

W I S wissenschaft
in die schulen!

Echelle-Spektrografen: Präzision in Farbe

Die Astrospektroskopie, also die wellenlängenabhängige Analyse des Lichts kosmischer Objekte, ist ein bedeutendes Werkzeug der Himmelforschung. Mit so genannten Echelle-Spektrografen lässt sich ein ebenso breiter Spektralbereich erfassen wie mit klassischen Geräten – jedoch bei deutlich höherer Auflösung. Die moderne Variante ist auch kommerziell erhältlich. Was dürfen Amateurastronomen davon erwarten?

Von Paul Heeren

Wir schreiben das Jahr 1814: Durch einen kleinen Spalt im Vorhang fällt ein Sonnenstrahl auf ein Prisma, welches das Licht in seine unterschiedlichen Farbanteile zerlegt. Der Spiegel-schleifer bewertet mit diesem Arrangement die Güte des verwendeten Glases. Bei genauerem Hinsehen entdeckt er dunkle Linien im Farbspektrum des Lichts – insgesamt zählt er 574, deren Lage und Breite er dokumentiert (siehe SuW 12/2014, S. 46, und SuW 1/2015, S. 44). Doch der fleißige Optiker hat keine Zeit für weitere Untersuchungen – seine Linsen haben Vorrang. Die Entdeckung liegt ihm trotzdem am Herzen: »... so wäre es sehr zu wünschen, dass ihm geübte Naturforscher Aufmerksamkeit schenken möchten«, schreibt Joseph von Fraunhofer (1787–1826) über das von ihm beobachtete Phänomen.

Rund 50 Jahre später soll sein Wunsch in Erfüllung gehen: Der Chemiker Robert Bunsen und der Physiker Gustav Kirchhoff entdecken, dass Atome nicht nur Licht aussenden, sondern bestimmte Anteile auch absorbieren können. Die von Fraunhofer gefundenen dunklen Linien im Sonnenlicht beruhen auf chemischen

Elementen und molekularen Verbindungen in der Sonnenatmosphäre, die charakteristische Anteile des ausgesandten Lichts verschlucken – so ihre richtige Folgerung.

Von da an entwickelt sich die Methode zu einem beispiellosen Werkzeug von Astronomen, das heutzutage aus ihrer Arbeit nicht mehr wegzudenken ist. Durch eine Analyse des Spektrums der Sonne können sie rückschließen, welche Elemente in den oberen Schichten ihrer Atmosphäre vorkommen – aber nicht nur dort: Die Astrospektroskopie lässt sich auch auf weit entfernte Sterne, Gasnebel und sogar Galaxien anwenden. Ein Großteil unseres Wissens über den Kosmos basiert heute auf Erkenntnissen, die Forscher erst durch die Spektroskopie gewannen: etwa die chemischen Elemente von Sternen und die Größe unseres Milchstraßensystems.

In der Amateurastronomie spiegelte sich der Siegeszug der Spektroskopie nicht im selben Maß wider wie in der professionellen Forschung: Die Technik ist aufwändig, und die Auswertung und Interpretation der Daten kann mitunter mühsam sein. Doch hat der Interessierte die Grundlagen erst einmal verinnerlicht, dann

wird er mit völlig neuen Möglichkeiten belohnt: Spektrografen sind vergleichsweise unsensibel gegenüber künstlichem Streulicht und erlauben deshalb auch in Gegenden mit hoher Lichtverschmutzung noch gewinnbringende Beobachtungen. Hinsichtlich der Reichweite sind Hobbyastronomen zwar deutlich engere Grenzen gesetzt als den professionellen Forschern, aber die Lichtsammelfläche der Amateuerteleskope kann dennoch ausreichen, um – mit etwas Glück und Fleiß – in unserer direkten stellaren und galaktischen Nachbarschaft Neues zu entdecken.

Doch selbst wenn ein Sternfreund nichts bis dato Unbekanntes beobachtet, kann er mit einem guten Spektrografen zur aktuellen Forschung beitragen: Denn besonders bei Langzeitbeobachtungen eines Objekts über mehrere Wochen, Monate oder sogar Jahre hinweg, stößt die professionelle Astronomie wegen der knapp bemessenen Beobachtungszeiten an den Großteleskopen an ihre Grenzen. In teils weltweiten Netzwerken decken deshalb immer mehr Amateurastronomen solche langen Beobachtungszeiträume ab und arbeiten oft eng mit Wissenschaftlern zusammen (siehe SuW 12/2009, S. 70). Be-



Paul Heeren / Universität Heidelberg

Echelle-Spektrografen erfüllen den Astronomen gleich zwei Wünsche auf einmal: Sie erfassen das gesamte Sternspektrum auf einer einzigen Aufnahme – bei gleichzeitig hoher spektraler Auflösung. Die hier sichtbaren farbigen Streifen geben aneinander grenzende Teile des optischen Spektralbereichs wieder. Solche Spektren ermöglichen tiefe Einblicke in Sterne und ihre Planetensysteme, die einer direkten Beobachtung unzugänglich sind.

sondere Aufmerksamkeit wurde in den zurückliegenden Jahren und Jahrzehnten der Astrospektroskopie zuteil, da Forscher mit ihrer Hilfe zahlreiche Exoplaneten entdeckten. Speziell mit den so genannten Echelle-Spektrografen spürten die Astronomen bis heute mehr als 500 solcher fernen Welten auf.

Echelle-Spektroskopie

Bei klassischen Spektrografen muss der Beobachter stets einen Kompromiss zwischen zwei Anforderungen eingehen: Eine hohe spektrale Auflösung erreicht er, indem er das Spektrum weit auseinanderzieht – dann passt aber nur ein kleiner Wellenlängenbereich auf den bildgebenden Sensor, also den CCD-Chip. Umgekehrt geht ein breites Spektrum auf Kosten der Auflösung, da es nur zusammengedrückt auf den Chip passt. Echelle-Spektrografen bieten hier einen entscheidenden Vorteil: Mit einer einzigen Aufnahme erfassen sie ein Spektrum über einen extrem breiten Wellenlängenbereich hinweg, und dies mit enorm hoher spektraler Auflösung. Was aber ist beim Echelle-Spektrografen anders – denn schließlich arbeitet ja auch er mit einem CCD-Chip?

