

Mitteilungsblatt der
Fachgruppe

S P E K T R O S K O P I E

der Vereinigung der
Sternfreunde e.V.

Rundbrief Nr. 25 (2003)

Einzelheft: 3,50 Euro (plus Porto)
Herausgeber: Ernst Pollmann
Charlottenburgerstraße 26c
51377 Leverkusen

Inhaltsverzeichnis

		Seite
Christian Thiele	Sternspektroskopie mit Lichtleiter-CCD-Technik (II)	1
Dieter Goretzki	Die Gleichungen von Boltzmann und Saha in der Sternspektroskopie (III)	10
Roland Bücke	Sternspektroskopie mit Dobson-Teleskopen	20
Berthold Stober	Mein Weg zur Spektroskopie	24

Sternspektroskopie mit Lichtleiter-CCD-Technik (Teil II)

(v. Christian Thiele, Buxtehude)

Jugend forscht '98

Fachgebiet: Geo- und Raumwissenschaften

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 Schicht [1]. 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 (**p**icture **e**lements).

Diese werden auch „Potentialtöpfe“ genannt [2]. 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 eingelesen.

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 aus.

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.

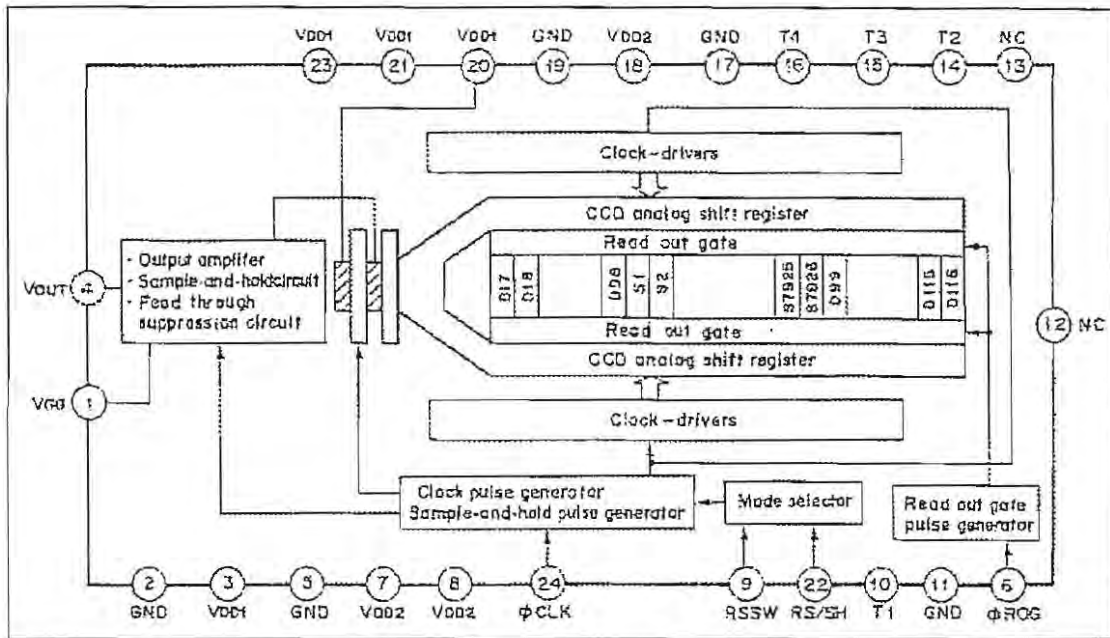


Abb. 8: Schema der auf dem CCD-Chip untergebrachten Funktionen [7]

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) optimal [4]. 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.

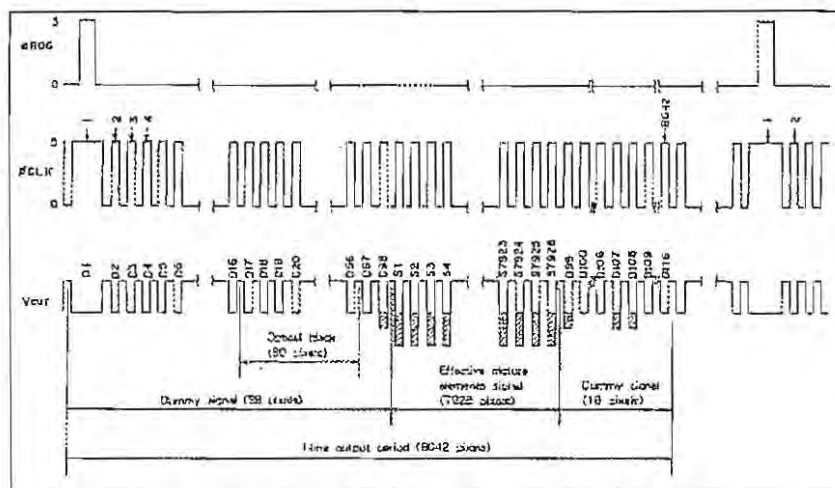


Abb. 9: Diagramm der Takt- und Steuerimpulse für das CCD-Element [7]

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. 2.4.). Dieser Dunkelstrom halbiert sich bei einer Temperaturerniedrigung von 5-10 K [5]. 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 Metalle [5]. 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. $70 * 10 \text{ mm}^2$, das Peltier-Element aber $15 * 15 \text{ mm}^2$ 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 beigefügt. 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 können [7]. 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 Lichtkegels 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:

$$\tan(\varphi/2) = (d_2/2)/f_2 \quad \text{Gl.(6)}$$

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:

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

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:

$$l = (1/f_k - d_i/(d_k \cdot f_i))^{-1} \quad \text{Gl.(10)}$$

Der Projektionsabstand für mein System beträgt $l = 70,5 \text{ mm}$.
 Der Öffnungswinkel vom Lichtleiter zur Apertur des kurzbrennweitigen Fotoobjektivs mit einer vorderen Öffnung von $d = 33 \text{ mm}$ beträgt nach Gl.(6) $\varphi = 26,3^\circ$. So wird bei einer Äquivalentbrennweite $f_2 = 641 \text{ mm}$ (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 $s = 55,5 \text{ mm}$ abgebildet.
 Die Empfindlichkeit des CCD-Chips hat nach Herstellerangaben ein Maximum bei $\lambda \approx 480 \text{ nm}$ (Abb.10). Der abzubildende Spektralbereich soll etwa von $\lambda = 400$ bis 800 nm reichen, für Photonen dieser Wellenlängen ist der CCD-Chip recht empfindlich.

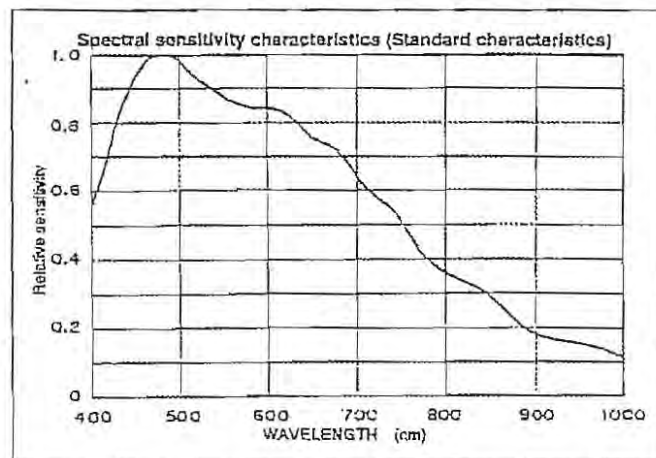


Abb. 10: Die spektrale Empfindlichkeit des CCD-Chips [7]

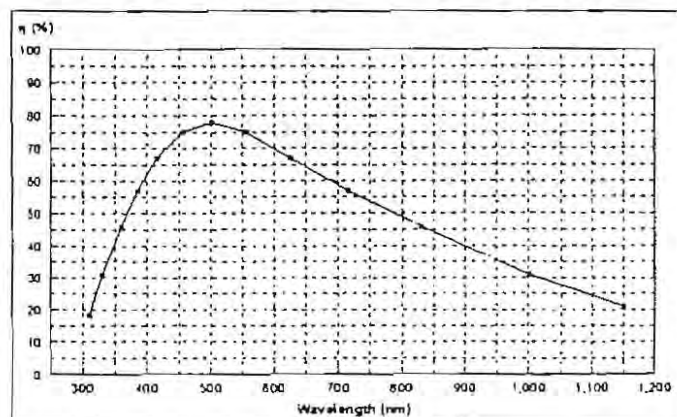


Abb. 11: Die Helligkeitsverteilung im Blazegitter-CCD-Chips [7]

Damit wird auch der gesamte visuell sichtbare Spektralbereich abgebildet. Das verwendete Blaze-Gitter (Blaze bei $\lambda = 500 \text{ nm}$) 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 $\lambda = 400 \text{ nm}$ in einem Winkel von $\beta = 28,7^\circ$, Licht der Wellenlänge $\lambda = 800 \text{ nm}$ 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 [10] ab. Als abbildende Optik benutze ich eine einfache Sammellinse $f_3 = 80 \text{ mm}$, $d_3 = 60 \text{ mm}$. 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 rotes [11].

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 $\lambda = 400 \text{ nm}$ bis $\lambda = 745,8 \text{ nm}$ 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 $d_3 \geq 90 \text{ mm}$ optimal. Leider sind Linsen mit einem Öffnungsverhältnis $d/f > 1$ ($f = 80 \text{ mm}$, $d = 90 \text{ mm}$) schwer zu bekommen.

4.3. Die theoretische spektrale Auflösung

Die theoretische spektrale Auflösung meiner Anordnung berechnet sich wie folgt:

Die Dispersion beträgt bei $\lambda = 400 \text{ nm}$ $d = 109430,6$ (Gl.(3)). Auf dem CCD-Chip werden also $d^{-1} = 9,14 \text{ nm/mm}$ abgebildet. Ein $7 \mu\text{m}$ großer Pixel bildet theoretisch einen Bereich von $\Delta\lambda = 0,064 \text{ nm}$ ab. Bei $\lambda = 746 \text{ nm}$ beträgt $\Delta\lambda = 0,033 \text{ nm}$. 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 $0,27 \text{ nm}$.

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 werden [12]:

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 Ausleserauschen. 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. 1.2.).

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:

$$I = (I_{RF} - I_{DF}) * S / I_{FF} \quad \text{Gl.(12)}$$

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.

