

Messen wie die Profis

– Teil 1: Ein Spalt-Spektrograph maximaler Effizienz in Planung

von Thomas Eversberg und Klaus Vollmann

Wir beschreiben die Entwicklung, den Bau sowie die optische Analyse und Prüfung eines klassischen Spalt-Spektrographen für den Newtonfokus zur Aufnahme von Sternspektren. Aufgrund der Teleskop- und CCD-Parameter, der zu erreichenden Grenzmagnituden sowie der Helligkeiten entsprechender Zielsterne wurde unser Spektrograph dem Teleskop zweckbestimmt und optimal angepasst, um insbesondere die maximal mögliche Effizienz, also die optimale Lichtausbeute sowohl optik- als auch aufnahmeseitig zu erzielen. Dazu wurden grundsätzliche Überlegungen für alle beteiligten Parameter in Betracht gezogen.

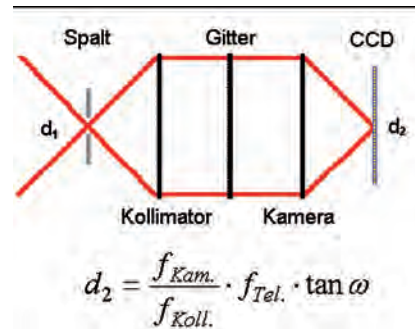
Professionelle Teleskope werden immer größer und haben Spiegel der 10-Meter-Klasse erreicht. Die chemische Datenaufnahme mit Fotoplatten wurde in beinahe allen Bereichen durch CCD-Kameras ersetzt. Dies wirkt sich auch auf die Amateurastronomie aus, da mit dieser Entwicklung ein enormer Preisverfall (der für Amateure wahrscheinlich dominierende Faktor) einhergeht. Teleskope von bis zu 40 cm Öffnung sind hier keine Seltenheit mehr und der fortgeschrittene Amateur kann ohne großen finanziellen Aufwand CCD-Kameras nutzen, die eine hohe Effizienz aufweisen.

Mit Ausnahme weniger Entwicklungen stehen dem Amateur prinzipiell also die gleichen Technologien zur Verfügung wie dem Profi. Allerdings ist aufgrund begrenzter finanzieller Mittel eine Annäherung an wissenschaftliche Ziele oder gar eine Zusammenarbeit mit den Profis in den Bereichen, in denen wirklich große Teleskope erforderlich sind, kaum denkbar.

Darüber hinaus erreichen schon Teleskope von etwa 20 cm Öffnung (!) ein Auflösungsvermögen in der Größenordnung des typischen Seeings unserer Breiten. Teleskope mit größeren Aperturen können diese also bezüglich der geometrischen uns spektralen Auflösung nicht sinnvoll ausschöpfen, sofern keine adap-

tiven Optiken genutzt werden. Anders ist dies bei der Spektroskopie, insbesondere der Linienprofilanalyse. Es lassen sich spektrale Änderungen in den Emissionslinien von Winden massereicher Sterne in Zeitskalen von Minuten bis Jahren auch mit kleinen Teleskopen ohne weiteres detektieren, auswerten und interpretieren.

Da das Signal-zu-Rausch-Verhältnis S/N vom Spiegeldurchmesser abhängt [1] und Variationen des Seeings eliminiert werden, können große Teleskope hier ihre Apertur voll ausspielen. „1-m-Elefanten“ wie Melle [2] und Trebur sind prädestiniert für die Spektroskopie. Die entsprechende Zusammenarbeit zwischen Amateuren und Profis sowie der erfolgreiche Einsatz der Amateurspektroskopie werden insbesondere durch die Arbeiten der VdS-Fachgruppe „Spektroskopie“ [3-5] aber auch durch die vorgestellten Artikel von Berthold Stober [6] und Markus Giftthaler [7] verdeutlicht. Der vom Amateur vielfach als Mangel empfundene Nachteil einer nichtbildgebenden Technik wird durch die Einmaligkeit der einzelnen Beobachtung, die mögliche physikalische Analyse sowie eine potentielle Zusammenarbeit mit der professionellen Astronomie mehr als aufgewogen. Langfristige Beobachtungen in Zeiträumen von Jahren können von der professionellen Astronomie aufgrund begrenzter Beobachtungszeit nur bedingt oder gar nicht durchgeführt werden. Darüber hinaus sind solche Kampagnen für viele Wissenschaftler ineffizient; es fallen einfach zu wenige Publikationen ab. Das Interesse der Autoren als ausgebildete Spektroskopiker ist die Analyse der Winde von massereichen Sternen, deren zeitlich veränderliche Emissionslinien auf dynamische Phänomene in den Atmosphären zurückgeführt werden. Dazu gehören die Be- und insbesondere die Wolf-Rayet-Sterne. Be-Sterne haben den Vorteil, dass sie relativ häufig und hell am Himmel zu finden sind. Das gilt jedoch nicht für die seltenen WR-Sterne, deren hellste Vertreter am Nordhimmel



1 Das Prinzip eines Spalt-Spektrographen. Der optische Spalt liegt im Teleskopfokus und erzeugt in Dispersionsrichtung eine Lichtquelle (Stern) konstanter Breite. Die Brennweiten von Kollimator und Kamera bestimmen das spektrale Auflösungsvermögen ebenso wie die Brennweite des Teleskops und das Seeing.

nur 7-8 mag aufweisen. Um auch von diesen Sternen mit ihren komplexen Winden brauchbare Spektren mit unserem 12,5-Zöller zu erhalten, mussten wir auf maximale Effizienz des Systems achten. Das Ziel war, den Anforderungen einer wissenschaftlichen Datenqualität zu genügen (siehe unten).