Der Trick besteht darin, das vom Teleskop gesammelte Sternlicht zweimal in Folge aufzutrennen: Zunächst fällt der Strahl unter einem großen Winkel auf ein reflektierendes Gitter, das im Profil betrachtet einer Treppe oder einer Leiter (französisch: *échelle*) ähnelt (siehe Kasten S. 66). Das Licht wird an den Stufen der Treppe reflektiert und spaltet sich dabei in seine einzelnen Farbkomponenten auf, die bei unterschiedlichen Austrittswinkeln sichtbar werden. Die Intensitätsmaxima der einzelnen Farben wiederholen sich dabei in einem regelmäßigen Muster, den so genannten Ordnungen: Man erhält somit jedes Spektrum mehrfach und spricht dann von einem Spektrum erster Ordnung, zweiter Ordnung und so weiter.

Ein Echelle-Gitter ist nun für relativ große Ein- und Austrittswinkel des Lichts optimiert; dadurch liegen die beobachteten Intensitätsmaxima einer bestimmten Farbe in zwei aufeinanderfolgenden Ordnungen nur um einen sehr kleinen Winkel versetzt (siehe Kasten S. 66). Die Spektren der einzelnen Ordnungen überlappen sich also stark, so dass das hinter dem Echelle-Gitter entstehende Farbgemisch insgesamt nahezu weiß erscheint. Um diese

Überlappung zu beseitigen, kommt nun ein zweites Gitter oder Prisma zum Einsatz, der so genannte Cross Disperser: Er beugt oder bricht das Licht jetzt genau senkrecht zu dem Echellegitter.

Die überlappenden Farbkomponenten – man stelle sie sich vertikal aneinander gereiht vor – werden nun erneut gemäß ihrer Wellenlänge aufgetrennt, nun jedoch in horizontaler Richtung. So entsteht schließlich ein zweidimensionales Spektrum mit vielen schmalen, parallelen Ordnungen, die jeweils einen kleinen Wellenlängenausschnitt abbilden – je nach Instrument können es bis zu rund hundert sein. Auf diese Weise erreicht man beispielsweise bei der Aufnahme eines Sonnenspektrums eine extrem hohe Auflösung, wobei die Gesamtheit der Ordnungen einen extrem breiten Wellenlängenbereich abdeckt (siehe Bilder S. 68).

Um die gleichen Informationen mit einem herkömmlichen Spaltspektrografen zu erhalten, müsste der Beobachter etliche Einzelaufnahmen belichten und dabei den CCD-Chip jeweils um einen gewissen Winkel zu einem anderen Wellenlängenbereich hin verschieben – was wesentlich mehr Zeit und Geduld erforderte. Bei Mes-

Spektroskopie und der Echelle-Spektrograf

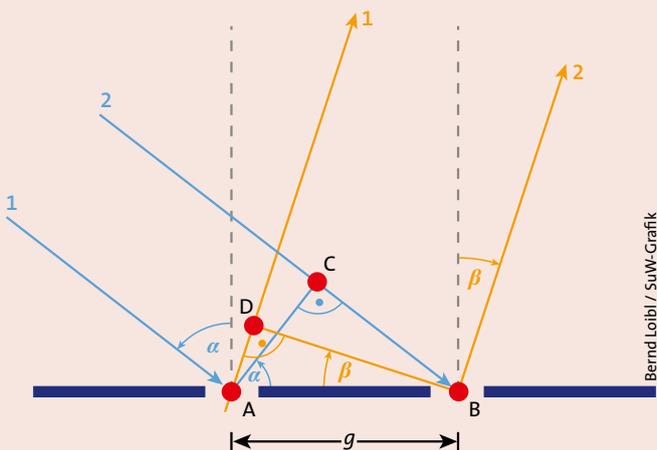
Mehr als ein Jahrhundert lang arbeiteten die Astronomen mit Spektrografen, die das Sternlicht mit Hilfe eines einzigen optischen Elements – eines Prismas oder eines optischen Gitters – in seine Farben zerlegten. Bei der Zerlegung des Lichts in seine einzelnen Farben treten die Spektren grundsätzlich mehrfach, in so genannten Ordnungen, auf. Ein klassischer Spektrograf nutzt nur das Spektrum erster oder zweiter Ordnung.

Eine bedeutende Weiterentwicklung brachten Echelle-Spektrografen, die auf trickreiche Weise mit zwei optischen Gittern arbeiten. Dadurch lassen sich auch die Spektren höherer Ordnungen einbeziehen und zu einem breiten, hochauflösenden Gesamtspektrum zusammensetzen. Hierin können die Forscher feinere Details nachweisen als zuvor, was bei der Jagd nach Exoplaneten oder der Untersuchung physikalischer Eigenschaften von Sternen hilfreich ist. – Der technische Aufwand ist allerdings größer.

Beugung am Gitter

Ein Spektrograf macht sich die Beugung von Licht an einem Gitter oder die Brechung von Licht in einem Prisma zu Nutze. Bei Gitterspektrografen wird zwischen Reflexions- und Transmissionsgittern unterschieden. Beide basieren letztlich auf demselben Prinzip: Ein unter dem Winkel α auf das Gitter fallender Lichtstrahl wird an den Gitterelementen in so genannte Elementarwellen aufgespalten. Diese interferieren konstruktiv oder destruktiv miteinander, abhängig von der Wellenlänge λ und vom Austrittswinkel β des Lichts. Hier betrachten wir nur das Reflexionsgitter (siehe Bild unten).

Entspricht der Wegunterschied der optischen Pfade zweier Strahlen genau einem ganzzahligen Vielfachen N der Wellenlänge λ , so bilden sie hinter dem Gitter, auf einem Projektionsschirm oder CCD-Sensor, ein Intensitätsmaximum. Für ein



Zwei Lichtstrahlen fallen unter dem Winkel α auf benachbarte Rillen A und B eines Reflexionsgitters und werden unter dem Winkel β reflektiert. Beträgt der Wegunterschied A–D der beiden reflektierten Strahlen genau ein ganzzahliges Vielfaches der Lichtwellenlänge, so schwingen die Wellenzüge entlang der beiden reflektierten Strahlen im Gleichtakt. Unter dem passenden Reflexionswinkel β lässt sich dann ein Helligkeitsmaximum beobachten.