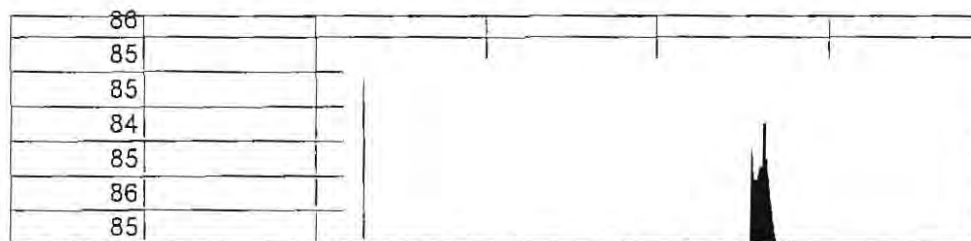


Abb. 12: Rohbild eines Spektrums einer Neonlampe
Auf der X-Achse ist die Wellenlänge, auf der Y-Achse die Intensität des Lichts der Wellenlänge aufgezeichnet

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.

Literatur:

- [1] siehe [4], S. 177
- [2] Lexikon der Astronomie; Herder Verlag, Freiburg im Breisgau, 1989; Band 1, S. 149
- [3] SONY Datenblatt für ILX508 bzw. SONY Linear Sensor '96.4 - semiconductor products guide
- [4] Die CCD Astrokamera für den Amateur; Hans-Ruedi Wernli; Birkhäuser Verlag, Basel, 1995; S. 39
- [5] siehe [8], S. 26ff.
- [6] Datenblatt für Thermoelektrische Kühler, Peltierelemente; CONRAD-Elektronik
- [7] 12-Bit-AD-Wandler ADS 12, Datenblatt; ELV-Elektronik, Leer
- [8] Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik; Verlag moderne Industrie, Wolfgang Dummer & Co, München 1979; S. 2589 ff.
- [9] Astrofotografie; W. Schwinge; Franckh-Kosmos, Stuttgart 1993; S. 99
- [10] siehe [5], S. 67
- [11] Physik - Mittelstufe; Dorn, Bader; Schroedel Schulbuchverlag, Hannover 1980; S. 250
- [12] siehe [8], S. 40 ff
- [13] Mein Homecomputer selbstgebaut; J. Glagla / D. Feiler; Otto Maier Verlag, Ravensburg, 1984
- [14] elektor - Zeitschrift für Elektronik 7/8 1982; elektor Verlag, Gangelst

Sternspektroskopie mit Dobson-Teleskopen

(von Roland Bücke, Hamburg)

Einleitung

Der gerätetechnische und damit auch der finanzielle Aufwand steigt mit abnehmender Objekthelligkeit und/oder höherer Auflösung der Spektren rapide an. Als Amateur stößt man allzu schnell an kaum überwindbare Hürden. Größere Teleskope benötigen mehr Platz, möglichst einen festen Standort in günstiger Lage, eine stabile Montierung, die auch entsprechende Zusatzgeräte trägt und über eine präzise Nachführung für längere Belichtungszeiten verfügt sowie nicht zuletzt wegen all dieser Anforderungen einen dickeren Geldbeutel. Die genannten Rahmenbedingungen dürften wohl nur wenigen „Glücklichen“ keine Kopfschmerzen bereiten.

Soll es aus diesem Dilemma wirklich keinen Ausweg geben? Diese Frage stellte ich mir vor ca. 2 Jahren, als ich mich - angeregt durch das Fachgruppentreffen auf der Hamburger Sternwarte - für die Spektroskopie zu interessieren begann. Mir wurde schnell klar, dass für mich persönlich die ernsthafte Beschäftigung mit der Spektroskopie eine neue gerätetechnische Lösung erforderte.

Die rein visuell beobachtenden Sternfreunde mit ihren genial einfachen Holzkonstruktionen, sprich Dobson-Teleskopen, haben es da wesentlich einfacher als die Spektroskopiker. Selbst große Teleskope mit mehr als 20 Zoll Öffnung lassen sich im PKW verstauen und außerhalb des überstrahlten Stadthimmels genügt jedes kleine Stück Wiese, um in wenigen Minuten dem Hobby nachgehen zu können - und das bei vergleichsweise minimalem finanziellen Aufwand.

Fazit: Viel Licht für wenig Geld bei hoher Mobilität.

Für mich als aktivem „Dobsonbauer“ lag es daher nahe, Überlegungen darüber anzustellen, ob und wenn ja in welcher Weise Dobson-Teleskope „spektroskopietauglich“ gemacht werden können. Dabei sollten aus Kostengründen konsequent alle Komponenten im Selbstbau ausschließlich mit den Mitteln einer durchschnittlichen Heimwerkerausstattung und der Verwendung handelsüblicher Materialien erstellt werden.

Maschinen zur Metallbearbeitung wie Drehbank und Fräsmaschine wurden nicht benutzt. Fairerweise muss aber von vornherein betont werden, dass ohne Geduld und Ausdauer sowie einigem manuellen Geschick ein Gelingen unmöglich ist. Kostenersparnis durch Selbstbau erfordert notwendigerweise einen hohen zeitlichen Aufwand.

Mittlerweile konnte ich das Konzept an einem Prototyp, für den ich meinen ersten 8-Zoll-Dobson umbaute, so weit umsetzen, dass die Eignung für die Spektroskopie außer Frage steht.

Konzept

Dobson-Teleskope sind für den Einsatz mit größeren und schwereren Zusatzeinrichtungen, zu denen Spektrographen zählen, ungeeignet. Sie würden unter der zusätzlichen Last unweigerlich aus dem Gleichgewicht geraten oder sich gar verformen. Auch ein Ausbalancieren mit Gegengewichten oder Zugfedern widerspricht dem Grundgedanken von Leichtbau mit Holz und Mobilität. Als Ausweg bietet sich hier eigentlich nur der Einsatz von LWL (Lichtwellenleitern) an. Teleskop und Spektrograph stellen dann zwei mechanisch völlig entkoppelte Einheiten dar, so dass Abmessungen und Gewicht des Spektrographen nicht mehr limitiert sind.

