Sonnenspektrograph für Schüler

Lothar Schanne, Daniel Sablowski Februar 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Ein	leitung	3
2	Med	chanik des Spektrographen	3
3	Opt	tik des Spektrographen	5
4	Auf	fbau und Benutzung des Systems	8
	4.1	Stückliste	8
	4.2	Vorgehensweise beim Aufbau	8
	4.3	Justierung	15
	4.4	Testspektren	18
	4.5	Eichkurve für die Gittereinstellung auf Wellenlängenbereiche	20
	4.6	Aufnahme von Sonnenspektren	21
5	Δ 115	swertung von Spektrenaufnahmen	22
0	5.1	Überblick	22
	· -		
	5.2	Vorbereitung der Aufnahmen mit IRIS	23
		5.2.1 Einleitung	23
		5.2.2 Addieren einer Sequenz (Darks)	24
		5.2.3 Darkkorrektur einer Aufnahme	24
		5.2.4 Flatfieldkorrektur	24
		5.2.5 Spektrum ausrichten	26
		5.2.6 2D - 1D	26
	5.3	Spektren extrahieren mit VSpec	27
6	Lös	ungen zu den Aufgaben	27

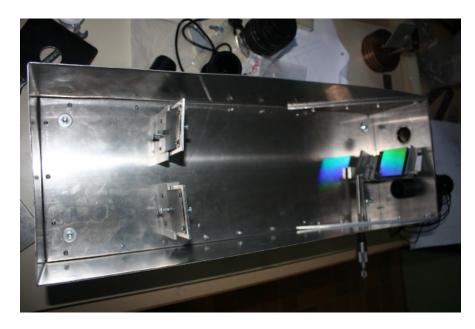


Abbildung 1: Innenansicht

1 Einleitung

Der Sonnenspektrograph für Schüler (SSS) ist ein Gemeinschaftsprojekt von Lothar Schanne und Daniel Sablowski. Damit möchten wir Schülern und Studenten die Möglichkeit schaffen, mit einem einfach zu handhabenden System erste Erfahrungen in der Spektroskopie zu sammeln. Der Spektrograph ist ein kompletter Selbstbau und somit ein Einzelstück. Daher bitten wir um umsichtige Behandlung des Messgerätes. Dieses Manual ist vor der Nutzung des Spektrographen zu lesen. Es wird hier auf die Mechanik, die Optik, Beobachtungstechnik, Reduktion und Auswertung eingegangen. Der Artikel gibt unerlässliche Hinweise für den erfolgreichen Gebrauch der Gerätschaft.

Der Spektrograph ist nach pädagogischen Gesichtspunkten gebaut. Es handelt sich nicht um eine black box. Alle Bestandteile sind sichtbar und es wird Wert gelegt auf "Handbedienung". Das Spektrographendesign (Typ Czerny-Turner) ist mit optischen Grundkenntnissen verstehbar. Der Benutzer kommt mit wesentlichen Grundgeräten in Kontakt: Ein einfaches Linsenteleskop, eine einfache mechanische parallaktische Montierung zur Nachführung des Teleskops auf die Sonne, die gefahrlose Projektion der Sonne auf einen Bildschirm, auf dem Strukturen wie Sonnenflecken oder starke Protuberanzen ohne weitere Hilfsmittel zu erkennen sind, ein Lichtwellenleiter (Faseroptik), der das Licht eines kleinen Ausschnitts der projizierten Sonnenoberfläche in den Spektrographen leitet, der leicht zu öffnende Spektrograph einfacher Bauart, dessen Funktion einfach zu erklären ist, der Detektor (CCD), der das Spektrum registriert und in digitaler Form der Auswertungssoftware zur Verfügung stellt. Naturwissenschaftlich interessierte junge Menschen werden damit ihre Freude haben und ihre Neugierde an einem lehrreichen Objekt und Projekt befriedigen können.

Wir wünschen allen Nutzern viel Freude mit dem Spektrographen und vor allem hoffen wir, dass viele Erfahrungen gesammelt werden können. Vielleicht erreichen wir so auch junge Leute, die sich über das SSS-Projekt hinaus mit der Spektroskopie beschäftigen wollen.

2 Mechanik des Spektrographen

Der Spektrograph ist komplett aus Aluminium gefertigt. Die Komponentenhalter, Kameraadaption und die Lichtleitereinspeisung sind an einer dicken Aluminiumplatte angebracht. Zur notwendigen Verkleidung des Ganzen wurde ein dünnes Aluminiumblech verwendet. Für Wartungsarbeiten ist der Deckel abnehmbar gehalten. Alle optischen Komponenten müssen in justierbaren Haltern eingebaut werden, sodass man den Strahlengang einstellen kann. Um welche optischen Elemente es sich handelt wird in Abschnitt 3 behandelt. In Abbildung 1 sieht man die Spiegelhalter von hinten und erkennt die Schrauben zur Einstellung. Ebenso

In Abbildung 1 sieht man die Spiegelhalter von hinten und erkennt die Schrauben zur Einstellung. Ebenso erkennt man die Anschlüsse für den Lichtleiter und die CCD-Kamera. Das Gitter wird mittels einer Mikrometerschraube gedreht, sodass man den gewünschten Wellenlängebereich einstellen kann. Dazu gibt es eine Eichkurve, um schnell den richtigen Bereich anfahren zu können. Mehr hierzu in Abschnitt 4.



Abbildung 2: Außenansicht

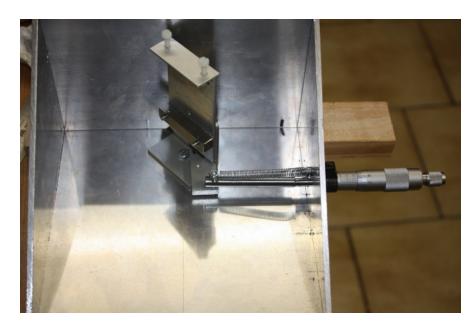


Abbildung 3: Gitterhalter

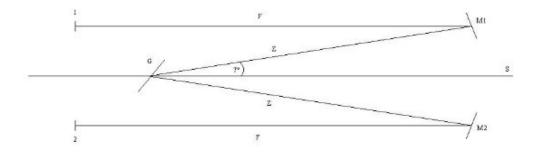


Abbildung 4: Czerny-Turner-Aufbau

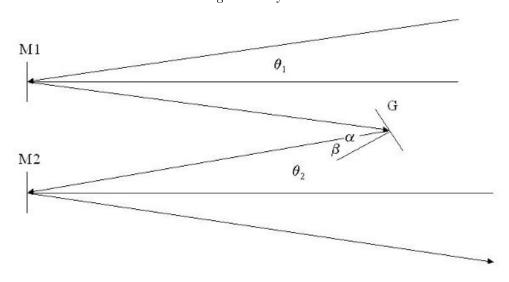


Abbildung 5: asymmetrischer Aufbau

3 Optik des Spektrographen

Beim optischen Aufbau des SSS handelt es sich um einen Czerny-Turner-Aufbau. In einem solchen Spektrographen werden zwei Hohlspiegel (sphärisch oder parabolisch) als Kollimator und abbildendes Element benutzt. Abbildung 4 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Czerny Turners.

