

Sternspektroskopie mit Lichtleiter-CCD-Technik

Christian Thiele
Jugend forscht '98
Fachgebiet: Geo- und Raumwissenschaften

Inhalt:

Einleitung	1
1. Bisher von Amateurastronomen benutzte Technik	2
1.1. Das Reflexionsgitter	2
1.2. Der Spaltspektrograph	3
1.2.1. Auftretende Probleme	4
1.2.2. Die Verwendung von Lichtleitern	4
2. Das „Lichtleiterokular“	5
2.1. Die Idee	5
2.2. Die Ausführung	6
2.2.1. Der Lichtleiter	6
3. Der CCD-Sensor	7
3.1. Die Ansteuerungs- und Ausleseelektronik	7
3.2. Die Kühlung des CCD-Chips	9
3.3. Die Auslesesoftware	10
4. Der Spektrograph mit Lichtleiter-CCD-Technik	10
4.1. Die Anpassung des Kollimators an den Lichtleiter	10
4.2. Die Abbildung des Spektrums	12
4.3. Die theoretische spektrale Auflösung	13
4.4. Die Auswertung der Daten des CCD-Elements	13
5. Schluß	14
6. Literatur- und Quellenverzeichnis	15

Einleitung

Ein Spektrograph dient dazu, Licht (z.B. das Licht eines Sterns) in sein Spektrum zu zerlegen und aufzuzeichnen. Dann kann im Spektrum ausgemessen werden, aus welchen Farbanteilen das untersuchte Licht besteht.

Die Idee, einen Spektrographen mit Lichtleiter-CCD-Technik zu bauen, entstand aus meinem alten Jugend forscht - Projekt zum Thema Sternspektroskopie. Dort traten bei der Aufnahme von Sternspektren Probleme auf, die wohl vielen Amateurastronomen bekannt sind:

- Beim Benutzen von großen und schweren Zusatzgeräten am Teleskop treten Stabilitätsprobleme der Teleskopmontierung auf.
- Bei der Aufnahme von Sternspektren auf fotografisches Filmmaterial sind meistens sehr lange Belichtungszeiten und so eine exakte Nachführung nötig.

Mein Ziel ist es, einen leistungsfähigen Spektrographen zu bauen, der an einem bestehenden, einfachen Amateuerteleskop eingesetzt werden kann. Dazu soll er mit einem Lichtleiter mit dem Teleskop verbunden werden. Um auch Spektren schwacher Sterne aufnehmen zu können, soll ein CCD-Element als Bildempfänger dienen. Dies ermöglicht auch eine einfache und möglicherweise automatisierte Auswertung des Spektrums mit einem PC.

1. Bisher von Amateurastronomen benutzte Technik

1.1. Das Reflexionsgitter

Das Sternlicht kann mit einem oder mehreren Prismen, mit einem Gitter oder mit einer Kombination aus beiden in seine Spektralfarben zerlegt werden. Ich betrachte hier nur die Zerlegung mit einem (Reflexions-) Gitter.

Beim optischen Gitter werden die Welleneigenschaften des Lichts dazu ausgenutzt, weißes Licht in Spektralfarben zu zerlegen.

Ein Reflexionsgitter besteht aus einer spiegelnden Fläche, in die feine Linien eingeritzt sind. Solche Gitter wurden zuerst von L.M. Rutherfurd und später von H.A. Rowland (1882) benutzt¹. Die eingeritzten Linien bilden den undurchlässigen Teil des Gitters, an den unverletzten, reflektierenden Linien entstehen nach Huygens viele Elementarwellen, die sich halbkreisförmig ausbreiten. Fällt Licht unter dem Winkel α auf das Gitter, so entsteht vor dem Gitter ein Interferenzmuster. Nur in bestimmten Winkeln interferieren die Wellenzüge gleicher Wellenlänge (und damit Farbe) konstruktiv. Dies geschieht, wenn der Gangunterschied zwischen zwei Wellenzügen ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge λ ist. An diesen Stellen ist nur Licht einer Wellenlänge zu sehen.

Die Formel für das Reflexionsgitter lautet:

$$\sin \alpha + \sin \beta = k \cdot \lambda / g \tag{Gl.(1)}$$

wobei g die Gitterkonstante (Abstand der Linien), α der Einfallswinkel, β der Winkel, unter dem das Interferenzmaximum auftritt, λ die Wellenlänge des Lichts, und k die Ordnung des Maximums ist.

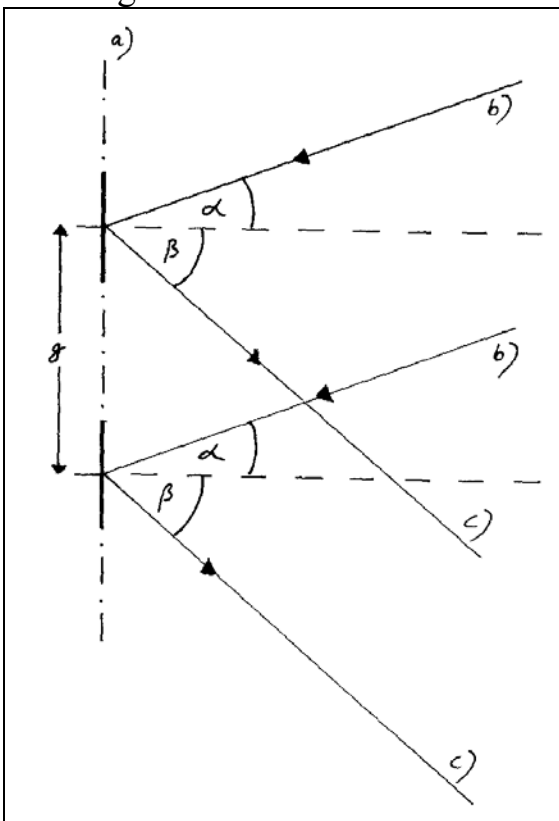


Abbildung 1: Beugung am Reflexionsgitter a) Gitter, b) einfallende Lichtstrahlen, c) Lichtstrahlen des gebeugten Lichts

1.2. Der Spaltspektrograph

Hochaufgelöste Sternspektren werden fast ausschließlich mit Spaltspektrographen aufgezeichnet.

Bei einem Spaltspektrographen wird das Beugungs- beziehungsweise Seeingscheibchen des Sterns zunächst mit einem Objektiv in der Spaltebene abgebildet. Hinter dem Spalt tritt ein sich aufweitendes Lichtbündel auf, welches vor dem Auftreffen auf das dispergierende Element (hier: das Reflexionsgitter) durch eine Kollimatorlinse parallelisiert werden muß. Das am Gitter entstehende Spektrum wird mit einem weiteren Objektiv in dessen Brennebene abgebildet. Der Spalt muß senkrecht zur Dispersionsrichtung des Gitters orientiert sein.