Reflexionsgitter, bei dem zwei benachbarte Gitterelemente den Abstand g haben, ergibt sich in diesem Fall die Bedingung

$$N \lambda = g (\sin \alpha + \sin \beta).$$

Dabei wird die Zahl $N = 1, 2, 3 \dots$ auch als die Ordnung des Spektrums bezeichnet, denn für verschiedene N beobachtet man bei festem Einfallswinkel α unter mehreren Beobachtungswinkeln β die jeweiligen Maxima der unterschiedlichen Wellenlängen. Dies ist das Prinzip eines klassischen Spektrografen. An seine Grenzen stößt ein klassischer Spektrograf, wenn zugleich eine hohe Auflösung und ein breites Beobachtungsspektrum gefordert sind.

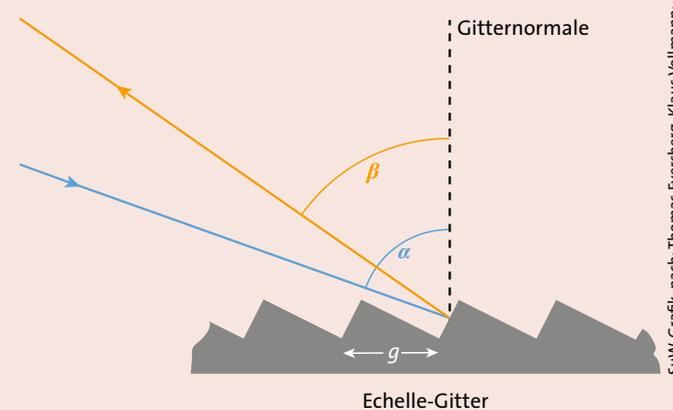
Spektrale Auflösung

Das spektrale Auflösungsvermögen gibt die Fähigkeit des Spektrografen an, nahe beieinander liegende Spektrallinien mit den Wellenlängen λ_1 und λ_2 noch getrennt nachzuweisen. Die Auflösung R beschreibt in diesem Zusammenhang, um welche Differenz $\Delta \lambda$ sich die beiden Wellenlängen λ_1 und λ_2 zweier Lichtstrahlen unterscheiden müssen, um im Spektrum noch getrennt voneinander dargestellt zu werden. Es gilt:

$$R = \lambda_1 / \Delta \lambda, \text{ wobei } \Delta \lambda = |\lambda_1 - \lambda_2|.$$

Je größer die Zahl R ist, desto höher ist das spektrale Auflösungsvermögen. Kann ein Gerät beispielsweise zwei Spektrallinien der Wellenlängen 500 beziehungsweise 505 Nanometer gerade noch getrennt abbilden, so beträgt sein Auflösungsvermögen in diesem Spektralbereich $R = 100$. Hat der Spektrograf eine Auflösung von $R = 10000$, so kann er die Wellenlänge 500 Nanometer (nm) und eine benachbarte Wellenlänge im Abstand von $\Delta \lambda = 500 \text{ nm} / 10000 = 0,05 \text{ nm}$ noch getrennt darstellen.

Eine höhere Auflösung bedeutet also, zwei Wellenlängenanteile weiter voneinander zu trennen – und dies zieht das komplette Spektrum auseinander, bis es auf dem Beobachtungsinstrument, meist ein CCD-Sensor, keinen Platz mehr findet. Hier kommt nun der Echelle-Spektrograf ins Spiel.



Beim sägezahnförmigen Reflexionsgitter eines Echelle-Spektrografen wird ein unter großem Winkel α einfallender Strahl unter einem ebenfalls großen Ausfallwinkel β reflektiert.

SuW-Grafik, nach: Thomas Eversberg, Klaus Vollmann: Spectroscopic Instrumentation, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2015, Seite 198, Fig. 5.4

Echelle-Spektrograf

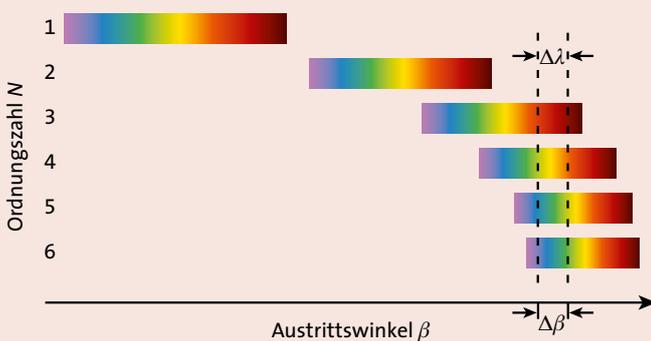
Die Begrenzung des abgebildeten Spektrums umgeht ein Echelle-Spektrograf, indem er zwei hintereinander wirkende optische Elemente nutzt. Zunächst trifft das Licht auf ein so genanntes Echelle-Gitter: ein Reflexionsgitter, dessen im Querschnitt betrachtete Rillen an ein Sägeblatt oder an eine Leiter (französisch: échelle) erinnern. Diese spezielle Geometrie erlaubt es, Spektren ohne große Intensitätsverluste bei großen Winkeln zu messen: Die Lichtstrahlen treffen nämlich nahezu senkrecht auf die Trepfenstufen des Gitters (siehe Bild links unten).

Bei einem Echelle-Spektrografen kommt ein Reflexionsgitter mit relativ großem Gitterabstand g zum Einsatz. Das hier im Querschnitt dargestellte Profil des Gitters erinnert an einen Sägezahn. Auf Grund dieser Geometrie wird ein unter großem Winkel α einfallender Strahl unter einem ebenfalls großen

Ein Echelle-Spektrograf verarbeitet Spektren mehrerer Ordnungen zu einem hochauflösenden Gesamtspektrum.