Dies ist eine symmetrische Anordnung. Je größer die F-Zahl

$$F\# = \frac{f_{koll}}{d_{koll}} \tag{1}$$

des Kollimators ist, desto weniger machen sich die Abbildungsfehler bemerkbar. Dabei ist f_{koll} die Brennweite und d_{koll} der Durchmesser des Kollimatorspiegels M1. Die Abstände Z können mit dem Kriterium für ein ebenes Bildfeld berechnet werden. Von diesem Kriterium gibt es mehrere Versionen. Beim SSS haben wir uns für die einfachste Form entschieden.

$$Z = 0,8454 \cdot f \tag{2}$$

Das Gitter ist ein Reflexionsgitter mit 1200 l/mm und 50 mm x 50 mm groß. Bei den Spiegeln handelt es sich um einfache sphärische Spiegel mit einem Durchmesser von 45 mm und einer Brennweite von 450 mm. Die F# ist demnach 10. Die Koma kann für eine Wellenlänge auf Null reduziert werden. Dazu muss jedoch der symmetrische Aufbau in einen asymmetrischen überführt werden. Dazu betrachte man Abbildung 5.

Die Winkel θ können mit folgender Beziehung^1 bestimmt werden:

¹Daniel J. Schröder, Astronomical Optics, 1987, S.277

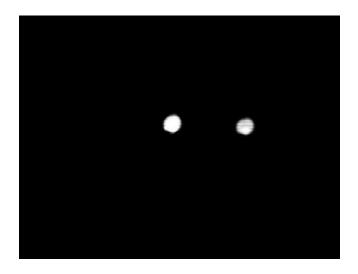


Abbildung 6: Zerstreuungsscheibchen

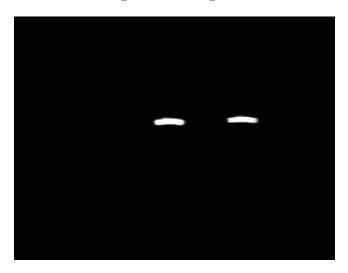


Abbildung 7: meridionaler Fokus

$$\frac{\theta_2}{\theta_1} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 \left(\frac{\cos(\alpha_0)\cos(\theta_2)}{\cos(\beta_0)\cos(\theta_1)}\right)^3 \tag{3}$$

Hierbei sind R_1 und R_2 die Krümmungsradien der beiden Spiegel. Diese sind hier gleich und der erste Faktor wird zu 1. Die Gleichung scheint erstmal nicht lösbar. Daher machen wir eine Vereinfachung. Als erstes können wir θ_1 als gegeben ansehen, weil wir diesen Winkel frei wählen dürfen. Außerdem sind die Winkel θ klein und wir können die Kosini dieser zu 1 setzen. Damit können wir also nun den Winkel θ_2 bei einer Wellenlänge λ_0 bestimmen. Für diese Wellenlänge werden Einfalls- und Ausfallswinkel am Gitter mit Hilfe der Gittergleichung

$$-(\sin(\alpha) + \sin(\beta)) = \frac{n\lambda}{q} \tag{4}$$

berechnet und in die Gleichung 3 eingesetzt. Dieses Kriterium wurde beim SSS ebenfalls berücksichtigt. Die Winkeldifferenz

$$\alpha - \beta = \psi \tag{5}$$

wird als totaler Winkel bezeichnet. Dieser beträgt beim SSS -14°. Das Licht wird beim SSS über einen 60 µm Lichtwellenleiter in den Spektrographen geleitet. Am Ausgang des Lichtwellenleiters (= Eingang des Spektrographen) sitzt ein Spalt mit 25 µm Breite. Am Teleskop wird der Lichtwellenleiter an einem Projektionsschirm befestigt. Dort kann der Bereich der Sonne auf den Eingang des Lichtleiters gebracht werden, welcher spektroskopiert werden soll. Näheres dazu findet sich im Abschnitt 4. Die Abbildungen 6, 7, 8 zeigen die drei astigmatischen Foki, Abbildung 9 zeigt die Entstehung dieser.



Abbildung 8: sagittaler Fokus

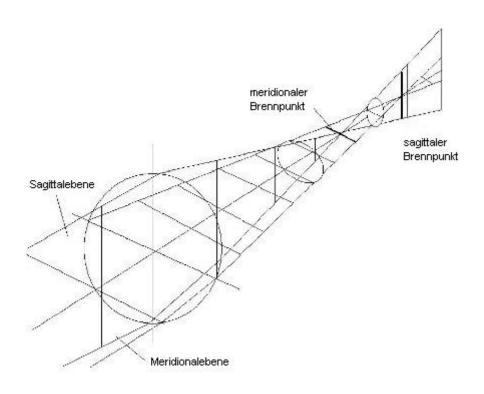


Abbildung 9: Astigmatismus

Aufgaben

- 1. Bestimmen Sie den Ein- und Ausfallswinkel für ein Gitter mit 1200 l/mm bei einer Wellenlänge von 550 nm im SSS. Hinweis: Der totale Winkel beträgt 14°.
- 2. Wir wählen $\theta_1=3.5^\circ$ und wollen θ_2 wissen. λ_0 sei 550 nm.
- 3. Fertigen Sie eine Skizze an, aus der alle bekannten Größen hervorgehen. Bestimmen Sie dazu auch den Abstand Z.
- 4. Drei wichtige Abbildungsfehler² können berechnet werden durch:

$$TAS = \frac{\theta_1^2 d_{koll}}{2} \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \left(1 + \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^3 \left(\frac{\cos(\alpha_0)}{\cos(\beta_0)} \right)^6 \right) \tag{6}$$

$$TTC = \frac{3\theta_1 d_{koll}}{16F \#_{koll}} \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \left(1 - \left(\frac{\cos(\beta)\cos(\alpha_0)}{\cos(\alpha)\cos(\beta_0)} \right)^3 \right)$$
 (7)

$$TSA = \frac{d_{koll}}{64F \#_{koll}^2} \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \left(1 + \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^3\right). \tag{8}$$

Dabei ist TSA die transversale sphärische Aberration, TTC die transversale tangentiale Koma und TAS der transversale Astigmatismus. Was heisst hier transversal? Was ist Astigmatismus, sphärische Aberration und Koma? Was ist an den Gleichungen für TSA und TAS interessant und was sagt uns das? Bestimmen Sie die Aberrationen am unteren (400 nm) und oberen (700 nm) Ende des Spektrums.

4 Aufbau und Benutzung des Systems

4.1 Stückliste

Zuerst sollte man kontrollieren, ob alle Teile vorhanden sind. Dem dient die folgende Stückliste:

- 1. Stativ (Tripod) für die Montierung
- 2. Dreieckige Blechplatte mit 3 Flügelschrauben zur Versteifung des Tripods
- 3. Montierung
- 4. Teleskop
- 5. Projektionsokular mit Projektionsschirm
- 6. Lichtwellenleiter (Faser, orange, 5 bzw. 30 m lang)
- 7. Spektrograph
- 8. Neonflackerlampe zum Kalibrieren

4.2 Vorgehensweise beim Aufbau

Nachfolgend sind die Teile und der Zusammenbau beschrieben.

In Abb. 10 liegt das Stativ zusammengeklappt auf dem Boden. Die Beine sind zusammengeschoben. In diesem Zustand (für den Transport) misst es nur ca. 80 cm in der Länge.

Die Dreieckplatte (Abb. 11) wird mit den 3 Flügelschrauben auf halber Höhe der Stativbeine zur Versteifung des Stativs auf die vorgesehenen Halter zwischen den Beinen aufgeschraubt. Die Schrauben werden von unten durch die Löcher geführt und in die Gewindelöcher in den Ecken der Dreieckplatte geschraubt.



Abbildung 10: Stativ



Abbildung 11: Dreieckplatte



Abbildung 12: Stativ, versteift mit der Dreieckplatte



Abbildung 13: Montierung auf dem Boden liegend



Abbildung 14: Stativ mit Montierung

Dann steht das Stativ (Tripod) recht steif (Abb.12). Jetzt kann man bereits die 3 Beine ausziehen, wenn man später bequem die Sonne in das Teleskop bringen will und eine höhere Arbeitsebene wünscht.