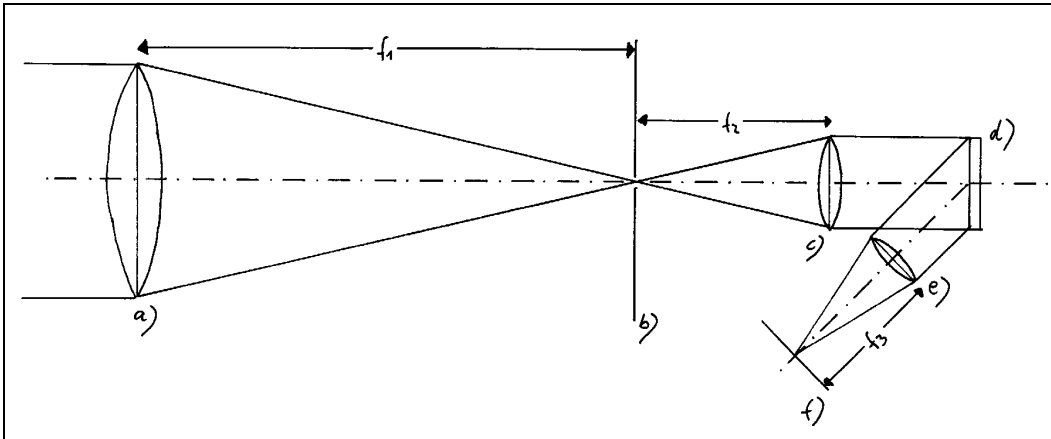


Abbildung 2: Der Strahlengang im Gitterspektrographen mit Spalt

a) Objektivlinse mit dem Durchmesser d_1 und der Brennweite f_1 ; b) Spalt; c) Kollimatorlinse d_2, f_2 ; d) Reflexionsgitter; e) abbildende Linse d_3, f_3 ; f) Fokalebene

Für die Objektiv- und Kollimatorlinse muß bei optimaler Ausleuchtung des Gitters gelten:

$$f_1/d_1 = f_2/d_2. \quad \text{Gl.(2)}$$

Die Dispersion des Spektrographen beträgt:

$$d = (f_3 \cdot k) / (g \cdot \cos \beta). \quad \text{Gl.(3)}$$

Mit der Anzahl der beleuchteten Gitterfurchen $Z = l/g$ (l ist der Durchmesser der beleuchteten Gitterfläche) beträgt die Auflösung Δl in der Fokalebene f :

$$\Delta l = (f_3 \cdot \lambda) / (g \cdot Z \cdot \cos \beta). \quad \text{Gl.(4)}$$

Die Breite b' der Abbildung des Spalts in der Fokalebene bei der wahren Spaltbreite b beträgt:

$$b' = (b \cdot f_3) / (\cos \beta \cdot f_2). \quad \text{Gl.(5)}$$

Der Spektrograph muß wegen der scheinbaren Bewegung der Sterne im Tagesverlauf auf den zu spektrographierenden Stern nachgeführt werden.

Dazu wird er parallel zu einem parallaktisch montierten Fernrohr befestigt. Bei der Aufnahme eines Spektrums wird die Nachführung auf den Stern mit einem Fadenkreuzokular im Fernrohr kontrolliert.

1.2.1. Auftretende Probleme

Die Nachführung des Spektrographen kann Amateurastronomen einige Probleme bereiten:

Der Spektrograph selbst braucht ein Objektiv mit möglichst großer Öffnung, um auch Spektren schwächerer Sterne aufzunehmen. Wählt man zugunsten einer hohen Auflösung auch noch eine lange Kollimatorbrennweite, so wird das Gerät sehr lang. Oft ist der Spektrograph dann größer und schwerer als das Nachführteleskop selbst.

Nutzt man die Optik des Teleskops selbst als Objektiv für den Spektrographen, so wird ein zweites Fernrohr zur Kontrolle der Nachführung nötig. Auch in diesem Fall ist die Teleskopmontierung vom Gewicht der Geräte oft überlastet.

Ein ähnliches Problem hatten Astrofotografen:

Sie konnten nicht durch ein Teleskop gleichzeitig fotografieren und die Nachführung kontrollieren. Dazu war immer ein zweites Teleskop notwendig. Mit einem sog. „off-axis-guider“ ist dies heute möglich: ein Teil des außeraxialen Strahlenbündels aus dem Aufnahmefernrohr wird mit einem kleinen Prisma oder Spiegel seitlich in ein Fadenkreuzokular abgelenkt².

1.2.2. Die Verwendung von Lichtleitern

Für Amateurastronomen, die mit ihrem vorhandenen Teleskop Sternspektren aufnehmen wollen, gibt es bisher eine interessante Alternative:

Der Spektrograph wird nicht auf das Teleskop montiert, sondern daneben gestellt und mit einer Lichtleitfaser mit dem Teleskop verbunden.

Das eine Ende des Lichtleiters wird im Fokus des Teleskops gehalten, das andere Ende in der Spaltebene des Spektrographen. Am besten eignet sich ein reines Spiegelteleskop (Reflektor), da nur hier die Brennweite für Licht aller Wellenlängen gleich ist.

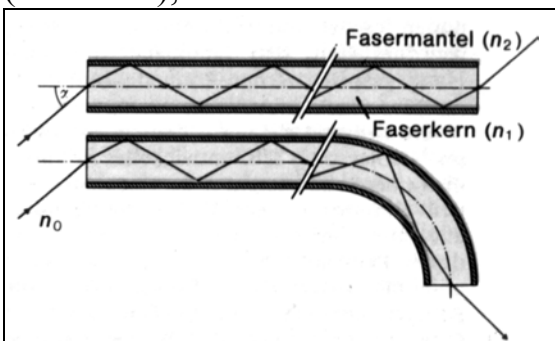


Abbildung 3: Die Lichtbrechung im Lichtleiter³

Fällt ein Lichtstrahl auf die polierte Eingangsfläche des Lichtleiters, so wird er im Innern der Faser durch Totalreflexion weitergeleitet. Dabei folgt er allen Biegungen der Faser und tritt am Ende wieder aus.

So muß der große Spektrograph nicht auf dem Teleskop nachgeführt zu werden.

Trotzdem benötigt man zur Nachführung ein zweites Fernrohr, das parallel zum dem Fernrohr mit dem Lichtleiter montiert wird.

Als problematisch erweist sich die exakt parallele Einstellung der beiden optischen Systeme, da das Seeingscheibchen des Sterns auf die Spitze des etwa 1 mm bis 50 µm dünnen Lichtleiters treffen muß, während der Stern im Leitfernrohr in der Mitte des Fadenskreuzes zu sehen ist. Auch die Fokussierung des Sternscheibchens auf den Lichtleiter erweist sich als schwierig und kann am besten durch „Versuch und Irrtum“, also durch die Aufnahme von Spektren mit unterschiedlicher Einstellung vorgenommen werden. Es ist auch möglich, die Helligkeit des am Ende aus dem Lichtleiter austretenden Lichtes visuell zu beobachten und solange die Fokuseinstellung zu verändern, bis es am hellsten ist.