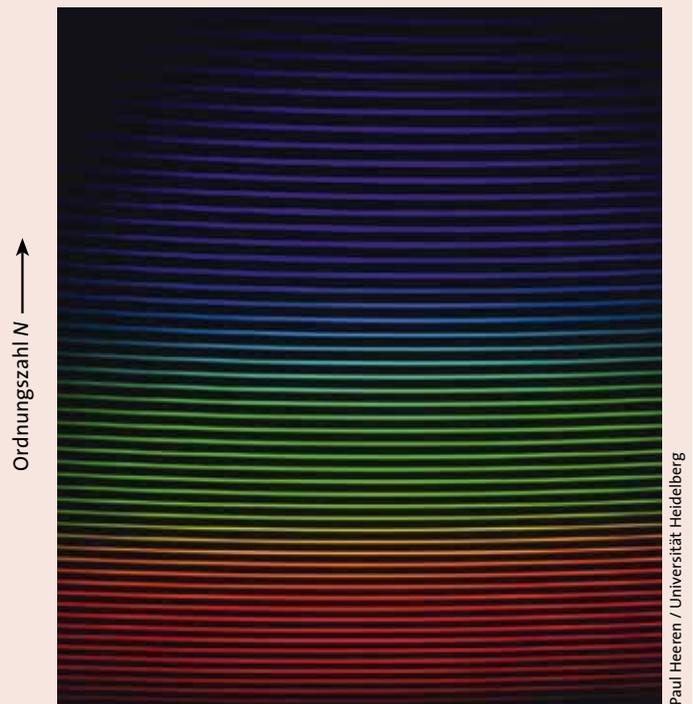
Ausfallwinkel β reflektiert. Gemäß unserer Formel für die konstruktive Interferenz entsprechen großen Reflexionswinkeln β hohe spektrale Ordnungen N . Bei dieser Anordnung überlagern sich die Spektren zweier aufeinanderfolgender Ordnungen stark (siehe Bild unten).

Dies wird deutlich, wenn wir uns die Formel genauer ansehen: Für einen festen Austrittswinkel β ist die Wellenlänge λ umgekehrt proportional zur Ordnungszahl N . Beobachten wir beispielsweise unter dem Winkel β in der ersten Ordnung $N_1 = 1$ die Wellenlänge λ_1 , so erscheint uns unter demselben Winkel in der zweiten Ordnung $N_2 = 2$ Licht mit der halben Wellenlänge: $\lambda_2 = \lambda_1 \times N_1/N_2 = \lambda_1/2$. Vergleichen wir dagegen die aufeinanderfolgenden Ordnungen 70 und 71 bei demselben Winkel β , so unterscheiden sich die beiden Wellenlängen λ_{70} und λ_{71}



Die von einem Reflexionsgitter erzeugten Spektren erscheinen bei hohen Ordnungen unter ähnlichen großen Austrittswinkeln β . Deshalb tragen zu dem im Winkelbereich $\Delta\beta$ beobachteten Licht viele Spektralfarben gleichzeitig bei: Die in der Grafik einzeln dargestellten Spektren überlagern sich für den Betrachter zu einem weißen Streifen. Erst mit einem zusätzlichen Gitter, dem so genannten Cross Disperser, gelingt es, die Spektren zu trennen und als einzelne Zeilen der Breite $\Delta\lambda$ darzustellen.

Wellenlänge λ →



Paul Heeren / Universität Heidelberg

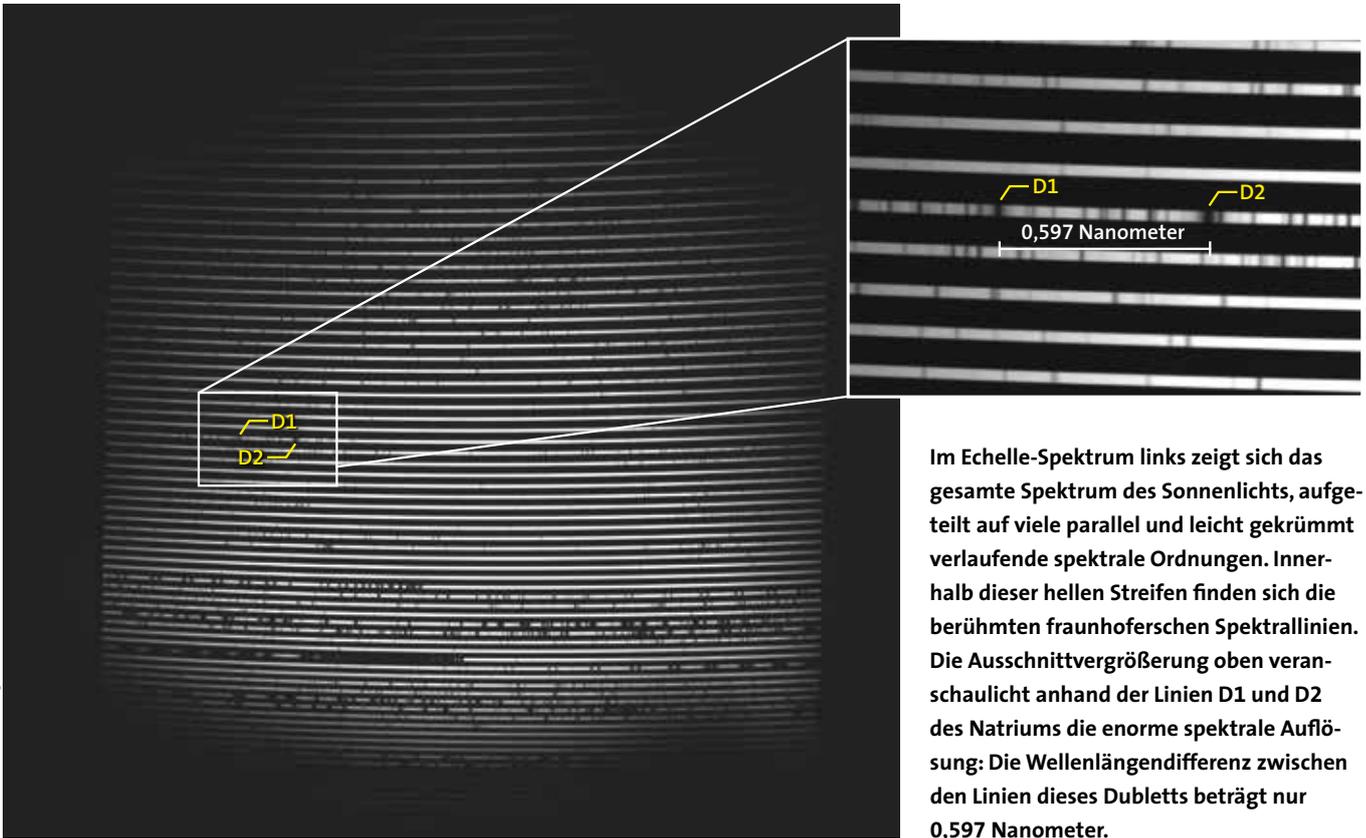
Hat das vom Echelle-Gitter kommende Licht den Cross Disperser passiert, ergibt sich ein zweidimensionales Spektrum, hier das durchgängige Schwarzkörperspektrum einer Halogenlampe. Parallel zueinander liegen Dutzende verschiedene Ordnungen. Jede dieser Zeilen gibt nur ein kleines Wellenlängenintervall $\Delta\lambda$ des gesamten Spektrums wieder.

kaum, da das entsprechende Verhältnis von 70/71 sehr nahe an eins liegt. Unter einem fest gewählten Winkel β lassen sich daher viele nur wenig unterschiedliche Wellenlängen λ in verschiedenen Ordnungen beobachten (siehe Grafik links).

