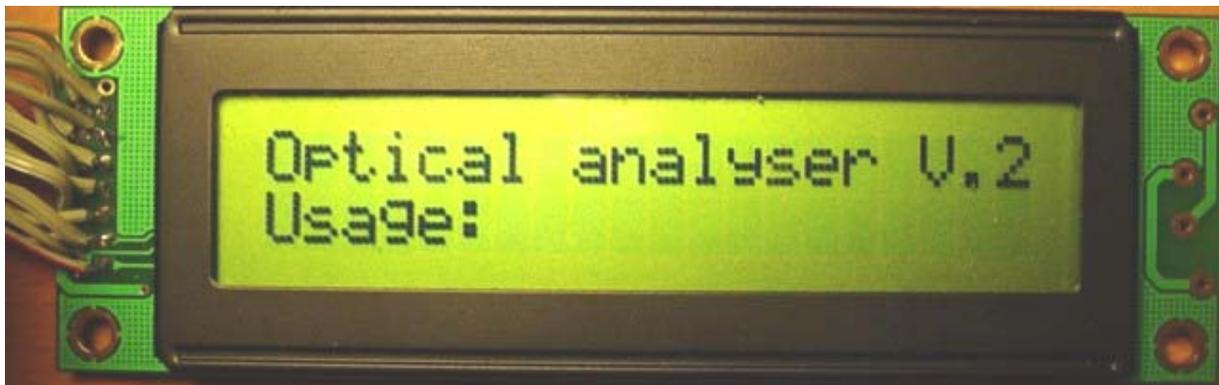


# ***PIC-gesteuerte optische Spektralanalyse***



**Wettbewerb „Jugend Forscht“ 2008**

**Sebastian Hellberg (19 Jahre)**

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

**Inhalt:**

1.	Einleitung	3
2.	Beschreibung und Erklärung der verwendeten Komponenten	3
2.1.	Der Monochromator	3
2.1.1.	Was ist ein Monochromator?	3
2.1.2.	Der Wadshorth-Monochromator	4
2.2.	Der PIC-Microcontroller	5
2.2.1.	Aufbau und Funktionsweise	5
2.2.2.	Spezifikationen meines PICs	6
2.2.3.	Programmierung von Software für PICs	7
2.2.4.	Verwendete Programmierumgebung	7
2.2.5.	Verwendeter Programmer	7
3.	Beschreibung meiner Apparatur	8
3.1.	Was kann meine Apparatur?	8
3.2.	Aufbau der Mechanik	9
3.3.	Aufbau der Elektronik	9
3.4.	Aufbau der PIC-Software	10
4.	Die ersten Messungen	10
5.	Einsatzgebiete	12
6.	Probleme, die bei der Arbeit an dem Projekt entstanden sind	12
7.	Ausblick	12
8.	Quellen	13
9.	Danksagung	13
10.	Schaltpläne	14

## **1. Einleitung**

Durch einen glücklichen Zufall bekam die Jugend-forscht-AG meiner Schule einen großen Satz optischer Komponenten gespendet. Unter diesen Komponenten befand sich ein wundersames optisches Gerät, dessen Funktion nicht auf den ersten Blick erkennbar war. Dieses Gerät faszinierte mich, und nach einiger Recherche fand ich heraus, dass es sich hierbei um einen Wadshorth-Monochromator handelte.

Da man mit einem solchen Gerät vielfältige optische Untersuchungen anstellen kann, beschloss ich, mich weiterhin mit diesem Monochromator zu beschäftigen und ihn in einem Jugend forscht – Projekt zu nutzen. Da ich im Rahmen meines letzten Jugend forscht – Projektes schon einige Erfahrungen mit PIC-Mikrocontrollern gesammelt hatte, nahm ich mir vor, diese beiden Dinge zu kombinieren und daraus ein Projekt zu entwerfen.