Bemerkungen zum optischen Spalt

Zur Beobachtung zeitabhängiger Linieneffekte in den Spektren ist eine zeitlich konstante spektrale Auflösung notwendig. Die Auflösung wird jedoch durch die Abbildung des zu beobachtenden Objekts bestimmt. Wenn die Größe des Zielobjekts in Dispersionsrichtung (die Richtung, in die das Licht gebeugt wird) nicht konstant gehalten wird, ist das Auflösungsvermögen durch zeitabhängige Fluktuationen (Seeing) variabel. Die Abbildung 1 verdeutlicht den geometrischen Zusammenhang. Falls die Abbildung des im Durchmesser fluktuierenden Seeing-Scheibchens im Fokus des Spektrographen d_2 größer ist als die stabilen Beugungseffekte aller abbildenden optischen Elemente, ist ein optischer Spalt unerlässlich. Das ist beinahe immer der Fall, da das Seeing-Scheibchen in

der Bildebene des Teleskops d_1 mit der Brennweite größer wird und Beugungseffekte erst bei einer Teleskopbrennweite von unter 1 m dominieren. Beobachter mit Teleskopen kurzer Brennweite können aufgrund stabiler Beugungseffekte i. d. R. auf einen Spalt verzichten.

Mit dem Spalt wird das Seeing-Scheibchen in Dispersionsrichtung auf konstanter Breite gehalten, indem Randteile der Sternabbildung abgeblendet werden (Abb. 2). Der Spalt ist also ein rein auflösungsdefinierendes optisches Element und muss senkrecht zur Dispersionsrichtung orientiert sein.

In manchen Texten wird der Spalt jedoch oft als Blende zur Reduktion des Himmelshintergrunds und somit zur Verbesserung des S/N angesehen. Dazu folgende Überlegung: Im Gegensatz zum annähernd punktförmigen Stern wird der gesamte Himmelshintergrund auf dem Chip bzw. auf jedes einzelne Pixel spektral abgebildet und wir müssen diesen in Relation zum eng begrenzten Sternlicht setzen. Wenn wir ein Bildfeld oder optisches Gitter von 50 mm Länge betrachten und die zu beobachtenden Sterne bei einer Teleskopbrennweite von rund 1 m in einer Mondnacht (Himmelshintergrund $\sim 19 \text{ mag/arcsec}^2$) heller sind als 4 mag bleibt die Verschlechterung des S/N bei rund 1.000 Pixel jedoch geringer als 10 %. Analog gilt dies für Sterne von etwa 5,5 mag bei einer Teleskopbrennweite von rund 4 m. Der mechanische Aufwand für eine Blende steht also i. d. R. in keinem Verhältnis zu der erreichbaren Verbesserung der Datenqualität. Daher macht ihr Einbau nur dann Sinn, wenn diese direkt als Spalt ausgelegt wird.

Der Spalt ermöglicht außerdem eine von den aufgenommenen Spektren unabhängige Wellenlängenkalibration mittels einer Kalibrationslampe (z. B. Ne oder He-Ar). Eine direkte bzw. abhängige Kalibration an den gemessenen Spektrellinien ist durchaus möglich (terrestrische Linien aus der Erdatmosphäre), die Menge geeigneter Linien aber meist unzureichend. Die Anwendung von Sternlinien ist unzuverlässig, falls diese Linien Variabilitäten in der Wellenlänge zeigen. Dieser Fall gilt insbesondere für Sterne wie Be-Sterne mit ihren Äquatorialscheiben und die daraus resultieren-



2 Der optische Spalt definiert die spektrale Auflösung, indem die Flügel des fluktuierenden Seeing-Scheibchens ausgeblendet werden. Die Spaltbacken stehen immer senkrecht zur Dispersionsrichtung, um ein konstantes spektrales Auflösungsvermögen zu garantieren.

den prominenten H α -Emissionen. Völlig unmöglich wird eine direkte Kalibration bei WR-Sternen. Deren ausströmende Atmosphären sind optisch so dicht, dass in ihren Spektren keine Absorptionslinien sondern nur variable und stark verbreiterte Emissionen zu finden sind. Für den Einbau eines Spalts sprechen somit eine definierte und konstante spektrale Auflösung sowie die unabhängige Kalibration auf der Sternlichtachse. Beide Punkte sind unerlässlich, will man professionellen Ansprüchen an spektroskopische Untersuchungen gerecht werden. Nachteilig sind die notwendigerweise exakte Nachführung (der Zielstern muss auf dem Spalt bleiben), der zusätzliche Lichtverlust durch das „Wegschneiden“ der Seeingflügel, der höhere mechanische Aufwand und damit auch die höheren Kosten.

