Helium-Neon-, Halbleiterlaser: Rohdaten des CCD-Sensors. x-Achse: Pixelnummer; y-Achse: ADC-Werte

Um aufgrund der Messung quantitative Aussagen über die Wellenlänge zu treffen, muss die x-Achse zunächst kalibriert werden. Da der schmalere Peak bei $n=356$ aufgrund der niedrigeren Wellenlänge dem He-Ne-Laser zuzuordnen ist und die zugehörige Wellenlänge bekannt ist kann φ_{\min} nach Gleichung (4) aus Kapitel 2.6 berechnet werden. Mithilfe von

$$\varphi_{\min} = \arcsin\left(\frac{632,8 \text{ nm}}{838 \text{ nm}}\right) - \arctan\left(\frac{356 \cdot 0,014 \text{ mm}}{120 \text{ mm}}\right) = 46,6^\circ$$

$$\lambda(n) = 838 \text{ nm} \cdot \sin\left(46,6^\circ + \arctan\left(\frac{n \cdot 0,014 \text{ mm}}{120 \text{ mm}}\right)\right)$$

Gleichung (3) kann dann jedem Pixel n eine Wellenlänge λ zugeordnet werden:

Neben der x- sollten der y-Achse relative Intensitätswerte zugeordnet werden. Dazu muss zuerst das Offset der Basislinie bestimmt und dann von den Messwerten abgezogen werden. Danach wird die höchste Intensität des Spektrums als 100% betrachten, indem alle Pixelwerte durch den absoluten Wert geteilt werden. In Abb. 28 ist das nun kalibrierte Spektrum zu sehen.

Wie man auf dem Diagramm erkennen kann, müsste die Spektrallinie des Halbleiterlasers bei ungefähr 657,5 nm liegen. Dieser Wert weicht um nur 2,5 nm von den Herstellerangaben ab, was bei den Diodenlasern allerdings durchaus realistisch ist.

Dem Diagramm kann zudem entnommen werden, dass der Peak des Halbleiterlasers deutlich breiter, als der des He-Ne-Lasers ist. Die Peakbreite wird auf halber Höhe des Peaks bestimmt. Für den He-Ne-Laser beträgt sie 0,5 nm, für den Diodenlaser ca. 3 nm. Der breitere Peak ist durch die schlechtere Modenstabilität des Diodenlasers zu erklären.

In dem Diagramm lässt sich außerdem erken-

nen, dass das Rauschen an der Basislinie sehr gering ist, obwohl bei dieser Messung keine Mittelwerte gebildet wurden.

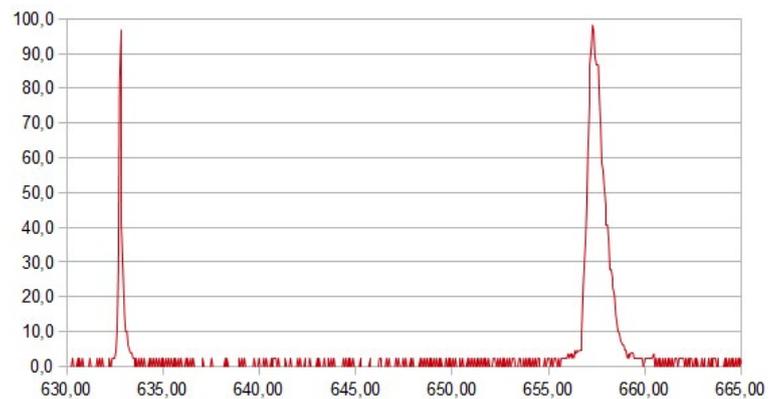


Abb. 28: Spektrum Helium-Neon-, Halbleiterlaser: Kalibrierte Daten. x-Achse in nm, y-Achse in rel. Intensität

