

Die Farben der Sterne

Einfache Spektroskopie mit Newton-Teleskop, Blazegitter und Webcam

VON JOERG SCHLIMMER

Obwohl es für den Amateurastronomen mittlerweile möglich ist, mit wenig technischem Aufwand Spektroskopie zu betreiben, ist die Spektralanalyse unter den Amateuren bislang kaum verbreitet. Im Folgenden möchte ich daher zeigen, wie einfach und zugleich spannend die Spektralanalyse ist, denn jeder Stern hat sein eigenes, einzigartiges Spektrum, ähnlich dem Fingerabdruck eines Menschen.

Möchte man das Licht in seine einzelnen Farben zerlegen, benötigt man ein so genanntes dispersives Bauelement. Hierbei handelt es sich um ein Prisma oder um ein Beugungsgitter. Der generelle Nachteil von Gittern gegenüber Prismen besteht in der ungünstigen Lichtverteilung. Während ein Prisma nur ein Spektrum erzeugt, verteilt sich das Licht bei einem Gitter auf verschiedene Beugungsordnungen. Da in der Regel nur die erste Beugungsordnung für die Analyse herangezogen wird, ist

das Licht der anderen Beugungsordnungen verloren. Man kann diesen Nachteil jedoch durch eine geeignete Form der Gitterfurchen beseitigen, sodass der größte Anteil des Lichtes auf eine bestimmte Beugungsordnung fällt. Die Gitterfurchen haben dann die Form einzelner Prismen (Abb. 2).

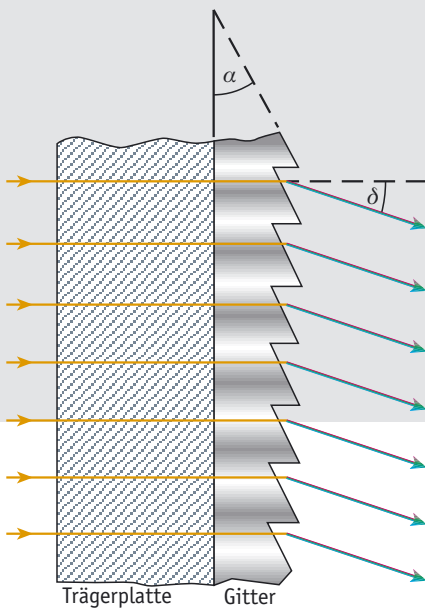
Solche Gitter werden als Blazegitter bezeichnet. Man kann sie als Kombination von Prisma und Beugungsgitter auffassen. Im Gegensatz zu Prismenspektren, wo das Licht in einem einzigen Spektrum

vorliegt, überlappen sich beim Gitter die Spektren verschiedener Beugungsordnungen. Der nutzbare Spektralbereich hängt aber natürlich sehr von der spektralen Empfindlichkeit des Empfängers ab. Bei visueller Beobachtung oder bei der Photographie mit Farb- oder Schwarzweiß-Film spielen diese Überlappungen keine Rolle. Dient als Empfänger hingegen eine CCD-Kamera deren spektrale Empfindlichkeit bis einen Mikrometer reicht, kann man diese Überlappung bei der Spektroskopie von Roten Riesensternen, wie zum Beispiel Beteigeuze, leicht beobachten. Sie lässt sich durch einen Sperrfilter, der nur den visuellen Bereich des Spektrums durchlässt, leicht verhindern.

Der Vorteil eines Gitters besteht in seinem höheren Auflösungsvermögen. Bei Gittern wird das Auflösungsvermögen durch das Produkt aus der Zahl der Beugungsordnung und der Gesamtzahl der Gitterlinien bestimmt. Die Gesamtzahl

◀ Abb. 1: Das Sternbild Orion – links in einer nachgeführten Aufnahme, rechts mit feststehender Kamera. Die gelbliche Farbe von Beteigeuze ist gut zu sehen. (Bild: Joerg Schlimmer)

▼ Abb. 2: Schematische Darstellung eines Blazegitters als Transmissionsgitter. Der Prismenwinkel α der Furchen wird so gewählt, dass der Ablenkungswinkel δ des Prismas gleich dem Beugungswinkel der ersten Ordnung ist, wodurch sich die Effizienz der Beugung erhöht [1].



▼ Abb. 3: Der Blaze-Gitter-Spektrograph von Baader Planetarium, von links nach rechts: Blazegitter, Gitterhalter, wahlweise Webcam oder Okular mit Zylinderlinse (Webcam und Okular gehören nicht zum Lieferumfang).



»Sterne und Weltraum« im Physik-Unterricht

Als Ergänzung zu diesem Beitrag finden Sie unter der Internetadresse www.wissenschaft-schulen.de grundsätzliche Betrachtungen zur Spektroskopie, sowie praktische Tipps zur Auswertung ihrer Ergebnisse. Diese Anleitungen sind nicht nur für Lehrer und Schüler von Interesse: Anhand der damit gesammelten Erfahrungen werden uns die Begriffe Spektrallinie und Spektralklassifikation

vertrauter, und wir verstehen zum Beispiel, was die Farben der Sterne uns sagen, und warum uns unsere Sonne nicht grün erscheint.

Unser Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« führen wir in Zusammenarbeit mit der Landesakademie für Lehrerfortbildung in Donaueschingen durch. Es wird von der Klaus Tschira Stiftung gGmbH großzügig gefördert.

der Gitterlinien hängt einerseits von der Dichte der Linien (Anzahl/mm) und andererseits von der Größe des Gitters ab.

