ESpekDiko vs. BACHES

Zwei Echellespektrographen im Vergleich

Daniel P. Sablowski

17. Januar 2012
Privatsternwarte Plösen

Vorliegender Artikel vergleicht den Selbstbau-Echellespektrographen ESpekDiko von Daniel Sablowski mit dem BACHES Echellespektrographen der CAOS Gruppe. Zunächst werden die allgemeinen technischen Daten beider Systeme gegenüber gestellt und kritisch betrachtet. Im 2. Abschnitt wird auf den finanziellen Aufwand und auf den Konstruktionsaufwand der Systeme eingegangen. Die Beobachtungsperformance vergleicht die Erstellung von Kalibrationsspektren und den beim Echellespektrographen kritischen Prozess des Flatfieldings. Weiterer wichtiger Punkt der Effizienz und Signalverhältnisse, sowie die mechanische Stabilität der Systeme wird im 4. Abschnitt dargestellt. Allerdings müssen hier die verwendeten Detektoren ebenfalls betrachtet und damit insbesondere das Rauschverhalten und die Quanteneffizienz berücksichtigt werden um die reine relative optische Effizienz der Spektrometersysteme zu ermitteln. Im vorletzten Abschnitt wird auf den Prozess der Datenreduktion eingegangen. Schlussendlich wird ein Fazit im letzten Abschnitt gezogen.

Inhaltsverzeichnis

1 Technische Daten **3**
1.1 ESpekDiko . . . 3
1.1.1 Allgemeine Systemparameter . . . 3
1.1.2 Geometrische Parameter . . . 4
1.1.3 Optische Parameter . . . 4
1.2 BACHES . . . 5
1.2.1 Allgemeine Systemparameter . . . 5
1.2.2 Geometrische Parameter . . . 5
1.2.3 Optische Parameter . . . 6
1.3 Pros und Kons . . . 6

2 Finanzieller und Konstruktionsaufwand **7**
2.1 BACHES . . . 7

2.2 ESpekDiko . . . 7
2.3 Fazit . . . 7

3 Beobachtungsperformance **8**
3.1 BACHES . . . 8
3.1.1 Kalibrations- und Guidingeinheit . . . 8
3.1.2 Flatfielding . . . 9
3.1.3 Fokussierung und Justage . . . 12
3.2 ESpekDiko . . . 12
3.2.1 Kalibrations- und Guidingeinheit . . . 12
3.2.2 Flatfielding . . . 13
3.2.3 Fokussierung und Justage . . . 14
3.3 Pros und Kons . . . 14

4 Messqualität **15**
4.1 Stabilität . . . 15
4.2 Signal . . . 15

5 Reduktion der Spektren **16**

6 Fazit **20**

1 Technische Daten

1.1 ESpekDiko

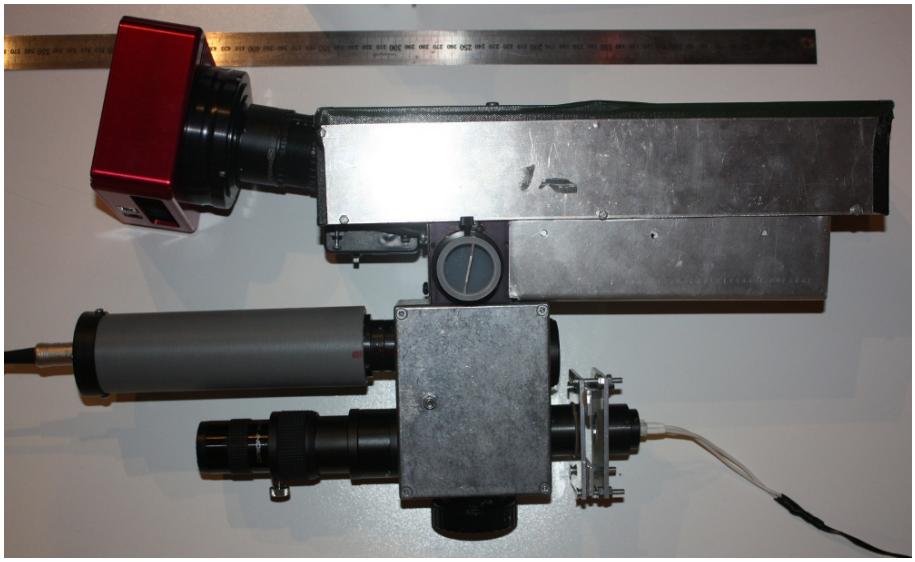

Abbildung 1: Gesamtansicht ESpekDiko

1.1.1 Allgemeine Systemparameter

Das Spektrometer ist für Teleskope mit einem Öffnungsverhältnis von 1:10 ausgelegt. Am Spektrometer ist eine Klappspiegeleinheit mit vier Anschlussmöglichkeiten, zwei zum einkoppeln von Kalibrations- und Flatsignal und zwei weitere für Okulare bzw. Kameras angebracht. Die Einheit ermöglicht somit das betrachten eines größeren Teleskopgesichtsfeldes durch die Wahl unterschiedlicher Okulare um so den richtigen Stern zu identifizieren und auf den Spalt des Spektrometer zu bringen. Der Spalt ist aus einen Wolframplättchen gefertigt, reflektiert somit und besitzt eine Abmessung von 90 µm x 50 µm. Über den Klappspiegel wird das Kalibrationslicht einer Thorium-Argon Hohlkathodenlampe und das Flatlicht einer Xenonlampe eingekoppelt. Das Flatlicht kann noch durch verschiedene Filter geleitet werden, um eine bessere Ordnungsidentifikation bei der Reduktion der Spektren zu erhalten (mehr dazu in Abschnitt 3). Die Stromversorgung der Th/Ar-Lampe erfolgt über ein selbst hergestelltes Netzteil.

An der Klappspiegeleinheit ist ein SC-Gewinde angebracht, das eine direkte Verschraubung des Spektrometers mit dem Teleskop erlaubt und somit eine hohe Stabilität erreicht wird.

1.1.2 Geometrische Parameter

Das Systemgewicht liegt bei 3.000 g, wobei Detektor (Atik 383L+) und die Kalibrationseinheit mit integrierter Klappspiegelfunktion enthalten sind. Weiterhin beträgt die Gesamtlänge des Gerätes ca. 450 mm. Durch die Nutzung der Klappspiegeleinheit entfällt die Notwendigkeit eines Okularauszuges und die insgesamte Baulänge des Systems wird gering gehalten. Weitere wichtige Größe ist der Abstand zwischen Echellegitter und dem Crossdisperser, da dieser auf Grund der Dispersion des Echellegitters die nötige Öffnung des Objektives festlegt. Er beträgt im ESpekDiko 150 mm. Weiterhin ist der Abstand zwischen Crossdisperser und Objektiv sehr knapp gehalten (20 mm) und die Baulänge des Kameraobjektives liegt, wegen der Bauart des Objektives selbst, bei 160 mm. Außerdem beträgt der Winkel zwischen einfallendem Strahl und gebeugtem Strahl am Echellegitter ca. 10°, wobei der gebeugte Strahl einen größeren Winkel mit der Gitternormalen einnimmt als der einfallende Strahl.