Die nächste, wohl größere Schwierigkeit resultiert aus der azimuthalen Montierung eines Dobson. Eine einfache präzise Nachführung über die Stundenachse ist also nicht gegeben. Zwar findet man mittlerweile im Internet eine wachsende Zahl von Beispielen und Konstruktionsunterlagen für Computersteuerungen mit Schrittmotoren, die sicherlich zur Verbesserung der visuellen Beobachtung tauglich sind, aber eine ausreichende Präzision, wie sie für die Fotografie und natürlich auch Spektroskopie nötig ist, dürfte bisher kaum gelungen sein.

Jedenfalls sind mir noch keine hochqualitativen Astroaufnahmen aufgefallen, die mit einem Dobson gewonnen wurden. Einen großen Vorteil hat die Spektroskopie gegenüber der Fotografie mit azimuthal aufgestellten Teleskopen – es entfällt der Ausgleich der Bildfelddrehung als dritte Nachführachse. Eine einfache Schrittmotorsteuerung mit einem PC erfordert also eine permanente manuelle Korrektur in zwei Achsen. Diese dürfte bei langen Belichtungszeiten besonders in kalten Winternächten kaum Freude aufkommen lassen.

Die Alternative zu einfachen Schrittmotorsteuerungen sind lichtelektrische Nachführsysteme. Einen guten Überblick über die verschiedenen Varianten dieser Technik kann man im Handbuch für Sternfreunde von Roth (Springer-Verlag, 1989) nachlesen. Eine Diskussion der Vor- und Nachteile der einzelnen Nachführsysteme, die zur Entscheidung für die nachstehend beschriebene Konstruktion führten, würde den Rahmen dieses Artikels sprengen.

Ist erst einmal die automatische Nachführung mit Fasereinkopplung des Sternlichts realisiert, können jederzeit verschiedene Spektrographen entsprechend den konkreten Anforderungen angekoppelt werden.

Das lichtelektrische Nachführsystem

Die Positionsbestimmung des Sterns erfolgt mit einer speziellen Lichtleiteranordnung. Zur Weiterleitung des Sternlichts an den Spektrographen sind 6 weitere Fasern gleichen Durchmessers möglichst gleichmäßig und dicht um die zentrale Faser angeordnet (Abb.1).

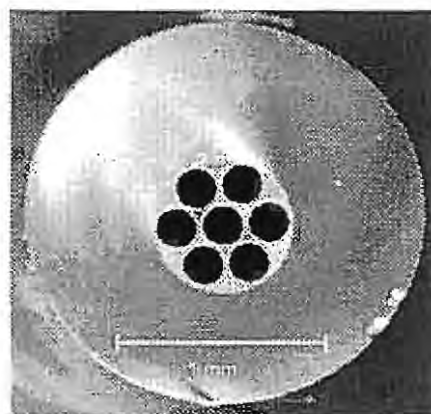


Abb. 1: Das Positioniersystem mit Anordnung der Lichtleiter

Die lichtleitenden Faserkerne mit einem Durchmesser von $200\mu\text{m}$ zeichnen sich tiefschwarz ab und sind von einem $15\mu\text{m}$ dicken Kunststoffmantel umgeben. Dieser bestimmt den minimalen Abstand der Glasfasern, nachdem der wesentlich dickere

Schutzmantel entfernt wurde. Die Fasern sind als Bündel mit Epoxydharz in eine Glaskapillare eingeklebt und dann geschliffen und poliert worden. Die Politur der Endflächen ist entscheidend für eine möglichst verlustarme Ein- und Auskopplung des Lichts.

Der so gebildete Faserring um die zentrale Faser dient der Positionsbestimmung des Sterns. Ein Teil des Lichts (ca. 8%) wird durch eine dünne Planplatte (Deckglas für die Mikroskopie) zur visuellen Grobeinstellung und Kontrolle seitlich herausgelenkt. Der Faserkopf ist in Abb. 2 schematisch dargestellt.

Die elektronisch verarbeiteten Signale steuern über einen Regelkreis die Schrittmotoren, so dass das Sternbildchen quasi innerhalb dieses Rings gefangen bleibt. Zur Reduzierung der Detektorzahl (Fotodioden) wurden jeweils zwei benachbarte Lichtleiter zusammengefasst.