Der größte Vorteil des Gitters liegt allerdings in der Linearität des erzeugten Spektrums. Beim Prisma hängt die Dispersion vom Brechungsindex ab. Der Brechungsindex nimmt für unterschiedliche Wellenlängen jedoch verschiedene Werte an. Man bezeichnet diese Eigenschaft daher auch als differenzielle Dispersion. Sie ist bei blauem Licht sehr viel geringer als bei rotem Licht. Beim Gitter hingegen ist die Dispersion nahezu unabhängig von der Wellenlänge! Die Zuordnung der Wellenlängen zu den Spektrallinien ist daher wesentlich einfacher.

Bauformen von Spektrographen

■ **Objektivspektrographen:** Die Distanz der Sterne ist so groß, dass wir das Licht, das in die Öffnung eines Teleskops eintritt, als paralleles Bündel ansehen können. Daher genügt es im Prinzip, ein Prisma oder ein Gitter vor der Öffnung des Teleskops zu platzieren. Wegen der geringen Abmessungen der Prismen beziehungsweise der Gitter kann jedoch nur ein kleiner Teil der Öffnung des Teleskops abgedeckt werden. Die zur Verfügung stehende Lichtmenge ist daher sehr gering.

■ **Spaltspektrographen:** Soll das Licht flächenhafter Objekte wie das der Sonne oder der Planeten analysiert werden, so ist die Verwendung eines Spaltspektrographen erforderlich. Bei diesem befindet sich im Brennpunkt des Teleskops ein Spalt mit geringer Öffnung. Das Licht wird hinter dem Spalt durch einen Kol-

limator zu einem parallelen Bündel geformt. Im parallelen Strahlengang befindet sich auch das dispersive Element. Das Spektrum kann anschließend durch ein Objektiv auf einen Empfänger abgebildet oder mit Hilfe eines zusätzlichen Fernrohrs betrachtet werden. Ist die Spaltbreite dem Durchmesser des Beugungsscheibchens angepasst, so kann der Einfluss des Seeing erheblich reduziert werden. Nach diesem Prinzip sind alle hochauflösenden Spektrographen aufgebaut.

■ **Der Blazegitterspektrograph von Baader Planetarium:** Neben den Objektiv- und Spaltspektrographen gibt es noch eine dritte Anordnung, die in Gestalt des Blazegitterspektrographen von Baader Planetarium vorliegt. Dieser ermöglicht einen einfachen Einstieg in die Spektroskopie. Er wurde bereits in [2, 3] vorgestellt. Ich möchte mich daher bei der Beschreibung des Spektrographen kurz fassen und nur einige grundlegende Gesichtspunkte darstellen.

Beim Blazegitterspektrographen von Baader wird das holographisch hergestellte Blazegitter wie ein Filter in den konvergenten Strahlengang des Teleskops vor dem Brennpunkt eingesetzt. Dadurch kann das gesamte vom Teleskop gesammelte Licht zur Spektroskopie verwendet werden. In Abb. 3 ist der Spektrograph dargestellt. Er besteht aus dem eigentlichen Blazegitter, welches in einer üblichen Okularfilterfassung sitzt.

Der freie Durchmesser des Gitters beträgt 25 Millimeter. Mit 207 Linien/Millimeter ergibt sich für die erste Beugungsordnung eine theoretische Auflösung von

Blazegitterspektroskop/Spektrograph von Baader Planetarium

Blazegitter:	Linien: freier Durchmesser: theor. Auflösung: geblazet für: Länge des Spektrums visuell: Länge des Spektrums photographisch: Auflösung in der Filmebene:	207 mm ⁻¹ ca. 25 mm < 0.1 nm 1. Ordnung ca. 12 Bogenminuten ca. 6 mm ca. 48 nm/mm, gefasst in Okularfilterfassung
Lieferumfang:	1 ¹ / ₄ -Zoll-Blazegitter gefasst Zylinderlinse mit Halterung Baader Universalansatz (Nr. 2458010) Anleitung	
Bezug über:	Baader Planetarium, Zur Sternwarte, D-82291 Mammendorf www.baader-planetarium.de/default_sm.htm Preis: 200 € (Stand 1/2006)	

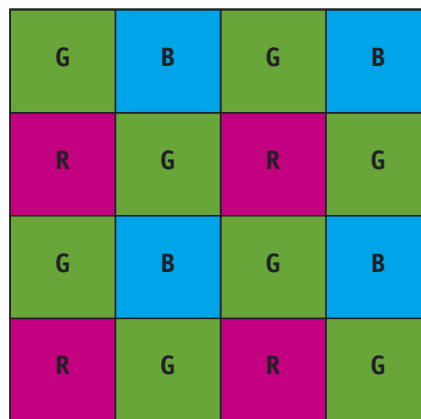
größerer Brennweite stärker bemerkbar macht.

Bei einem Spektrographen sollte das Licht als paralleles Bündel das dispersive Element passieren. Beim Blazegitterspektrographen von Baader Planetarium wird das Gitter jedoch in den konvergenten Strahlengang eingesetzt. Die Konvergenz der Strahlen hängt vom Öffnungsverhältnis des Teleskops ab. Fällt ein Lichtstrahl schräg auf ein Gitter, so verändert sich für diesen die Gitterkonstante. Genau genommen trifft jedoch jeder vom Objektiv kommende Lichtstrahl unter einem anderen Winkel auf das Gitter. Jedem Lichtstrahl entspricht somit eine eigene Gitterkonstante.