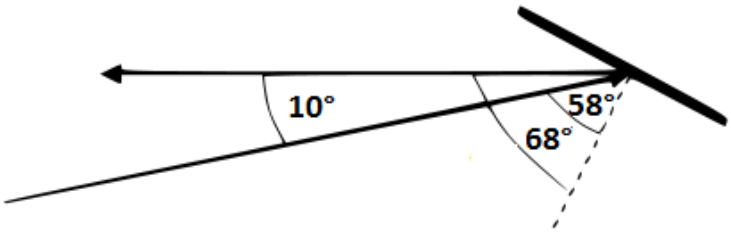

Abbildung 2: Winkel am Echellegitter bei ESpekDiko

1.1.3 Optische Parameter

Ziel bei der Entwicklung war vorgesehen ein Auflösungsvermögen von R = 10.000 bei einer Spaltbreit von 50 µm zu erhalten. Dies machte eine Kollimatorbrennweite von 120 mm erforderlich. Weiterhin wurde ein Echellegitter mit 31,6 l/mm verwendet, da hiermit eine bessere Geometrie bei der Abbildung der Ordnungen erreicht wird, was wiederum die Abdeckung eines größeren Wellenlängenbereiches ermöglicht. Als Cross-Disperser wurde ein Transmissionsgitter mit 300 l/mm, aus zwei wesentlichen Gründen verwendet: Zunächst ist die Geometrie bei der Konstruktion einfacher zu realisieren und des Weiteren ist mit 300 l/mm eine ausreichende Separation der Ordnungen gegeben. Die Brennweite des Objektives belief sich auf 160 mm, um die erwähnte Separation der Ordnungen bei gleichzeitiger Abbildungen des maximalen Wellenlängenbereiches zu erreichen. Beim Objektiv handelt es sich um ein eigens entwickeltes Petzval-Objektiv aus zwei kommerziellen Achromaten. Es ermöglicht theoretisch eine Abbildung von 400 nm bis 1200 nm, wobei mit dem vorliegenden System eine Abbildung von 400 nm bis 750 nm erreicht wird.

Abbildung 3: Gesamtansicht BACHES

1.2 BACHES

Bei der hier getesteten und vorgestellten Version handelt es sich um einen der Prototypen des Gerätes. Er wurde vom Astronomischen Institut Dr. Remeis Sternwarte Bamberg der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg erworben und wird dort für das astronomische Praktikum eingesetzt.

1.2.1 Allgemeine Systemparameter

BACHES ist für Teleskope mit einem Öffnungsverhältnis von 1:10 konzipiert worden und soll letztlich zwei verschiedene Spalte 100 µm x 50µm und 100 µm x 25 µm erhalten. In dem Prototypen ist der schmälere Spalt von 100 µm x 25 µm eingebaut. Das Spektrometer wird über eine 2" Teleskopsteckaufnahme an das Teleskop gekoppelt, wobei die Hülse abgeschraubt werden kann und dann ein 2" Gewinde zur Verfügung steht. Zur Erstellung der Kalibrationsspektren steht eine Thorium-Argon Hohlkathodenlampe, welche direkt auf dem Spektrometer montiert ist, zur Verfügung. Um das Licht einkoppeln zu können, ist ein kleiner einklappbarer Spiegel in der Spaltbeobachtungseinheit integriert und wird im Serienmodell über einen Magneten automatisch betätigt werden. Die Kameraklemme wurde nachträglich angebracht, um eine Verdrehung des Detektors relativ zum Spektrometer während der Beobachtung und Transport zu verhindern.

1.2.2 Geometrische Parameter

Das Systemgewicht liegt bei ca. 2.400 g, wobei der Detektor (SBIG ST1603ME) und die nachträglich angebrachte Kameraklemme enthalten sind. Die Länge des Gerätes beläuft

sich auf ca. 400 mm. Im Prinzip sind keine weiteren Daten des Spektrometers bekannt, jedoch können aus genauer Betrachtung des Spektrums und der Gehäuseform einige Parameter eingegrenzt werden. Zunächst kann von außerhalb ein Winkel zwischen einfallendem und ausfallendem Strahl zu 10° gemessen werden. Weiterhin stellt man fest, dass die Geometrie am Gitter so aussieht: Der Beugungswinkel ist hier kleiner als der Einfallswinkel (Abb. 4), wobei die Werte für die Winkel auf Grund der Gittergleichung ermittelt werden können. Weiterhin kann man in etwa den Abstand zwischen Echellegitter und Crossdisperser auf ca. 140 mm bis 170 mm abschätzen. Ebenfalls wird der Abstand zwischen Crossdisperser und Objektiv so klein wie möglich gehalten worden sein und dürfte daher maximal bei 20 mm liegen. Auffallend ist allerdings, dass das Objektiv keinerlei Schrägstellung aufweist. Dies deutet auf einen Crossdisperser mit entweder geringer Liniendichte hin, oder auf eine Kombination mit Transmissionsgitter und Prisma (Grism), sodass das Prisma die durch das Transmissionsgitter entstehende Beugung des Spektrums wieder kompensiert.

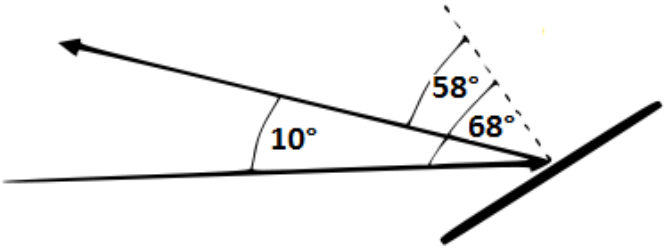

Abbildung 4: Winkel am Echellegitter bei BACHES

1.2.3 Optische Parameter

Über die optischen Parameter ist wie über die geometrischen Parameter nichts bekannt und können daher nur eingeschränkt werden. Zunächst stellt man fest, dass auf Grund der Ordnungsanzahl ein Echellegitter mit 79 l/mm (kommerziell erhältlich) verwendet wird und dieses aller Wahrscheinlichkeit einen Beugungswinkel von 63,4° aufweisen sollte. Es ist außerdem ersichtlich, dass als Crossdisperser ein Transmissionsgitter verwendet wird, da der Abstand zwischen den Ordnungen von rot nach blau abnimmt. Ein Prisma würde genau das Gegenteilige zeigen. Wegen des erreichten Auflösungsvermögens von R = 20.000 mit dem 25 µm Spalt, kann auf eine Kollimatorbrennweite von ca. 120 mm geschlossen werden.

1.3 Pros und Kons

Ein absoluter Vergleich beider Systeme ist nicht möglich, da über BACHES nicht alle Einzelheiten bekannt sind. Tatsache ist jedoch, dass das Systemgewicht beider Instrumente und auch die Länge der Geräte vergleichbar sind. ESpekDiko ist um ca. 50 mm länger, was auf das Objektiv zurückzuführen ist. In dieser Hinsicht ist und bleibt das Objektiv

von BACHES in zweierlei Aspekten ein Rätsel: Was wurde für eine Linse verwendet, Dublett, Triplett, ... in Bezug auf die Abbildungsfehler? Warum knickt der Strahlengang nach dem Crossdisperser nicht ab, wie man es erwarten würde?

Es zeigte sich bei der Entwicklung von ESpekDiko, dass das Objektiv für einen Echelle das allerwichtigste ist, alle anderen Komponenten sind weniger kritisch, daher ist es aus Sicht des Verkäufers natürlich verständlich, wenn die Details dazu nicht bekannt gegeben werden können. Allerdings wäre es schon hilfreich und wichtig zugleich, dass zumindest die Brennweiten der Linsen bekannt wären, um die entsprechenden Berechnungen für Auflösung und Dispersion durchführen und das System eindeutig mit anderen vergleichen zu können.

Letztlich bleibt also nur ein wesentlicher Unterschied beider Systeme: das Echellegitter. Zunächst besitzt das Gitter von BACHES wohl um die 79 l/mm und selbiges in ESpekDiko verfügt über 31,6 l/mm. Weiterhin sind die Winkel am Gitter beider Systeme unterschiedlich. Es ist auf Grund der Abschattung der Gitterfurchen möglich, dass die Anordnung in BACHES effizienter ist als diejenige von ESpekDiko.