Da sich die unterschiedlichen Spektren überlagern, erscheint das Gesamtspektrum hinter dem Gitter zunächst noch gänzlich weiß. Die verschiedenen Ordnungen müssen nun voneinander getrennt werden, um sie analysieren zu können. Diese Funktion übernimmt das zweite optische Element des Echelle-Spektrografen: ein so genannter Cross Disperser. Darunter versteht man ein Gitter, dessen reflektierende Rillen senkrecht zu denen des Echelle-Gitters orientiert sind. Die zu einem weißen Streifen überlagerten Ordnungen unterschiedlicher Wellenlängen werden nun an diesem zweiten Gitter unterschiedlich stark gebeugt und somit ihren Farben entsprechend auseinander gezogen. So wird aus dem Streifen ein zweidimensionales Spektrum (siehe Bild oben).

Jede Zeile dieses Spektrums entspricht einer anderen Ordnung N und bildet jeweils nur einen kleinen Wellenlängenausschnitt $\Delta\lambda$ des Gesamtspektrums ab – jedoch in sehr hoher spektraler Auflösung. Die Gesamtheit der vielen parallel liegenden Ausschnitte – also die gedanklich aneinandergereihten Zeilen – repräsentieren das gewünschte Spektrum der beobachteten Lichtquelle, beispielsweise eines Sterns.

SuW-Grafik, nach: Thomas Eversberg, Klaus Vollmann: Spectroscopic Instrumentation, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2013, Seite 195, Fig. 5.2



Im Echelle-Spektrum links zeigt sich das gesamte Spektrum des Sonnenlichts, aufgeteilt auf viele parallel und leicht gekrümmt verlaufende spektrale Ordnungen. Innerhalb dieser hellen Streifen finden sich die berühmten fraunhoferschen Spektrallinien. Die Ausschnittvergrößerung oben veranschaulicht anhand der Linien D1 und D2 des Natriums die enorme spektrale Auflösung: Die Wellenlängendifferenz zwischen den Linien dieses Dubletts beträgt nur 0,597 Nanometer.

sungen von Objekten, die sich rasch verändern, ist das problematisch. Zudem können die nötigen mechanisch beweglichen Teile des Instruments die Messgenauigkeit beeinträchtigen. Hierauf kommt es besonders bei der Suche nach Planeten bei fremden Sternen an, denn diese kann der Beobachter durch präzise Wellenlängenmessungen an Spektrallinien nachweisen.

Exoplaneten lassen Sterne taumeln

Um einen Exoplaneten mit einem Echelle-Spektrographen aufzuspüren, vermessen die Astronomen das Spektrum eines Sterns immer wieder aufs Neue und analysieren jeweils die Positionen seiner Spektrallinien. Verschieben sich die Linien im Spektrum periodisch hin und her, so kann das ein Hinweis auf einen Exoplaneten sein – denn: Kreist ein Planet um den Stern, so bewegt sich auch dieser ein wenig, da beide Objekte stets den gemeinsamen Schwerpunkt des Systems umrunden. Er liegt üblicherweise nahe am Stern oder gar innerhalb, weil Sterne um ein Vielfaches schwerer sind als ihre Planeten. Nichtsdestoweniger vollführt der Stern winzige kreis- oder ellipsenförmige Bewegungen um den gemeinsamen Schwerpunkt.

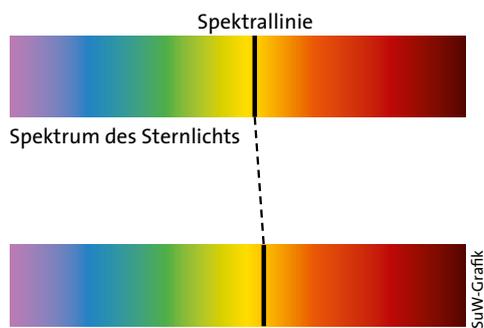
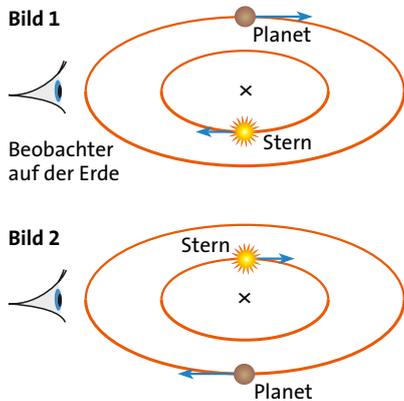
Ist das System passend positioniert, macht sich dieses stellare Taumeln auf Grund des Doppler-Effekts bemerkbar –

und zwar folgendermaßen: Nähert sich der Stern auf seiner Kreisbahn dem Beobachter, so erscheinen seine Spektrallinien etwas zum Blauen hin verschoben, so dass sich die Wellenlängen verkürzen. Das Gegenteil ist der Fall, wenn der Stern sich wieder entfernt; die Linien rutschen dann weiter in den roten Bereich (siehe Grafik rechts oben). Diese Verschiebungen lassen sich mit einem Echelle-Spektrographen messen und über die Zeit auftragen. Die Periode der spektralen Änderungen entspricht dann genau der Umlaufzeit des Exoplaneten; über die Amplitude der Dopplerverschiebung und den genauen Ablauf der Variationen lässt sich außerdem auf weitere Parameter des Systems schließen, wie den Abstand zwischen Stern und Planet, dessen ungefähre Masse und die Exzentrizität seines Umlaufs.