Schon war die Idee geboren: Ein mikrocontrollergesteuerter Wadshorth-Monochromator, den man zu verschiedensten optischen Untersuchungen verwenden kann.

Zum Aufbau der Arbeit: Zuerst werde ich den Aufbau des Monochromators sowie den PIC beschreiben. Darauf folgt eine Erläuterung der selbst entwickelten Mechanik, Elektronik und PIC-Software, worauf eine Darstellung der Einsatzgebiete folgt.

## **2. Beschreibung und Erklärung der verwendeten Komponenten**

### **2.1. Der Monochromator**

#### **2.1.1. Was ist ein Monochromator?**

Ein Monochromator ist ein Gerät, das aus einem polychromatischen Licht, welches mehrere Wellenlängenanteile enthält, ein monochromatisches Licht mit nur einem Wellenlängenanteil herausfiltert.

Beispiele für das polychromatische Licht sind Sonnenlicht oder das Licht einer Glühlampe; zum monochromatischen Licht gehört das Laserlicht.

Es gibt verschiedene Arten von Monochromatoren: Zum einen die nicht-einstellbaren und zum anderen die einstellbaren.

Zu den nicht-einstellbaren (auch nicht-dispersiv genannten) gehören die Farbfilter. Bei ihnen werden durch Absorption und / oder Interferenz unerwünschte Spektralbereiche eliminiert, wodurch ein nahezu monochromatisches Licht entsteht (nahezu deshalb, weil ein wirklich als monochromatisch zu bezeichnendes Licht nur von einem Laser erzeugt werden kann).

Einstellbare Monochromatoren (auch dispersiv genannt) sind in der Regel eine Anordnung von Spiegeln, Spalten und einem optischen Gitter oder einem Prisma. Durch einen Spalt fällt polychromatisches Licht einer Halogen- oder Xenonglühlampe auf das Gitter bzw. Prisma, an welchem es durch Brechung bzw. Dispersion in seine einzelnen spektralen Bestandteile zerlegt wird. Durch einen zweiten Spalt wird dann nur ein sehr kleiner Teil des Spektrums durchgelassen, der dann nahezu monochromatisch ist.

In einer solchen Apparatur ist meistens das Gitter bzw. das Prisma drehbar eingebaut, sodass durch Drehung desselben das Spektrum vom Anfang bis zum Ende über den Spalt gefahren werden kann, wodurch einstellbar Licht jeder Spektralfarbe erzeugt werden kann.

### 2.1.2. Der Wadshorth-Monochromator

Der von mir verwendete Monochromator ist ein so genannter Wadshorth-Monochromator. Er ist auf Foto 1 zu sehen.

In ihm erzeugt eine Halogenglühlampe das polychromatische Licht. Dieses fällt über einen Einlassspalt und einen Spiegel auf ein Prisma, in welchem es spektral