2 Finanzieller und Konstruktionsaufwand

2.1 BACHES

Für BACHES steht ein letztlicher Preis noch nicht fest, er wird sich aber logischerweise um mehrere tausend Euro bewegen. Die Serienausführung wird remotefähig sein und damit das automatische einkoppeln von Flat- und Kalibrationslicht ermöglichen. Es ist darauf zu hoffen, das BACHES in zwei Varianten erhältlich sein wird: Als eine weniger professionelle und daher kostengünstiger Variante ohne Remotebetrieb und eine professionellere Variante zur automatisierten Ausführung der peripheren Tätigkeiten.

2.2 ESpekDiko

ESpekDiko ist als Selbstbauprojekt natürlich billiger als BACHES. Alle Bauteile haben sich auf ca. 1.700 € belaufen. Jedoch ist es ohne handwerkliches Geschick und entsprechende Ausrüstung nicht möglich einen solchen Spektrographen zu konstruieren. Der Vorteil zu bisherigen Selbstbau-Echelleprojekten ist das hoch-korrigierte Objektiv, was keinerlei Einschränkungen im visuellen Bereich besitzt. Daher ist ein 1:10 System zur direkten Ankopplung an das Teleskop eine sehr attraktive Lösung im Gegensatz zu den aufwendigeren fasergekoppelten Systemen.

2.3 Fazit

Wer die Möglichkeiten hat, kann sich ein gutes System wie ESpekDiko selbst herstellen. Wer genügend Geld ausgeben kann, bekommt mit BACHES ein fertiges System auf hohem Niveau. Beide Systeme sind hier schwierig zu Vergleichen, es kommt eben auf die Gegebenheiten des Einzelnen an. Allerdings ist aus den Erfahrungen im Praktikum

mit BACHES zu erwähnen, dass es genau das richtige System für Lehrzwecke ist. Zuerst lernt man die Grundlagen der Spektroskopie sehr eindrucksvoll mit einem solchen Echellespektrometer und zugleich ist es ein Up-To-Date System, da an vielen professionellen Observatorien Echellespektrographen eingesetzt werden. Weiterhin lässt ein solches System auch Messungen in unseren Breiten außerhalb der reinen Lehre zu und ist damit auch für die professionelle Arbeit in Verbindung mit einem entsprechend leistungsstarken Teleskop einsetzbar.

Institute und High-End Amateure bekommen mit BACHES ein fertiges System, mit dem man sofort loslegen kann und auch gute Ergebnisse erzielt.

Für Bastler und wenig Betuchte bietet die Konstruktion von ESpekDiko eben eine gute Schlechtwetterbeschäftigung, ganz zu schweigen von dem enormen Lerngehalt einer solchen Unternehmung.

3 Beobachtungsperformance

3.1 BACHES

3.1.1 Kalibrations- und Guidingeinheit

Die Erstellung von Kalibrationsspektren erfolgt sehr einfach, da nur der Klappspiegel in der Beobachtungseinheit eingeklappt werden muss. Das Netzteil für die Hohlkathodenlampe liefert einen stabilen Strom und kann einfach über ein Potentiometer geregelt werden. Nach einigem experimentieren wurden nach wenigen Sekunden Belichtung des Th/Ar-Spektrums bei 8 mA Versorgung bereits gute Ergebnisse erzielt (Abb. 8), welche auch in der folgenden Datenreduktion zu einer guten Identifikation der Linien führte.

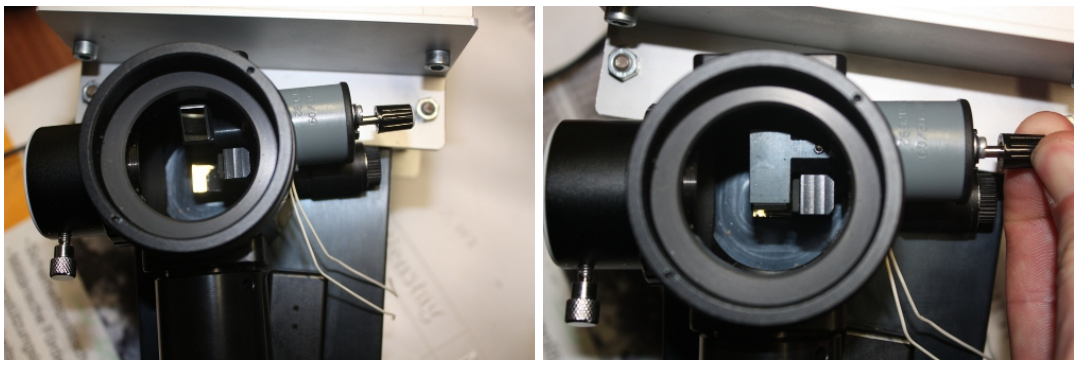

Abbildung 5: Spaltbeobachtungseinheit; rechts: eingeklappter Spiegel - Kalibrationslicht wird eingekoppelt

In Abbildung 5 sieht man zentral den reflektierenden Spalt und darüber einen drehbaren Spiegel, dessen Achse mit dem magnetischen Drehknopf verbunden ist. Wird an den Drehknopf eine Spannung angelegt, so wird der Spiegel eingeklappt. Bei dem Prototypen ist der Spiegel manuell zu betätigen. Unter dem Drehknopf ist eine Spaltbeleuchtung (Beleuchtungseinheit eines Fadenkreuzokulars) angebracht, was das identifizieren des Spaltes

Abbildung 6: Netzteil

mit der Guidingkamera ermöglicht. Wie Abbildung 7 zeigt, ist der Spalt gut einsehbar

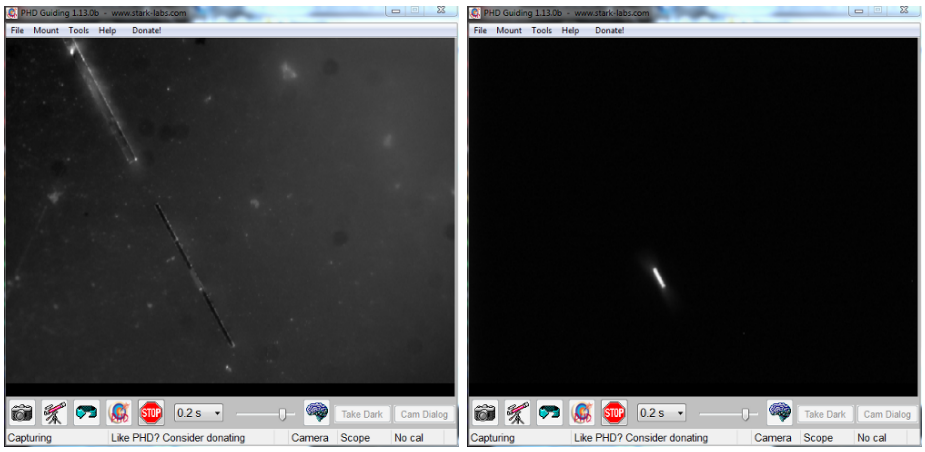

Abbildung 7: Spalt

und der Stern kann gut an die korrekte Position gebracht und dort gehalten werden. Bei gut eingestelltem Sucherfernrohr zeigten sich meinst keinerlei Probleme den Stern zu finden. Gelegentlich musste die Nachführkamera durch ein Okular ersetzt werden, damit man den Stern finden kann.

Die Th/Ar-Lampe kann in ihrer Halterung rotiert werden, um sie bestmöglichst zu justieren, sodass der Strahl (durch eine Linse gebündeltes Licht aus der Kathode) den Spalt trifft und das Kalibrationsspektrum maximales Signal enthält.