Abb. 13 zeigt die Montierung etwas wirr auf dem Boden liegend. Sie wird auf das Stativ gesetzt und von unten mit der großen Schraube unter dem Stativkopf festgeschraubt. Diese Schraube muss fest sitzen (bitte aber nicht überdrehen!!!).

Jetzt ist die Montierung auf dem Stativ befestigt, so dass das Teleskop in seine beiden Halterungen (Ringe) eingelegt werden kann.

In Abb. 15 ist das Teleskop bereits in seinen Ringschellen rutschfest verschraubt. Vorsicht, die diversen Klemmschrauben vorher an der Montierung etwas anziehen, damit das Teleskop nicht unkontrolliert kippt/umschlägt und beschädigt wird.

Unbedingt am Ende der Gewichtsstange die Stopp-Schraube mit der Unterlegscheibe eindrehen (Abb. 16). Sonst fällt bei unbeabsichtigter Lockerung der Klemmschraube unkontrolliert das Gewicht von der Stange. Das gibt schöne blaue Zehen. Und das Teleskop schlägt dabei um (weil das Gegengewicht zur Balance fehlt).

Nachdem die Beine ausgezogen sind kann das Projektionsokular mit dem Projektionsschirm im Okularauszug des Teleskops festgeklemmt werden.

In Abb. 18 ist die Projektionseinheit gezeigt, bestehend aus Schirm, Halterung und Projektionsokular.



Abbildung 15: Teleskop auf der Montierung installiert



Abbildung 16: Gegengewicht



Abbildung 17: Teleskop fertig auf dem Stativ und der Montierung montiert



Abbildung 18: Projektionseinheit



Abbildung 19: Projektionseinheit im Okularauszug des Teleskops befestigt



Abbildung 20: Teleskopeinheit fertig montiert



Abbildung 21: Der Spektrograph mit angekoppelter Faser



Abbildung 22: Detailansicht der Frontplatte des Spektrographen

Im Bild 19 ist die Projektionseinheit im Okularauszug des Teleskops durch eine Klemmschraube befestigt.

Jetzt ist das Teleskop soweit fertig aufgebaut. Es muß nur noch der Spektrograph mit der Faser (Lichtwellenleiter) angekoppelt werden. Bis hierhin sind etwa 15 Minuten vergangen.

Abb. 21 zeigt den Czerny-Turner-Spektrograph auf dem Boden stehend. Im Vordergrund ist der orange, ca 5 m lange Lichtwellenleiter zu sehen. Sein Ende (Lichtaustritt) ist im Lichteintritt des Spektrographen submillimetergenau im Fokus angebracht.

Das Foto 22 zeigt die Front des Spektrographen genauer. Links der Lichteintritt mit dem eingeführten LWL. Rechts der Lichtaustritt, an dem der Detektor (CCD-Kamera oder DSLR) anzuschrauben ist. Ganz links erkennt man noch die Mikrometerschraube, mit der das Gitter verstellt wird. Damit wird der Wellenlängenbereich des auf dem Detektor abgebildeten Spektrums eingestellt.

In Abb. 23 ist der Spektrographendeckel entfernt und man sieht in sein Inneres. Ganz vorne in der Mitte das Gitter (bzw. dessen Halter), im Hintergrund die beiden Hohlspiegel (links der Kollimator, rechts die Kamera). Der Spektrograph ist innen matt schwarz lackiert, damit unvermeidliches Streulicht absorbiert wird und nicht die Spektren stört.

In Abb. 24 wieder ein Blick in das Innere, jetzt aber über die Hohlspiegel hinweg gesehen in Richtung Gitter.



Abbildung 23: Geöffneter Spektrograph



Abbildung 24: Innenansicht des Spektrographen



Abbildung 25: Das Gitter



Abbildung 26: Faser an die Projektionseinheit gekoppelt



Abbildung 27: Lichtleiterende spektrographenseitig

In Abb. 25 sind die Gitterhalterung, die Gitterverstellung mittels einer Schubstange (die von der Mikrometerschraube verstellt wird) und eine Rückholfeder und das Gitter zu sehen.

Nach der Ankopplung des Lichtwellenleiters an den Schraubstecker im Projektionsschirm ist die Apparatur fertig zum Einsatz. Es wird nur noch ein Detektorsystem benötigt (CCD-Kamera oder DSLR) und die dazugehörige Bildaquisitionssoftware auf einem PC, um Sonnenspektren aufnehmen zu können

4.3 Justierung

Beim Transport des Spektrographen kann es zu einer Dejustierung kommen. Man erkennt das an folgenden Merkmalen:

- Das Spektrum fällt an der CCD (oder eben dem verwendeten Detektor) vorbei und wird deshalb nicht abgebildet.
- Das Spektrum ist unscharf.

In beiden Fällen muß der Spektrograph neu justiert werden.

Wenn das Spektrum unscharf ist, sollte erst mal überprüft werden, ob der Detektor (CCD, DSLR) normal an seiner Halterung sitzt oder ob er sich im Anschlußgewinde verdreht hat. Dann braucht nur das korrigiert zu werden .

Außerdem könnte es sein, dass der Faserlichtaustritt mit dem Spalt sich nicht mehr im Fokus des Kollimators befindet. Weil sich beispielsweise die ihn fixierenden Klemmschrauben gelockert haben. Auch das ist leicht zu überprüfen und zu korrigieren. Im Bild 27 ist der Lichteintritt des Spektrographen im Detail fotografiert.

Der Lichtleiter ist auf eine kreisrunde Platte geschraubt, die in das Lichteintrittsrohr am Spektrographen geschoben wird (Abb. 28 und 29).

²Gleichungen entnommen aus: Daniel J. Schröder, Astronomical Optics, 1987, S.278



Abbildung 28: Die Faser wird in ihre Aufnahme am Spektrographen geschoben



Abbildung 29: Klemmschrauben für die Faseraufnahme

Es sind auch Klemmschrauben in der Hülse des Spektrographen zu erkennen (2 Ebenen je 3 Schrauben, Abb. 29 und 30). Die runde Platte am LWL wird soweit in die Hülse geschoben, dass sie von der zweiten, zum Spektrographengehäuse hin liegenden Klemmschraubenebene geklemmt werden kann.

Die äußere Klemmschraubenebene dient dazu, die etwas kleinere Metallhülse festzuhalten, die gegen die runde Platte drückt, um diese vertikal auszurichten und um damit auch den LWL auf den Kolli auszurichten.

Falls kein Test-Spektrum auf dem Detektor zu erkennen ist³, sind die Spiegel oder das Gitter verstellt. Dann muß der LWL abgeschraubt werden und die Lage der optischen Achse ist mit einem Justierlaser zu überprüfen.

Schickt man das rote kohärente Laserlicht durch den verbliebenen Spalt, erscheint auf dem Kolli (weißes Papier als Bildschirm davorstellen) ein waagerechtes Beugungsbild (siehe Abb. 31). Damit ist gleichzeitig überprüft, dass der Spalt senkrecht steht (was sehr wichtig ist, um maximale Auflösung zu erhalten).

 $^{^3}$ Zur Erzeugung eines Testspektrums kann Tageslicht oder eine Taschenlampe verwendet werden.