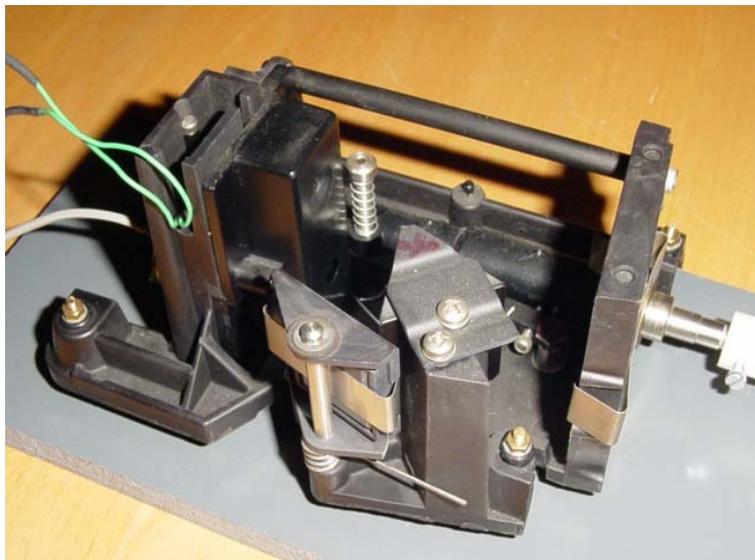


Foto 1: Der Wadshorth-Monochromator

zerlegt wird. Über zwei weitere Spiegel wird dieses Spektrum dann auf einen Auslassspalt abgebildet. Das Prisma und einer der drei Spiegel sind fest miteinander verbunden und als Einheit drehbar ausgeführt, wodurch es möglich ist, den gesamten Spektralbereich über den Auslassspalt abzubilden. In Abbildung 1 ist das Funktionsprinzip des Wadshorth-Monochromators zu sehen.

Die Einstellung der Wellenlänge erfolgt über eine Drehachse, welche um 9 Umdrehungen gedreht werden kann. Drehungen an dieser Achse werden über ein Gewinde in eine lineare Bewegung umgesetzt, welche über eine Steuerkurve dann die Prisma-Spiegel-Einheit dreht.

Eine weitere Steuerkurve steuert zusätzlich die Breite des Auslassspaltes, um die Bandbreite des ausfallenden Lichtes konstant zu halten.

Leider waren keine Daten zu dem Monochromator vorhanden, deshalb mussten alle entscheidenden Werte selbst gemessen werden. Wie diese Messungen dazu aussahen, wird in Kapitel 4 beschrieben.

Zuerst habe ich vermutet, dass der Zusammenhang Stellung der Achse – Wellenlänge linear ist, da die Drehung des Prismas über eine Steuerscheibe erfolgt. Diese Vermutung bestätigte sich bei den Messungen.

Weiterhin konnte ich messen, dass die Wellenlänge des Ausgangslichtes zwischen 970nm und 350nm einstellbar ist. Dies entspricht dem kompletten sichtbaren Bereich des Lichtes mit etwa 400nm bis 780nm plus Ausschnitten des Infrarotspektrums und des Ultraviolettpektrums.

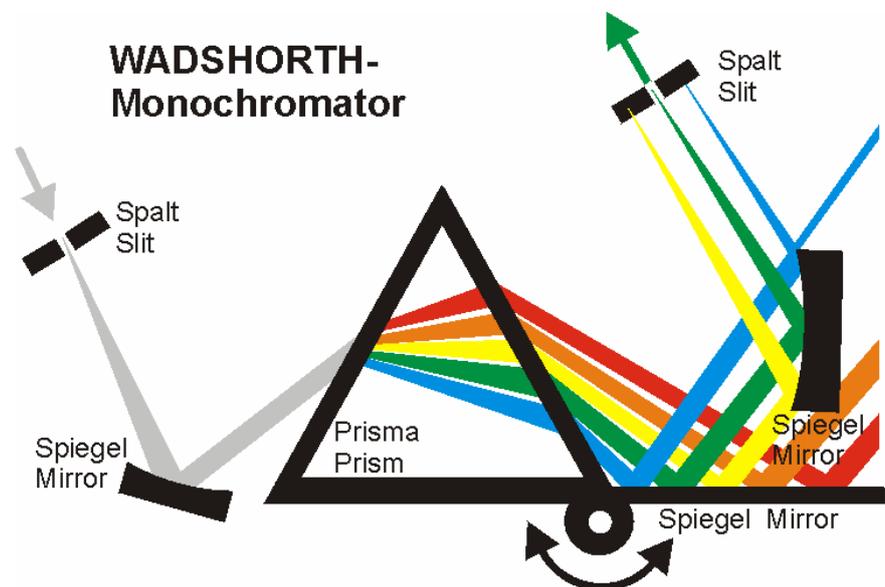


Abbildung 1: Funktionsweise eines Wadshorth-Monochromators (entnommen aus [1])