Planung und Rechnungen

Abhängig von obigen Anforderungen mussten zunächst alle optischen Parameter des Systems Teleskop – Spektrograph – CCD-Pixelgröße bestimmt werden. Der Spektrograph kann nicht als ein vom Teleskop oder der CCD unabhängiges System betrachtet werden. Sowohl die Teleskopbrennweite und das Öffnungsverhältnis als auch die Pixelgröße der CCD bestimmen die Eigenschaften der Optik. Eine sehr hilfreiche Quelle sind die Arbeiten des französischen Amateurs

Christian Buil [8]. Unterschiedliche Spektrographen sowie deren Bau werden in didaktisch guten Texten vorgestellt. Ein Highlight bildet ein entsprechendes Excel-Sheet namens SIMSPEC, welches alle in den Texten hergeleiteten Formeln vereinigt und für die Planung interaktiv zur Verfügung stellt. Für die Nutzung eines Spalts haben wir SIMSPEC modifiziert. Diese modifizierte Version kann von unserer Webseite [9] oder der Fachgruppe Spektroskopie [4] geladen werden.

Aufgrund der langen Brennweite unseres f/16-Cassegrain und der daraus zwangsläufig resultierenden langen Brennweiten der Spektrographenoptiken mit folglich immenser Baugröße wollten wir das System zunächst via Lichtleiter mit dem Teleskopfokus verbinden. Allerdings ist die Transmissivität von Fiberoptiken aufgrund verschiedener Effekte (Fokusdegradation des Fokus, Oberflächenpolitur der Faserenden, mechanische Anpassungen) stark reduziert. Selbst professionelle Anwender erreichen aktuell eine Transmissivität von maximal 70 %. Außerdem erfordern Lichtleiter einiges Know-How. Unsere Anforderungen an hohe Effizienz schloss Lichtleiter daher aus.

Eine Alternative bot das Littrow-Design im Newton-Fokus. Insbesondere durch die kompakte Bauweise, bei der eine einzelne Optik als Kollimator und Kamera wirkt, sind Littrow-Spektrographen in Amateurreisen weit verbreitet. Leider steigt der mechanische Aufwand eines Littrow-Spektrographen durch den Einbau eines optischen Spalts und macht das Design anspruchsvoller. Ein hervorragender Littrow-Spalt-Spektrograph für f/8-bis-f/12-Systeme (LHires III), von Christian Buil entwickelt und heute von der Firma Shelyak vertrieben, stand damals nicht zur Verfügung und wäre auch an unser Teleskop nicht angepasst.

Für den f/4-Newton entschieden wir uns daraufhin für einen Spaltspektrographen nach klassischem Design. Ein Umlenkspiegel zwischen Gitter und Kamera dient zur Reduzierung der Baugröße. Darüber hinaus sollte unsere Guiding-CCD den Stern zwecks Nachführung direkt im Spektrographen erfassen sowie die Positionierung auf dem Spalt ermöglichen. Nach Diskussionen mit einigen auf dem Gebiet der massereichen Sterne erfahre-

nen Profis waren unsere Vorgaben wie folgt:

1. Grenzhelligkeit: etwa 8 mag,
2. Spektrale Dispersion: $\sigma < 0,4 \text{ \AA}/\text{Pixel}$,
3. Signal-zu-Rausch-Verhältnis: $S/N \geq 100$ und
4. Belichtungszeit: maximal 30 min.

Die Grenzgröße von 8 mag definiert sich aus den schwächsten WR-Zielsternen. Die relativ hohe spektrale Dispersion σ sowie das hohe S/N ergeben sich aus der Linienprofilanalyse, die notwendig ist, um diskrete Strukturen im Wind von WR- und Be-Sternen zu detektieren. Um Materiekumpen in WR-Winden (die als transiente Emissionen in den Spektren in Erscheinung treten) zu verfolgen, bedarf es darüber hinaus einer hinreichend kurzen Belichtungszeit.

Davon ausgehend konnten wir nun das Gesamtsystem berechnen. Die Parameter lauten damit:

1. Teleskopöffnung: $D = 317,5 \text{ mm}$,
2. Teleskopbrennweite: $f = 1.270 \text{ mm}$,

3. Kollimatorbrennweite: $f = 180 \text{ mm}$,
4. Kamerabrennweite: $f = 500 \text{ mm}$ und
5. Gitterkonstante: $k = 1.200 \text{ Linien/mm}$.

Mit diesen Größen sollten bei einem Seeing von 2" eine spektrale Auflösung von etwa $0,8 \text{ \AA}$ auf zwei 24 \mu m -Pixel und ein S/N von rund 150 innerhalb einer Belichtungszeit von 1.800 s bei einem Stern von 8 mag erreicht werden.

(Anm. der Red.: Das Teleskop und der Spektrograph befinden sich heute am Carl-Fuhlrott-Gymnasium, Wuppertal, im Schülerlabor Astronomie zur Durchführung von Schülerprojekten und zur Lehrerfortbildung.)

Literaturhinweise, Erläuterungen und Web-Links

- [1] *Das Signal ist proportional zur Anzahl der gemessenen Photonen, also $S \sim NP$. Das Rauschen ist gemäß Poisson-Statistik jedoch propor-*

tional zur Wurzel der gemessenen Photonen. Damit ergibt sich für das Verhältnis $S/N \sim N^{1/2}$. Die Anzahl der Photonen hängt von der Spiegelfläche ab, welche wiederum proportional zum Spiegeldurchmesser zum Quadrat ist und somit gilt $S/N \sim D$.