Abbildung 30: Detail der Faseraufnahme



Abbildung 31: Beugungsbild des Lasers auf einem Stück weißem Papier, das vor den Kollimatorspiegel gestellt ist

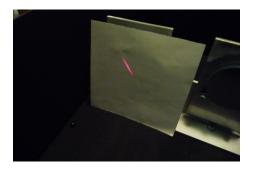


Abbildung 32: Schräges Beugungsbild des Lasers deutet auf schrägen Einbau des Spalts hin

Steht das Beugungsbild schräg auf dem Kolli (wie in Abb. 32 gezeigt), ist der Spalt schief eingebaut (nicht senkrecht).

Nun wird auch der Spalt (die runde Platte mit dem Schraubstecker für den LWL) ausgebaut und mit dem Laser genau mittig in Richtung Kollimator gestrahlt. Wenn der Laserstrahl die Mitte des Kollimators (M1) trifft, sollte sein Bild auch etwa in der Mitte des Gitters auftauchen (Abb. 33).

Ist das nicht der Fall, muss der Kollimator mittels der Stellschrauben auf seiner Rückseite so geneigt werden, dass der Reflex des Kollimators die Mitte des Gitters trifft. Das Gitter wirft das Laserlicht dann mittig auf die Kamera (M2), sofern die Gitterstellung mit der Mikrometerschraube richtig eingestellt ist. Gleichzeitig muss der Laserreflex etwa in der Mitte der beiden Hohlspiegel zu sehen sein. Wirft das Gitter den Laserstrahl nicht in die Mitte der Vertikalen des Spiegels M2, muss das Gitter im Halter etwas gekippt werden.

Diese Korrekturen sind nur selten notwendig. Der Spektrograph ist ausreichend stabil, weshalb sich die optischen Teile bei sachgemäßer Behandlung des Gerätes nicht verstellen.



Abbildung 33: Laserpunkt auf dem Gitter



Abbildung 34: Laserpunkt auf Kollimator- und Kamera-Hohlspiegel

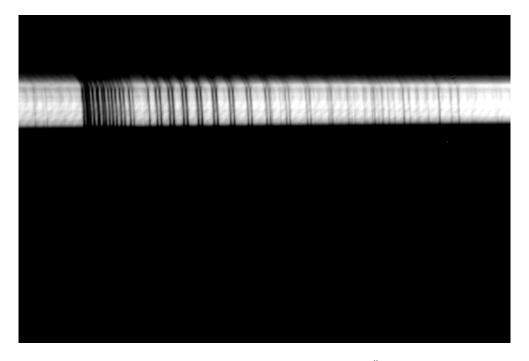


Abbildung 35: Die Sauerstoffbande bei 690 nm eignet sich sehr gut für die Überprüfung der Abbildungsschärfe des Spektrographen

4.4 Testspektren

Zu Beginn einer Beobachtungsserie sollten Testspektren aufgenommen werden. Ein guter Test ist die Aufnahme der terrestrischen⁴ Sauerstoffbanden bei 690 nm. An ihr kann die Auflösung mit einem Blick abgeschätzt und auch mittels einer schnellen Auswertung (x-Profil durch den Spektrenstreifen) quantitativ bestimmt werden.

Ein Teil der Absorptionslinien des Luftsauerstoffs bilden enge Dubletts, Linien, die ca. 1 Angström auseinanderliegen. Wenn sie noch getrennt werden, ist der Spektrograph ausreichend justiert. Das ausgewertete und mit diesen Linien kalibrierte Spektrum sieht dann etwa wie in Abb. 36 aus.

Anhand des Spektrums in Abb. 37, aufgenommen mit einem professionellen Spektrographen, können die Linien identifiziert werden 5 .

 $^{^4}$ Terrestrische Linien werden durch Lichtabsorption in der Luft erzeugt.

⁵Observatoire de Paris (UNICOM) / AstroQueyras Sun spectrum - Sampling : 0.066 A/pixel (April 2002), entnommen aus http://astrosurf.com/buil/us/spectro11/specalib.htm

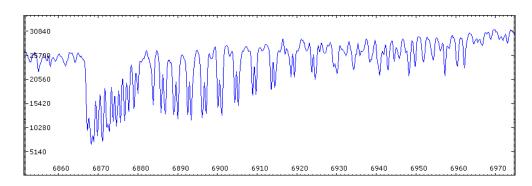


Abbildung 36: Sauerstoffbande als 1d-Spektrum

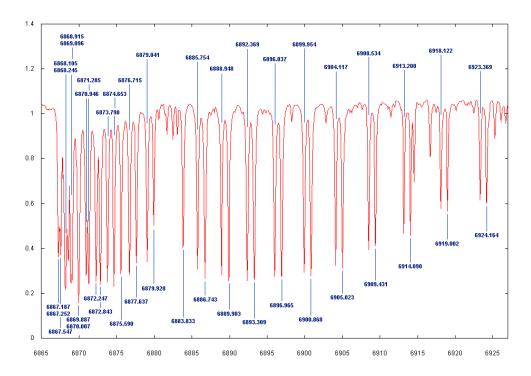


Abbildung 37: Vergleichsspektrum zur Identifizierung der O2-Absorptionslinien

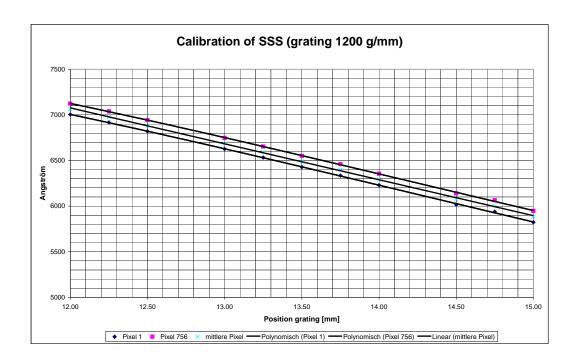


Abbildung 38: Eichkurve: Zusammenhang zwischen Wellenlängenbereichsfenster auf der Kamera und der Stellung des Gitters (Mikrometerschraube)

4.5 Eichkurve für die Gittereinstellung auf Wellenlängenbereiche

Im Normalfall will man bestimmte Partien des Spektrums der Sonne aufnehmen. Beispielsweise die H α -Linie oder das Natriumdublett D. Dazu muß man zu Beginn der Aufnahme wissen, wie das Gitter einzustellen ist, damit der gewünschte Wellenlängenbereich auch auf dem Detektor abgebildet wird. Dazu ist eine Eichkurve nötig, welche die Beziehung zwischen der Mikrometerschraubeneinstellung und dem abgebildeten Wellenlängenfenster beschreibt.

Die Abbildung 38 zeigt eine solche Eichkurve. Dargestellt sind 3 Geraden. Die Mittlere gilt für den Mittelpunkt des auf dem Detektor abgebildeten Wellenlängenfensters, die Untere und Obere gelten für die Ränder des abgebildeten Bereichs. Eine solche Eichkurve gilt nur für den verwendeten Detektor (Lage und Breite des Chips) und nur solange an der Gittermechanik und der Lage des Gitters in der Halterung nichts geändert wird oder sich verstellt hat.

Wie gewinnt man nun eine solche Eichkurve? Dazu verwendet man das Licht einer Spektrallampe. Das sind gasgefüllte Lampen, die scharfe Emissionslinien, also Photonen diskreter Wellenlängen, aussenden. Die billigste und einfachste ist die Neon-Glimmlampe, die im Alltag vielfältig eingesetzt ist. Dem Spektrographen ist solch eine Neonlampe beigefügt. Sie werden mit 230V Wechselspannung betrieben, also normalem Haushaltsstrom, und zeichnen sich durch ihr schwaches rötliches Licht aus. Auch wenn die Lampe nur schwach leuchtet ist die Intensität der emittierten Linien (Photonen definierter Wellenlängen) recht hoch, weil sich das eine Watt Lichtleistung auf nur wenige Linien konzentriert und nicht wie in einer Glühlampe auf ein kontinuierliches Spektrum verteilt ("schwarzer Strahler").