## 2.2. Der PIC-Microcontroller

### 2.2.1. Aufbau und Funktionsweise

PICs sind sehr hoch integrierte ICs der Firma Microchip, die zur Klasse der Microcontroller gehören. Vom Aufbau her ähneln sie sehr einem PC, das heißt, auf dem Chip sind eine RISC-CPU (Reduced Instruction Set Computing Central Processing Unit), ein mehrfach

beschreibbarer Flash-Programmspeicher, ein RAM-Speicher, in vielen Fällen ein nicht-flüchtiger Datenspeicher (EEPROM) sowie bis zu 96 I/O-Pins, die als Schnittstellen wie zum Beispiel RS232, I<sup>2</sup>C, USB, Ethernet, als Anschluss für LC-Displays oder als frei verwendbare Digital-I/Os genutzt werden können. Der Programmspeicher kann bis zu 128kB groß sein, das RAM bis zu 4kB und das EEPROM bis zu 1kB. Die Geschwindigkeit der CPU liegt etwa bei maximal 10 MIPS (MIPS = Mega Instructions Per second). Dies liegt, auch wenn aufgrund der verschiedenen Prozessorarchitekturen kein direkter Vergleich vorgenommen werden kann, von der Rechenleistung her in der Größenordnung eines Intel 80386 Mikroprozessors.

Die Funktionsweise des PICs ähnelt im weitesten Sinne der eines PCs: Ein Microcontroller kann von einem PC mit einer Software programmiert werden, sodass er genau das tut, was er tun soll. Dadurch sind diese Bausteine sehr flexibel einsetzbar.

Oft werden sie für Steuer- und Regelaufgaben in Geräten des täglichen Lebens eingesetzt, zum Beispiel in Waschmaschinen, Handys oder auch in der Steuerelektronik von Autos.

In der modernen Elektrotechnik verdrängen sie mehr und mehr konventionelle digitale Schaltungstechnik wie zum Beispiel die TTL- oder CMOS-ICs.

### **2.2.2. Spezifikationen meines PICs**

Der von mir verwendete PIC18F452 der Firma Microchip ist ein Microcontroller der „High Performance Enhanced“ - Baureihe. Er besitzt eine 8 Bit RISC-CPU mit einer Geschwindigkeit von maximal 10 MIPS, 32kB Flash-Programmspeicher (bis zu 100 000 mal beschreibbar), 1,5kB RAM sowie 256 Byte EEPROM – Datenspeicher.

Ein Befehlswort der CPU ist 16 Bit lang, sodass im Programmspeicher 16 kWords Platz finden. Es gibt insgesamt 75 Assembler-Befehlswoorte, die von der CPU unterstützt werden.

Die Architektur des Microcontrollers ist auf die Programmierung in C optimiert.

Nach außen hin besitzt er 35 digitale I/O – Leitungen; außerdem hat er verschiedene Schnittstellen wie zum Beispiel RS232 oder RS485 integriert. Auch besitzt er interne A/D – Wandler mit einer Auflösung von 10 Bit sowie Analog-Komparatoren.

Es gibt ihn sowohl im DIP40-Gehäuse als auch im PLCC- oder TQFP – SMD – Gehäuse mit 44 Pins.



*Foto 2: PIC-Microcontroller im PLCC- sowie im DIP40-Gehäuse*

### **2.2.3. Programmierung von Software für PICs**

Damit ein Microcontroller eine gewünschte Funktion übernehmen kann, muss er zunächst programmiert werden. Dazu wird in der Regel auf einem PC in einer Microcontroller-Entwicklungsumgebung ein Programm geschrieben. Übliche Programmiersprachen hierfür sind Assembler, C und seit einiger Zeit auch andere Hochsprachen wie BASIC. Dieses Programm wird dann compiliert und mithilfe eines Programmers, welcher an den PC angeschlossen ist, in den PIC geschrieben.

So programmiert, kann der PIC in seine Zielschaltung eingesetzt werden und seiner Funktion nachgehen.