2. Das „Lichtleiterokular“

2.1. Die Idee

Beim Experimentieren mit einem Lichtleiter kam mir der Gedanke eines Systems, welches ähnlich wie der „off-axis-guider“ in der Astrofotografie bei der Spektroskopie mit einem Fernrohr für Aufnahme und Nachführkontrolle auskommt.

Die Spitze des Lichtleiters, die später in der Brennebene des Teleskops sein soll, wird in der Brennebene eines (Fadenkreuz-) Okulars gehalten, im Winkel von 90° gebogen und vor der Linse des Okulars seitlich aus diesem herausgeführt.

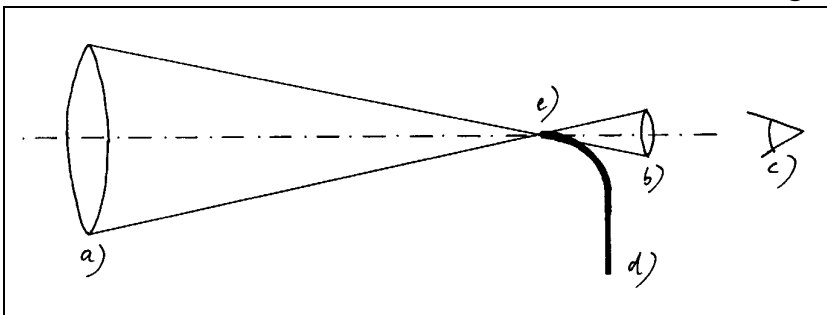


Abbildung 4: Der Lichtleiter in der Fokalebene des Teleskops vor dem Okular
a) Teleskopobjektiv; b) Okular; c) Auge des Beobachters; d) Lichtleiter;
e) Fokalebene

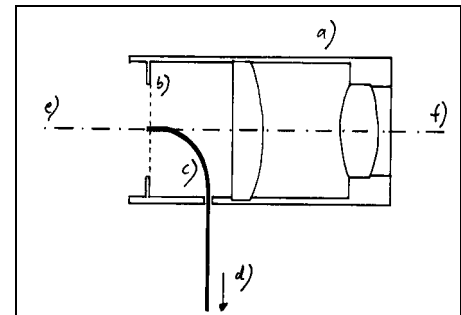


Abbildung 5: Querschnitt durch das „Lichtleiterokular“
a) Okulargehäuse; b) Gesichtsfeldblende; c) Lichtleiter; d) zum Spektrographen; e) zum Teleskop; f) zum Beobachter

Die Einstellung eines Sterns oder eines anderen astronomischen Objekts auf den Lichtleiter ist nun denkbar einfach: Man steckt das Okular in den Okularauszug des Teleskops und stellt das gewünschte Objekt wie gewöhnlich scharf. Im Gesichtsfeld des Okulars sieht man ganz normal den Stern und die Spitze des Lichtleiters im Querschnitt. Sie befindet sich in der Brennebene des Okulars und damit auch in der Brennebene des Tele-

skops. Nun muß man das Teleskop nur noch so einstellen, daß das Bild des zu spektroskopierenden Sterns hinter dem Lichtleiter „verschwindet“.

2.2. Die Ausführung

Eine Vergrößerung von 100-fach ist sinnvoll und vielseitig, um viele astronomische Objekte zu beobachten. Das Okular soll an einem Schmidt-Cassegrain-Teleskop mit 20 cm Öffnung und 2 m Brennweite benutzt werden. Daher wähle ich ein Okular mit 20 mm Brennweite ($1 \frac{1}{4}$ Zoll Durchmesser). Wichtig ist, daß die teleskopseitige Brennebene des Okulars, wie etwa bei Okularen nach Kellner, frei zugänglich ist. Okulare nach Huygens, Mittenzwey oder Ramsden eignen sich nicht⁴.

Um die Spitze des Lichtleiters in der Brennebene zu befestigen, habe ich auf die Gesichtsfeldblende des Okulars ein Doppelfadenkreuz aus ca. 0,1 mm dünnen Drähten geklebt. Die Drähte sind Einzeldrähte aus dem "Drahtbündelchen" einer dünnen Elektroniklitze. Schließlich wird die Spitze des Lichtleiters in der Mitte des Doppelfadenkreuzes festgeklebt. Das Fadenkreuz muß recht stabil sein, da es die Spitze des Lichtleiters halten muß, wenn dieser um 90° gebogen wird. Der Abstand zwischen der okularseitigen Linse und der Brennebene sollte nicht zu klein sein, da in Lichtleitern hohe Lichtverluste auftreten, wenn sie in engen Radien gebogen werden. Der Lichtleiter verläßt das Okular durch eine Bohrung an der Seite.



Abbildung 6: Das „Lichtleiterokular“ (ohne $1 \frac{1}{4}$ Zoll-Hülse)
Die Halterung des Lichtleiters im Doppelfadenkreuz

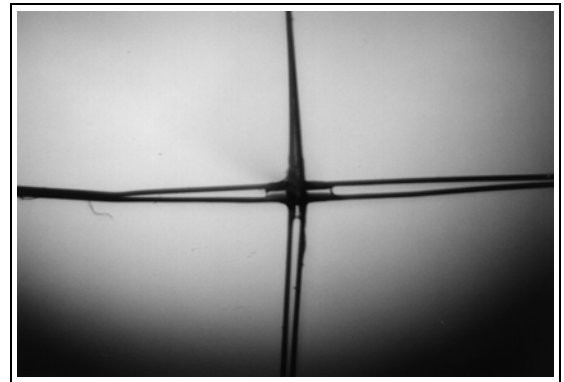


Abbildung 7: Der Blick durch das Okular
Man erkennt den Lichtleiter in der Mitte des Fadenkreuzes

2.2.1. Der Lichtleiter

Der von mir verwendete Lichtleiter hat eine Länge von ca. 70 cm und einen Durchmesser von ca. 150 μm . Leider sind mir die weiteren technischen Daten des Lichtleiters unbekannt, seine beiden Enden sind unbearbeitet.

Der Lichtleiter sollte nicht dünner sein als die der Durchmesser der Beugungs- bzw. Seescheibchen eines Sterns in der Fokalebene des Teleskops. Die Seescheibchen in meinem Teleskop sind maximal etwa 50-100 μm groß.

Soll der Lichtverlust an der Ein- und Austrittsfläche möglichst gering sein, so müssen diese Flächen möglichst plan und glatt (am besten poliert) sein. Da ich nicht die nötigen Geräte habe, um einen so dünnen Lichtleiter plan zu schleifen, habe ich das Ende auf einer weichen Unterlage mit einem Skalpell abgebrochen und die Bruchkante unter einem Mikroskop untersucht. Nach einigen Versuchen erhält man recht plane und glatte Bruchstellen, die nur manchmal an der Seite eine Unregelmäßigkeit zeigen.