5.1.2 Leuchtstofflampe

Leuchtstofflampen sind mit Quecksilberdampf und einem Edelgas gefüllt. Wird die Lampe eingeschaltet, so finden Gasentladungen statt, wodurch das Quecksilber Licht aussendet. Da dieses Licht nicht gerade natürlich aussieht, befindet sich innen an der Glasoberfläche ein fluoreszierender Leuchtstoff, durch den der UV-Anteil im Lichtspektrum des Quecksilberdampfes in den Bereich des sichtbaren Lichtes verschoben wird, sodass ein angenehmerer Farbton entsteht. Auch dieses Leuchtstoffgemisch weist im Gegensatz zu einer Glühbirne kein kontinuierliches Spektrum auf. Abbildung 29 zeigt das kalibrierte Spektrum einer Kompaktleuchtstoff-Lampe von 515 nm (Grün) bis 655 nm (Rot). Es wurden 5 Einzelspektren aufgenommen und deren Durchschnitt gebildet. Außerdem wurde der gleitende Durchschnitt über 5 Messwerte gebildet.

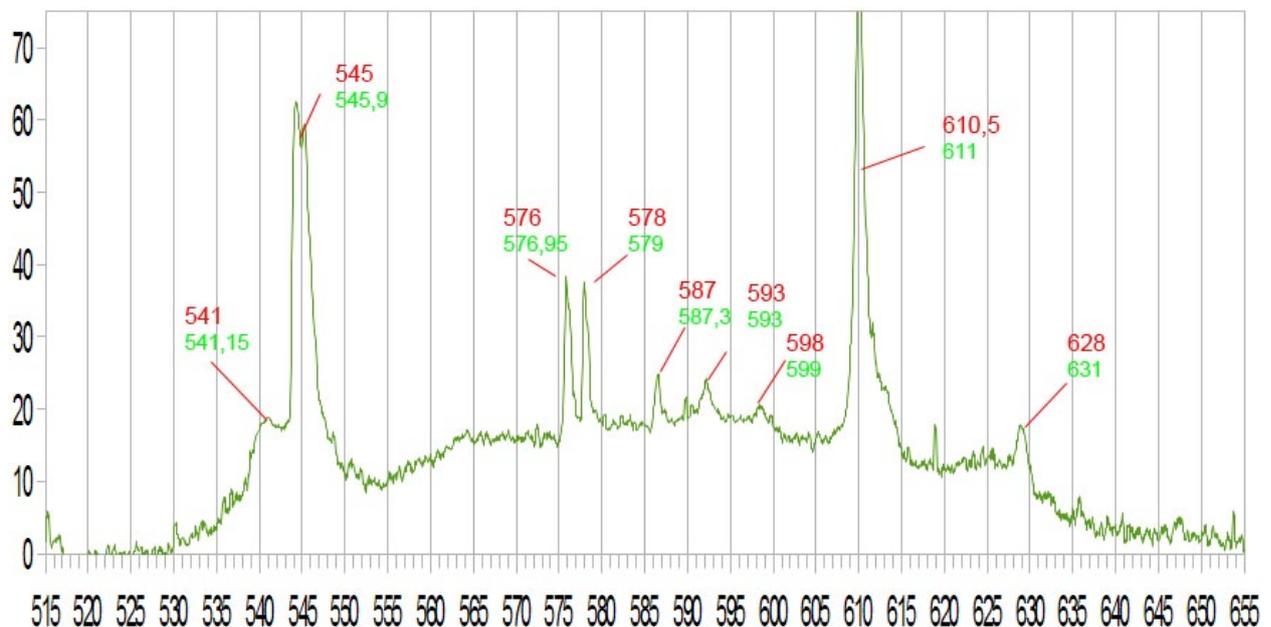


Abb. 29: Kalibriertes Emissionsspektrum einer billigen Kompakt-Leuchtstofflampe. x-Achse in nm, y-Achse in rel. Intensität

Dieses ähnelt stark den Spektren von Leuchtstoffröhren in der Literatur. An jedem erkennbaren Peak ist die gemessene Wellenlänge (rot) und die Wellenlänge in der Literatur (grün) angegeben. Wie man sehen kann, weichen die gemessenen Werte durchschnittlich um ca. 1 nm von den Literaturwerten ab.