3.1.2 Flatfielding

Zur Erzeugung eines Flatspektrums ist im Prototypen noch nichts vorgesehen gewesen. Es ist also nötig mit einer starken Halogenlampe eine diffus reflektierende Ebene zu bestrahlen und diese dann als Quelle zu verwenden. Dabei muss eine Lampe verwendet werden,

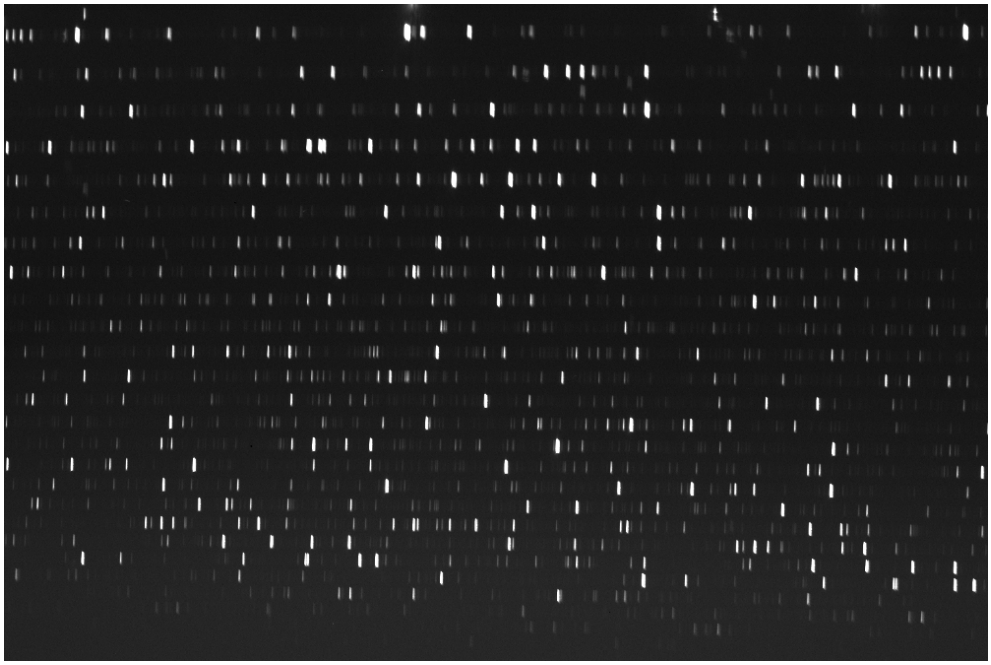

Abbildung 8: Th/Ar-Kalibrationsspektrum

die auch im blauen Bereich des Spektrums noch ein hohes Signal liefert, da man sonst bei der Reduktion der Spektren nicht alle Ordnungen erfassen kann. Hierzu kann auch ein Filter eingesetzt werden, welcher im roten Bereich die Intensität reduziert, während er im blauen Bereich nahezu alles transmittiert. Solche Filter sind im Handel erhältlich und eignen sich gut zur Gewinnung eines Flatfieldes, das später zur Ordnungsidentifikation eingesetzt werden kann. Abbildung 9 zeigt Transmissionskurven[1] einiger Farbfilter, wo-

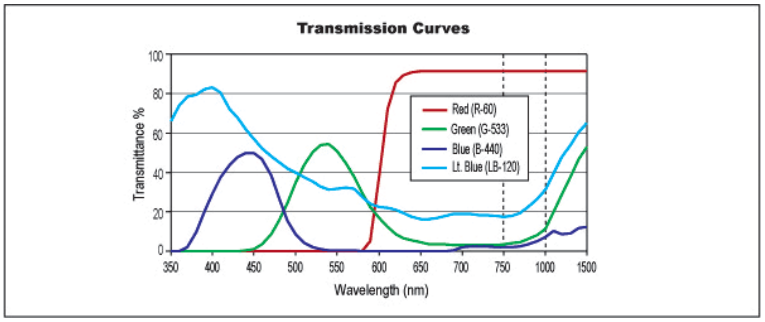

Abbildung 9: Transmissionskurven einiger Farbfilter

bei es sich bei der hellblauen Kurve um den verwendeten Filter handelt.Bei Verwendung einer einfachen Halogenlampe ohne jegliche Filter konnten 18 Ordnungen, beginnend bei

[1] Edmund Optics, gefasste Farbfilter

der langwelligsten hin zum kurzwelligen Bereich des Spektrums identifiziert werden. Unter Nutzung des Lt. Blue Filters (Abb. 8) konnten 19 Ordnungen extrahiert werden. Zur

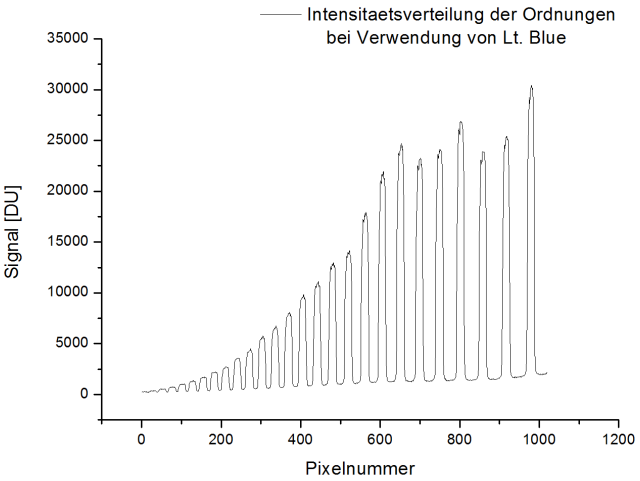

Abbildung 10: Flatfield bei Verwendung von Lt. Blue; links: Rohspektrum; rechts: senkrechter Plot durch Ordnungen

Identifikation der Ordnungen kann u.U. auch das Objektspektrum verwendet werden. Die Ordnungen, welche von der Reduktionsroutine nicht gefunden werden, verfügen dann in der Regel über ein zu geringes Signal also über ein zu geringes S/N-Verhältnis um noch vernünftig ausgewertet zu werden. Die Division des Objektspektrums muss allerdings mit einem nicht durch Filter manipulierten Spektrum geschehen (oder der Filtergang muss herausgerechnet werden), weswegen daher ein reines Halogenspektrum verwendet wird. In Abbildung 10 ist ein Flatspektrum und ein zugehöriger Plot senkrecht durch die Ordnungen gezeigt. Abbildung 11 zeigt selbiges allerdings nur für die Halogenlampe ohne jegliche Filterung. Es ist ein Intensitätsverlauf zu sehen, welcher proportional zu einem Spektrum eines Schwarzen Körpers ist. Allerdings lässt sich damit nicht auf die Temperatur der Strahlungsquelle schließen, da hier noch die spektrale Empfindlichkeit des Spektrometers (Detektor, Optiken, etc.) herausgerechnet werden müssen. Allerdings wird schnell ersichtlich, dass eine Division mit dem durch den Filter verfälschten Verlauf ein unsauberes Objektspektrum entstehen lassen würde. Unter Verwendung von einigen Filtern (z.B. RGB-Interferenzfilter) und nach einigen Versuchen, können meist alle Ordnungen identifiziert werden. Ein Flatfield wird nach jeder Beobachtung angefertigt, bevor das Teleskop zum nächsten Objekt bewegt, oder der Spektrograph vom Teleskop genommen wird, da es sonst zu einer Verschiebung der Spektren kommen kann und eine Auswertung erschwert und im schlimmsten Falle unmöglich wird. Eine weiter Möglichkeit ist die Anfertigung eines 1-dimensionalen Masterflats, welches dann mit dem 1-dimensionalen Objektspektrum verarbeitet wird.