### **2.2.4. Verwendete Programmierumgebung**

Die von mir verwendete Programmierumgebung ist die MPLAB IDE von Microchip. Sie kann als Freeware von der Homepage [6] heruntergeladen werden. Als Ergänzung habe ich dazu noch den MPLAB C18 Compiler derselben Firma verwendet, der es ermöglicht, in der MPLAB IDE mit der Programmiersprache C zu arbeiten. Auch dieser ist als Freeware als „Student Edition“ mit eingeschränktem, für die meisten Zwecke aber völlig ausreichendem Funktionsumfang, auf derselben Homepage zu finden.

### **2.2.5. Verwendeter Programmier**

Da ich bislang keinen PIC-Programmer besaß, sondern nur ein Evaluation Board mit eingebautem Programmer für den dort eingebauten PIC, beschloss ich, einen reinen PIC-Programmer aufzubauen.

Zuerst schaute ich mich auf der Suche nach einem entsprechenden Programmer im Internet um und wurde auch fündig. Dieser arbeitete jedoch nicht korrekt mit meinen PICs zusammen, woraufhin ich mich entschloss, einen Programmer selbst zu entwickeln. Dieser Entwicklung legte ich den Schaltplan meines Evaluation Boards [2] zugrunde und wandelte ihn nach meinen Bedürfnissen ab. Herausgekommen ist eine Schaltung, dessen Schaltplan auf Seite 14 zu finden ist.

### 3. Beschreibung meiner Apparatur

#### 3.1. Was kann meine Apparatur?

Meine Apparatur kann benutzergesteuert Licht aller gewünschten Wellenlängen zwischen 970nm und 350nm erzeugen. Per Tasterdruck kann die gewünschte Wellenlänge eingestellt

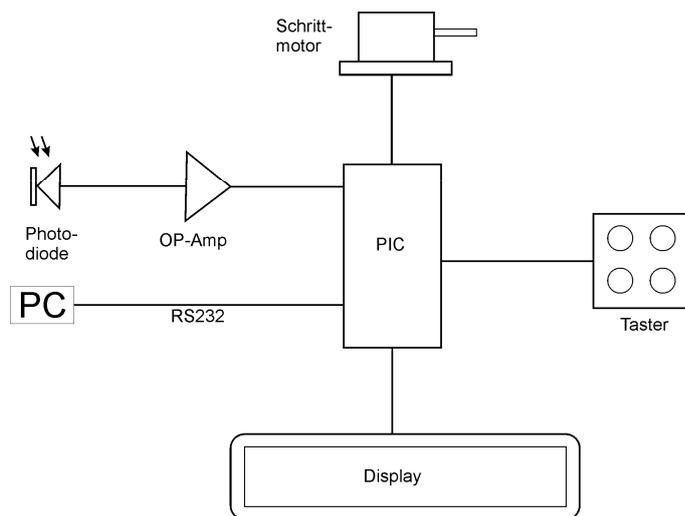


Abbildung 2: Funktionsschema meiner Apparatur

Charakteristik der Fotodiode und des Monochromators und ist somit in der Lage, die relative Intensität des Lichtes in Prozent im Display anzuzeigen. Ist kein Objekt zwischen dem Ausgang und der Fotodiode, so beträgt diese bei jeder Wellenlänge 100%.

Damit erhält man die Möglichkeit, optische Transmissionsmessungen verschiedenster Objekte wie Farbfiltern, Farbfolien oder Sonnenbrillengläsern zu machen.

Zusätzlich findet eine Ausgabe der Daten über RS232 an einen PC statt, sodass man die gemessenen Daten dort speichern oder in Form von Graphen oder Ähnlichem weiterverarbeiten kann.