- [2] P. Riepe und H. Tomsik, 2006: „Große Amateurteleskope in Deutschland?“, *Sterne und Weltraum* 4/2006
- [3] <http://spektroskopie.fg-vds.de>
- [4] E. Pollmann, 2000: *The Be Star Newsletter* 34, 6/2000
- [5] E. Pollmann und B. Stober, 2005: *The Be Star Newsletter* 38, 5/2005
- [6] B. Stober, 2005: „Der Mizar-Test: Spektroskopie mit selbst gebautem Gitterspektrographen“, *Sterne und Weltraum* 6/2005
- [7] M. Gifthaler, 2005: „Calis - Sterne hinterm Gitter“, *Sterne und Weltraum* 10/2005
- [8] astrosurf.com/~buil/
- [9] www.stsci.de

Messen wie die Profis

– Teil 2: Konstruktion und Ergebnisse

von Thomas Eversberg und Klaus Vollmann

Teil 1 [1] beschrieb die Planung der grundlegenden Elemente des Spektrographen. Im Teil 2 wird nun über den Aufbau, die wesentlichen Elemente, die Konstruktion und erste Ergebnisse berichtet.

Aufbau

Als Kollimator und Kamera wählt man am einfachsten handelsübliche Fotoobjektive, vorausgesetzt, die Baugröße des Gitters lässt dies zu. Mit einer optisch wirksamen Gitterfläche von 50 mm x 50 mm ist das in unserem Fall kein Problem. Wir wählten ein 180-mm-Fotoobjektiv von Meyer-Optik als Kollimator sowie ein 500-mm-Fotoobjektiv von Beroflex als Kamera. Unser Spektrographenentwurf ist in der Abbildung 1 gezeigt.

Der Fokus des Newton-Teleskops wird zunächst mittels eines Umlenkprismas von 10 mm Kantenlänge (1) in die optische Achse des Spektrographen gelenkt und auf den Spalt (2) abgebildet. Unser Zeiss-Spalt (Abb. 2) hat eine Genauigkeit von 10 µm pro Teilstrich auf dem Nonius und stammt aus einem alten Photometer. Da wir bei einem Seeing von 2" eine Sternabbildung von 12 µm im Fokus erhalten, wäre eine genauere Einteilung zwar wünschenswert, jedoch deutlich teurer. Wir weisen darauf hin, dass im Markt durchaus kostengünstige einstellbare Spalte erhältlich sind. Deren Qualität ist uns jedoch unbekannt. Ein verstellbarer Spalt kann aber auch selbst hergestellt werden. Dabei muss lediglich die Parallelität der Spaltbacken gewährleistet sein. Dazu reicht es, zwei Rasierklingen oder auch zwei Metallplatten mit einer Phase gegeneinander zu stellen und auf einem entsprechenden Träger zu fixieren. Die Einstellung der Spaltbreite kann dann via Fühlerlehre oder aber optisch durch ein Beugungsexperiment erfolgen.

Nach dem Spalt wird der Strahl via Kollimator (3) parallelisiert und auf das Reflexionsgitter (4) geworfen. Um den gesamten visuellen Spektralbereich von 4.000 – 7.000 Å messen zu können, muss

das Gitter drehbar sein. Außerdem sollen Gitter mit 600 sowie 1.200 Linien pro mm genutzt werden.

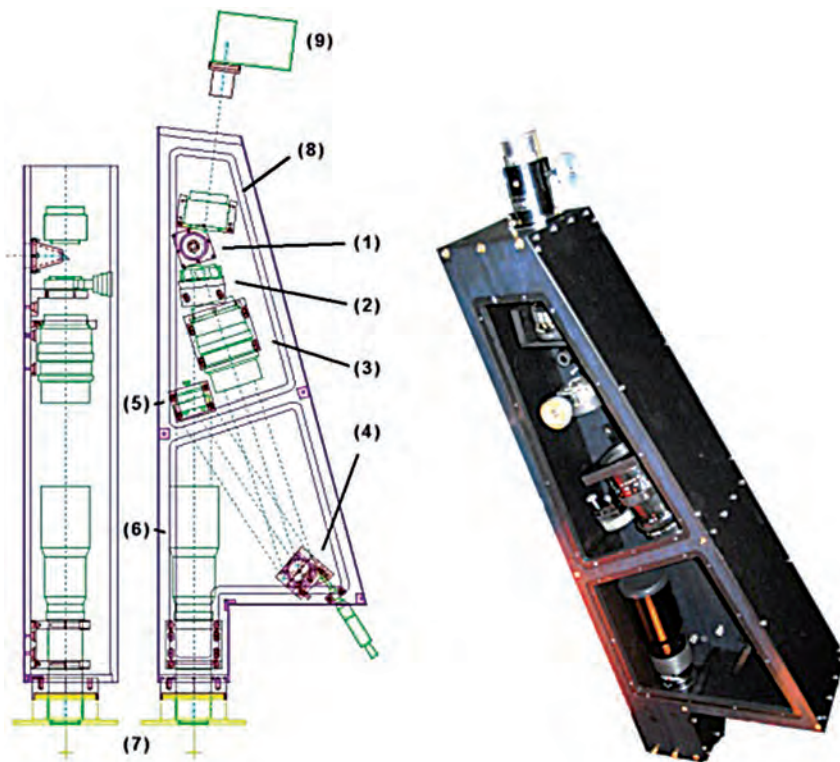
Der nachfolgende Spiegel (5) reflektiert den Strahl danach parallel zur optischen Achse des Teleskops in Richtung Kame-

ra (6). Als Detektor nutzen wir eine MegaTEK CCD-Kamera mit dem Chip-Typ Tektronix TK 1024 und einer Pixelgröße von 24 µm. Als Guider ist eine Alpha-Maxi CCD-Kamera, welche ebenfalls von Frank Fleischmann (Fa. OES) hergestellt wurde, im Einsatz.