Im konvergenten Strahlengang überlagern sich daher Spektren, die an Gittern mit scheinbar unterschiedlichen Gitterkonstanten entstanden sind. Dadurch wird das Auflösungsvermögen des Spektrographen verringert. Zum Glück ist es nicht ganz so schlimm, wie es im ersten Moment aussieht. Für den Randstrahl meines Teleskops mit 1 : 7.5 ergibt sich für das vorliegende Blazegitter eine Gitterkonstante von 206.8 Linien/Millimeter, das heißt der maximale Fehler liegt unter 0.1 Prozent. Beobachtet man mit einem Schmidt-Cassegrain-Teleskop, das in der Regel mit Blende 10 arbeitet, so ist der Fehler noch geringer.

In den Telekonverter wird der Gitterhalter eingesetzt. In das objektivseitige Ende wurde zuvor ein UV-IR-Filter und das Blazegitter angeschraubt. Der UV-IR-Filter lässt laut Datenblatt den Bereich von etwa 410 bis 690 Nanometer passieren und verhindert die Überlappung von 1. und 2. Beugungsordnung. Ferner dient der Filter als physischer Schutz für das sehr viel empfindlichere und teurere Blazegitter. In das okularseitige Ende des Git-

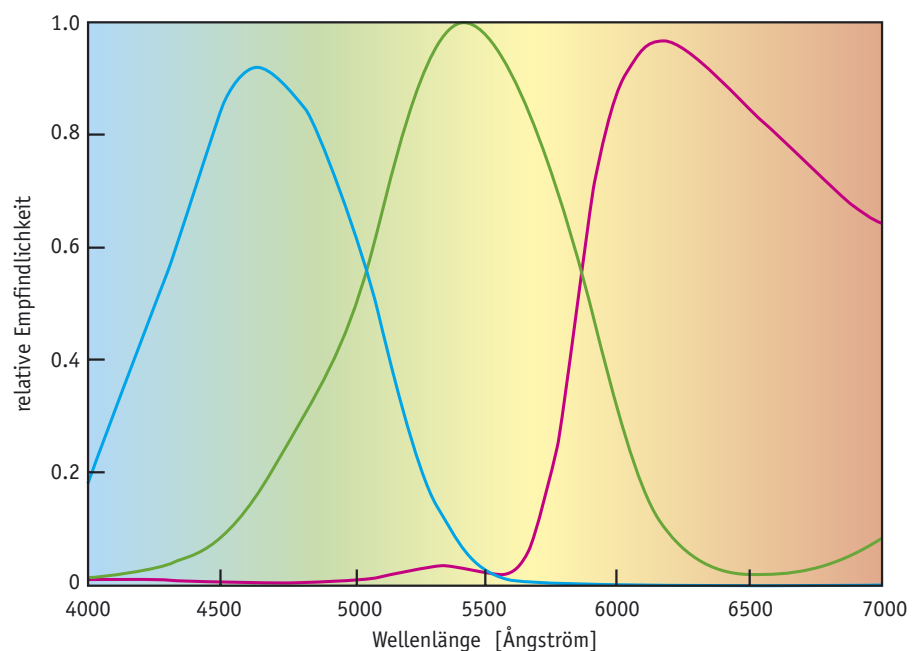
etwa 5400, das heißt, es können Linien mit Abständen von weniger als einem Ångström (1 Å = 0.1 nm) getrennt werden. Dies reicht zum Beispiel zur Trennung der Natrium-D-Doppellinie aus. Zu dem Spektrographen gehört ferner ein Gitterhalter mit Schiefbefokussierung und eine Zylinderlinse inklusive Halterung. Okularseitig kann auf das T2-Außengewinde des Gitterhalters eine Kamera angeschraubt oder das Spektrum mit Hilfe eines Okulars beobachtet werden. Die Zylinderlinse lässt sich durch ihre Steckhülse auf das Okular aufstecken, wodurch das Spektrum zur besseren Ansicht verbreitert wird. Im Lieferumfang ist eine zehnstufige Anleitung mit vielen praktischen Beispielen und Tipps enthalten.



- ▲ Abb. 4a: Codierung moderner Farb-CCD-Chips;
- ▼ 4b: Spektrale Empfindlichkeit des CCD-Chips Sony ICX 098BQ, der in der ToUCam Pro (PCVC 740 k) verwendet wird [4].

Der Blazegitterspektrograph in der Praxis am 8-Zoll-Newton-Teleskop

Bei dem verwendeten Newton-Teleskop handelt es sich um das R200SS von Vixen. Mit einem Öffnungsverhältnis von 1:4 und einer Brennweite von 800 Millimetern ist es ideal für die Beobachtung und Photographie großflächiger Deep-sky-Objekte geeignet. Weil die Bildebene bei dem R200SS sehr dicht am Tubus sitzt, kann der Spektrograph allerdings nicht mit der Primärbrennweite des Teleskops verwendet werden. Für spektroskopische Aufgaben wird die Brennweite mit einem Telekonverter auf 1500 Millimeter verlängert. Das Öffnungsverhältnis sinkt dabei von 1 : 4 auf 1 : 7.5. Dies hat einerseits den Vorteil, dass es durch den größeren Abbildungsmaßstab leichter ist, Doppelsterne zu spektroskopieren, andererseits ist die Analyse empfindlicher gegenüber den Einflüssen der Luftunruhe, die sich mit



terhalters wird je nach Anwendung ein Okular oder die Webcam eingesetzt. Der Abstand zwischen dem Gitter und dem CCD-Chip der Webcam beträgt etwa 80 Millimeter. Der vom Spiegel kommende Lichtkegel hat bei 1 : 7.5 an der Stelle des Gitters einen Durchmesser von etwa 10.7 Millimeter. Somit wird praktisch nur ein Teil des Gitters zur Lichtzerlegung genutzt. Dennoch ist das Auflösungsvermögen von Gitter und Webcam gut aufeinander abgestimmt und beträgt in dieser Konfiguration etwa 3.5 Ångström pro Pixel.