Eine Schemazeichnung der gesamten Apparatur ist in Abbildung 2 zu sehen, ein Foto in Foto 3.

werden. Diese wird dann auf dem Display angezeigt, und ein Schrittmotor bringt gleichzeitig die Drehachse des Monochromators in die entsprechende Stellung. Zusätzlich befindet sich ca 1cm hinter der Lichtaustrittsöffnung eine Fotodiode, welche die Intensität des austretenden Lichtes misst. Diese Fotodiode ist mit einem A/D-Wandler-Eingang des PICs verbunden. Der PIC kennt die



Foto 3: Foto der gesamten Apparatur

### **3.2. Aufbau der Mechanik**

Der mechanische Aufbau meines Projekts ist relativ einfach gehalten. Auf einer stabilen, 10mm starken PVC-Grundplatte sind der Monochromator und der Schrittmotor befestigt. Der Schrittmotor hat einen Schrittwinkel im Vollschrittmodus von  $1,8^\circ$ , in dem von mir benutzten Halbschrittmodus von  $0,9^\circ$ . Das entspricht 400 Schritten pro Umdrehung, bzw. 3600 Schritten für die gesamten neun Umdrehungen. Diese Schrittzahlen werden ab sofort als absolutes Maß für die Stellung der Motorachse verwendet.

Für eine sichere Verbindung der Schrittmotor- und der Monochromatorachse sorgt ein selbst gedrehtes Adapterstück aus Nylon, in dem die beiden Achsen mit Schrauben fixiert werden. Da die Achse des Schrittmotors glatt und rund ist, ergibt sich außerdem ein mechanischer Schutz des Monochromators gegen eine Überbeanspruchung, da im Fehlerfalle, falls der Schrittmotor gegen einen Anschlag fahren sollte, die Motorachse in dem Adapterstück durchdreht.

### **3.3. Aufbau der Elektronik**

Die Elektronik besteht aus drei Baugruppen: Dem PIC, der Schrittmotoransteuerung und dem Operationsverstärker. Ein Schaltplan dieser Elektronik ist auf Seite 15 zu finden

Das zentrale Element der Schaltung ist der PIC. Er steuert den Schrittmotor, nimmt die Displayausgabe vor, nimmt die Befehle des Bedieners über die Taster entgegen, wandelt die Ausgangsspannung des Operationsverstärkers in einen Digitalwert um und gibt die Daten über RS232 an einen PC aus.

Die Schrittmotoransteuerung besteht aus einem TTL-Puffer vom Typ 7406 und vier leistungsstarken HEXFETs mit einem sehr geringen  $R_{DSon}$ . Das hat den Vorteil, dass die Transistoren trotz eines Stroms von über 2A nicht gekühlt werden müssen. Außerdem geschieht die Ansteuerung dieser FETs nahezu stromlos, was eine komplizierte Treiberstufe, wie sie für bipolare Transistoren nötig wäre, überflüssig macht.

Der Operationsverstärker, welcher das Signal der Fotodiode verstärkt, ist als Strom-/Spannungswandler geschaltet. Die Fotodiode lässt einen zur Intensität des einfallenden Lichtes proportionalen Strom fließen, welcher vom OP in eine Spannung gewandelt wird. Die Verstärkung ist dabei abhängig vom Widerstand zwischen dem Eingang und dem Ausgang, wobei gilt: Je größer der Widerstand, desto höher die Verstärkung. Der PIC kann mithilfe eines Relais zwischen zwei verschiedenen Verstärkungen wählen.

### 3.4. Aufbau der PIC-Software

Damit der PIC genau das tut, was er soll, benötigt er eine Software. Diese Software habe ich in der Programmiersprache C geschrieben. Sie ist relativ lang und komplex (sie umfasst etwa 800 Zeilen Programmcode), daher würde es den Rahmen dieser Arbeit sprengen, wenn ich hier den Quellcode komplett abdrucken und erläutern würde.