Da sich das Lichtspektrum der Leuchtstofflampe über einen relativ großen Bereich erstreckt, kann sie, vor allem durch die charakteristischen Peakformen, gut als „Marker“ verwendet werden.

5.1.3 Grüner Halbleiterlaser

Das nebenstehende Diagramm zeigt das Spektrum eines grünen Laserpointers. Das Spektrum wurde mithilfe der Energiesparlampe kalibriert. Der Peak liegt bei 532 nm, was exakt mit den Herstellerangaben des Lasers übereinstimmt. Auch hier handelt es sich um einen Diodenlaser, was die große Peakbreite von ca. 6 nm erklärt.

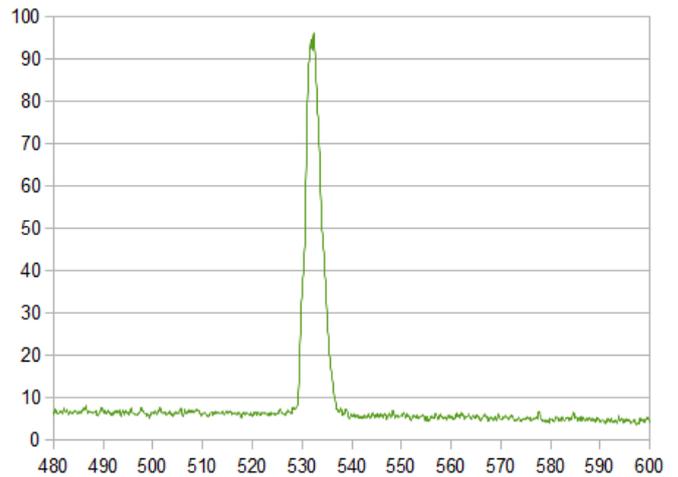


Abb. 30: Kalibriertes Spektrum eines grünen Laserpointers

5.1.4 Weiße LED

Weiß leuchtende Leuchtdioden bestehen oft aus einer UV-LED mit verschiedenen Leuchtstoffen, die, wie bei der Leuchtstofflampe, das höherenergetische UV-Licht über Lumineszenz in langwelligeres Licht umwandeln. Es werden meist 3 Leuchtstoffe mit roter, grüner und blauer Farbe verwendet.

Im Gegensatz zur Leuchtstofflampe ist das Spektrum zwar kontinuierlicher, allerdings lässt sich auch eine Verteilung erkennen. Die Intensität ist um 537 nm (Grün), 565 nm (Gelb) und 594 nm (Orange) höher als bei den umgebenen Wellenlängen.



Abb. 31: Kalibriertes Emissionsspektrum einer weißen LED. x-Achse in nm, y-Achse in rel Intensität. Mittelwertbildung von 7 Messungen, gleitender Durchschnitt 5 Messwerte.

5.1.5 Blaue LED

Die blauen Leuchtdioden verwenden keine Lumineszenz-Farbstoffe, da es Halbleitermaterialien gibt, die blaues Licht aussenden können. Die von mir verwendete LED ist eine blaue LED aus Galliumnitrid (GaN) und emittiert Licht mit einer Wellenlänge von 470 nm.

Das Spektrum wurde mithilfe der Leuchtstofflampe kalibriert.