Die Philips ToUCam Pro im spektroskopischen Einsatz

Als Empfänger dient die Philips ToUCam Pro (PCVC 740k). Aufgrund ihrer großen Lichtempfindlichkeit hat sich diese Webcam in der Amateurszene inzwischen zur Standard-Webcam entwickelt. Die Webcam ist mittels einer abgeschnittenen Filmdose an das Teleskop adaptiert. Um Streulicht zu vermeiden, ist die Filmdose innen mit schwarzer Veloursfolie beklebt.

Seit der ersten Überlegung, eine Webcam als Empfänger für spektroskopische Aufnahmen einzusetzen, stellte sich die Frage, wie gut die Philips ToUCam Pro das kontinuierliche Spektrum darstellen kann. Webcams sind Farbkameras. Die Farbinformation wird durch Farbfilter gewonnen, die in Form eines Mosaiks auf den Chip aufgedampft sind. Sie werden auch als Color-Mosaik-Filter bezeichnet. Das Grundschema ist in Abb. 3a dargestellt.

Jeder dieser aufgedampften Filter hat einen charakteristischen Durchlassbereich. Zusammen decken die RGB-Filter die spektrale Empfindlichkeit über den gesamten visuellen Bereich bis ins nahe Infrarot ab (Abb. 3b). Farblücken wie sie Farb- oder Diafilme häufig aufweisen, konnten nicht erkannt werden. Die Farbcodierung wirkt sich zwar auf das Auflösungsvermögen des farblichen Kontinuums aus, jedoch nicht auf die Trennung der dunklen Absorptionslinien. Bei diesen ist es egal, ob sie auf ein blau-, grün- oder rot-kodiertes Pixel fallen.

Die »naturgetreue« Darstellung des Spektrums hängt neben der eigentlichen spektralen Empfindlichkeit auch vom korrekten Weißabgleich ab. Unter dem Weißabgleich versteht man die Verstärkung der roten und blauen Farbkomponenten im Bezug auf die grüne Farbkomponente. Die Einstellungen der Webcam lassen sowohl einen automatischen als auch einen manuellen Weißabgleich zu.

Die Größe des Spektrums hängt vom Abstand zwischen Blazegitter und CCD-Chip ab. Bei kleinen Abständen kann die

0. Beugungsordnung zusammen mit dem Spektrum aufgezeichnet werden. Wird hingegen der Gitterhalter eingesetzt, so beträgt der Abstand 80 Millimeter. Das Spektrum ist dann größer als der CCD-Chip der Webcam. Dadurch ist man gezwungen, mehrere Teile des Spektrums separat aufzunehmen. Hinterher lassen sich die Bilder mit einem Bildverarbeitungsprogramm zu einem Gesamtspektrum zusammenfügen.

Mit der Größe des Spektrums sinkt auch seine Helligkeit und damit die Reichweite der Objekte. Mit einer Auflösung von 3.5 Ångström pro Pixel lassen sich die Spektren von Sternen bis zu 2.5 mag mit zehn Bildern pro Sekunde bequem aufzeichnen. Wird die Auflösung des Spektrums an die Größe des CCD-Chips angepasst (ca. 6 Å pro Pixel) und die Einstellungen der Webcam auf Automatik eingestellt, so lassen sich Sternspektren

bis zur 5. Größe aufzeichnen. Allerdings werden dann nur fünf Bilder pro Sekunde in den Rechner eingelesen.

Aufnahme der Spektren

Zum Aufsuchen des Sterns wird in den Gitterhalter ein Okular mit geringer Vergrößerung eingesetzt. Bewährt hat sich hierfür ein 26-mm-Plössl-Okular. Mit einer Brennweite von 1500 Millimeter ergibt sich damit eine 60-fache Vergrößerung. Die Sterne lassen sich in gewohnter Weise beobachten, jedoch ist ihre Helligkeit sehr viel geringer, weil das meiste Licht auf die erste Beugungsordnung fällt. Symmetrisch zum Bild des Sterns (0. Beugungsordnung) sieht man die Spektren der ± 1. Beugungsordnung. Das Gitter wird durch Drehen des Gitterhalters so ausgerichtet, dass das Spektrum exakt in Rektaszension fällt. Die 0. Beugungsordnung wird in der Mitte des Gesichtsfeldes

Philips ToUCam Pro (PCVC740k)

Produktspezifikationen

Sensor:	1/4" CCD
Videoauflösung:	640 Pixel (H) × 480 Pixel (V)
Standbildauflösung:	1280 Pixel (H) × 960 Pixel (V)
Mindestbelichtung:	< 1 lux
Weißabgleich:	2500 K–7500 K
Linse:	6 mm F2.0
max. Bildrate:	60 Bilder pro Sekunde
Farbtiefe:	24 bit

Bedienungselemente

Vollautomatik:	ja
Bildrate:	ja
Bildauflösung:	ja
Kontrast:	ja
Helligkeit:	ja
Gegenlichtkomponente:	ja
Weißabgleich:	ja
Belichtungskontrolle:	ja
Audio-Aufnahmepegel:	ja
Schnappschuss:	ja