Das andere Ende des Lichtleiters kann mit einem Stecker in den Spektrographen gesteckt werden.

Der Lichtleiter hat noch einen Schutzmantel aus Kunststoff. Um eine Beschädigung oder Abreißen aus dem Okular zu verhindern, habe ich Okular und Stecker durch ein 0,8 mm dünnes Drahtseil als Zugentlastung verbunden. Drahtseil und Lichtleiter werden zu Schutz durch einen ca. 4 mm dicken Gummischlauch geführt.

3. Der CCD-Sensor

Als Bildsensor soll in meinem Spektrographen ein CCD-Chip dienen.

Die Vorteile von CCD-Elementen sind ihre bessere Quantenausbeute (80% statt 0,6%), Linearität und Dynamik (5000:1 statt 300:1) im Vergleich zur fotografischen Schicht⁵.

CCD heißt **charge coupled device** (ladungsgekoppeltes Gerät). Einfallende Photonen werden im Detektor durch den inneren Photoeffekt in Photoelektronen umgesetzt. Die freigesetzten Elektronen sammeln sich durch ein geeignetes elektrisches Potential in den Pixels (**picture elements**). Diese werden auch „Potentialtöpfe“ genannt⁶. Zum Auslesen des Sensors werden die in den Pixels gesammelten Ladungen von einem Pixel zum nächsten verschoben, bis sie am Rand des Chips den Eingang des Verstärkers erreichen. Das verstärkte Signal wird dann mit einem Analog/Digital-Wandler in einen PC eingeleiten.

Eine handelsübliche CCD-Kamera mit einem zweidimensionalen Chip scheidet für mein Projekt vor allem aufgrund der niedrigen für das Spektrum nutzbaren Pixelanzahl in einer Reihe aus. Solche Kameras für Amateurastronomen haben etwa 500 * 500 Pixels, es läßt sich also entweder nur ein kleiner Ausschnitt des Spektrums mit hoher oder ein großer Ausschnitt mit geringerer spektraler Auflösung pro Pixel aufnehmen. Außerdem sind diese gebrauchsfertigen Kameras recht teuer im Vergleich zu meiner Lösung.

Als Bildsensor dient in meinem Spektrographen ein lineares CCD-Array. Da das Spektrum in meinem Spektrographen aufgrund des punktförmigen Eintritts“spaltes“ (Lichtleiter) fadenförmig und nicht flächig ist, ist ein zweidimensionaler Sensor überflüssig.

Ich entschied mich für den linearen CCD - Sensor ILX508A von SONY (s/w mit 7926 Bildelementen von 7 * 7 μm^2 Größe). Eigentlich wurde er für den Einsatz in hochauflösenden Kopierern entwickelt. Er zeichnet sich durch eine große Pixelzahl, eine sehr hohe Empfindlichkeit, eine sehr niedrige Transferineffizienz der elektrischen Ladungen innerhalb des Chips und einen niedrigen Dunkelstrom aus⁷.

3.1. Die Ansteuerungs- und Ausleseelektronik

Der CCD-Chip muß noch mit einer geeigneten von einem PC gesteuerten Ansteuerungs- und Ausleseelektronik versehen werden. Abb.(8) zeigt schematisch die Funktionen der auf dem Chip untergebrachten Elektronik.

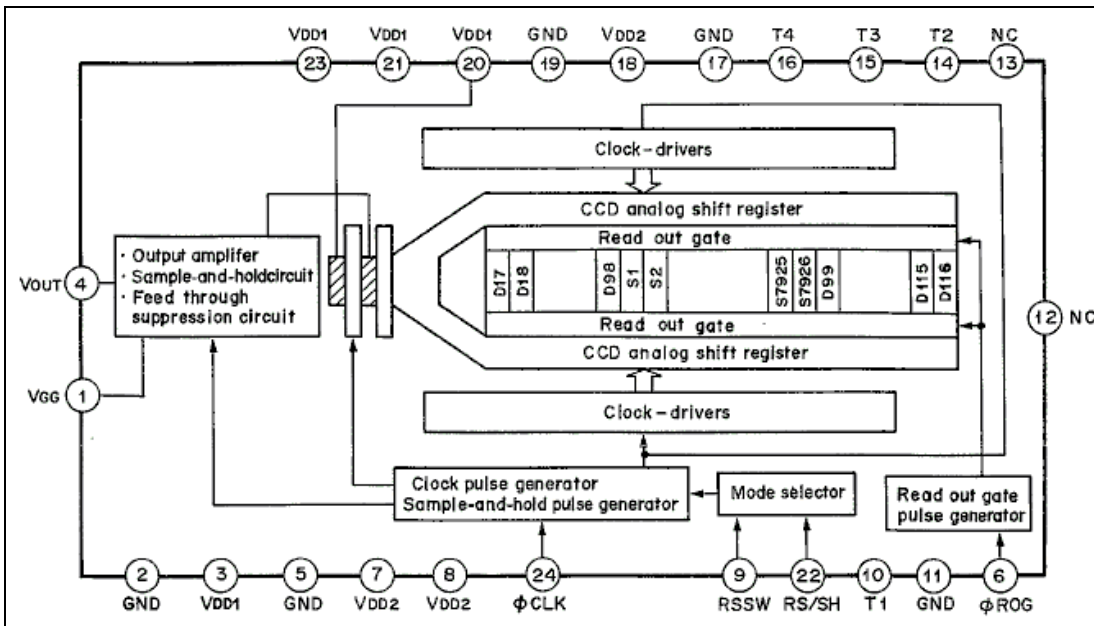


Abbildung 8: Schema der auf dem CCD-Chip untergebrachten Funktionen⁷

Der Chip liefert bei richtiger

Ansteuerung in serieller Folge die verstärkten Ausgangsspannungen der einzelnen Pixels. Bevor diese analogen Spannungen mit einem PC verarbeitet werden können, müssen sie digitalisiert werden. Für die Dynamik von 5000 des ILX508 ist ein A/D-Wandler mit 12 Bit ($2^{12} = 4096$ Bildstufen) optimal⁸. Wird die Auflösung zu hoch gewählt, so fallen bereits kleinste Chipfehler stark ins Gewicht. Höher auflösende A/D-Wandler könnten theoretisch einzelne Photonen oder unsinnigerweise gar Bruchteile davon zählen. Ich benutze den 8-Kanal 12-Bit A/D-Wandler ADS12, der von ELV Elektronik als Bausatz angeboten wird. Die Daten werden über die serielle Schnittstelle an den PC übertragen. Aus den Ansteuerungssignalen des A/D-Wandlers vom PC habe ich u.a. mit Hilfe von verschiedenen Treiber- und Logik-Bausteinen die Takt- und Steuersignale (φROG und φCLK) für das CCD-Element generiert.