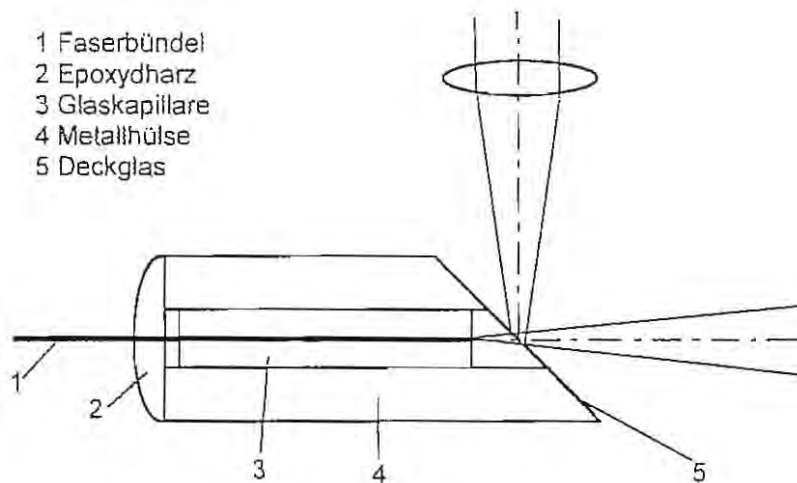


Abb.2: Schematische Darstellung des Faserkopfes

Die extrem schwachen Fotoströme müssen auf ein Spannungssignal verstärkt werden, dass die Ansteuerung der Schrittmotorensteuerung ermöglicht. Ein 1V Ausgangssignal des Verstärkers entspricht bei maximaler Verstärkung einem Fotostrom von ca. $5 \cdot 10^{-13}$ A. Gefolgt wird der 3-Kanal-Verstärker von einer Logikschaltung, die die Signale für die Schrittmotorensteuerung erzeugt.

Sämtliche elektronische Schaltungen sind in „wilder Verdrahtung“ auf Universalleiterplatten ausgeführt, so dass die Erstellung von Leiterplatten-Layouts entfiel. Einerseits ist während der Erprobungsphase mit Schaltungsänderungen zu rechnen, so dass ein endgültiges Layout noch nicht erstellt werden konnte; andererseits ermöglicht dies auch Nichtelektronikern ohne Kenntnisse der Leiterplattenherstellung einen Nachbau. Die hohen Anforderungen an Langzeit- und Temperaturstabilität werden dennoch erstaunlich gut erfüllt. Die Stromversorgung von 2 x 12 V leisten zwei Bleiakkus.

Spektrograph mit CCD-Zeilenkamera

Der Spektrograph wurde aus vorhandenen optischen Komponenten gebaut, so dass Kompromisse bei der Dimensionierung unausweichlich waren. Die Glasfaser bildet mit ihrem 200µm Kerndurchmesser den Eintrittsspalt. Durch entsprechende Spaltblenden ließe sich die Spaltbreite weiter reduzieren, allerdings mit entspre-

chendem Lichtverlust. Kollimator und Kameraobjektiv sind jeweils ein gebrauchtes Fotoobjektiv mit 135 mm Brennweite. Das Reflexionsgitter stammt aus einem ausgemusterten Atomabsorptionsspektrometer mit ca. 1200 Linien/mm (falls meine Messungen stimmen).

Als Empfänger baute ich eine CCD-Zeilenkamera mit 2048 Pixeln im Format 14 x 200 μm . Um den Schaltungsaufwand möglichst klein zu halten, werden sämtliche Steuersignale in einem alten ausgedienten Notebook (80386SX CPU) generiert und über die Druckerschnittstelle übertragen. Der CCD - Chip wird ebenso über die Druckerschnittstelle ausgelesen. Die notwendige Software wurde mit Turbo Pascal geschrieben und läuft unter DOS. Die Kamera ist für die ersten Versuche nur mit einem 8 Bit AD-Wandler ausgestattet und soll später durch einen 12 oder 16 Bit Wandler ersetzt werden.

Da die Justage der optischen Komponenten sehr diffizil ist (immerhin muss das ca. 200 μm schmale Spektrenband auf den ebenso schmalen CCD Chip fokussiert werden), werde ich vorerst nur mit feststehendem Gitter arbeiten können. Dies bedeutet eine Einschränkung auf einen sehr kleinen Wellenlängenbereich von ca. 40 nm. Dafür beträgt die Auflösung ca. 0,3 nm (an Emissionslinien einer Neonlampe gemessen).

First Light

Mit Spannung erwartete ich nach Fertigstellung der Ausrüstung die erste klare Nacht. Am 16.02.2003 war es dann endlich so weit. Unter Vollmondlicht konnte alles sicher im Vorgarten aufgebaut werden. Erste Nachführversuche verliefen unerwartet problemlos. Trotz leicht böigem Wind konnten Sterne bis 3^m problemlos nachgeführt werden (die Grenze dürfte bei ca. 4^m liegen). Die ersten Aufnahmen sind erwartungsgemäß bescheiden, zumal die CCD-Kamera noch ungekühlt ist. Beispielhaft sind die unbearbeiteten Rohspektren von Sirius und Beteigeuze bei H α abgebildet (Abb. 3). Es wurde lediglich der gleitende Mittelwert über 3 Pixel gebildet. Die Belichtungszeit betrug 60 Sekunden.