Diese Lampe wird im dunklen Zimmer dicht vor die Faser gehalten und der Auslöser des Detektors betätigt. Die notwendige Belichtungszeit beträgt mehrere Minuten. Es werden viele solcher Aufnahmen gemacht, wobei nach jeder die Mikrometerschraube um 0,25 mm weitergedreht wird. So erhält man Neonspektren, die sich noch etwas überlappen, so dass letztendlich alle starken Linien der Lampe zwischen 700 und 585 nm erfasst werden. Die Spektrenaufnahmen werden mittels Darkaufnahmen korrigiert (= Abzug von Bias und Dunkelstrom) und mit VSpec extrahiert. Wenn die Neonlinien zweifelsfrei identifiziert sind, kann mit

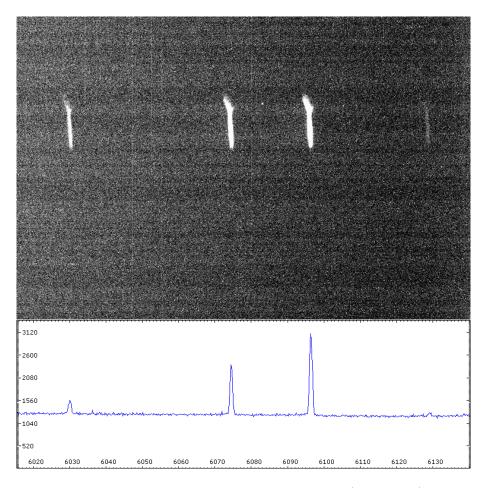


Abbildung 39: Beispiel eines Kalibrierspektrums (Neonlampe)

ihren bekannten Wellenlängen das jeweilige Spektrum mittels VSpec kalibriert werden. Die Wellenlängen des linken, des rechten und des mittleren Pixels werden abgelesen. Aus diesen Daten wird dann die Eichkurve erstellt.

In der Abb. 39 ist eine solche Aufnahme des Neonspektrums gezeigt (hier bei 14,50 mm Stellung der Mikrometerschraube) und darunter das mit VSpec extrahierte Spektrum, bereits wellenlängenkalibriert.

4.6 Aufnahme von Sonnenspektren

Das Teleskop und der Spektrograf sind fertig aufgebaut und mit dem Lichtwellenleiter verbunden. Es ist zweckmäßig, den Spektrographen in ein abgedunkeltes Zimmer zu stellen, was mit der 30 m langen Faserankopplung in den meisten Fällen leicht realisiert werden kann.

Durch Testspektren mittels Taschenlampe und Neonlampe wird die Funktionsfähigkeit und die Fokussierung überprüft. Außerdem wird mit Hilfe der Eichkurve und von frisch aufgenommenen Neonspektren der gewünschte Wellenlängenbereich für die erste Sonnenaufnahme eingestellt. Funktioniert alles befriedigend wird durch eine zweite Person am Teleskop die Sonne auf den Bildschirm gebracht, der zu spektroskopierende Teil der Sonne (z.B. ein Sonnenfleck) auf den Fasereingang gesetzt und durch drehen an den beiden Teleskopachsenverstellungen auf der Faser gehalten.

Es kann dann die CCD (oder allgemein der Detektor) ausgelöst werden. Dabei reichen bei Verwendung einer empfindlichen CCD-Kamera 5 bis 20 Sekunden Belichtungszeit aus. Es ist darauf zu achten, dass kein Teil des Spektrums überbelichtet wird, also die Kapazität der Kamerapixel nicht überschritten wird (überprüfen!).

Während der Belichtungszeit muss die Faser ununterbrochen aber ruhig bewegt werden. Damit werden sogenannte Moden in der Faser gemischt. Bei nicht-bewegter Faser sind diese Moden als Flecken in der Spektrumaufnahme zu erkennen. Sie ergeben dann bei der Auswertung stark gestörte Spektren, die praktisch wertlos
sind. Die Faserbewegung erfolgt recht simpel, in dem sie von einer Person in beiden Händen gehalten wird
und dann mit entsprechenden Arm- und Handbewegungen dafür gesorgt wird, dass sich alle Abschnitte der

Faser, mit Ausnahme der beiden letzten Meter vor dem Spektrograph und vor dem Bildschirm, unregelmäßig bewegen.

Nach der Aufnahme des Sonnenspektrums wird der Lichtleiter am Spektrograph feinfühlig abgeschraubt und die Neonlampe davorgehalten um ein Kalibrierspektrum aufzunehmen (das ist nur notwendig, wenn das Sepktrum unabhängig von den Sonnenspektrenlinien kalibriert werden soll). Alternativ kann die Neonlampe auch an den Fasereingang gehalten werden, wobei dann der Fasereinrritt etwas gegenüber anderem Umgebungslicht (Sonne) abgeschirmt werden sollte. Wenn beide Spektren zur Zufriedenheit ausgefallen sind (gleich nachprüfen durch Extraktion des Rohspektrums aus einer Aufnahme mit einem Programm wie VSpec) kann der abgebildete Wellenlängenbereich durch Neueinstellung an der Mikrometerschraube nach Wunsch geändert werden.

Wichtig ist im Verlauf der Beobachtungssitzung auch ein oder mehrere *Darks* aufzunehmen, deren Median von den einzelnen Aufnahmen abgezogen wird, bevor sie mit einem Programm wie VSpec weiterverarbeitet werden.

Zur Erleicherung der Interpretation der Spektren (Linienidentifizierung) ist dem Spektrograph ein Atlas beigefügt, der den Wellenlängenbereich von 600 bis 700 nm umfasst und jeweils das gemessene Rohspektrum, das zugehörige ausgewertete und kalibrierte 1d-Spektrum und das zugehörige Neonspektrum zeigt. Bei Wellenlängen unterhalb von 580 nm besitzt die Neonlampe keine hellen Emissionslinien mehr. Hier müssen dann andere Gasentladungslampen verwendet werden (z.B. Hg, Hohlkathodenlampen mit ausreichender Linienzahl etc.) oder man begnügt sich mit der Kalibrierung mittels leicht zu identifizierender Linien im Sonnenspektrum.

5 Auswertung von Spektrenaufnahmen

5.1 Überblick

Die Auswertung der Spektren hängt stark davon ab, in welchem Rohformat sie vorliegen. Und das hängt vom Detektor und seiner Ausleseelektronik ab.

CCD-Kameras ergeben meist direkt die ausgelesenen Pixeldaten im fit-Format. Das ist ein wissenschaftlicher Standard, mit dem die Auswerteprogramme immer auskommen. Bei Verwendung von DSLR-Kameras muss die in den Kameras bereits durchgeführte Bildbearbeitung (Weißabgleich etc.) unterdrückt werden, damit sie auswertbar bleiben. Dazu muss im RAW-Format ausgelesen werden, das dann speziell ausgewertet werden muss (3 Farbkanäle).