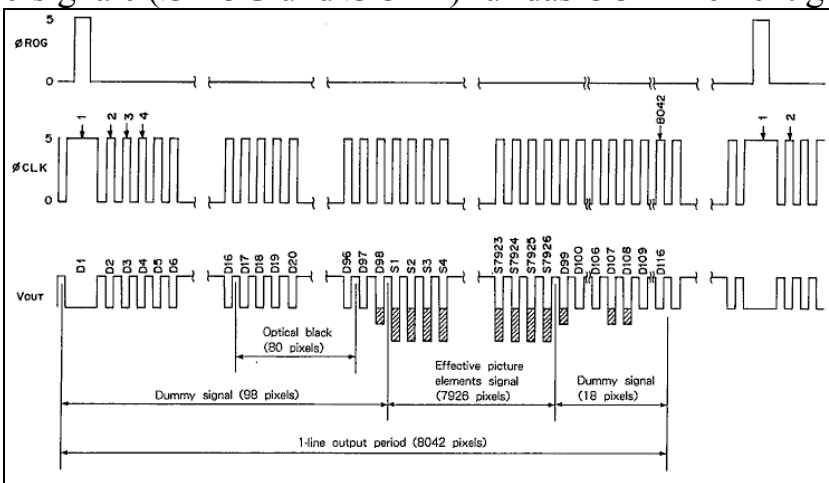


Abbildung 9: Diagramm der Takt- und Steuerimpulse für das CCD-Element⁷

3.2. Die Kühlung des CCD-Chips

Da das CCD-Element hauptsächlich zum Aufzeichnen schwacher Signale benutzt wird, muß es gekühlt werden. Es werden nicht nur Photoelektronen, sondern auch thermisch induzierte Elektronen frei, die das Meßsignal erheblich überlagern können (vgl. Kap. 4.4.). Dieser Dunkelstrom halbiert sich bei einer Temperaturniedrigung von 5-10 K⁹. Professionelle Kameras werden mit flüssigem Stickstoff auf ca. 150 K gekühlt und haben eine Dunkelstromrate von weniger als einem Elektron pro Pixel pro Stunde.

Meinen CCD-Chip kühle ich thermoelektrisch mit Peltier-Elementen. Der Peltier-Effekt, von Jean Peltier 1834 entdeckt, beruht auf der Entstehung einer Temperaturabsenkung an der Berührungsstelle zweier verschiedener, stromdurchflossener Metalle¹⁰.

Mit moderner Halbleitertechnik kann man Temperaturdifferenzen von ca. 60 K erzeugen. Handelsübliche Elemente bestehen aus vielen Peltier-Einzelementen, im Betrieb wird eine Seite heiß, die andere kalt.

Die kalte Seite kühlt den CCD-Chip, die heiße Seite muß mit einem Kühlkörper die Wärmeenergie an die Außenluft abgeben. Höhere Temperaturdifferenzen erreicht man durch hintereinanderschalten zweier Elemente, so daß die kalte Seite des einen Elements die warme des anderen kühlt.

Ich benutze zwei baugleiche Elemente der Firma CONRAD-Elektronik. Leider kann die theoretische Temperaturdifferenz von 120 K nicht erreicht werden. Dies ist bei dem Hintereinandersetzen zweier baugleicher Elemente nicht möglich. Die Wärmeleistung eines Elements setzt sich aus der Kälteleistung und der Jouleschen Verlustleistung zusammen. Das zweite, „warme“ Element muß die Verlustleistung des ersten, „kalten“ Elements mitkühlen. Also muß das erste Element mit einer geringeren Leistung als das zweite betrieben werden und erreicht natürlich die maximale Temperaturdifferenz nicht. Die Leistungen beider Elemente lassen sich rechnerisch aufeinander abstimmen, wenn alle technischen Daten vorliegen. Ich habe sie durch Ausprobieren bestimmt.

Der Wärmeübergang vom CCD-Chip zum ersten Peltier-Element ist bei meinem Aufbau problematisch, da der CCD-Chip eine zu kühlende Fläche von ca. 70 * 10 mm², das Peltier-Element aber 15 * 15 mm² groß ist. Ein Wärmeleiter muß die „Kälte“ möglichst gut verteilen. Dazu bietet sich Kupfer mit seiner hohen Wärmeleitfähigkeit an, es ist aber in massiver Form in dieser Größe schwer erhältlich. Also benutze ich ein entsprechendes Aluminiumstück mit einer ähnlich guten Leitfähigkeit. Um den Wärmeübergang zwischen CCD-Chip, Aluminiumkörper, beiden Peltier-Elementen und Kühlkörper zu verbessern, werden sie mit Epoxid-Harz aneinandergeklebt. Eine möglichst nahe Verbindung ohne störende Lufteinschlüsse erhält man, wenn alle Flächen mit 1000er Naßschliffpapier auf einer Glasscheibe plangeschliffen werden. Das Harz wird durch Erwärmung sehr dünnflüssig gemacht, damit alle Luftbläschen darin verschwinden. So wird vermieden, daß sie beim Anpressen der Teile plattgedrückt werden und die Wärmeleitung stören.

Der gerippte Aluminiumkühlkörper wird zusätzlich mit einem Lüfter gekühlt, so daß seine Temperatur beim Betrieb der Kühlung kaum über Umgebungstemperatur ansteigt.

Der CCD-Chip wird so auf ca. 50 - 60 K unter Umgebungstemperatur gekühlt. Angenommen, der Dunkelstrom halbiert sich bei einer Differenz von -7,5 K, so beträgt er bei einer Temperaturdifferenz von -55 K nur noch 0,6 % seines ursprünglichen Wertes. Die absolute Temperatur des gekühlten CCD-Chips hängt natürlich von der Umgebungstemperatur ab, so daß es einen großen Unterschied macht, ob Spektren bei +25°C Raumtemperatur oder bei -10°C Außentemperatur im Winter aufgenommen werden. Da das CCD-Element kälter als die Umgebungsluft ist, kondensiert dort sofort Wasser aus der Luftfeuchtigkeit und gefriert gegebenenfalls. Also habe ich das CCD-Element luftdicht abgeschlossen und in diesen Raum zur Trocknung etwas Silicagel (hygroskopisches Trockensalz) gegeben. Das optische Fenster des Raumes wird durch die abbildende Linse (d_3, f_3) gebildet.