Die provisorischen Relativzahlen des SONNE-Netzes, 1. Halbjahr 2011

zusammengestellt von A. Bulling

Tag	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni
1	39	18	48	40	49	94
2	40	18	46	46	43	103
3	33	22	55	45	54	103
4	39	22	73	49	51	87
5	29	16	84	38	51	63
6	26	8	102	46	33	57
7	26	13	112	56	31	41
8	21	38	104	66	48	32
9	20	36	78	59	62	26
10	19	21	61	46	64	21
11	20	31	62	55	48	30
12	11	44	61	69	32	21
13	2	60	68	87	30	13
14	0	70	40	100	40	29
15	7	69	32	90	43	38
16	11	59	29	78	42	43
17	20	53	28	58	39	51
18	25	50	17	55	31	43
19	18	63	24	59	29	29
20	24	44	23	54	26	37
21	19	35	18	61	28	34
22	25	31	34	69	32	35
23	23	25	31	60	21	42
24	21	12	41	50	11	50
25	25	11	63	38	16	38
26	18	25	68	51	35	12
27	13	30	89	48	52	15
28	11	34	94	43	59	21
29	10	-	72	49	75	33
30	17	-	68	57	93	44
31	14	-	56	-	80	-
Mittel	20,2	34,2	57,5	57,4	43,5	42,8



1 Links: Konstruktionsansicht des Spektrographen, (1) Einspeisung des Newtonfokus mit Umlenkprisma, (2) Spalt, (3) Kollimator, (4) Reflexionsgitter, (5) Umlenkspiegel, (6) Kamera, (7) CCD-Flansch, (8) Guidingoptik, (9) Guiding-CCD; rechts: Gesamtansicht des geöffneten Spektrographen

Um das Teleskop im spektroskopischen Modus mit der Vergrößerungsoptik (8) und der AlphaMaxi (9) sicher nachführen zu können, nutzen wir die beiden Reflexionen der Sternabbildung am Spaltrand. Dabei sollte ausreichend Licht von den Flügeln der Intensitätsverteilung des Seeing-Scheibchens vom Spaltrand reflektiert werden.

Die Halbwertsbreite der Intensitätsverteilungsfunktion als Indikator des Seings sollte genau der Spaltbreite entsprechen. Bei 2"-Seeing sind das in unserem Fall 12 μm . Wir können dann davon ausgehen, dass die beiden Funktionsflügel jeweils ebenfalls etwa 12 μm entsprechen. Diese sollten nun von einer ausreichenden Anzahl Pixel der Nachführkamera überdeckt werden. Um dies zu gewährleisten, nutzen wir ein 50-mm-Objektiv (8) in Verbindung mit einer Barlowlinse (1:2) vor der AlphaMaxi als Mikroskop, um den Spalt etwa 10x zu vergrößern und auf unserer Nachführkamera (9) abzubilden. Damit erhalten wir eine ausreichende Überdeckung von rund 13 Pixeln. Dazu muss das Objektiv jedoch ausreichend nahe vor dem Spalt positioniert werden. Um dies zu gewährleisten, haben wir den Prismenträger (1) in Form eines

hohlen Kegels (der „Vulkan“) entworfen. Mit dieser Form wird die Vignettierung des Strahls vermieden. Die Kegeljustage erfolgt über Feingewindeschrauben. Für maximale Reflektion wurde der Spalt um 12° in Richtung Guider verdreht.

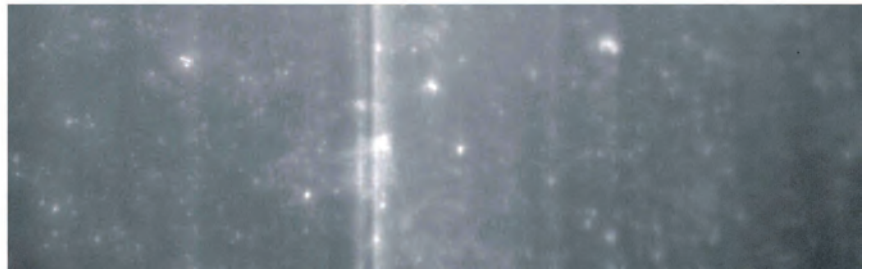
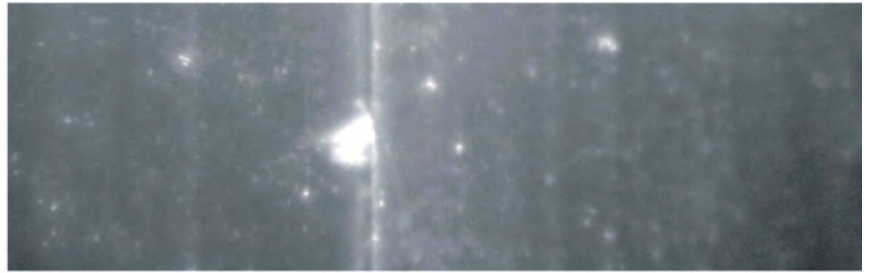
Um einen Stern mit der CCD-Kamera auf den Spalt zu positionieren, muss eine ausreichende Reflexibilität gewährleistet sein. Die der Backen des Zeiss-Spaltes war aber zu gering, daher mussten diese poliert werden. Dazu bezogen wir von der Firma MACOLAEPP Schleifpasten verschiedener Körnung (220, 360, 500 und 750). Der Schleifprozess erfolgte per Hand auf einer Glasplatte. Die Spaltbacken wurden gemeinsam auf einen Träger aus Aluminium geschraubt. Während des Prozesses wurde die Spaltoberfläche regelmäßig mit einem Mikroskop untersucht. Beim Schleifen per Hand hat sich die Form einer Acht bewährt. Nur so ist gewährleistet, dass keine Vorzugsrichtung entsteht. Angenehmer Nebeneffekt ist, dass keine Phase an den Backenenden entsteht. Abschließend wurde auf einer Baumwollscheibe poliert, bis eine Reflektivität von rund 80 % erreicht worden war. Die Abbildung 3 zeigt das Abbild der Wega.