Da die periodische Bewegung des Sterns relativ gering ist – sie ist abhängig von der Masse des umkreisenden Exoplaneten und der Entfernung der beiden Objekte zueinander – verschieben sich die Spektrallinien auch nur minimal: Jupiters Umlauf beispielsweise bewirkt bei der Sonne eine Änderung der Radialgeschwindigkeit von maximal 12,5 Meter pro Sekunde. Dies ist eigentlich ein beachtliches Tempo, doch die damit einhergehende Verschiebung einer Spektrallinie beträgt nur rund ein Vierhundertmillionstel ihrer Wellenlän-

ge. Eine Linie bei 600 Nanometern, also im gelb-orangen Spektralbereich, ändert ihre Position deshalb lediglich um 0,025 Pikometer. Dabei ist ein Pikometer der milliardste Teil eines Millimeters und der billionste Teil eines Meters: 10^{-12} Meter. Selbst bei Spektrographen mit enorm hoher Auflösung entspricht dieser winzige Wellenlängenunterschied auf dem Chip nur einem Bruchteil eines Pixels. Daraus folgt eine riesige Messunsicherheit; erst durch das Aufzeichnen etlicher Spektrallinien lassen sich solche Variationen zweifelsfrei nachweisen.

Hier kommt nun der Echelle-Spektrograph ins Spiel: Sein breiter Spektralbereich ermöglicht es, innerhalb eines großen Wellenlängenintervalls Hunderte oder gar Tausende Spektrallinien zu beobachten – in hoher Auflösung und durch eine einzige Aufnahme. Mit modernen Versionen lassen sich so Radialgeschwindigkeiten von fernen Sternen präzise messen und mögliche Exoplaneten nachweisen. Somit können die Astronomen heute um sonnenähnliche Sterne sogar kleine Planeten von Erdmasse aufspüren, obwohl hier die unscheinbaren Trabanten nur eine winzige Radialgeschwindigkeitsverschiebung bewirken, die deutlich unterhalb von einem Meter pro Sekunde liegt. Um eine derart hohe Genauigkeit zu gewährleisten, werden viele der professionellen Geräte in



Bei der Radialgeschwindigkeitsmethode untersuchen Astronomen die Dopplerverschiebung von Spektrallinien eines Sterns: Rotverschobene Linien deuten auf ein sich entfernendes, blauverschobene auf ein sich annäherndes Objekt hin. Eine periodische Linienverschiebung hin und her lässt auf eine Kreis- oder Ellipsenbahn des Sterns schließen – womöglich hervorgerufen durch einen begleitenden Exoplaneten, der mit seinem Zentralgestirn den gemeinsamen Schwerpunkt des Systems umläuft.

Vakuumtanks gelagert, und ihre Temperaturen genau kontrolliert, wodurch sich die thermische Ausdehnung der Materialien auf ein Minimum reduziert.

Sind solche Präzisionsinstrumente nur den Profis vorbehalten oder kommen sie auch für Hobbyastronomen in Betracht? Immerhin handelt es sich bei den professionellen Echelle-Spektrografen um Spezialanfertigungen, deren Produktionskosten oft im sechsstelligen Bereich liegen. Gleichwohl lässt sich ein solches Instrument auch deutlich günstiger anfertigen, denn alle benötigten optischen Komponenten wie Linsen, Echellegitter und Prismen gibt es fertig zu kaufen. Die nötigen optischen und technischen Berechnungen sind natürlich nicht ganz einfach, aber

interessierte Bastler können mittlerweile auf umfassende hilfreiche Literatur zurückgreifen. Ferner steht die Fachgruppe Spektroskopie der Vereinigung der Sternfreunde e.V. (VdS) jedem Interessierten zur Seite. Wer über das nötige Kleingeld verfügt, kann aber auch einen Echelle-Spektrografen im Fachhandel erwerben.

Kommerziell erhältliche Geräte

Mittlerweile bieten einige Unternehmen sofort einsatzbereite Geräte an, die sich direkt am eigenen Teleskop anschließen lassen. Im Folgenden sollen zwei beliebte Instrumente besprochen werden, für die bereits umfangreiche Tests vorliegen: der Echelle-Spektrograf BACHES der Firma Baader Planetarium und das Gerät eShel

des Unternehmens Shelyak Instruments (siehe Bilder S. 70). BACHES kostet voll ausgestattet rund 11000 Euro, der eShel mit allem Zubehör etwas mehr als 16000 Euro. Die Instrumente sind also nicht gerade billig, aber die Hersteller versprechen eine enorme Leistungsfähigkeit. Was leisten diese Geräte in der Praxis?

Bei beiden Apparaturen umfasst das Paket eine Kalibrationseinheit mit Thorium-Argon-Lampe für die Wellenlängenbestimmung und eine Weißlicht-Kontinuumslampe. Der eShel hat nach Angaben von Shelyak eine maximale spektrale Auflösung von etwa 10000, für den BACHES verspricht Baader Planetarium sogar 18000 (siehe Kasten S. 66). Der eShel steht abseits des Teleskops, das Sternlicht wird



Spektrum SPEZIAL

WAHLWEISE
als Print-,
Digital- oder
Kombiabo

Die **Spektrum**-Spezial-Reihe befasst sich mit allen Themen rund um die Naturwissenschaften, von Physik über Astronomie, Geowissenschaften, Informatik und Mathematik bis hin zu den technischen Disziplinen. Jahresabo je Reihe (4 Ausgaben pro Jahr): Print € 29,60; Digital € 21,-; Kombiabo Print + Digital € 33,60

(Printpreise inkl. Versandkosten Inland; Digitalabo nur für Privatkunden)

Bestellen Sie jetzt Ihr Spezialabo!