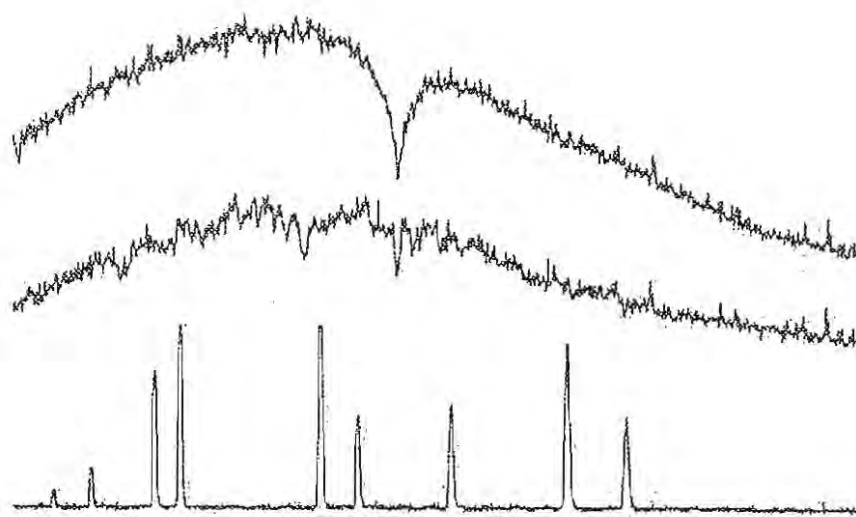


Abb 3: Rohspektren

Zusammenfassung und Ausblick

Nachdem die Inbetriebnahme erfolgreich verlaufen ist, werde ich mit der Beobachtungstätigkeit beginnen und parallel dazu die einzelnen Komponenten optimieren und weiterentwickeln. Einem Einsatz an größeren Teleskopen (nicht nur Dobsons) steht prinzipiell nichts im Wege. Ausgehend von den Erfahrungen am 8" Teleskop lässt sich für größere Öffnungen die nachführbare Grenzgröße leicht abschätzen (siehe Tabelle 1).

Teleskopöffnung	Grenzgröße
20 cm	4 ^m
40 cm	5,5 ^m
60 cm	6,5 ^m
80 cm	7 ^m

Tabelle 1: Grenzgröße für einige Teleskopöffnungen

Ist damit das Ende der Möglichkeiten zur Vergrößerung der effektiven Teleskopöffnung erreicht? Ideen für weitere Entwicklungen bestehen bereits. So sind z.B. Modifikationen am optischen System selbst denkbar. Verzichtet man auf die visuelle Beobachtung, sind die Anforderungen an die Abbildungsgüte wesentlich geringer, da das Licht ja „nur“ auf die Endfläche der optischen Faser fokussiert werden muss. Diese ist aber wesentlich größer als das Beugungsscheibchen eines Sterns. So sind noch dünnere und damit wesentlich leichtere Spiegel möglich. Dieser Gesichtspunkt ist vor allem für Spiegelschleifer interessant. Der elliptische Fangspiegel könnte ebenso entfallen, wenn die Faserenden direkt in den Fokus verlegt werden. Ein weiterer Schritt zur Vergrößerung der Teleskopöffnung wäre die Ankopplung mehrerer Teleskope mit lichtelektrischer Nachführung über Lichtleiter gleichzeitig an einen Spektrographen. Stellen Sie sich z.B. die Zusammenschaltung von vier Teleskopen mit 60 cm Öffnung vor. Die Öffnung des Gesamtsystems entspricht dann einem 1,2m Spiegel! Vorerst sind für mich als „Spektroskopieneuling“ aber erst wesentlich bescheidenere Schritte zu gehen.

Mein Weg zur Sternspektroskopie

(von Dr. Berthold Stober, Glan-Münchweiler)

Seit etwa 35 Jahren beschäftige ich mich mit der Amateurastronomie. Über Jahre hinaus habe ich ausschließlich visuelle Beobachtungen gemacht. Später habe ich mich auch astrofotografisch betätigt. Mit dem Aufkommen der CCD-Kameras wurde der Wunsch immer größer, die Meßeigenschaften dieser Geräte auszunutzen. Das einfache Ablichten irgendwelcher astronomischer Objekte wurde immer langweiliger und konnte und kann nur in seltenen Fällen „wissenschaftliche“ Erkenntnisse liefern!

Ich war schon immer sehr beeindruckt, von den Leistungen, die Fraunhofer mit vergleichsweise einfachsten Werkzeugen erzielte. Irgendwann ist mir einmal ein Bericht in die Hände gefallen, aus dem zu entnehmen war, daß man mit einigen 100m Zwirn ein geeignetes Objektivgitter erstellen kann. Dies ist dann zu errei-

chen, wenn man den Zwirn über einen Rahmen spannt, dessen zwei gegenüberliegende Seiten aus zwei feinen Gewindestäben besteht. Ich habe mir auf diese Weise ein Objektivgitter hergestellt und war von der Leistung dieses primitiven Zusatzgerätes dermaßen beeindruckt, daß ich mich dazu entschloß, auf diesem Gebiet weiter zu arbeiten.

Zunächst bestellte ich mir das Transmissionsgitter der Firma Baader. In Verbindung mit der dazu gelieferten Zylinderlinse konnte man an hellen Sternen direkt visuell Absorptionslinien erkennen. Ich hatte das zwar erhofft, war aber so erfreut darüber, daß ich an Stelle des Okulars meine ST 6 einsetzte. Damit konnten, wenn auch in bescheidener Qualität, Spektren dokumentiert werden. Allerdings stellte sich sehr bald heraus, daß ein solches Gitter, betrieben im konvergenten Strahlengang, künftig keinerlei feinere Messungen ermöglichen würde. Schon gar nicht war zu erwarten, damit sich weiter entwickeln zu können.