3.3. Die Auslesesoftware

Dem A/D-Wandler war ein Ausleseroutine in der Programmiersprache PASCAL beigelegt. Diese Routine ist, selbst wenn nur einer der 8 Kanäle ausgelesen wird, für meine Zwecke viel zu langsam. Der Wandlerchip selbst hat eine Wandelzeit von nur 10 μ s, durch die serielle Datenübertragung zum PC sollten laut Datenblatt immerhin mehrere hundert Messungen pro Sekunde realisiert werden können¹¹. Leider konnte mit den mitgelieferten Routinen nur eine um den Faktor 10 kleinere Ausleserate pro Sekunde erreicht werden. Die Auslesedauer der gut 8000 Werte hätte also mehrere Minuten gedauert. Eine solche Auslesedauer ist wegen des entstehenden Dunkelstromes nicht akzeptabel. Durch Optimierung der Routinen kann ich bis jetzt eine Auslesedauer von $t \approx 50$ s erreichen. Dies ist zwar ein Vielfaches der Auslesezeiten von handelsüblichen CCD-Kameras, kann aber systembedingt kaum verbessert werden:

Der Spektrograph wird ja an einem Teleskop im Garten oder noch besser an einem dunklen Ort auf freiem Felde benutzt. Also kommt als PC nur ein tragbares, netzunabhängiges Gerät in Frage. Ich benutze einen Laptop, der nicht mit Erweiterungskarten (Steckkarten) ausgerüstet werden kann. Daher kann ich bei meinem Gerät keine A/D-Wandler-Steckkarten benutzen, die auf den schnellen Datenbus des PC Zugriff haben.

Das Austüfteln des Timings der Takt- und Steuersignale von A/D-Wandler und CCD-Element, das Umschreiben der mitgelieferten Auslesesoftware und schließlich die Inbetriebnahme des gekühlten CCD-Elements wird hier zugunsten des optischen Aufbaus recht knapp behandelt, beanspruchte aber den Großteil meiner Forschungszeit.

4. Der Spektrograph mit Lichtleiter-CCD-Technik

Im Prinzip kann bei Verwendung eines Lichtleiters ein Spektrograph wie in 1.2. beschrieben benutzt werden.

4.1. Die Anpassung des Kollimators an den Lichtleiter

Der Öffnungswinkel des aus dem Lichtleiter austretenden Lichtkegels¹² beträgt in meinem Aufbau $\varphi \approx 30^\circ$. Es soll möglichst alles Licht auf das Gitter treffen. Also muß eine Kollimatorlinse gewählt werden, bei der gilt:

$$\text{Gl.(6)}$$

$$\tan(\varphi/2) = (d_2/2)/f_2,$$

wobei $\varphi = 30^\circ$ und der Durchmesser d_2 gleich dem Durchmesser der zu benutzenden Gitterfläche ist. Ich verwende ein Blaze-Gitter mit $g^{-1} = 1200 \text{ l/mm}$ und $5 * 5 \text{ cm}^2$ Größe der Firma ZEISS. Daraus folgt für die Kollimatorbrennweite $f_2 = 9,3 \text{ cm}$. Da die Breite b' der Abbildung des Spalts in der Fokalebene nach Gl.(5) umgekehrt proportional zur Kollimatorbrennweite f_2 ist, folgt daraus ein niedriges spektrales Auflösungsvermögen: Die Breite der Abbildung des Lichtleiters (des Spaltes) überdeckt in der Fokalebene einen zu großen Bereich im Spektrum.

Wird eine längere Kollimatorbrennweite gewählt, so geht ein Großteil des Lichts aus dem Lichtleiter verloren.

Benutzt man jedoch eine Kombination von Linsen(systemen), so kann man eine größere Kollimatorbrennweite bei gleichzeitiger voller geometrischer Ausnutzung des Lichtkegels erreichen. Dies geschieht mit einer optischen Anordnung, die in der Astrofotografie als „Okularprojektion“ bekannt ist und die Äquivalentbrennweite des Teleskops verlängert.

Als Kollimator wird eine langbrennweitige Optik (f_l) genommen. Zwischen Kollimatorbrennebene und Lichtleiter ist eine zweite, kurzbrennweitige Optik (f_k). Die Äquivalentbrennweite des Systems ist:

$$f_{\bar{\lambda}} = f_l/f_k * l. \quad \text{Gl.(7)}^{13}$$

l ist der Projektionsabstand zwischen der kurzbrennweitigen Optik und dem Lichtleiter.

Als Optiken verwende ich ein zweilinsiges Objektiv mit $d_l = 80 \text{ mm}$ (abgeblendet auf $d = 50 \text{ mm}$), $f_l = 500 \text{ mm}$ und ein mehrlinsiges Fotoobjektiv mit $d_k = 25 \text{ mm}$ und $f_k = 55 \text{ mm}$. Die Spitze des Lichtleiters wird nun mit dem kurzbrennweitigen Objektiv im Brennpunkt F scharf abgebildet. Gegenstandsweite l und Bildweite b in Zusammenhang mit der Brennweite f wird mit der Linsengleichung ausgedrückt.

$$1/l + 1/b = 1/f \quad \text{Gl.(8)}$$

Die beiden Optiken sind aneinander angepaßt, wenn der Öffnungswinkel vom Brennpunkt F zu den Eintrittsblenden beider Optiken gleich ist. Der Strahlensatz besagt dann:

$$(d_k/2)/b = (d_l/2)/f_l. \quad \text{Gl.(9)}$$

So läßt sich l berechnen:

$$l = (1/f_k - d_l/(d_k * f_l))^{-1}. \quad \text{Gl.(10)}$$

Der Projektionsabstand für mein System beträgt $l = 70,5$ mm.

Der Öffnungswinkel vom Lichtleiter zur Apertur des kurzbrennweitigen Fotoobjektivs mit einer vorderen Öffnung von $d = 33$ mm beträgt nach Gl.(6) $\varphi = 26,3^\circ$. So wird bei einer Äquivalentbrennweite $f_2 = 641$ mm (Gl.(7)) des Kollimators fast das gesamte aus dem Lichtleiter austretende Lichtbündel erfaßt.

4.2. Die Abbildung des Spektrums

Das vom Gitter erzeugte Spektrum wird mit der Aufnahmeoptik in deren Brennebene auf das lineare CCD-Array der Länge $s = 55,5$ mm abgebildet.

Die Empfindlichkeit des CCD-Chips hat nach Herstellerangaben ein Maximum bei $\lambda \approx 480$ nm (Abb. (10)). Der abzubildende Spektralbereich soll etwa von $\lambda = 400$ bis 800 nm reichen, für Photonen dieser Wellenlängen ist der CCD-Chip recht empfindlich.