Physische Daten

Maße:	6.9 cm × 4.8 cm × 4.8 cm
Gewicht:	110 g
Kabellänge:	2.95 m
Mikrophon:	integriert

Systemvoraussetzungen

Betriebssystem	PC:	Windows 98/Me/2000
	MacIntosh:	Apple MacOS 9.0
Prozessor	PC:	Pentium II/AMD K6-2
	MacIntosh:	Imac Rev. A - D
Speicher (RAM):		mind. 32 MB
Freier Festplattenspeicher:		mind. 50 MB
USB-Anschluss		

Inzwischen wurde die Philips ToUCam Pro durch die Philips ToUCam Pro II ersetzt. Der Preis beträgt ca. 80 € (Stand 1/2006)

platziert. Danach wird das Okular gegen die Webcam getauscht und die Scharfeinstellung korrigiert. Die enorme Vergrößerung der Webcam gegenüber dem Okular wird dadurch sichtbar, dass auf dem Monitor nur noch die 0. Beugungsordnung zu sehen ist. Wird nun das Teleskop langsam in Rektaszension bewegt, so taucht nach einiger Zeit das blaue Ende des Spektrums auf dem Monitor auf.

Die abschließende Korrektur der Scharfstellung erfolgt anhand der Sichtbarkeit der dunklen Absorptionslinien. Hierzu sollte man einen Stern aufsuchen, der möglichst hoch am Himmel steht und deutlich sichtbare Absorptionslinien besitzt. Im Winter bieten sich hier Beteigeuze und Aldebaran an.

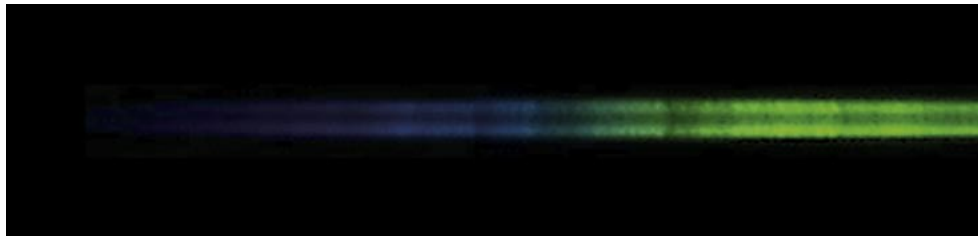
Von jedem Spektrum kann nun ein Video aufgenommen werden. In der Regel begrenze ich die Dauer auf zehn Sekunden. Damit stehen 100 Einzelbilder für eine Weiterverarbeitung zur Verfügung.

Auswertung der Spektren

Im Gegensatz zur Aufnahme ist die Auswertung recht zeitaufwändig. Eine automatische Überlagerung der Einzelbilder führte bislang mit verschiedenen Programmen zu keinem befriedigenden Ergebnis. Deswegen werden von den 100 Einzelbildern eines Videos die zehn bis 15 besten ausgesucht und manuell miteinander überlagert (siehe Abb. 5). Zur Überlagerung dienen charakteristische Absorptionslinien als guter Anhaltspunkt. Dadurch lässt sich der Einfluss des Seeing drastisch reduzieren.

Je mehr Einzelbilder miteinander überlagert werden, um so besser ist das Signal-Rausch-Verhältnis des Komposits. Aus dem Komposit kann anschließend eine Zeile heraus geschnitten werden, die durch mehrmaliges Kopieren verbreitert wird. Auf diese Weise lässt sich das Spektrum zur genaueren Auswertung »extrahieren«. Doch erst der Vergleich mehrerer Spektren miteinander zeigt letztlich, welche Linien als Absorptionslinien interpretiert werden können.

Zur Analyse werden die RGB-Bilder der Webcam in Schwarz-Weiß-Bilder umgewandelt. Anschließend können sie vom Programm IRIS [5] eingelesen und analysiert werden. Diese Software wurde zur Aufzeichnung und Auswertung von CCD-Bildern entwickelt und ist im Internet frei erhältlich. Zur Analyse kann eine Linie durch das Spektrum gelegt werden. Die einzelnen Intensitätswerte werden automatisch als Graph ausgegeben. Sie können auch als Textdatei abgespeichert und in einem Tabellenkalkulationsprogramm weiter verarbeitet werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, den Graphen an die Größe des Spektrums anzupas-



▲ Abb. 5: Das Spektrum von Beteigeuze bei Fokussierung auf maximalen Kontrast der Absorptionslinien. In der Mitte ist die Abschattung des Sekundärspiegels des Newton-Teleskops deutlich zu erkennen.

sen und als Bitmap-Datei abzuspeichern. Diese Datei kann mit einem Bildverarbeitungsprogramm weiterverarbeitet werden.

Die Ergebnisse

Exemplarisch werden nachfolgend vier Spektren bekannter Sterne des Winterhimmels vorgestellt und beschrieben. Die Aufnahmen entstanden alle am 16. Februar 2003. Die Reihenfolge entspricht dabei der Ordnung nach den Spektralklassen von O bis M. Die Zustandsgrößen sind – soweit nicht anders angegeben – aus [6] entnommen.