Mit dem polierten Spalt verlieren wir maximal zwei Größenklassen und können unsere schwächsten Zielsterne effektiv auf rund 10 mag nachführen. Damit sind wir sicher, auch unsere schwächsten Zielsterne auf dem Spalt verfolgen zu können. Im oberen Teil der Abbildung 3 ist der Stern neben der Spaltöffnung positioniert und liefert ein maximales Signal von etwa 24.000 ADU bei einer Belichtungszeit von einer Sekunde. Im unteren Bild ist der Stern genau auf der Spaltöffnung positioniert und liefert ein maximales Signal von etwa 1.200 ADU. Das reflektierte Restlicht kann von dem Guider gemessen werden, womit eine hinreichend genaue Nachführung auf dem Spalt gewährleistet ist.

Durch die Nutzung der Flügel der Seingscheibe für die Nachführung auf dem Spalt gehen je nach Beobachtungsbedingung immerhin bis zu 40 % des eingespeisten Lichts für die Analyse verloren. Man könnte nun einwenden, dass damit die Nutzung einer Glasfaseroptik mit bis zu 70 % Transmission wieder attraktiv wird. Unsere Voraussetzung war aber eine Nachführung innerhalb des Spektrographen. Wenn nun analog zum Spalt der äußere Ring der Sternabbildung um die Faserapertur nachgeführt wird, verliert man nicht nur Licht in Dispersionsrichtung sondern ebenso senkrecht dazu. In der Summe ist die Effizienz dieses Verfahrens dann noch geringer.



2 Der optische Spalt von Zeiss



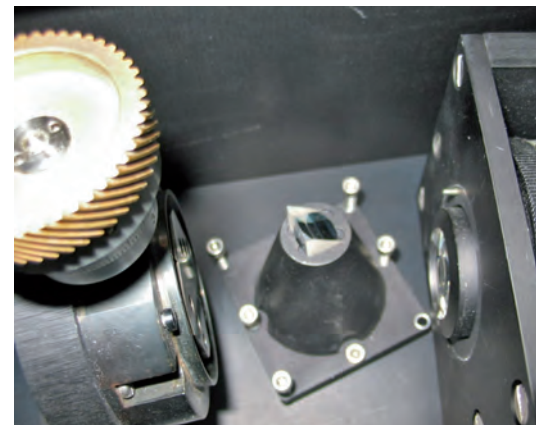
3

Links: Die Politur des Spalts wurde mit 220er-, 360er- und 700er-Korn durchgeführt. Offensichtlich war die Politurpaste toxisch und wirkte auf das zentrale Nervensystem. Rechts: Der Stern Wega auf dem polierten und beleuchteten Spalt. Rechts oben: Wega linksseitig des Spaltes, rechts unten: mittig im Spalt

Konstruktion

Um den Spektrographen ausreichend stabil an den Tubus zu befestigen und eine hinreichende optische Stabilität zu gewährleisten, haben wir als Basis eine Aluminiumplatte von 10 mm Stärke gewählt. Dabei haben wir gelernt, dass Gussplatten zwar die höchste Planarität aufweisen, jedoch wegen eingeschlossener Lunker schwer zu bearbeiten sind. Besser sind gereckte Platten, die ebenfalls sehr eben sind. Auf dieser Platte werden nun alle Elemente des Geräts befestigt. An den Ecken der Basisplatte stehen Säulenelemente, die eine Deckelplatte tragen, welche mit der Bodenplatte identisch ist, jedoch zur besseren Zugänglichkeit der optischen Elemente ausgefräst ist. Sowohl

die Seiten also auch die Deckplatte haben Abdeckbleche aus Aluminium. Der „Vulkan“ mit dem aufgesetzten Prisma bildet den optischen Zugang zum Spektrographen. Dieser ist über mehrere Schrauben justierbar (Abb. 4). Das optische Gitter wurde auf eine Halterung montiert, die vertikale und azimutale Justage ermöglicht (Abb. 5). Letztere erfolgt über eine Drehachse, deren Winkelposition mittels einer Mikrometerschraube reproduzierbar eingestellt wird. Um bei allen Winkelpositionen einen senkrechten Druckpunkt der Mikrometerschraube auf die Drehplatte zu gewährleisten, wurde diese mit einer Mimik versehen, die der Form einer Zyклоide entspricht (hier durch einen Kreisabschnitt ausreichend genähert).