Auf gut Glück und rief ich Ernst Pollmann an, der in der Zeitschrift Sterne und Weltraum als Leiter der VdS-Fachgruppe "Spektroskopie" angegeben war. Dies sollte sich für mich als außerordentlicher Glücksgriff erweisen. Mit viel Geduld und sehr viel Einfühlungsvermögen beantwortete er alle meine Fragen, die ich ihm in zahlreichen Telefonaten stellte. Er wies mich darauf hin, daß mit einem derartigen Gitter in einer solchen Anordnung keine weiteren zufriedenstellenden Ergebnisse zu erwarten seien. Er selbst arbeitete seinerzeit mit Objektivprismen. Ich aber wollte lieber weiter mit Gittern arbeiten weil ich davon überzeugt war, daß Gitter als dispergierende Elemente für uns Amateurastronomen leichter zu handhaben wären als Objektivprismen. Außerdem hielt mich das nichtlineare Dispersionsverhalten eines Prismas davon ab, jedesmal erneut für ein gegebenes Spektrum eine Dispersionskurve zu erstellen. Dazu müssen ja in einem Spektrum mindestens die Wellenlängen dreier Linien bekannt sein.

Durch Zufall geriet ich auf Anregung von Dr. A. Kaufer auf eine Internet-Seite, in der ein spaltloser Gitterspektrograph beschrieben war. Als dispergierendes Element war ein 30 x 30 mm bzw. 50 x 50 mm großes Gitter beschrieben, welches 1200 Linien pro Millimeter hatte. Ein solches Gitter kostete seinerzeit etwa DM 500,-. Als Kollimator bzw. als fotografisches Objektiv waren handelsübliche Kleinbildobjektive vorgeschlagen. Darüber hinaus waren etwa ein Quadratmeter Sperrholz erforderlich. Ich wollte es selbst kaum glauben, daß mit diesen relativ bescheidenen Mitteln ein funktionierender Spektrograph hergestellt werden konnte. Und zwar von einem Nichtnaturwissenschaftler wie ich es bin, der bislang eine eher sehr verschwommene Vorstellung von der Funktionsweise von Spektrographen hatte. Innerhalb von 48 Std. war meine Kiste fertig (Bild 1). Schon nach wenigen Justierversuchen erhielt ich auf meiner ST 6 den gewünschten Spektralfaden. Der Spektrograph war direkt an meinem Teleskop gekoppelt, was auf Grund der relativ großen Steifigkeit meiner Montierung und meiner Flatfieldkamera von Lichtenknecker möglich war und ist. Die so erzielten Ergebnisse waren derart beeindruckend, daß nach einigen Erörterungen auch Ernst Pollmann seine Arbeiten mit seinem Objektivprisma aufgab, und sich ebenfalls einen solchen Gitterspektrographen baute. Die von ihm erzielten Ergebnisse sind zum Teil veröffentlicht und sprechen für sich.

Für mich stellte sich nach einigen Versuchen heraus, daß der Gitterspektrograph in der vorgeschriebenen Anordnung doch zu „klobig“ war. Ernst Pollmann übermittelte mir eine Konstruktionszeichnung in orientierender Ausführung über einen Gitterspektrographen, welcher nur ein Objektiv benötigt. Diese Zeichnung hatte Herr Ferdinand Knappmann erstellt. Hier wird zur Kollimation des Lichtes und zur Abbildung des Spektrums auf dem Strahlungsempfänger nur ein Objektiv verwendet. Dies ergibt eine außerordentlich gedrungene Bauweise mit entsprechend geringem Gewicht (Bild 2). Der fertigungstechnische Aufwand allerdings ist größer.

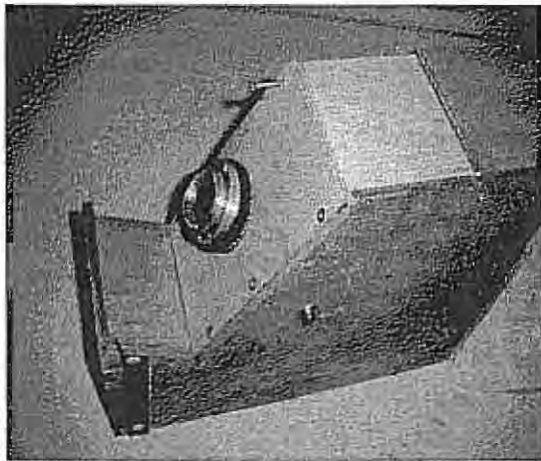


Bild 1:

Spektrograph mit 2 Objektiven für Kollimation u. Abbildung. Man sieht hier nur das Aufnahmeobjektiv das an die CCD angeflanscht wird.

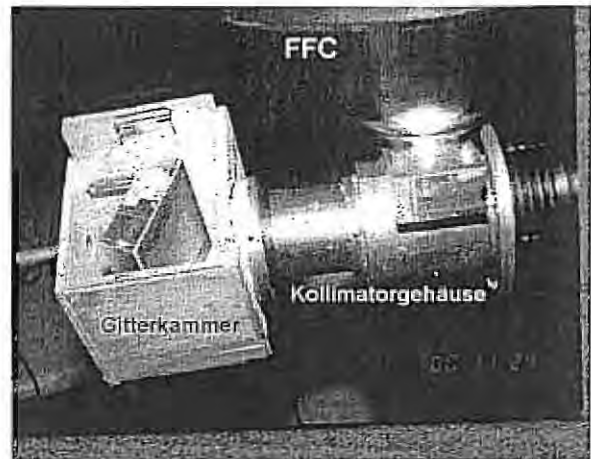


Bild 2:

Spektrograph nach Konstruktion von Ferdinand Knappmann. Hier montiert an einer Lichtenknecker Flat-Field-Kamera (3,5/500)

Als ganz entscheidend wichtig hat sich herausgestellt, daß zunächst mit dem Objektiv allein ein Stern scharf auf dem ST 6-CHIP eingestellt werden muß. Dann darf an dieser Fokussierung nichts mehr geändert werden. Die anschließende Scharfeinstellung des Spektrums erfolgt ausschließlich durch Änderung der Fokussierung am Teleskop. Das Einspiegeln des Lichtes erfolgt durch ein kleines Prisma. Eines der Hauptprobleme hierbei ist, ein geeignetes Objektiv ausreichender chromatischer Korrektur zu finden, welches hinter der letzten Linse genügend Freiraum besitzt, damit das Prisma zum Einspiegeln des Lichtes und die ST 6 noch genügend Platz haben.