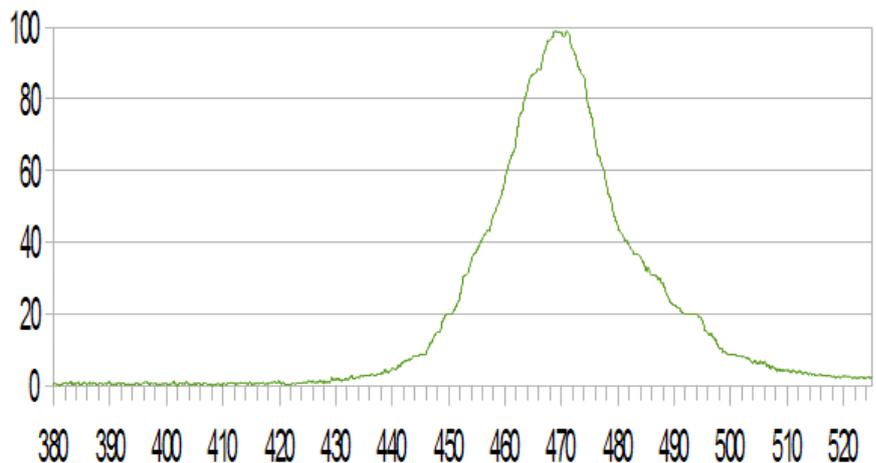


Abb. 32: Kalibriertes Emissionsspektrum einer blauen LED. x-Achse in nm, y-Achse in rel. Intensität. Mittelwertbildung von 5 Messungen, gleitender Durchschnitt 5 Messwerte.

(NATRIUM - MESSUNG)

5.2 Ausblick

Momentan entspricht die Breite meines Spaltes noch nicht der idealen, wodurch das Auflösungsvermögen des Spektrometers begrenzt wird. Außerdem musste ich feststellen, dass der von mir verwendete Schrittmotor etwas zu schwach ist, um das Gitter mit Spalt und LWL so zu bewegen, dass bei jedem Schritt genau $7,5^\circ$ gefahren werden. Deshalb muss nach ändern der Position das Spektrum immer erst kalibriert werden. Auch weicht der berechnete Abstand des Sensors von dem bei dem per Hand ideal justierten Abstand um ca. 1 cm ab. Das könnte daran liegen, dass die Furchen des unbekanntes Gitters anders angeordnet sind als angenommen und anders berechnet werden müsste. Leider fand sich auf dem Gitter keine Beschriftung.

Des Weiteren hat der verwendete CCD-Sensor bei verschiedenen Wellenlängen vermutlich unterschiedliche Empfindlichkeiten, sodass die Intensität des Spektrums ein wenig korrigiert werden müsste. Eine Korrektur wegen der Absorption des LWL wäre dazu auch sinnvoll.

Später soll die PC-Software so weiter entwickelt werden, dass die Peaks automatisch erkannt werden, was zum einen den Kalibrierungsvorgang erleichtern könnte. Auch könnte man so Emissionsquellen automatisch identifizieren lassen.

Evtl. könnte man den Aufbau mit einer eigenen Strahlungsquelle ausstatten, sodass die Software automatisch alle Messbereiche anfährt, kalibriert und zusammensetzt, sodann man anschließend ein komplettes Spektrum vom UV- bis IR-Bereich erhält.

6 Quellen, Literatur, Werkzeuge

- relevante Datenblätter:
 - MPLAB_C18_Libraries.pdf (Handbuch zum MCC18-Compiler)
 - 6264A.pdf (Datenblatt des HY6264A RAM-Baustein)
 - ULN_2001A (Datenblatt des Schrittmotortreiber der Firma SGS-Thomson)
 - Datenbuch: „CCD Linear Image Sensor“ 1997 der Firma Toshiba
- Software
 - Eagle 5.11.0 Light (Erstellen der Schaltpläne)
 - MPLAB IDE 8.66.00.00 von Microchip (Programmierungsumgebung für Mikrocontroller)
 - MPLAB MC18 C Compiler v3.37.01 vom Microchip (C-Compiler für Mikrocontroller)
 - Open Office 3.3.0 (Auswerten der Daten, erstellen der Diagramme)
- Informationen
 - Genaue Spektralwerte einer Leuchtstofflampe: http://www.naturwissenschaften-entdecken.de/fileadmin/inhalte/unterricht/sekundarstufe/astronomie/kalibrierspektrum_esl_744.jpg
 - Spektrale Charakteristik einer LED: <http://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode>

7 Danksagung

Vor allem möchte ich mich bei meinem Betreuungslehrer Thomas Biedermann bedanken, der mir bei meinem Projekt mit Rat und Tat zur Seite stand. Mein Dank gilt auch Susanne Biedermann für die gute Verpflegung mit Kaffee und Kuchen. Auch bedanke ich mich bei meiner Mutter für das häufige Fahren zur AG auch an Wochenenden.