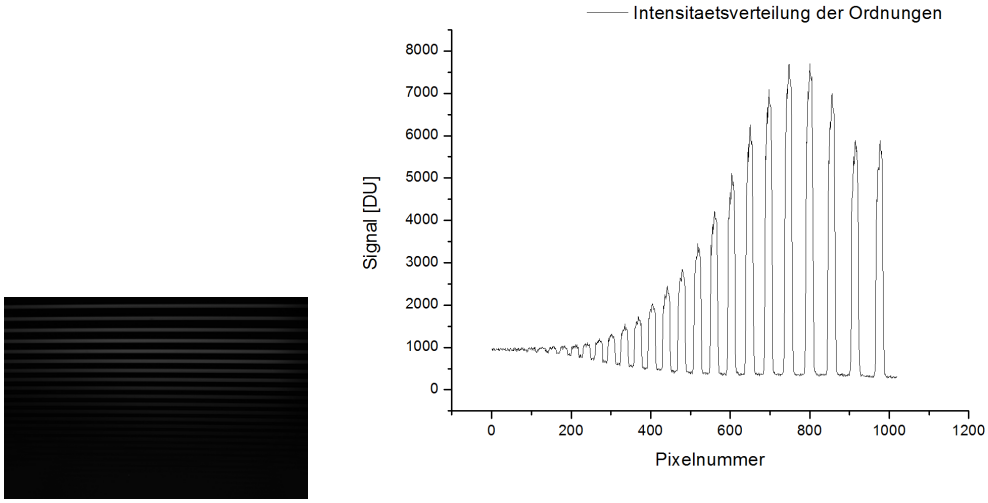

Abbildung 11: Flatfield mit Halogenlampe

3.1.3 Fokussierung und Justage

Es muss bzw. kann bei BACHES nur die CCD fokussiert werden. Hierzu wurde eine VariLock verwendet, da diese sowohl fein verstellbar, als auch in sich drehbar ist. Die Fokussierung der Kamera ist eine sehr sensible Tätigkeit. Hierzu wurde ein Linienpaar, welches einen Abstand nahe der Auflösungsgrenze besitzt, verwendet. Die Vergrößerung des Bildes wurde in der Software CCDOps auf 4:1 gesetzt um die Linie gut beobachten zu können. Nun wurde die VariLock so lange in der Länge verändert, bis der Kontrast beider Linien maximal wurde. Allerdings genügte bereits ein Anziehen des Konterringes aus, um eine leichte Defokussierung hervorzurufen. Aus diesem Grund muss die Fokussierung iterativ ablaufen um sich langsam an den richtigen Fokuspunkt heran zu arbeiten. Die VariLock wurde dann fixiert und die Kameraklemme angebracht, sodass die Kamera verdrehsicher mit dem Spektrometer verbunden ist.

3.2 ESpekDiko

3.2.1 Kalibrations- und Guidingeinheit

Zur Erzeugung eines Flatfields und Kalibrationsspektrums wurde eine Flippmirroreinheit (Abb. 13) angefertigt, welche direkt vor der Spaltbeobachtungseinheit angebracht ist. Dort stehen zwei Anschlüsse für Okulare bzw. Kameras zur Verfügung mit denen man durch das Teleskop das Sternfeld beobachten kann. Weiterhin sind für das Flatlicht und Th/Ar-Licht Ankopplungen vorhanden. Durch drehen des Spiegels können die entsprechenden Anschlüsse gewählt werden. Mit dem Übersichtsokular kann das Teleskop auf den zu untersuchenden Stern ausgerichtet werden, der nach Drehung des Spiegels aus dem Strahlengang in der Guidingkamera des Spektrometers erscheint. Der Spalt ist hinterleuchtet (Abb. 14 rechts), wodurch der Stern exakt auf ihn ausgerichtet werden kann.

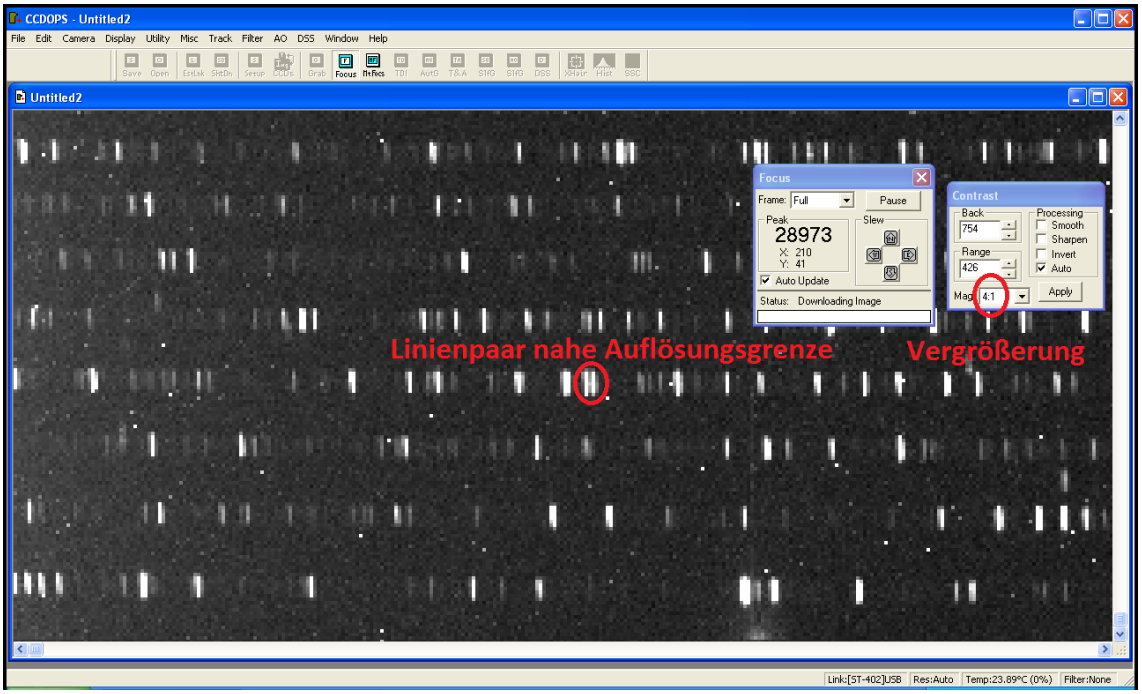

Abbildung 12: Fokussierung der CCD-Kamera am BACHES

Sitzt der Stern genau auf dem Spalt, wird das Autoguidingprozedere eingeleitet und die Aufnahme des Spektrums kann beginnen. Der Spalt muss gute Reflexionseigenschaften besitzen, damit der Stern beobachtet und nachgeführt werden kann. Solche Spalte (in Breite und Länge begrenzt) sind kommerziell nicht erhältlich, weswegen hier ein aus Wolfram bestehendes Metallplättchen, das ausreichend gute Reflexion besitzt, verwendet wurde. Der Spalt wurde von National Aperture hergestellt und geliefert. Es fällt jedoch eine gewisse Rauheit der Oberfläche (Abb. 14 links) auf, die zu erhöhtem Streulicht führt. In Abbildung 15 ist die Abbildung des Trapezes im Orionnebel gezeigt. Die Belichtungszeit betrug 1 sec, was auf eine gute Beobachtbarkeit von Sternen schwächer als 6. Größe schließen lässt.

Das Th/Ar-Spektrum zur Wellenlängenkalibration lässt sich einfach durch drehen des Flipmirrors in die entsprechende Position aufnehmen. Die Belichtungszeit liegt bei einer Stromstärke von 8 mA bei etwa 15 sec. Damit erhält man für die Reduktion des Spektrums gute Ergebnisse, sodass die Kalibration sehr genau anhand vieler Linien durchgeführt werden kann.