4

Die Newton-Einspeisungsoptik mit dem „Vulkan“, dem Spalt und dem 50-mm-Mikroskopobjektiv für den Guider



5

Ansicht des Gitterhalters mit Mikrometerschraube





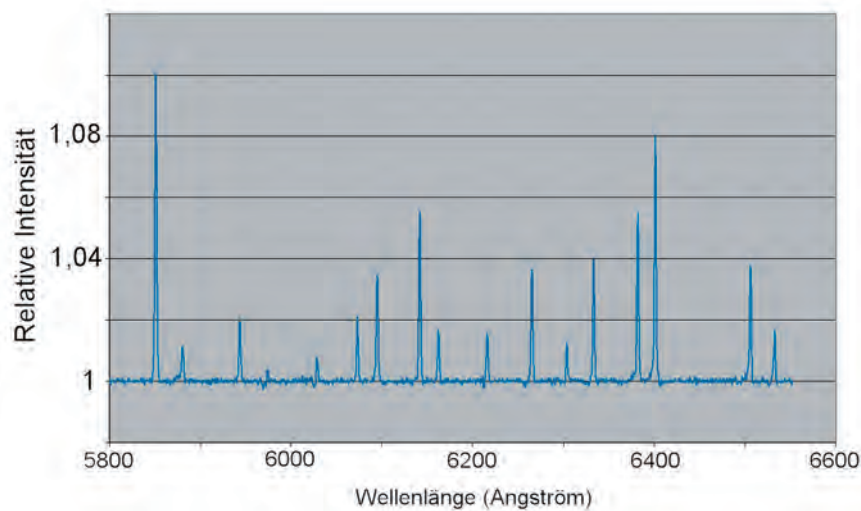
6 Der fertige Spektrograph mit angeschlossenem MegaTEK-CCD am Newton-Fokus. Der Okularauszug für den Guider ist am oberen Ende des Systems sichtbar.

Der Spalt kann in Richtung der optischen Achse des Kollimators um rund 5 mm verschoben werden. Damit erhält man eine zusätzliche Möglichkeit den Fokus exakt auf den Spalt zu positionieren. Die Abbildung 6 zeigt den fertigen Spektrographen am Teleskop.

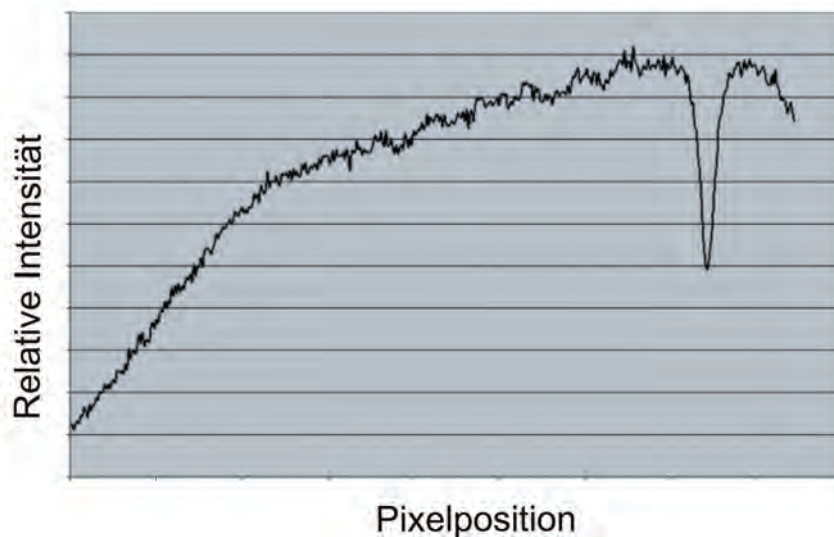
Erste Ergebnisse

Unsere ersten Aufnahmen eines Spektrums erfolgten mit einem Gitter von 638 Linien/mm an einer Neonlampe im Labor (Abb. 7). Die gemessene spektrale Dispersion von $0,77 \text{ \AA}/\text{Pixel}$ stimmt gut mit dem aus der Rechnung für unser Gitter mit 638 Linien/mm erwarteten Wert von $0,75 \text{ \AA}/\text{Pixel}$ überein. In diesem Spektrum kann man sehen, dass das System eine Halbwertsbreite der Emissionslinien von etwa 2,4 Pixeln liefert. Damit liegen wir etwa 20 % über der von uns angestrebten optimalen Auflösung von 2 Pixeln. Die vollständige Fokussierung wird aber an einem Stern durchgeführt.

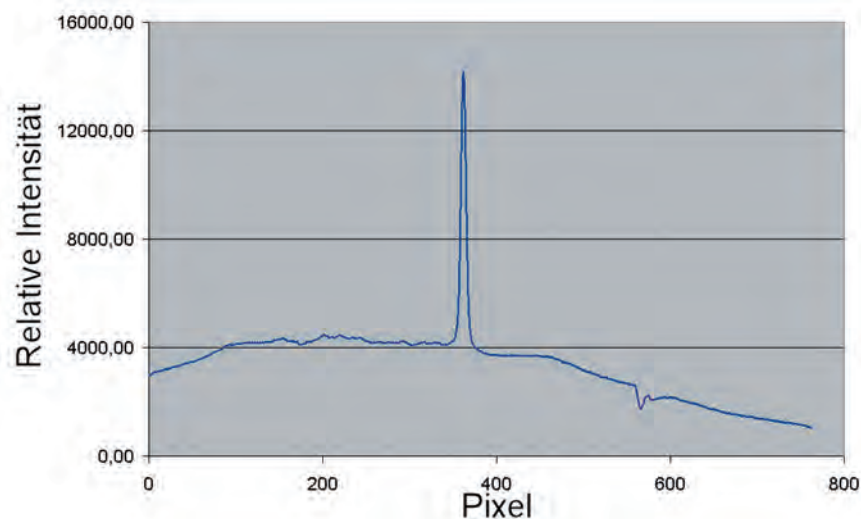
Das erste von uns aufgenommene Spektrum ist in der Abbildung 8 zu sehen. Der Stern Regulus wurde bei $50 \mu\text{m}$ Spaltöffnung für 60 Sekunden in niedriger Auflösung mit 630 Linien/mm belichtet.