Zur Auswertung der Aufnahmen gibt es käufliche und frei verfügbare Programme (freeware wie IRIS und VSpec). Einen Überblick dazu und die entsprechenden Links gibt es auf der Webseite

http://www.astrospectroscopy.eu/Einsteiger/Datenreduktion/Datenreduktion%20III.htm Für Aufnahmen im fit-Format ist die Vorgehensweise wie folgt zu umreissen:

1. Es steht ein gemitteltes Dark zur Verfügung (Mittelung vieler Darkaufnahmen der gleichen Belich-

- 1. Es steht ein gemitteltes Dark zur Verfugung (Mittelung vieler Darkaufnahmen der gleichen Belichtungszeit wie die Sonnenspektrenaufnahmen mit IRIS).
- 2. Das auszuwertende Sonnenspektrum liegt im 2d-fit-Format vor (eine Art Foto). Falls mehrere aufgenommen wurden werden sie gemittelt (z.B. mit IRIS).
- 3. Von dem (gemittelten) Sonnenspektrum wird das (gemittelte) Dark abgezogen (mit IRIS).
- 4. Von den Neonspektren, die mit kurzer Belichtungszeit aufgenommen werden (ca. 1 s), wird ein Bias abgezogen (mit IRIS). Ein Bias ist ein Dark, das mit der technisch kürzest möglichen Belichtungszeit aufgenommen ist.
- 5. In VSpec werden das darkkorrigierte, gemittelte 2d-Sonnenspektrum und das zugehörige biaskorrigierte 2d-Neonspektrum gleichzeitig geöffnet.
- 6. Aus dem Sonnenspektrum wird in VSpec mit dem button "display binning reference zone" das Extraktionsfenster geöffnet und der Rahmen über den Spektrumstreifen verschoben und soweit verschmälert, dass er einen möglichst gleichmäßig belichteten Teil des Spektrums erfasst. Der button "object binning" zählt dann die Intensitäten der ausgewählten Pixelspalten zusammen, was dann das Rohspektrum als Graph ergibt (Auftragung der Intensitäten gegen die Pixelnummern).
- 7. Im exakt gleichen (!) Pixelbereich (Pixelzeilen) wird auch das Neonspektrum extrahiert durch betätigen des button "display binning reference zone" (öffnen des Extraktionsfensters), verschieben auf den vorher im Sonnenspektrum verwendeten Pixelbereich und betätigen des buttons "reference binning". Dann gibt es im Graphen 2 Spektren: das der Sonne (layer intensity) und das der Neonaufnahme (layer Ref1).

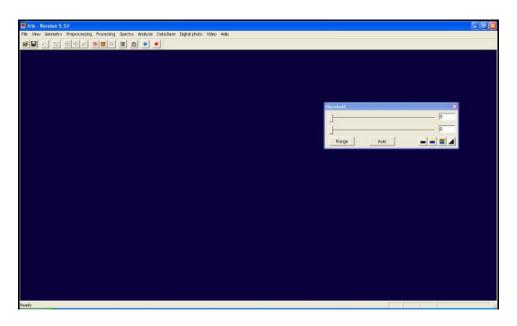


Abbildung 40: Hauptfenster

8. Nach Identifizierung der Neonlinien (verlässliche Kenntnis ihrer Wellenlänge) kann in VSpec die Kalibrierung erfolgen.

Für ausgewertete Beispiele siehe den dem Spektrographen beigefügten Atlas.

5.2 Vorbereitung der Aufnahmen mit IRIS

5.2.1 Einleitung

Mit der Freeware IRIS werden die Rohbilder vorbearbeitet, sodass die Spektren mit den Auswertesoftwares (z.B. VSpec) reduziert werden können. In dieser Kurzanleitung sollen die wesentlichen Punkte und das Vorgehen bei der Vorbearbeitung der Bilder gezeigt werden. IRIS kann von

http://www.astrosurf.com/buil/us/iris/iris.htm

heruntergeladen werden. Wenn IRIS gestartet wird, sieht das so aus: Das Programm ist sehr benutzerfreundlich und intuitiv aufgebaut. Das kleine Fenster in Abbildung 40 dient zur Kontrasteinstellung des geladenen Bildes. So kann es durchaus vorkommen, dass man erst den Kontrast einstellen muss, um etwas sehen zu können . Unter File können Bilder geladen, gespeichert und zugehörige Informationen abgerufen werden.

Unter View kann man zwischen verschiedenen Darstellungsarten (z.B. logarithmisch) wählen, was wir hier aber nicht benötigen. Wichtiger ist der Befehl Slice. Wählt man dies aus, kann man eine Linie über einen Bildbereich ziehen und erhält einen Plot in dem die Count's gegen die Pixel für diese Linie aufgetragen werden. Damit kann man z.B. den Fokus überprüfen, oder allgemein die Breite eines Spektrums ermitteln. Weiterhin ist das Histogramm wichtig, um eine evtl. Überbelichtung zu erkennen. Überbelichtete Bilder sind nicht mehr auswertbar.

Geometry ist dazu da, ein Bild auszurichten. Wir werden später die Funktion Rotate verwenden, um den Spektrenstreifen exakt horizontal einzurichten. Daneben kann man das Bild spiegeln, verschieben, binnen, usw.

Der Punkt Preprocessing beinhaltet für uns sehr wichtige Funktionen. Darunter die Flat- und Darkkorrektur, die wir später noch genauer kennen lernen werden.

Processing beinhaltet im Prinzip ebenfalls diese Funktionen wie Preprocessing, jedoch kann man hier differentieller vorgehen. Außerdem kann man hier ganze Sequenzen addieren, subtrahieren, multiplizieren, dividieren und das auch mit Einzelbilder und viele andere spaßige Sachen machen.

Digital Photo gibt wieder einige Bildbearbeitungsfunktionen.

Und Help bietet neben Informationen zur vorhandenen IRIS-Version auch eine Hilfefunktion.

Zu Beginn stellt man am einfachsten unter File – Settings den Pfad zum Ordner ein, indem sich die zu bearbeitende Dateien befinden. Dies schreibt man in das Feld Working path.

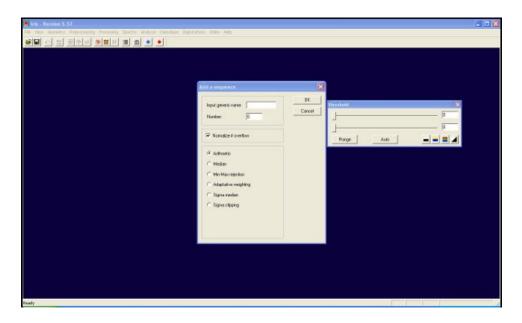


Abbildung 41: Add a sequenz

5.2.2 Addieren einer Sequenz (Darks)

Um die Spektren später mit einem Dark korrigieren zu können, werden erst die vorhandenen Einzeldark-Frames zu einem Meandark addiert. Dazu geht man unter Processing auf add a sequenz. Es öffnet sich das in Abb. 41 gezeigte Fenster. Im Feld Input generic name ist der gemeinsame Name der Darks einzugeben. In das Feld Number geben Sie dann die Nummer des letzten Darks ein, das Sie summieren wollen. In der Liste können Sie zwischen verschiedenen Summierungsvarianten wählen, wählen Sie arithmetisch, so werden die Darks summiert und gemittelt. Drücken Sie dann OK. Es erscheint das summierte Meandark, dass Sie nun speichern sollten.

Das Meandark kann auch mit einer extra Funktion unter Preprocessing erstellt werden. Hierzu braucht man ein Bias-Frame, dass nur das Ausleserauschen der Kamera beinhaltet. Dieses erstellt man durch eine Aufnahme (Kamera abgedunkelt) mit der geringsten Belichtungszeit. Oder man erstellt es sich selbst. Dazu läd man ein Dark, und gibt in der Konsole fill 0 ein. Dieses speichert man dann ab und muss es nun in Make a Dark als offset eingeben. Wählen Sie Mean oder Meridian und den gemeinsamen Namen sowie die Nummer des letzten Darks, dann OK und abspeichern. Wollen Sie auch bei der obigen Methode ein Offset abziehen, dann müssen Sie das für jedes Dark einzeln machen, oder mit der entsprechenden Sequenzfunktion.