3.2.2 Flatfielding

Zur Erstellung eines Flatfields wurde eine kleine Xenonlampe an den Flipmirror angebracht und auch eine Filterschublade vorgesehen, sodass die entsprechenden Flatspektren unkompliziert aufgenommen werden können. Es gilt hier auch das unter 3.1.2 allgemein

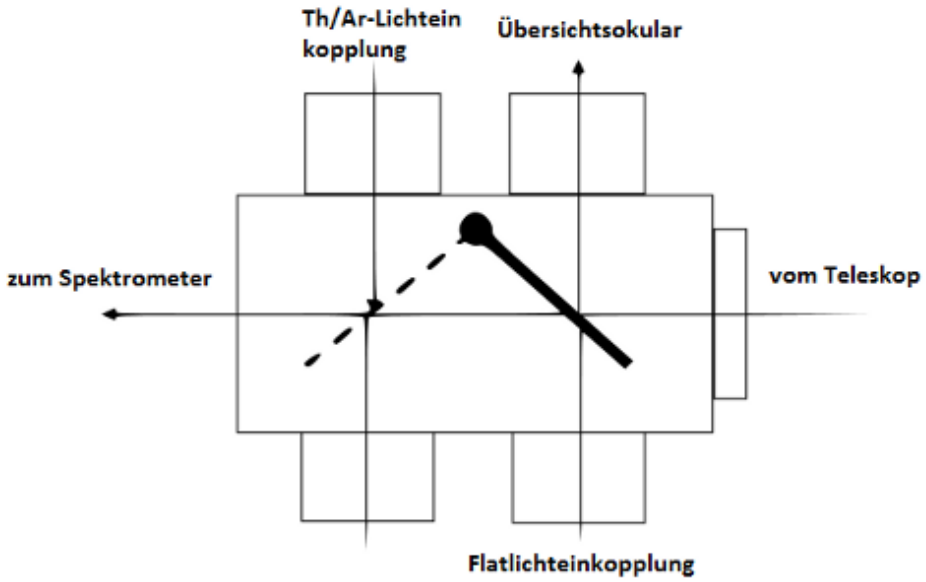

Abbildung 13: Flippmirror

dargelegte zur Verwendung von Filtern im Flatspektrum.

Nach einigen Versuchen, konnte auch bei ESpekDiko ein zufriedenstellendes Ergebnis in Hinblick auf die Identifikation der Ordnungen und der Flatkorrektur erzielt werden.

3.2.3 Fokussierung und Justage

Bei der Fokussierung der CCD-Kamera stellen sich keinerlei Schwierigkeiten heraus. Das Objektiv ist nicht sehr Anfällig auf die Fokuslage und lässt sich daher einfach einstellen. Die Fokussierung wurde hier anhand des Sonnenspektrum durchgeführt und es wurde ebenfalls ein VariLoch verwendet, da keine andere Alternative gesehen wurde.

Die Justage des Spektrometers ist in diesem Fall natürlich erforderlich (Eigenbau) und auch eine relativ zeitaufwendige Angelegenheit. Die Positionierung des Kollimators stellte sich dabei am schwierigsten heraus und wurde ebenfalls direkt am Teleskop unter Zuhilfenahme der Sonne durchgeführt, da ein Justierlaser nur schwer exakt auf der Teleskopachse angebracht werden kann. Die Justage stellte sich an Ende als stabil heraus und muss im schlimmsten Fall nur nach langen Transportwegen wiederholt werden.

3.3 Pros und Kons

Das Flatfielding ist eine generelle Schwierigkeit bei der Echellespektroskopie und konnte bei beiden Systemen durch einige Versuche auch zu einem zufriedenstellenden Ergebnis geführt werden. Die Einkopplung des Flatsignals soll im Serienprodukt von BACHES dann ebenfalls vorgesehen werden, wodurch es auch hier keine Kritik anzumerken gibt.

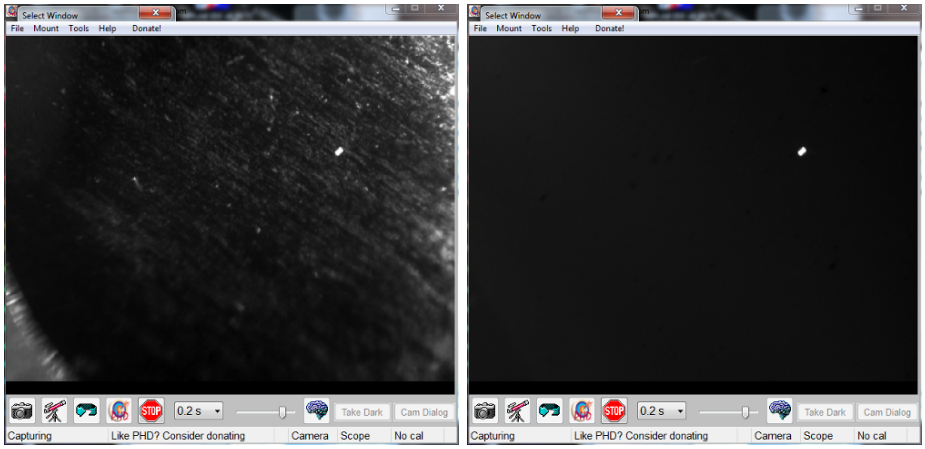

Abbildung 14: Spalt

Es bleibt nur das sehr sensible Objektiv von BACHES als ein Negativ zu nennen, dass man aber nach einigem experimentieren auch in den Griff bekommt.

4 Messqualität

4.1 Stabilität

Eine Messung der Verschiebung des Spektrums bei einem 180° Schwenk des Teleskops, die auf Grund der Änderung der Drehmomente hervorgerufen wird, lässt auf eine Verschiebung von unter einem Pixel (kleiner 10 µm) für beide Systeme schließen.

4.2 Signal

Zur Bestimmung der relativen Effizienzen der beiden Spektrometer wurde ein Stern (Hamal) mit beiden Systemen aufgenommen und das Signal bei einer bestimmten Wellenlänge verglichen. Der Stern wurde jeweils 70 Sekunden belichtet, das Signal im Spektrum von ESpekDiko betrug etwa 7000 ADU/pix und selbiges im Spektrum von BACHES etwa 900 ADU/pix. Der Gain-Faktor der SBIG Kamera beträgt 1,5 e^-/ADU und selbiger der ATIK Kamera 0,4 e^-/ADU, was einen Faktor 3,75 ausmacht. Weiterhin ist der Faktor der Quanteneffizienz für diesen Wellenlängenbereich 75/50 = 1,5. Weiterhin zu berücksichtigen ist die Pixelgröße, Dispersion und Abbildungsmaßstab, was etwa einen Faktor 2 ausmacht. Schließlich muss noch die unterschiedliche Spaltbreite und den damit verbundenen Verlusten Rechnung getragen werden. Durch die gaußförmige Intensitätsverteilung des Seeingscheibchens im Teleskopfokus, ergibt sich ein Faktor von 0,6. Insgesamt ist also der Umrechnungsfaktor von Signal im Spektrum von ESpekDiko zum Signal im Spektrum von BACHES in etwa gegeben durch:

$$Signal_{BACHES} = Signal_{ESpekDiko} \frac{1,5}{3,75} \frac{0,6}{2} = 0,12\, Signal_{ESpekDiko}$$

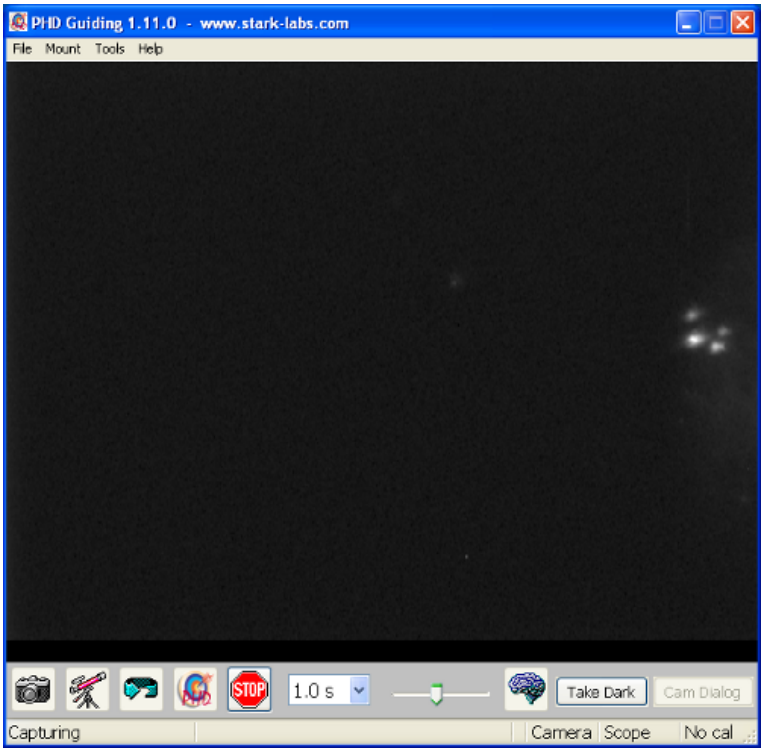

Abbildung 15: Trapez in M42 durch die Spaltbeobachtungseinheit von ESpekDiko

Hieraus ergibt sich ein zu erwartendes Signal im Spektrum von BACHES $Signal_{BACHES} = 0,12 * 7000$ ADU/pix = 840 ADU/pix, was auch in der Aufnahme erzielt wurde. Beide Systeme sind also im Hinblick auf ihre Effizienzen vergleichbar.