7 Das erste Neon-Laborspektrum



8 Rohspektrum des Sterns Regulus bei 60 Sekunden Belichtungszeit, rechts: $H\alpha$ -Absorption



9 Rohspektrum des Sterns γ Cas bei 60 Sekunden Belichtungszeit. Mitte: $H\alpha$ -Emission von der Äquatorialscheibe des Sterns

Die zum Blauen (links) abfallende Intensität ist auf eine interne Dejustage der optischen Komponenten im Spektrographen zurückführbar. Abhilfe schuf eine genaue Kollimation mittels Laser, welche von uns durchgeführt wurde. Dieses erste Spektrum wurde mit einem für das UV optimierten Gitter aufgenommen. Eine wesentliche Effizienzverbesserung um mehrere Faktoren erreichen wir mit unserem Zeiss-Gitter, welches für $H\alpha$ optimiert ist. Die Abbildung 9 zeigt das Spektrum des scheinbar hellsten Be-Sterns γ Cas und seine starke $H\alpha$ -Linie bei 6.562 \AA mit den gleichen Belichtungsparametern wie in der Abbildung 8.

Fazit

Mit dem vorgestellten Gerät werden professionelle Ansprüche an spektroskopische Untersuchungen von Sternen erfüllt. Man kann nun einwenden, dass der Aufwand, den der Spalt in einem Spektrographen verursacht, für den Amateur groß ist und dass Spektroskopie auch ohne Spalt sehr gut möglich ist. Das ist natürlich völlig richtig und wurde durch die in der Einführung benannten Arbeiten schon dargestellt. Physikalische Arbeit und Spaß an der Spektroskopie sind auch ohne Spalt möglich! Wenn jedoch wie beabsichtigt professionellen Ansprüchen gerecht werden soll und u. U. mit Profis zusammenarbeitet wird, muss man sich klar machen, dass eine definierte spektrale Auflösung nötig ist, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen.

Ein grundsätzliches Problem bei der Spektrographenentwicklung sind begrenzte finanzielle Mittel. Dies hat in unserem Fall dazu geführt, dass wir uns im Hinblick auf günstige 50-mm-Optiken (Kollimator, Gitter, Spiegel, Kamera) in Verbindung mit maximaler Effizienz des Gesamtsystems für eine Newton-Konfiguration mit kurzer Brennweite entscheiden mussten. Unsere Materialkosten konnten relativ klein gehalten werden. Die größten Kosten verursachte mit 250 EUR der gebrauchte Spalt. Ein effizientes Blazegitter ist schon für rund 200 EUR zu bekommen und der Umlenkspiegel plus Halterung kostet rund 100 EUR. Alle anderen Bauteile sind günstig bei diversen Gebrauchtmärkten zu erhalten, so dass von Gesamtkosten für die Materialien von rund 800 EUR ausgegangen werden kann. Handelsübliche Spektrographen sind fünfmal teurer und liefern ein spektrales Auflösungsvermögen ab $2,5 \text{ \AA}$. Das ist für eine Linienprofilanalyse jedoch i. d. R. zu wenig. Für unsere Öffnungszahlen sind geeignete Astro-Spektrographen nicht käuflich erwerbbar. Im Rückblick sollte angemerkt werden, dass das aus dem Newton-Teleskop resultierende sehr kleine Seeing-Scheibchen auf dem für eine definierte spektrale Auflösung nötigen Spalt Probleme einführt, die erstmal bewältigt werden müssen. Darüber hinaus sollten für eine einfachere Justage der Optiken die Ebenen der optischen Achsen von Teleskop und Spektrograph möglich parallel angeordnet sein. Dies zu erreichen ist jedoch nicht trivial. Insofern sollten

Lösungen für leichter handhabbare achsensymmetrische Teleskopfoki mit größeren Brennweiten (z. B. Cassegrain), mit jedoch größeren Spektrographen-Aperturen nicht zwangsläufig verworfen werden.

Durch unseren Zugang zu einer professionellen Werkstatt mit CNC-Werkzeugen konnten wir eine hochwertige mechanische Ausführung unseres Geräts erreichen. Wir möchten jedoch betonen, dass unser Ziel maximaler Effizienz auch durch einfachere Herstellungsverfahren erreichbar ist. Die entscheidenden Faktoren für ein genau definiertes und arbeitendes System liegen vielmehr in einer sorgfältigen Analyse und Anpassung aller wichtigen optischen Parameter von den Zielobjekten bis zur CCD-Kamera.

Danksagung

Wir danken Wolfhard Schlosser und Christian Vilter vom Astronomischen Institut der Ruhr-Universität Bochum sowie Anthony Moffat vom Département de Physique an der Université de Montréal für hilfreiche Diskussionen zur Optik und der mechanischen Umsetzung.

Literaturhinweise:

- [1] T. Eversberg, K. Vollmann, 2011: „Messen wie die Profis – Teil 1: Ein Spalt-Spektrograph maximaler Effizienz in Planung“, *VdS-Journal für Astronomie* 40, 118