5.2.3 Darkkorrektur einer Aufnahme

Nun müssen wir die Spektralaufnahmen mit unserem erstellten Meandark korrigieren. Dazu lädt man die Aufnahme des Spektrums in IRIS. Nun wählt man unter Preprocessing Remove dark. Es erscheint das in Abb. 42 gezeigte Fenster. Man gebe im Feld Dark image den Pfad zum Meandark an, also in unserem Falle einfach den Namen das Meandarks. Das Feld Cosmetic file können wir leer lassen und wählen Optimization ab. Wir geben noch einen neuen Namen der korrigierten Aufnahmen an und die Anzahl der Bilder.

5.2.4 Flatfieldkorrektur

Zur Flatfieldkorrektur hat IRIS ebenfalls ein einfaches Tool auf Lager. Wir finden unter Preprocessing den Punkt Divide by a flat-field und bekommen das in Abb. 43 gezeigte Fenster. In das Feld Input generic name kommt der Pfad zum darkkorrigierten Bild. In das zweite Feld Flat-field-frame kommt der Pfad zum Flatfield rein. In das dritte Feld tippt man den Pfad ein, wo die korrigierten Bilder rauskommen sollen. Schließlich ins letzte Feld die Anzahl der zu korrigierenden Aufnahmen.

Bemerkung: Unter Spectro findet man den Sequenzbefehl, Processing of 2D spectra. Hier kann man alle Korrekturen in einem Aufwasch erledigen lassen. Das erscheinende Fenster ist uns ja nun schon mehr als vertraut.

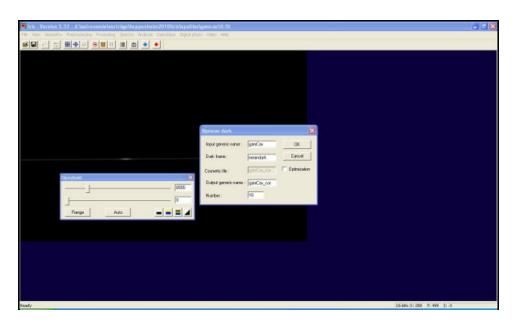


Abbildung 42: Remove dark

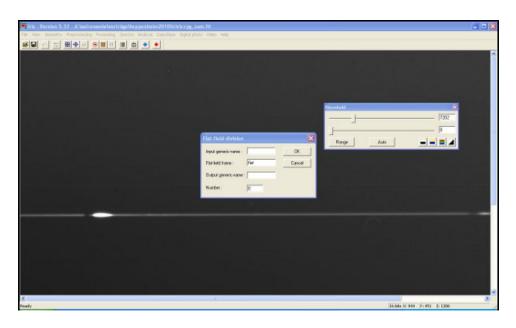


Abbildung 43: Flatfield divison

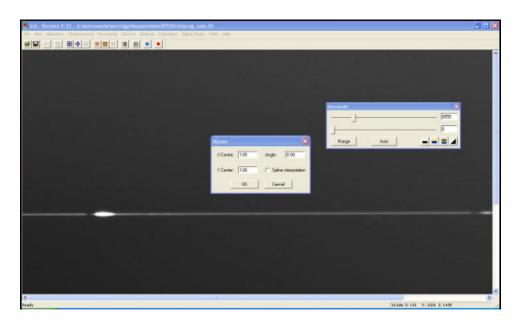


Abbildung 44: Rotate

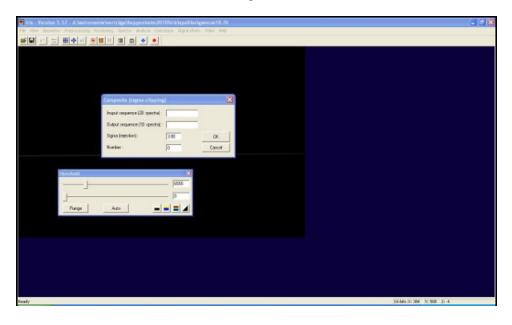


Abbildung 45: 2D - 1D

5.2.5 Spektrum ausrichten

Nun müssen wir dafür sorgen, dass der Spektralfaden schön horizontal liegt. Dazu rahmen wir einen Großteil des Spektralfadens ein und geben in der Konsole den Befehl L_ORI ein. Es erscheint ein kleines Fenster mit mehreren Angaben. Wir entnehmen dort die Angabe Angle. Nun kann man unter Geometry Rotate das Bild um diesen Winkel drehen, um ein gerades Spektrum zu haben.

Es gibt auch hier wieder einen Sequenzbefehl, der die einzelnen Aufnahmen um diesen Winkel dreht. Voraussetzung ist natürlich, dass sich die CCD während der Beobachtung nicht gedreht hat. Diesen Befehl findet man unter Spectro Tilt of a 2D spectra sequence. Es erscheint ein Fenster, in dem wir wieder die zu bearbeitenden Bilder in das erste Feld eingeben. In das zweite geben wir den Namen der Bilder an, wie es IRIS uns ausgeben soll. Als X-Position geben wir den Mittelpunkt des Bildes ein, unter Angle den negativen des eben ermittelten Winkels und Number die Anzahl der Bilder, dann OK.

5.2.6 2D - 1D

Nun extrahieren wir das 2D Spektrum zu einem 1D Spektrum. Zuerst rahmen wir den Spektralfaden ein. Nun finden wir unter Spectro den Sequenzbefehl Composite of a sequence of spectra: Im Fenster ist nun wieder alles wie gehabt. Wir erhalten nun 1D Spektren. Diese können wir wie unter 2. beschrieben aufaddieren. Mit

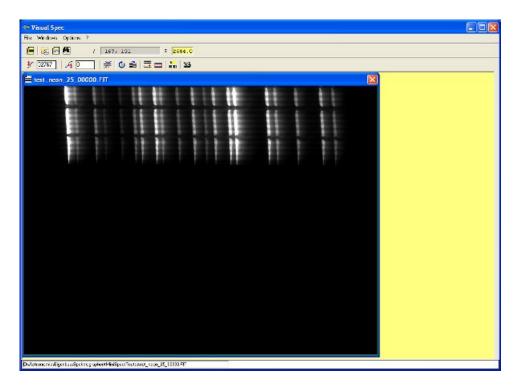


Abbildung 46: Laden des 2D-Spektrums in VSpec

diesem 1D Bild können wir in VSpec weiter arbeiten.