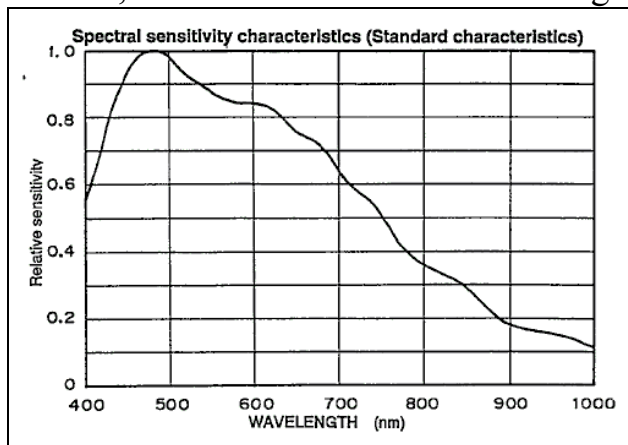


Abbildung 10: Die spektrale Empfindlichkeit des Chips⁷

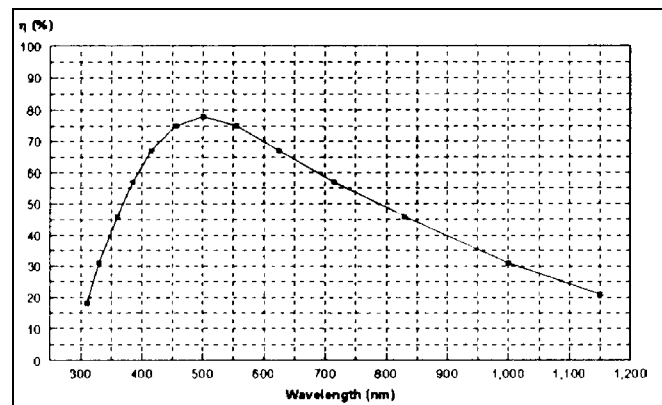


Abbildung 11: Die Helligkeitsverteilung im Blazegitter-CCD-Spektrum¹⁴

Damit wird auch der gesamte visuell sichtbare Spektralbereich abgebildet.

Das verwendete Blaze-Gitter (Blaze bei $\lambda = 500$ nm) konzentriert das reflektierte Licht durch spezielle Form der eingeritzten Furchen auf das Spektrum der 1. Ordnung, eine relative Helligkeitsverteilung ist in Abb. (11) zu sehen.

Optimal wäre eine Helligkeitsverteilung, die die unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit des CCD-Chips ausgleicht.

In meiner Anordnung steht das Gitter senkrecht zur optischen Achse des Kollimators, der Einfallswinkel der Lichtstrahlen auf das Gitter beträgt $\alpha = 0^\circ$.

Nach Gl.(1) wird Licht der Wellenlänge $\lambda = 400$ nm in einem Winkel von $\beta = 28,7^\circ$, Licht der Wellenlänge $\lambda = 800$ nm in einem Winkel von $\beta = 73,7^\circ$ gebeugt. Nach der Gleichung

$$s = f \cdot \tan \delta \quad \text{Gl.(11)}$$

bildet eine Optik mit der Brennweite f ein Objekt mit dem Winkeldurchmesser δ in der Größe s in der Fokalebene ab¹⁵.

Als abbildende Optik benutze ich eine einfache Sammellinse $f_3 = 80$ mm, $d_3 = 60$ mm.

Der chromatische Abbildungsfehler läßt sich recht einfach durch Schrägstellen des CCD-Chips kompensieren. So wird berücksichtigt, daß blaues Licht bei einer einfachen Sammellinse eine kürzere Brennweite hat als rotes¹⁶.

Eine auf Farbfehler korrigierte (achromatische), mehrlinsige Optik wie z.B. ein Fotoobjektiv ist möglicherweise nicht für den gesamten Bereich des abzubildenden Spektrums korrigiert.

Nach der Gl.(11) kann die Linse einen Winkel von $\Delta\beta = 34,8^\circ$ auf dem CCD-Chip abbilden. Das entspricht einem Bereich von $\lambda = 400$ nm bis $\lambda = 745,8$ nm im Spektrum.

Die Linse sollte sich möglichst dicht am Gitter befinden, da ihr Durchmesser sonst größer werden müßte, um alles vom Gitter gebeugte Licht abzubilden. Eine Vignettierung des einfallenden Lichtbündels ist jedoch zu verhindern.

In meiner Anordnung ist ein Linsendurchmesser von $d_3 \geq 90$ mm optimal. Leider sind Linsen mit einem Öffnungsverhältnis $d/f > 1$ ($f = 80$ mm, $d = 90$ mm) schwer zu bekommen.

4.3. Die theoretische spektrale Auflösung

Die theoretische spektrale Auflösung meiner Anordnung berechnet sich wie folgt:

Die Dispersion beträgt bei $\lambda = 400$ nm $d = 109430,6$ (Gl.(3)). Auf dem CCD-Chip werden also $d^{-1} = 9,14$ nm/mm abgebildet. Ein $7 \mu\text{m}$ großer Pixel bildet theoretisch einen Bereich von $\Delta\lambda = 0,064$ nm ab. Bei $\lambda = 746$ nm beträgt $\Delta\lambda = 0,033$ nm.

Die theoretische Auflösung im Spektrum auf dem CCD-Chip ist nach Gl.(4) $\Delta l = 0,73$ bis $2,7 \mu\text{m}$, also kleiner als die Größe eines Pixels.

Die entscheidende Größe ist die der Spaltabbildung auf dem CCD-Chip. Nach Gl.(5) ist $b' = 21,3$ bis $42,0 \mu\text{m}$. Jede noch so dünne Spektrallinie wird also auf mindestens 3 bis 4 Pixels abgebildet. Daraus folgt eine theoretische minimale Linienbreite von $\Delta\lambda = 0,13$ bis $0,27$ nm.

4.4. Die Auswertung der Daten des CCD-Elements

Die vom CCD-Element gelieferten und vom A/D-Wandler in den PC eingelesenen Daten enthalten leider nicht nur das reine Bildsignal. Um das endgültige Bild zu berechnen, müssen drei Bilder aufgenommen werden¹⁷:

Das *Rohbild* (Raw Frame) ist das aufgenommene Bild des Spektrums.

Das *Dunkelbild* (Dark Frame) wird bei geschlossener Optik aufgenommen. Es besteht aus dem Vorspannungsbild (Bias Frame) und dem Wärmebild (Thermal Frame). Das Vorspannungsbild enthält den Nullabgleichsfehler des Verstärkers und dessen Ausleserausachen. Das Wärmebild zeigt den Dunkelstrom des CCD-Chips. Da der Dunkelstrom von der Belichtungszeit und der Temperatur während der Aufnahme abhängt, muß das Dunkelbild unter denselben Bedingungen aufgenommen werden (vgl. Kap. 3.2.).

CCD-Astrofotografen nehmen als *Weißbild* (Flat Frame) eine gleichmäßig weiß beleuchtete Fläche auf. So sollen unterschiedliche Lichtempfindlichkeiten der Pixels und Schmutz- und Staubteilchen in der Teleskopoptik kompensiert werden. Theoretisch müßten alle Pixels dieselbe Helligkeitsstufe haben.

Bei der Aufnahme eines Spektrums dient das Weißbild dazu, die unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeiten der Apparatur auszugleichen. Dazu wird ein kontinuierliches Spektrum einer einfachen Glühlampe aufgenommen, in dem Licht aller Wellenlängen in gleicher Intensität enthalten sind. Ein kontinuierliches Spektrum wird im Spektrographen vor allem durch das Gitter (Abb.(11)) und durch die unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit des CCD-Chips (Abb.(10)) verfälscht. Außerdem können der Lichtleiter und die Linsen bzw. deren Beschichtung (Vergütung) eine Rolle spielen. Man erhält eine Empfindlichkeitsverteilung der Apparatur in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lichts.