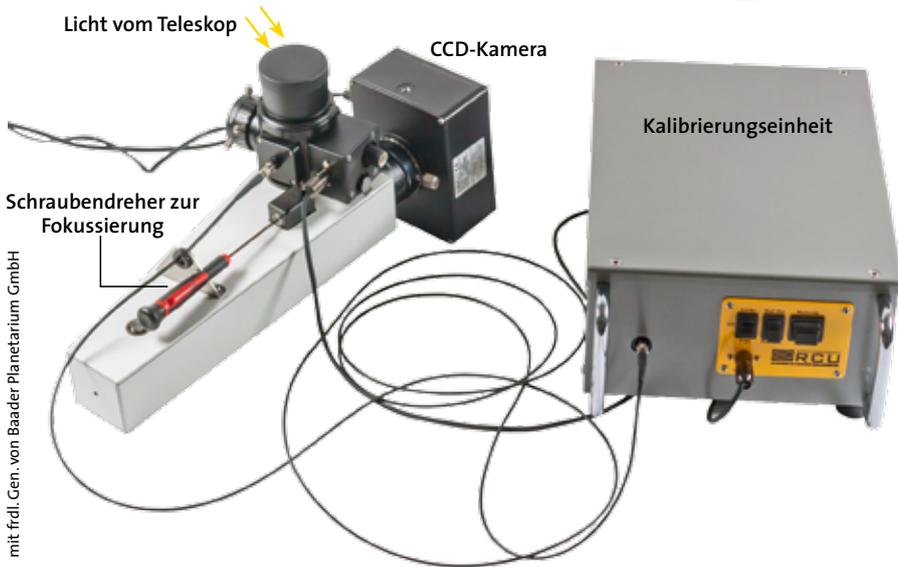
service@spektrum.de

Tel.: 06221 9126-743

www.spektrum.de/spezialabo



mit ftdl. Gen. von Shelyak Instruments



mit ftdl. Gen. von Baader Planetarium GmbH

Zwei kommerzielle Echelle-Spektrografen: Der eShel (oben) wird nicht mechanisch mit dem Teleskop verbunden, sondern erhält das vom Teleskop gesammelte Sternlicht über eine Glasfaserleitung. Dieses Gerät der französischen Firma Shelyak Instruments ist für rund 16 200 Euro erhältlich. Der von Baader Planetarium für etwa 11 000 Euro angebotene Spektrograf BACHES (unten) muss direkt hinter dem Teleskop montiert werden und wird gemeinsam mit diesem bewegt.

dass nur ein Teil des Sternlichts durch den Spalt auf das Echelle-Gitter fällt. Bei kleineren Teleskopöffnungen mit gleichem Öffnungsverhältnis ist die Brennweite – und damit auch die Sternabbildung – in der Ebene des Spalts ebenfalls kleiner, weshalb hier kein so großer Lichtverlust auftritt. Zwar ließe sich am Spektrografen auch ein breiterer Spalt von 50 Mikrometern nutzen; dies würde aber wiederum die spektrale Auflösung halbieren.

Eine Frage der Stabilität

Ein weiterer Nachteil der Anbringung am Teleskopfokus sind die unvermeidbaren Bewegungen. Das Gerät macht jeden Schwenk des Fernrohrs mit, was unweigerlich zu mechanischen Verwindungen im Instrument führt und der Stabilität entgegen wirkt. Ein Team von Astronomen um Stefan Kozłowski von der Universität Warschau testete den Spektrografen und bestätigte dieses Problem: Über mehrere Tage hinweg nahmen die Forscher in jeder Nacht einige Kalibrationsspektren auf und vermaßen ihre Positionen auf dem CCD-Chip. Es zeigte sich eine klare langfristige Variabilität, die wohl größtenteils auf Temperaturschwankungen zurückging. Selbst innerhalb einer Nacht verschoben sich die Spektren relativ zueinander, teils sogar um mehrere Pixel. Diese Unterschiede lassen sich in eine scheinbare Radialgeschwindigkeit umrechnen und betragen dann bis zu 15 Kilometer pro Sekunde.

Zwar fielen die Differenzen von Kalibrationsspektren, die unmittelbar vor und nach einer Messung am Stern aufgenommen wurden, im Allgemeinen deutlich geringer aus – doch auch in diesem Fall sollte man mit Verschiebungen um einen Kilometer pro Sekunde rechnen. Dieser Wert fließt als Unsicherheit der Wellenlängenkalkulation ein und begrenzt damit die Messgenauigkeit.

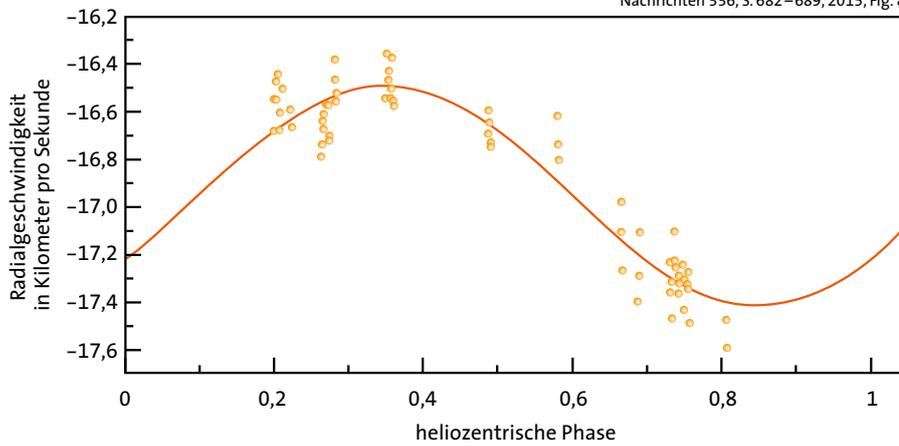
ihm über eine Glasfaser zugeführt. Für einen optimalen Lichtweg muss es in einem Öffnungsverhältnis von etwa $f/6$ eingespeist werden. Das Gerät ist relativ unsensibel gegenüber sich ändernden Beobachtungsbedingungen.

Ähnlich wie professionelle Instrumente könnte der Beobachter den eShel auch in einem gesonderten Raum mit konstanter Temperatur platzieren, was die Messgenauigkeit erhöhen würde. Ein nicht unbedeutender Nachteil dieses Konzepts liegt allerdings darin, dass in der Glasfaser ein gewisser Teil des Lichts verloren geht – die Effizienz des Geräts leidet darunter merklich. Aus diesem Grund stößt der Spektrograf bei lichtschwachen Objekten schnell an seine Grenzen. Eine bessere Glasfaser mit weniger Lichtverlusten würde für eine erhebliche Verbesserung sorgen, sie kostet aber zusätzliches Geld.