5.3 Spektren extrahieren mit VSpec

Das Extrahieren von Spektren in VSpec geht sehr einfach von der Hand. Dazu läd man das 2D Spektrum in VSpec. Wenn Sie auf den Botton "Display reference binning zone" drücken, erscheint ein Balken, den man in der Breite durch ziehen am Rand verändern kann. Diesen legt man über die Stelle des Spektrums, dass man extrahieren will. Drücken des "Objekt binning" - Buttons erzeugt ein Profil des Spektrums. Mit der Option "Calibration 2 lines" kann nun das Spektrum mit einer Wellenlängenskala versehen werden. Drücken Sie den Button und klicken sie auf YES in dem aufgehenden Fenster. Suchen Sie sich eine bekannte Spektrallinie, klicken links, dort wo die Linie ins Kontinuum übergeht und ziehen sie rüber bis zum nächsten Kontinuumsübergang. Es öffnet sich ein kleines Fenster, in das sie die Wellenlänge der Linie eintragen müssen. Drücken Sie dann Eingabe und suchen Sie sich eine weitere bekannte Linie und wiederholen den Vorgang. Die Linien sollten möglichst weit über das Spektrum verteilt liegen. Nun klicken Sie auf den kleinen gelben Kasten rechts am Rand des Profilfensters "graduations". Die Skala wird nun angezeigt. Nun kann noch eine Kontinuumsdivision durchgeführt werden. Gehen Sie dazu unter "Radiometry" auf "Continuum automatique". Drücken Sie den "Erase graphic" Button und wählen dann in dem Fenster daneben "intensity". Gehen Sie unter "Operations" auf "Divide profile by a profile...". Dort wählen Sie "scaleN.intensity" und dann OK. Nun können Sie, wie gerade beschrieben, wieder die Graphiken löschen und sich nur "Division" anzeigen lassen. Dies müssen wir noch normieren. Dazu wählen Sie einen Bereich im Spektrum, der einem Kontinuum möglichst nahe kommt und drücken den Button mit der 1. Diese Schritte waren nur die wesentlichsten. In VSpec können Sie noch einiges mehr machen. Wichtig ist z.B. die Funktion "Computation preferences" unter "Spectrometry". Dort können wichtige Eigenschaften von Linien und Spektralbereichen bestimmt werden. Seien Sie aber diesen Werten, insbesondere dem SNR (Signal- zu Rauschverhältnis) und der FWHM skeptisch gegenüber. Nicht immer bringt VSpec das richtige Ergebnis. Außerdem können Sie Linien beschriften, indem Sie die Linie einkästeln und die rechte Maustaste drücken und "Label" wählen. Profile können außerdem in andere Formate exportiert werden.

6 Lösungen zu den Aufgaben

1. Wir setzen $\alpha - \beta = -14^{\circ}$ in die Gittergleichung, eliminieren somit β und lösen nach α auf:

$$\alpha_0 = \frac{\arcsin(-\frac{n \cdot \lambda_0}{g})}{\cos(\frac{\psi}{2})} + \frac{\psi}{2}.$$
 (9)

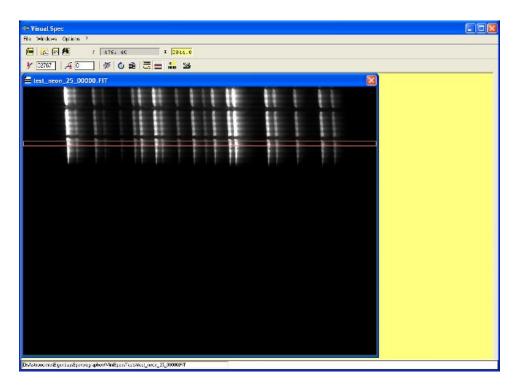


Abbildung 47: Kollabieren des Spektrums

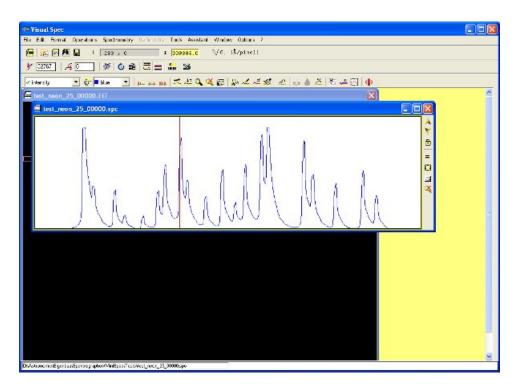


Abbildung 48: Profil erzeugen

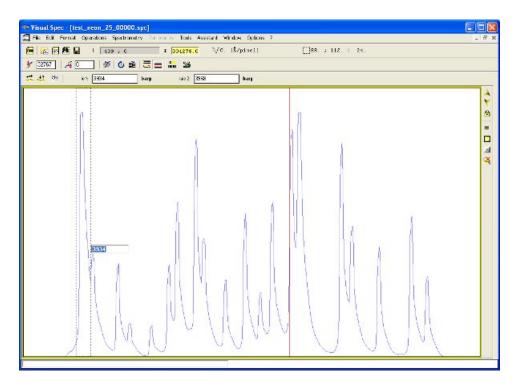


Abbildung 49: Kalibration

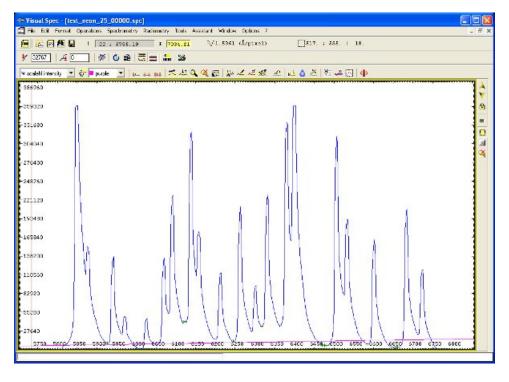


Abbildung 50: Kontinuum

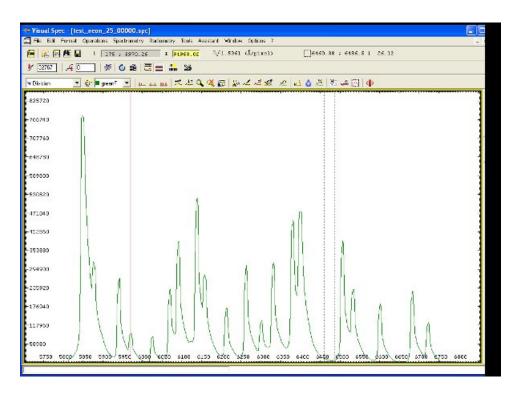


Abbildung 51: Normieren

Einsetzen ergibt $\alpha_0 = -48,6^{\circ}$ und β_0 erhält man zu $\alpha_0 - \psi = -34.6^{\circ}$.

2. Wir machen die Vereinfachungen in Gleichung 3 und erhalten:

$$\theta_2 = \left(\frac{\cos(\alpha_0)}{\cos(\beta_0)}\right)^3 \theta_1 = 2,7^{\circ} \tag{10}$$

3. Anwenden von Gleichung 2 ergibt:

$$Z = 450mm \cdot 0,8454 = 380,4mm$$

4. Transversal bedeutet hier die Queraberration, diese steht orthogonal zur Längsaberration. Die Längsaberration ist die Aberration auf der optischen Achse, wie z.B. die chromatische Längsaberration. Die drei genannten Aberrationen können in Büchern zur Optik nachgelesen werden. An den Gleichungen für TAS uns TSA ist interessant, dass sie nicht von den Ein- und Ausfallswinkeln abhängen, es ist nämlich:

$$TAS(\alpha, \beta) = const.$$

$$TSA(\alpha, \beta) = const.,$$

d.h. diese Aberrationen sind nicht abhängig von der Wellenlänge und somit für das gesamte Spektrum gleich. Im Gegensatz dazu ist TTC abhängig von den Winkeln und somit von der Wellenlänge. TAS gibt die Breite des Spektralstreifens an, die durch diesen Astigmatismus gegeben ist. Somit ist die Breite 2TAS und führt nur zu einer Verbreiterung des Streifens, jedoch nicht zu einer Beeinträchtigung des Auflösungsvermögens. Um die Fehler zu berechnen verwenden wir die in Aufgabe 1 bereits bestimmten Winkel und können TSA und TAS sofort bestimmen zu:

$$TAS = 0,068mm$$

$$TSA = 0,014mm$$

Für TTC erhält man bei 400 nm und 700 nm 3 µm. Aufgrund von herstellungsbedingten Ungenauigkeiten können diese Fehler in der Praxis höher liegen. Zum Vergleich bestimme man die Breite des Spektrenstreifens aus einer Aufnahme und vergleiche dies mit dem berechneten Wert.