■ **Rigel (β Orionis):** Mit dem Spektraltyp B8 und der Leuchtkraftklasse Iab gehört Rigel zu den Blauen Riesensternen, was ihm im Hertzsprung-Russell-Diagramm einen Platz links oben auf dem Riesenast zuweist. Seine Oberflächentemperatur beträgt etwa 12 300 Kelvin. Typisch für diesen Spektraltyp sind Absorptionslinien hochionisierter Atome wie HeII, SiIV und NIII, doch sind im hier aufgezeichneten Spektrum keine ausgeprägten Linien zu sehen. Die Breite der Absorptionslinien von O-Sternen ist generell geringer als die anderer Spektralklassen. Daher ist ihre Aufzeichnung anfälliger gegenüber dem Einfluss der Luftunruhe, was sich insbesondere bei niedrig stehenden Sternen – wie Rigel – bemerkbar macht.

Natürlich ist die Webcam nicht in der Lage, den spektralen Intensitätsverlauf richtig wiederzugeben, denn das Strahlungsmaximum von Rigel liegt mit 2300 Ångström bereits im UV-Bereich. Das Intensitätsmaximum in Abb. 6a liegt bei etwa 5200 Ångström. Es hat sich jedoch im Nachhinein herausgestellt, dass die Webcam den spektralen Bereich zwischen 4000 und 5000 Ångström deutlich zu niedrig wiedergibt. Der Grund hierfür liegt nicht in mangelnder Empfindlichkeit des CCD-Chips, sondern am automatischen Weißabgleich. Da allerdings alle hier gezeigten Spektrogramme am glei-

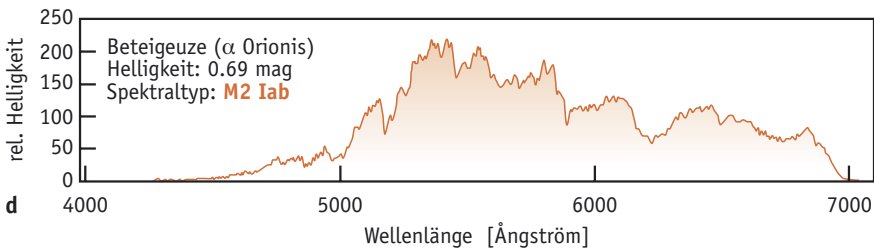
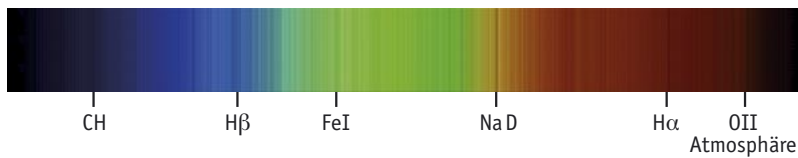
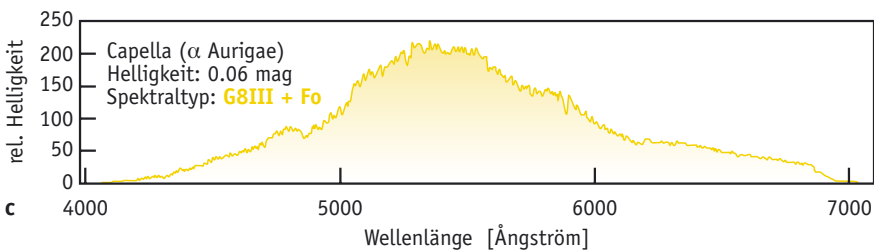
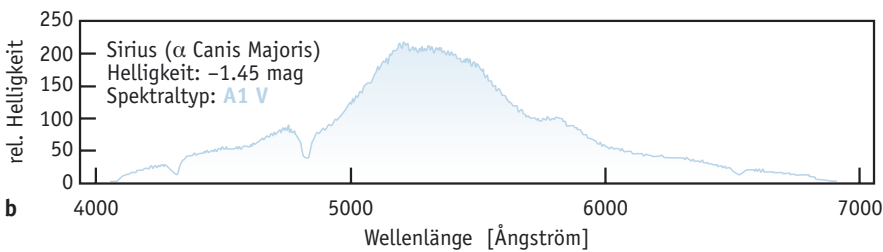
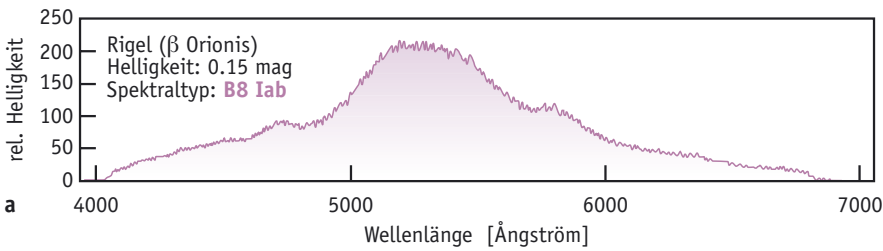
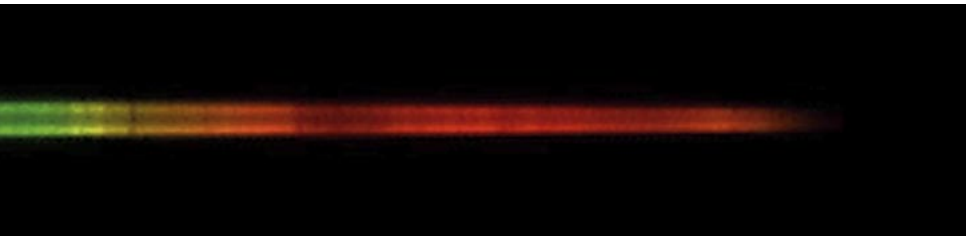
▶ Abb. 6: Die Spektren bekannter Sterne des Winterhimmels: a) Rigel, b) Sirius, c) Capella und d) Beteigeuze. Rigel (β Orionis) weist die Spektralklasse B8 und die Leuchtkraftklasse Iab auf.

chen Abend mit den gleichen Einstellungen gemacht wurden, soll dieser Fehler hier nicht weiter von Interesse sein.