Aufgrund der Länge und Komplexität der Software habe ich sie in Prozeduren unterteilt. Die Initialisierungsroutine, in der alle Prozeduren aufgeführt werden, ist hier zu sehen:

```
void MotorStepF();           Motor ein Schritt vor
void MotorStepB();           Motor ein Schritt zurück
void MotorRunF(unsigned char SpeedF); Motor vorwärts laufen
void MotorRunB(unsigned char SpeedB); Motor rückwärts laufen
void DispOut();              Displayausgabe der Werte
void (RS232Out);             RS232-Ausgabe der Werte
int ReadAD (void);           Fotodiode über ADC auslesen
void corrVal (ADval);        Messwert der Fotodiode in
                              Relativwert umwandeln
```

### 4. Die ersten Messungen

Die allererste Messung wurde durchgeführt, um zu überprüfen, ob der Zusammenhang Stellung der Achse – Wellenlänge linear ist. Dazu habe ich drei extrem schmalbandige Farbfilter benutzt: Einen mit 580nm, einen mit 545nm und einen mit 436nm. Bei jedem habe ich die entsprechende Step-Position des Motors bei dem Durchlass-Maximums notiert und daraus eine Formel gebildet:

$$f(x) = -\frac{4}{23} * x + 973 \quad (1)$$

Hier steht x für die Step-Position der Achse und f(x) für die Wellenlänge

Hier zeigte sich nun, dass meine Vermutung stimmte, dass der Monochromator linear arbeitet. Mit der Formel, die ich aus nur zwei Messwerten bildete, konnte ich immer den dritten errechnen; außerdem ergab sich, egal welches Wertepaar ich zur Formelberechnung verwendete, immer dieselbe Formel.

Somit war ich nun in der Lage, zu jeder beliebigen Achsposition des Monochromators die Wellenlänge zu bestimmen.

Bei der zweiten Messung bezog ich die Fotodiode mit ein. Hier wurde die Ausgangsspannung der Fotodiode in Abhängigkeit zur Wellenlänge gemessen. Der Graph dieser Messung sieht so aus:

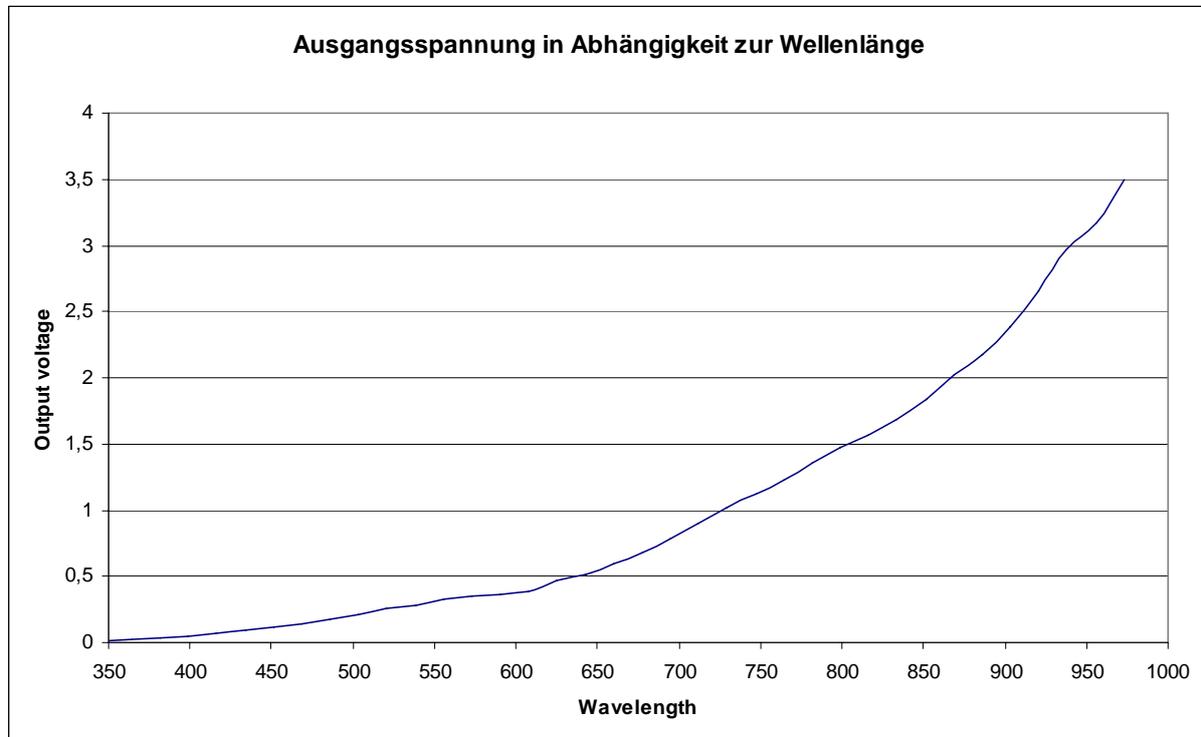


Abbildung 3: Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Wellenlänge

Dieser Graph diente mir als Eichkurve. Er wurde in Tabellenform im PIC abgespeichert, sodass dieser dann mit Hilfe der der Wellenlänge entsprechenden Korrekturzahl die relative Intensität berechnen kann.

Diese beiden Messungen reichten aus, um das Gerät voll einsatzfähig zu machen.

## **5. Einsatzgebiete**

Mein Gerät ist ein Durchlicht-Spektrometer. Es kann vielfältig eingesetzt werden, und zwar immer dort, wo ein Objekt auf seine spektrale Durchlässigkeit überprüft werden soll. Dazu können beispielsweise gehören:

- Bestimmung der Filtereigenschaften von unbekanntem optischen Filtern
- Bestimmung der Transmissionseigenschaften von Sonnenbrillen
- Bestimmung der Transmissionseigenschaften von chemischen Lösungen

Dem Einsatz dieses Gerätes sind hier kaum Grenzen gesetzt!

## **6. Probleme, die bei der Arbeit an dem Projekt entstanden**

Die Arbeit an diesem Projekt verlief relativ problemlos. Neben einigen Programmierfehlern in der Software des PICs, die aber sicherlich unvermeidlich sind, gab es nur einmal das Problem, dass eine Schaltplandatei aufgrund eines Programmfehlers verloren ging. Auch dieses Problem ließ sich aber beheben, indem einfach ein neuer Schaltplan erstellt wurde.

## **7. Ausblick**

Momentan ist die Schaltung nur auf einem Steckbrett aufgebaut, wodurch sie noch nicht besonders robust und transportfähig ist. Deshalb soll sie bis zum Wettbewerb auf einer Platine aufgebaut werden.

Auch ist die Bedienungsführung des Gerätes noch nicht optimal, da jede gewünschte Wellenlänge mühsam angefahren werden muss. Abhilfe könnte hier durch die Verwendung einer numerischen Tastatur geschaffen werden.

Außerdem wurden bislang noch nicht besonders viele Messungen ausgeführt. Auch hier soll weitergearbeitet werden, sodass auf dem Wettbewerb Messergebnisse in grafischer Form mit verschiedenen Filtern präsentiert werden können.

## **8. Quellen**

[1]: <http://www.ir-spektroskopie.de/spec/basics/#3>

[2]: Elektor Ausgabe 2/2005, S. 34-40, Elektor-Verlag Aachen, 2005

[3]: PIC18FXX2 Data Sheet, Microchip Technology Inc., 2002. Heruntergeladen von <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39564c.pdf>

[4]: [www.microchip.com](http://www.microchip.com)

## **9. Danksagung**

Ich bedanke mich bei meinem Betreuungslehrer, Herrn StD Thomas Biedermann, für seine große Geduld und seinen großen Zeiteinsatz. Außerdem bedanke ich mich bei der gesamten Familie Biedermann, die mich an langen Forschungstagen ertragen und auch immer gut gepflegt hat. DANKE!!!