Das abgegliche Bild (Calibrated Image) wird folgendermaßen errechnet:

Gl.(12)

$$I = (I_{RF} - I_{DF}) * S / I_{FF}$$

wobei I das abgegliche Bild, I_{RF} das Rohbild, I_{DF} das Dunkelbild, S die Anzahl der Intensitätsstufen des A/D-Wandlers und I_{FF} das Weißbild ist.

Es werden jeweils die Intensitäten der einzelnen Pixels miteinander verrechnet, was sehr einfach ist, weil das Bild ja in digitaler Form auf dem PC vorliegt.

Eine bessere Intensitätskalibrierung ist durch Errechnen eines Weißbildes aus einem kalibrierten Spektrum eines Objekts und einem mit dieser Apparatur aufgenommenen Spektrum desselben Objekts möglich.

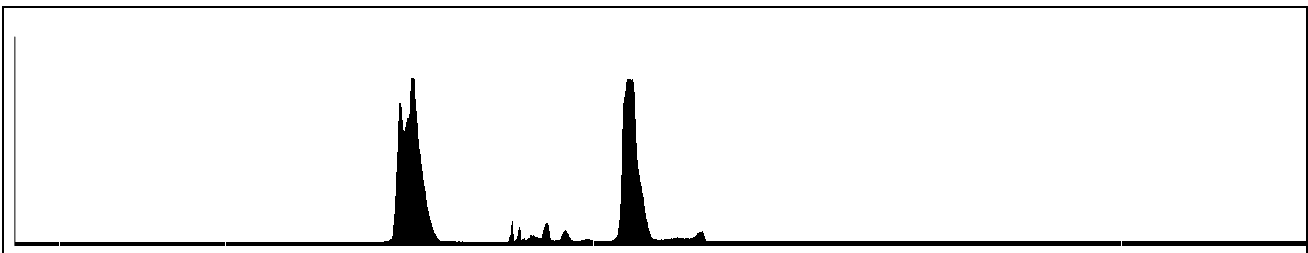


Abbildung 12: Rohbild eines Spektrums einer Neonlampe

Auf der X-Achse ist die Wellenlänge, auf der Y-Achse die Intensität des Lichts der Wellenlänge aufgezeichnet

5. Schluß

Mit meiner Idee des „Lichtleiterokulars“ habe ich einen neuartigen Spektrographen gebaut, der es Amateurastronomen sehr viel einfacher macht, Sternspektren aufzunehmen. Er kann sehr flexibel das bereits vorhandenen Teleskop voll ausnutzen, ohne an dessen Optik angepaßt zu werden. Die Mobilität ist durch das Generieren aller Versorgungsspannungen aus einer Autobatterie gesichert.

Die Verwendung eines linearen CCD-Arrays anstelle einer handelsüblichen CCD-Kamera senkt die Kosten erheblich.

Allerdings ist der Spektrograph durch die lange Kollimatoroptik immer noch recht sperrig (etwa $110 * 15 * 30 \text{ cm}^3$). Durch die vielen optischen Bauteile und insbesondere durch den Lichtleiter tritt ein recht hoher Lichtverlust auf.

Zukünftig böte sich eine halb- oder vollautomatische Auswertung von Sternspektren mit dem PC an, da die Spektren, einmal aufgenommen, in digitalisierter Form vorliegen.

Möglicherweise könnten durch Messung von Äquivalentbreiten der Absorptionslinien im Sternspektrum die Zustandsgrößen des Sterns bestimmt werden.

Es ist auch denkbar, das „Lichtleiterokular“ zur Helligkeitsmessung von Sternen (Photometrie) zu verwenden oder es in anderen optischen Systemen, wie etwa in Mikroskopen einzusetzen. Anwendungsgebiete sind überall dort zu finden, wo Licht aus einem Strahlengang herausgeleitet werden soll.

6. Literatur- und Quellenverzeichnis

- ¹ Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik; H. Gobrecht; Walter de Gruyter, Berlin 1973; 6. Aufl., Band III, S. 379
- ² The 20-cm Schmidt-Cassegrain Telescope; Peter L. Manly; Cambridge University Press, Cambridge 1994; S. 179
- ³ Meyers grosses Taschenlexikon; B.I.-Taschenbuchverlag, Mannheim/Leipzig/Wien/Zürich, 1992; 4.Aufl.
- ⁴ Handbuch für Sternfreunde; G.D. Roth; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1989; 4.Aufl., Band I, S. 67 ff.
- ⁵ siehe 4, S. 177
- ⁶ Lexikon der Astronomie; Herder Verlag, Freiburg im Breisgau, 1989; Band 1, S. 149
- ⁷ SONY Datenblatt für ILX508 bzw. SONY Linear Sensor '96.4 - semiconductor products guide
- ⁸ Die CCD Astrokamera für den Amateur; Hans-Ruedi Wernli; Birkhäuser Verlag, Basel, 1995; S. 39
- ⁹ siehe 8, S. 26ff.
- ¹⁰ Datenblatt für Thermoelektrische Kühler, Peltierelemente; CONRAD-Elektronik
- ¹¹ 12-Bit-AD-Wandler ADS 12, Datenblatt; ELV-Elektronik, Leer
- ¹² Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik; Verlag moderne Industrie, Wolfgang Dummer & Co, München 1979; S. 2589 ff.
- ¹³ Astrofotografie; W. Schwinge; Franckh-Kosmos, Stuttgart 1993; S. 99
- ¹⁴ ZEISS Grating Catalog; ZEISS Oberkochen
- ¹⁵ siehe 5, S. 67
- ¹⁶ Physik - Mittelstufe; Dorn, Bader; Schroedel Schulbuchverlag, Hannover 1980; S. 250
- ¹⁷ siehe 8, S. 40 ff.
- ¹⁸ Mein Homecomputer selbstgebaut; J. Glagla / D. Feiler; Otto Maier Verlag, Ravensburg, 1984
- ¹⁹ elektor - Zeitschrift für Elektronik 7/8 1982; elektor Verlag, Gangel

Besonders danken möchte ich folgenden Firmen, die mein Projekt freundlich und tatkräftig unterstützen:
„**TEXAS INSTRUMENTS**“ (stellte mir für das Projekt einen Laptop zur Verfügung),
„**ZEISS**“ (stellte mir das Reflexionsgitter zur Verfügung),
„**SONY**“ (sandte mir Musterexemplare von CCD-Zeilensensoren zu),
„**Dr. VEHRENBURG**“ (stellte mir das Kellner-Okular zur Verfügung).

Ich danke meinem Betreuungslehrer Herrn Brandt, der zu (fast) jeder konkreten Frage zu den elektronischen Logikbausteinen eine Antwort wußte.

Außerdem danke ich Herrn Dr. Fleischmann der Firma OES, der mir sehr hilfreiche Tips zur Kühlung des CCD-Chips mit Peltier-Elementen gab.