Ich habe eher zufällig ein Objektiv der Firma Leitz gefunden, welches ursprünglich in Diaprojektoren verwendet wurde. Später fand ich noch das Objektiv "Heidomat" welches in 6 x 6 Diaprojektoren Verwendung findet. Diese Objektive haben eine sehr große Schnittweite und sind - so weit ich es beurteilen kann - optisch einwandfrei. Als Eingangsoptik verwende ich ein 20cm MPT von Lichtenknecker in der Version 1:4/770mm. Dieses Teleskop hat ein sehr großes Bildfeld und für das 24 x 36mm Format ist die Abbildung beugungsbegrenzt. Durch das große Bildfeld ist der Stern bzw. das Spektrum relativ leicht auf die ST 6 zu zentrieren. Die Nachführung wird über ein parallel montiertes Teleskop (C 5) und eine ST 4 Kamera überwacht. Durch die genaue Aufstellung des Teleskops führt selbst stundenlange Belichtung nur zu einer Abweichung von ein bis zwei Pixel. In der hier von mir be-

schriebenen Anordnungen beträgt die lineare Dispersion 60 Angstr./mm bei Verwendung der ST 5.

Um unterschiedliche spektrale Bereiche erfassen zu können, habe ich mein Gitter verstellbar angeordnet. Die Feineinstellung erfolgt über eine Gewindespindel, die eine ablesbare Skala trägt. Da für unsere Verhältnisse davon ausgegangen werden kann, daß die Dispersion unseres Gitterspektrographen linear ist, können so leicht beliebige Wellenlängen eingestellt werden. Da das Gerät aber – aus guten Gründen übrigens – spaltlos ist, hängt der eingestellte Spektralbereich auch von der Position des Sternes auf dem Gitter ab. Eine reproduzierbar einstellbare Wellenlänge würde einen Spalt zur Voraussetzung haben mit allen sich heraus ergebenden Problemen. Bild 3 zeigt ein erstes unverbreitetes, fadenförmiges CCD-Rohspektrum des Besterns ζ Tauri, das mit diesem Spektrographen und einer Belichtung von 300 sec gewonnen wurde. Deutlich hebt sich darin die für diese Sternklasse typische H α -Emission hervor.

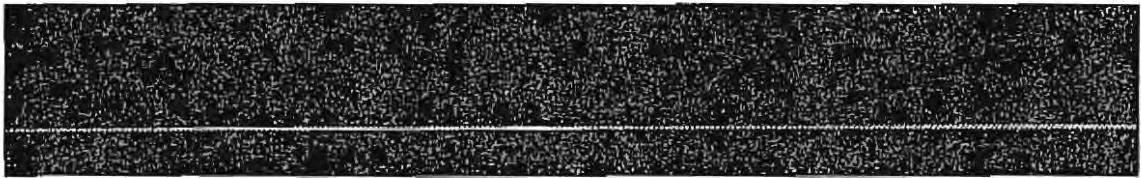


Bild 3: Spektrum von ζ Tauri im Bereich von etwa 6500-7100 Angstr.

Übrigens darf ich noch einmal Mut machen: In der FG Spektroskopie findet sich nach meiner zweijährigen Erfahrung in den allermeisten Fällen jemand, der mit Geduld und ggf. entsprechendem Fachwissen berät. So hat mir beispielsweise Herr Dr. Otmar Stahl von der Landessternwarte in Heidelberg per Email sehr geduldig die Bedeutung und Funktionsweise des Spaltes bei Spektrographen erklärt und ich denke schon, daß ich das nun so verstanden habe und es bei künftigen Konstruktionen berücksichtigen kann. Andere haben Ähnliches getan.

Also, Spektroskopie ist schon was Spezielles und ein wenig Astronomie sollte man schon beherrschen. Der vorstehende Aufsatz stammt eben von jemandem, der kaum glauben konnte je einen solchen Apparat bauen, betreiben und mit ihm messen zu können! Künftig richtet sich mein Interesse auf Spektrographen, die keine Linsen haben - wegen deren nicht vollständig zu unterdrückender chromatischer Aberration - sondern deren Kollimatoren und Aufnahmeoptiken aus Spiegeln bestehen.

Für alle, die sich näher interessieren hat Herr Knappmann sehr sorgfältige Konstruktionszeichnungen des von mir „aus dem Kopf“ gebautem Littrowspektrographen angefertigt. Diese Pläne können über die Fachgruppe bezogen werden. Darüber hinaus möchte ich auf die Internetadresse <http://www.astro-reinecke.org> von Herrn Dr. Reinecke verwiesen werden, der mit noch bescheideneren Werkstattmitteln als sie mir zu Verfügung stehen sich einen Gitterspektrographen aufgebaut hat. Unter <http://www.spektros.de> ist auch die sehr lehrreiche Internetseite von Günter Gebhard zu finden, allerdings in englischer Sprache.