■ **Sirius (α Canis Majoris):** ist mit einer Helligkeit von -1.5 mag der hellste Stern an unserem Firmament. Dies liegt jedoch an seiner geringen Entfernung von lediglich 8.7 Lichtjahren zur Erde. Sein Spektrum wird mit A1V klassifiziert. Seine Oberflächentemperatur ist mit 11 000 Kelvin bereits etwas niedriger als die von Rigel, doch liegt sein Strahlungsmaximum immer noch im UV-Bereich.

Sterne dieses Spektraltyps sind für die Spektroskopie mit dem Blazegitterspektrographen gut geeignet. Sie zeichnen sich durch ausgeprägte Absorptionslinien des Wasserstoffs aus. Dadurch können sie bereits mit niedriger Auflösung spektroskopiert werden. In Abb. 6b fallen insbesondere die H γ -Linie (4340 Å) und die H β -Linie (4861 Å) auf. Auch die H α -Linie (6563 Å) – die uns von vielen Emissionsnebeln her bekannt ist – ist bereits gut zu erkennen. Die H δ -Linie (4102 Å) wird leider durch das UV-IR-Filter abgeschnitten, dessen Transmission erst bei 4100 Ångström beginnt. Neben den Wasserstofflinien tritt auch die Natrium-D-Linie hervor. Die Leuchtkraftklasse V weist Sirius als normalen Hauptreihenstern aus.

■ **Capella (α Aurigae):** Im Winter steht das Sternbild Fuhrmann hoch im Zenit. Bei dem 43 Lichtjahre entfernten Hauptstern Capella handelt es sich um einen 0.06 mag hellen spektroskopischen Doppelstern. Darunter versteht man solche Doppelsterne, die auch mit großen Teleskopen nicht mehr getrennt werden können. Allerdings lassen sie sich spektroskopisch nachweisen, da sich die Absorptionslinien in ihrer Feinstruktur periodisch ändern. Beide Komponenten umlaufen den gemeinsamen Schwerpunkt in 104 Tagen. Sie gehören zu den Spektralklassen G8 und F0 und sind Riesensterne der Leuchtkraftklasse III. Natürlich reicht



das Auflösungsvermögen des Blazegitterspektrographen in der hier eingesetzten Form bei weitem nicht aus, spektroskopische Doppelsterne nachzuweisen.

Das Spektrum von Capella ist dem unserer Sonne, ein G2-Typ, bereits sehr ähnlich. Die Oberflächentemperatur beträgt nur noch 5600 Kelvin. Das Strahlungsmaximum der G-Sterne liegt im grünen Wellenlängenbereich. Es ist daher nicht verwunderlich, dass sich das menschliche Auge im Laufe der Evolution diesen Bedingungen optimal angepasst hat. Aus diesem Grunde nehmen wir das Licht mit einer Wellenlänge von 550 Nanometern am intensivsten wahr. Vergleichen wir das Spektrum von Capella mit den Spektren von Rigel und Sirius, so können wir erkennen, dass die Intensität im roten Spektralbereich deutlich höher ist.

Ein kleiner Teil des roten Lichtes wird bei 6875 Ångström durch einfach ionisierten Sauerstoff (OII) der Erdatmosphäre absorbiert. Von den Wasserstofflinien treten die H α - (6563 Å) und die H β -Linie (4861 Å) klar hervor. Sie sind jedoch schon sehr viel schwächer ausgeprägt als bei der A-Klasse. Gut sichtbar sind die Natrium-D-Linien (5890 Å, 5896 Å). Auch die Absorptionslinie von FeI bei 5269 Ångström ist gut zu erkennen. Im blauen Spektralbereich lässt sich das so genannte G-Band ermitteln, welches durch CH-Moleküle gebildet wird.

■ **Beteigeuze (α Orionis)** ist der linke Schulterstern des Orion. Seine Helligkeit schwankt zwischen 0.4 mag und 1.3 mag. Sein Spektraltyp, M2 Iab, weist ihn als Roten Überriesen aus. Überriesen entstehen nur, wenn es sich um sehr massereiche Sterne handelt. Ist der Wasserstoffvorrat im Innern aufgebraucht und der entstandene Heliumkern zu massereich geworden, so kollabiert der Stern. Dadurch steigen Druck und Temperatur im Innern derart an, dass nun Helium zu Kohlenstoff verbrannt wird. Um den Heliumkern herum befindet sich jedoch eine Schale, in der die Energie weiterhin durch Verbrennung des Wasserstoffs produziert wird. Durch den größeren Druck im Sterninnern bläht sich die äußere Hülle solange auf, bis ein neuer Gleichgewichtszustand erreicht ist. Der neue Gleichgewichtszustand ist jedoch sehr instabil, der Durchmesser des Sterns ändert sich daher beständig [6, 7]. Mit dem Durchmesser verändert sich auch die Leuchtkraft. Beteigeuze ist deshalb ein so genannter Veränderlicher, der bereits am Ende seines Lebens steht und irgendwann in Form einer Supernova explodieren wird.