5 Reduktion der Spektren

Folgende Betrachtungen gelten für beide Systeme.

Wie schon im 3. Abschnitt angedeutet, ist die Erstellung eines Flatfieldes zur Identifikation der Ordnungen (n-Identifikation) erforderlich. Da alleine mit dem Blaufilter (siehe Abschnitt 3) kein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt wurde, wurden letztlich 3 unterschiedlich aufgenommene Flatfields addiert. Es wurde eine Halogenlampe, das Spektrum selbiger Lampe durch einen blauen Interferenzfilter und das Spektrum einer UV-Taschenlampe aufgenommen. Die Addition dieser Spektren und die Identifikation der Ordnungen ist in Abbildung 18 gezeigt. Diese Aufnahmetechnik ermöglicht die n-Identifikation bis zum blauen Ende des VIS-Bereichs bei 400 nm. Weiter in Richtung UV macht auf Grund der geringen Effizienz des CCD-Chips und der immer schlechter werdenden Transparenz der Erdatmosphäre keinen Sinn.

Die Reduktion der Spektren erfolgt mit der für BACHES geschriebenen Routine unter MIDAS. Die Rohbilder müssen dunkelstromkorrigiert sein und in der richtigen Orientie-

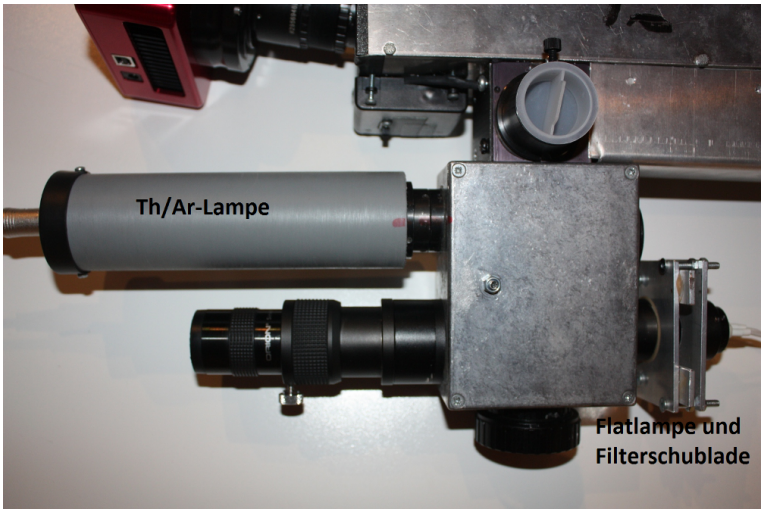

Abbildung 16: Kalibrationseinheit von ESpekDiko

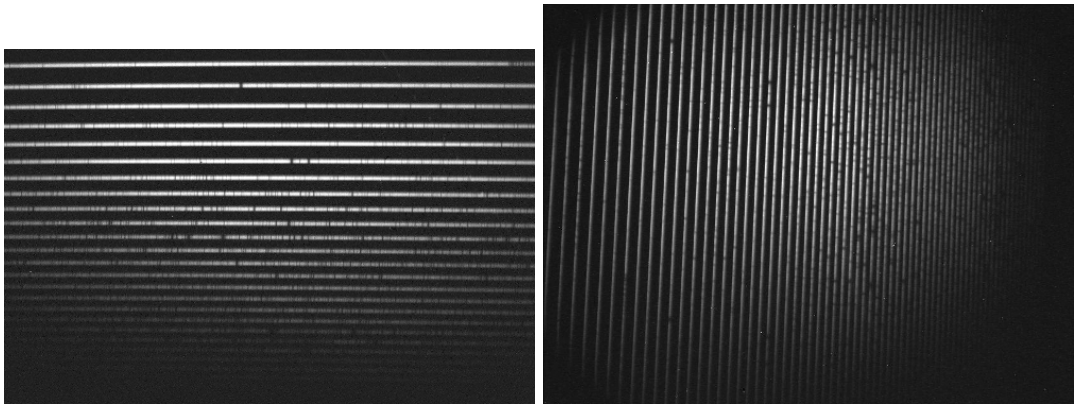

Abbildung 17: Rohspektrum von Hamal; links: BACHES; rechts: ESpekDiko

rung vorliegen. Am oberen Teil des Bildes muss der rote Bereich des Spektrums liegen und die Wellenlänge muss innerhalb der Ordnungen von links nach rechts ansteigen. Mit

inmidas

öffnet sich MIDAS und mit

set/cont baches

wird die BACHES-Routine geladen. Hier stehen einige spezielle Befehle zur Auswahl, die die aufwändige Echellereduktion zusammenfassen und dabei noch genügend Flexibilität lassen um eine gute Auswertung gewährleisten zu können. Außerdem können die Open-Source Quellcodes der Routine jederzeit an einen anderen Spektrographen angepasst werden, weswegen sich die Routine auch für ESpekDiko eignet. Zuerst führt man die n-Identifikation und die Wellenlängenkalibration durch. Hierfür steht der Befehl

calibrate/baches

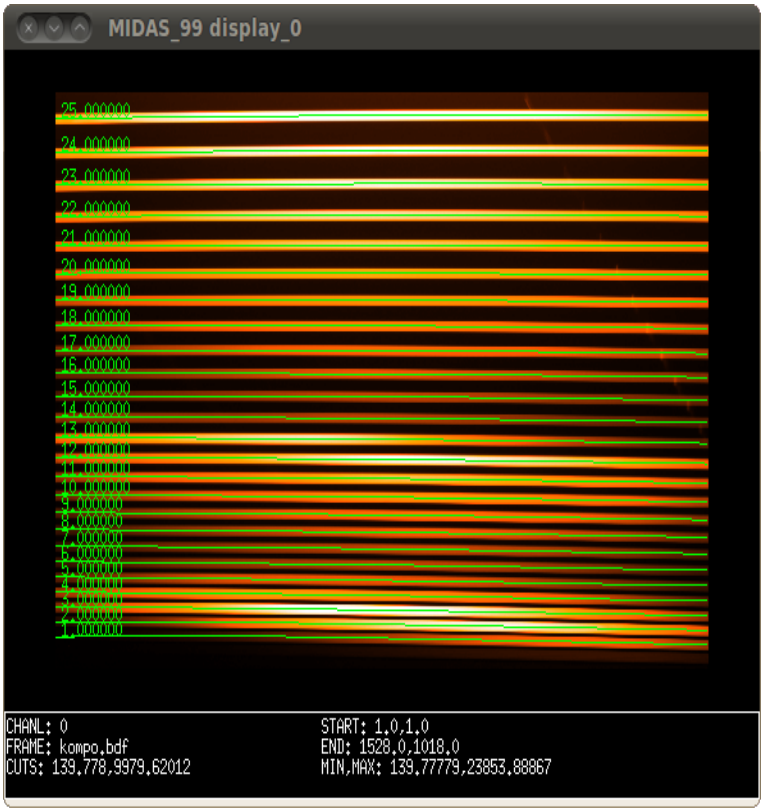

Abbildung 18: Flat zur n-Identifikation; von der Routine gefundene Ordnungen sind grün markiert

zur Verfügung. Dieser Befehle sieht z.B. so aus:

Midas 002> calibrate/baches nflat.fit thar.fit 25 5 5 0.3 3

Hierbei muss das Flat nflat.fit zur n-Identifikation und das Th/Ar-Kalibrationsspektrum thar.fit im aktuellen Verzeichnis liegen. Die Zahl 25 gibt die Anzahl der zu suchenden Ordnungen an (default 26), die erste 5 die Anzahl der Pixel der Ordnungsbreite für die n-Identifikation (default 14), die zweite 5 die Anzahl der bei der Extraktion der Ordnungen zu verwendeten Pixel (default 10), die 0,3 den angestrebten RMS-Fehler (default 0,3) und die 3 die Ordnung des finalen Polynoms für den Fit der Dispersion (default 3). Mit diesen Parametern muss etwas experimentiert werden, bis man mit dem individuellen Echelle ein Optimum erreicht und diese Parameter können dann ohne Weiteres in den Quellcode der Routine eingegeben werden. Nach zufriedenstellender n-Identifikation wird das Th/Ar-Kalibrationsspektrum angezeigt. Nun müssen vier Linien identifiziert werden, wobei je zwei identisch ist, aber in unterschiedlichen Ordnungen liegen (Abb. 19). Die Linien müssen in der Reihe nach von unten nach oben angeklickt werden, wobei der Cursor in seiner Länge und Breite mit Hilfe der Pfeiltasten eingestellt werden kann. Mit einem Rechtsklick in das Bild bestätigt man die Auswahl und wird nach der Ordnungszahl der ersten Linie gefragt (im Bild rechte blaue Linie bei n = 44) und danach nach den beiden

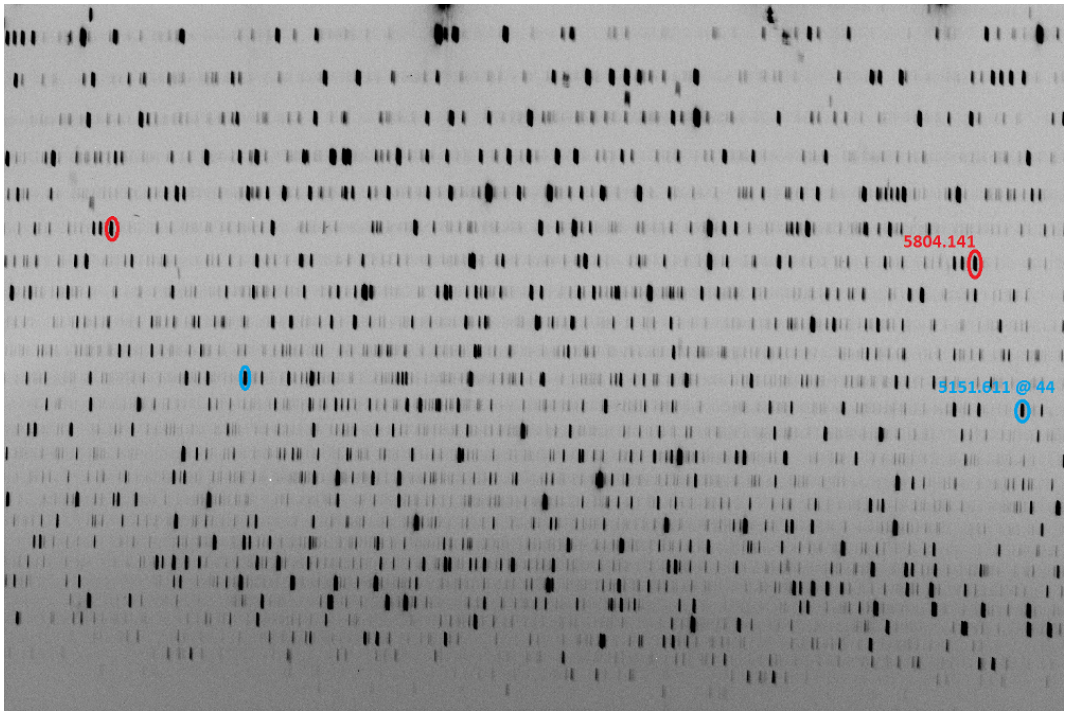

Abbildung 19: Wellenlängenkalibration

Wellenlängen der Linienpaare. Werden die Linien gefunden und von MIDAS zugeordnet, läuft eine Abschätzung der Dispersion ab, die gegebenenfalls eine falsche Linienidentifikation erkennt. Bei grenzwertigen Rechenergebnissen werden dem User die Zahlenwerte gezeigt und eine Bestätigung gefordert. Danach werden weitere Linien gesucht (welche in einem Linienkatalog der Th/Ar-Lampe hinterlegt sind) und zugeordnet. Dann wird iterativ der Kalibrationsfehler reduziert. Ist das Ergebnis zufriedenstellend, erfolgt die Übertragung auf das Objektspektrum und eine Flatfieldkorrektur, mit

Midas 003> pipeline/baches star.fit

wird dies durchgeführt. Für die Flatfieldkorrektur muss ein entsprechendes Flat im aktuellen Verzeichnis mit der Bezeichnung master_flat.bdf vorliegen. Liegt dieses als flat.fit vor, kann es mit

Midas 003> indisk/fits flat.fit master_flat.bdf

in das richtige Format gebracht werden. Weiterhin muss in der Routine ein kleiner Fehler ausgebessert werden. Unter Midas/MIDAS/contrib/baches/proc findet sich der Quellcode für die Pipeline baches_pipeline.prg. Dort steht:

```
!
! Flat-fielding (pixel to pixel variations)
!
IF m$exist(flat) .eq. 1 THEN
!
```

```
COMPUTE/IMA {frame}p = {frame} / {flat} >NULL frame = frame + "f"
WRITE/OUT "{cmd}: creating {frame} with {flat} divided" ENDIF
!
```

Allerdings muss aus dem grün markierten p ein f werden:

```
!
! Flat-fielding (pixel to pixel variations)
!
IF m$exist(flat) .eq. 1 THEN
!
COMPUTE/IMA {frame}f = {frame} / {flat} >NULL frame = frame + "f"
WRITE/OUT "{cmd}: creating {frame} with {flat} divided" ENDIF
!
```

Die beiden Systeme unterscheiden sich also in der Reduktion der Spektren nicht voneinander, weswegen hier ein Vergleich nicht nötig ist. Die Reduktion der Spektren mit dieser Routine ist allerdings sehr angenehm und sehr schnell erlernbar. Außerdem kann sie an jeden speziellen Echelle-Spektrographen angepasst werden und jeder einzelne Schritt ist nachvollziehbar. Bei Fehlern wird eine eindeutig nachvollziehbare Fehlermeldung ausgegeben, wodurch der Fehler schnell gefunden und behoben werden kann.

6 Fazit

Schlussendlich bleibt insgesamt fest zu stellen, dass beide Systeme sich in den wichtigen Punkten sehr ähnlich sind, was letztlich damit zusammenhängt, dass die Systeme, zwar unabhängig voneinander, aber unter Berücksichtigung der auf die Effizienz des Systems Einfluss nehmenden Parameter entstanden sind.

Mit BACHES wird ein System zur Verfügung stehen, mit dem sich innerhalb kürzester Zeit gute Ergebnisse erzielen lassen werden, ohne sich mit der (oft schwierigen) Konstruktion des Systemes auseinander setzten zu müssen. Und mit ESpekDiko hat sich gezeigt, dass ein vergleichbares System auch durch den Amateur realisiert werden kann.