Durch die größere Entfernung der Hülle zum Kern verringert sich die Temperatur der Oberfläche. Die Oberflächen-



spektrumdirekt
Die Wissenschaftszeitung im Internet

Die Redaktion von **spektrumdirekt** informiert Sie online schnell, fundiert und verständlich über den Stand der Forschung.



www.spektrumdirekt.de/info

temperatur von Sternen des Spektraltyps M ist kleiner als 3500 Kelvin. Das Strahlungsmaximum liegt bereits im infraroten Teil des Spektrums, dadurch erscheinen sie uns in rot-oranger Farbe.

Nach all dem verwundert es nicht, dass sich das Spektrum von Beteigeuze deutlich von den drei vorangegangenen Spektren unterscheidet (Abb. 6 d). Neben den deutlich ausgeprägten Absorptionslinien und Banden ist eine Vielzahl schwächerer Linien zu erkennen. Der Intensitätsverlauf ist nicht mehr so gleichmäßig wie bei den heißeren Sternen. Typisch für Sterne der Spektralklasse M sind die Titanoxid-Banden. Ferner treten die Natrium-D-Linien (5890 Å, 5896 Å) und das Magnesiumtriplett (5167 Å, 5169 Å, 5173 Å) deutlich hervor. Mit der gewählten Auflösung von rund 3.5 Ångström pro Pixel lassen sich diese Linien aber noch nicht trennen.

Erst auf den zweiten Blick bemerkt man das Fehlen der Wasserstofflinien. Selbst die H α -Linie ist kaum mehr auszumachen. Der Grund hierfür liegt in der geringen Dichte der Atmosphäre. Je höher der Druck ist, um so breiter sind die Absorptionslinien. Dieser Sachverhalt wird allgemein als Druckverbreiterung bezeichnet. Wegen der geringen Dichte sind die Wasserstofflinien sehr schmal [6, 8].

Vergleicht man nun die Intensität des Spektrums mit den vorangegangenen Spektren, so sieht man, dass sich die Intensität deutlich in den roten Bereich verschoben hat. Der plötzliche Abbruch des Spektrums bei etwa 6900 Ångström ist einerseits auf das UV-IR-Filter zurückzuführen, andererseits besitzt das Spektrum in diesem Bereich gerade ein lokales Minimum. Beides zusammen führt zu dem starken Abfall der Intensität. Ohne das UV-IR-Filter lässt sich das Spektrum noch weit verfolgen, bis es zu Überlappungen mit dem Spektrum der zweiten Beugungsordnung kommt.

Abschließende Bemerkungen

Der Blazegitterspektrograph von Baader Planetarium bietet in Verbindung mit einer handelsüblichen Webcam einen einfachen und preisgünstigen Einstieg in die Astrophysik für den Amateur. Die ganze Theorie über den Aufbau und Entwicklung der Sterne lässt sich auf diese Weise erfahren und selbst erleben. So kann man selbst die Forschungsergebnisse der professionellen Astronomen nachvollziehen, auch für den Schulunterricht ein sehr reizvolles Thema.

Eine Webcam ist für die Spektralanalyse heller Sterne sehr gut geeignet. Die spektrale Empfindlichkeit reicht von etwa 4000 bis 10000 Ångström. Die Auflösung der Spektren bestimmt gleichzeitig die Reichweite. So können Sterne bis etwa 2.5 mag mit einer Auflösung von 3.5 Ångström analysiert werden. Schwächere Sterne bis etwa 6 mag lassen sich mit geringerer Auflösung analysieren. Aufgrund des optischen Designs des Spektrographen ist die Spektralanalyse gegenüber dem Seeing sehr anfällig. Durch eine Videoaufzeichnung können bei der Auswertung die besten Bilder ausgesucht und miteinander überlagert werden. Dadurch lässt sich der Einfluss des Seings erheblich kompensieren. Mit dieser Hilfe gelingt es, markante Absorptionslinien deutlich hervorzuheben.

Als problematisch erwies sich der automatische Weißabgleich der Webcam. Dadurch sind keine reproduzierbaren Bedingungen gegeben. Der automatische Weißabgleich kann bei der Aufzeichnung desselben Sterns an verschiedenen Tagen zur unterschiedlichen Gewichtung der Farben führen. Hier sollte eine manuelle Einstellung erfolgen.

Das UV-IR-Filter hat sich für die Spektralanalyse insgesamt als nachteilig erwiesen. Das Spektrum wird unterhalb von 4100 Ångström abgeschnitten. Dadurch lässt sich die bei A-Sternen typische H δ -Linie nicht mehr aufzeichnen. □

Literaturhinweise

- [1] **Naumann/Schröder:** Bauelemente der Optik, 6. Auflage 1992. Carl Hanser Verlag.
- [2] **Otto Zimmermann:** Sternspektrographie in der Schule. SuW 11/1989, S. 642 – 647.
- [3] **Joachim Biefang:** Sternspektroskopie am Amateurteleskop. SuW 1/2002, S. 67–73.
- [4] Datenblatt Sony ICX098BQ: www.sel.sony.com/semi/PDF/ICX098BQ.pdf
- [5] IRIS: www.astrosurf.com/buil/us/iris/iris.htm
- [6] **Günter D. Roth:** Handbuch für Sternfreunde, Band 1 und 2, 4. Auflage. Springer-Verlag 1998. Bezugsquelle siehe Seite 71.
- [7] **Joachim Herrmann:** dtv Atlas der Astronomie, 10. Auflage 1990, 288 Seiten mit Sternatlas. Deutscher Taschenbuch Verlag, München.
- [8] **Helmut Zimmermann, Alfred Weigert:** ABC-Lexikon Astronomie, 8. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin, Oxford.