BACHES wird dagegen in der Brennebene des Teleskops betrieben und muss am Tubus befestigt werden. Das vom Teleskop gesammelte Licht fällt somit direkt

auf den Spalt und in den Spektrografen ein, wodurch Intensitätsverluste bei optimaler Kopplung minimiert werden. Lichtschwache Objekte lassen sich daher in relativ kurzer Beobachtungsdauer mit gutem Signal-Rausch-Verhältnis ablichten. Um das Echelle-Gitter im BACHES bestmöglich auszufüllen und die maximale spektrale Auflösung zu erreichen, sollte die lichtsammelnde Optik ein Öffnungsverhältnis von $f/10$ aufweisen; die normale Spaltbreite beträgt 25 Mikrometer.

Somit kann das Instrument selbst unter optimalen Beobachtungsbedingungen nur an Teleskopen bis etwa 50 Zentimeter Durchmesser eingesetzt werden, denn bei dem gegebenen Öffnungsverhältnis von 10 beträgt dann die Brennweite immerhin 10×50 Zentimeter, also 5 Meter. Die Sternabbildungen erscheinen dann am Spalt des angeschlossenen Spektrografen schon relativ groß – und durch die allgegenwärtige atmosphärische Luftunruhe werden sie zu noch größeren Scheibchen verschmiert. Es besteht also die Gefahr,



Die Radialgeschwindigkeitskurve des Sterns Tau Bootis, auf der Grundlage von Messungen mit dem eShel berechnet, lässt klar den Schluss auf einen begleitenden Exoplaneten zu. Die Geschwindigkeiten sind hier den jeweiligen Bruchteilen der Periodendauer, der so genannten Phase, zugeordnet: Eine Phase von 0,5 entspricht einer halben Periode, 1,0 der vollen Periode. An jedem Punkt der Phase streuen die Geschwindigkeiten um höchstens rund 400 Meter pro Sekunde.

Eine Forschergruppe um Theodor Pribulla von der Slowakischen Akademie der Wissenschaften erprobte in ähnlicher Weise den Spektrografen eShel. Das Ergebnis fällt wegen des Aufbaus günstiger aus: Innerhalb einer Nacht schwanken die Kalibrationspektren um nicht mehr als 250 Meter pro Sekunde. Dies ist ein deutlich besserer Wert als beim BACHES und für ein Instrument dieser Größe ein sehr guter Wert. Die beeindruckende Stabilität des eShel konnten die Forscher auch in realen Messungen an Sternen zeigen – tatsächlich gelang es ihnen, einen bereits bekannten Exoplaneten nachzuweisen: den Gasriesen Tau Bootis b (siehe Grafik oben).

Das Zentralgestirn, das dieser massereiche Planet umrundet, ist Teil des Doppelsternsystems Tau Bootis im Sternbild Bärenhüter (lateinisch: Bootes). Der Planet umläuft den helleren der beiden Sterne innerhalb von 3,3 Tagen. Im Jahr 1996 war er einer der ersten jemals entdeckten Exoplaneten. Seine Radialgeschwindigkeitsamplitude ist mit 466 Metern pro Sekunde relativ groß – trotzdem muss man sich erneut vergegenwärtigen: Die damit einhergehende relative Verschiebung der Spektrallinien auf dem CCD-Chip beträgt weit weniger als ein Zehntel eines Pixels.

Im Gegensatz zum eShel mussten sich die Forscher beim Testen von BACHES mit der Untersuchung von Doppelster-

nen begnügen: Beispielsweise konnte der Apparat die Radialgeschwindigkeiten des Systems HIP 3810 im Sternbild Fische mit einer Genauigkeit von rund 1,4 Kilometern pro Sekunde messen (siehe Grafik unten). Sein Messfehler liegt also rund fünfmal höher als der des eShel. Dennoch stellte der Spektrograf am Doppelstern A023631+1208 seinen Wert als wissenschaftliches Instrument unter Beweis: Die Massen der beiden Komponenten konnten die Forscher auf drei Prozent genau ermitteln – ein beachtliches Ergebnis, denn damit liegt die Messgenauigkeit nur um einen Faktor fünf unter derjenigen von professionellen Echelle-Spektrografen.

Für Amateurastronomen eine lohnende Investition?

Die Preise der beiden Geräte mögen viele Amateurastronomen abschrecken, doch der Käufer erhält in beiden Fällen ein Instrument, das deutlich mehr leistet als herkömmliche kommerzielle Spektrografen klassischer Bauart. Der ebenfalls von der Firma Baader Planetarium angebotene Spaltspektrograf DADOS kommt beispielsweise in der besten Ausstattung nicht über eine Auflösung von rund 3800 hinaus; und Shelyak Instruments hat zwar mit dem Lhires III ein Gerät mit einer sehr hohen Auflösung von rund 18 000 im Angebot, das aber ebensowenig mit dem breiten Spektralbe-

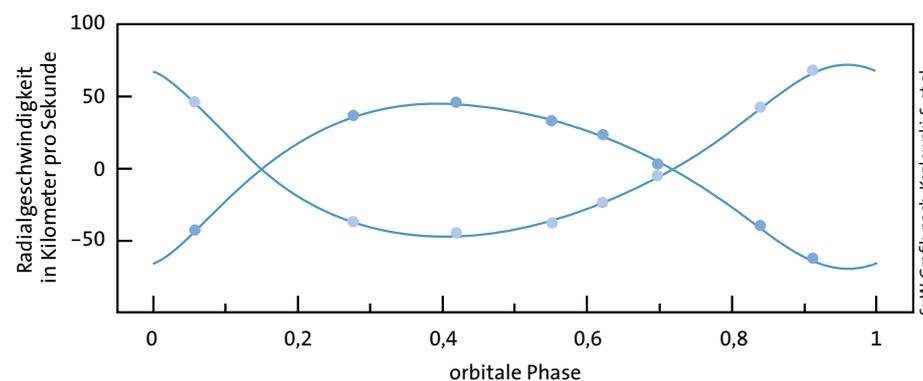
reich eines Echelle-Spektrografen aufwarten kann.

Und wie sieht es mit dem Nachweis von Exoplaneten aus? Zwar lassen sich mit dem eShel offenbar einige bereits bekannte Exemplare nachweisen, aber unter allen in den zurückliegenden fünf Jahren mit der Dopplermethode entdeckten Exoplaneten befanden sich nur zwei, deren Geschwindigkeitsamplituden größer waren als der Messfehler des eShel von 250 Meter pro Sekunde. Man müsste also ein Glückspilz sein, um damit ein bisher unbekanntes System mit genügend hoher Radialgeschwindigkeit und Helligkeit des Zentralsterns zu finden.

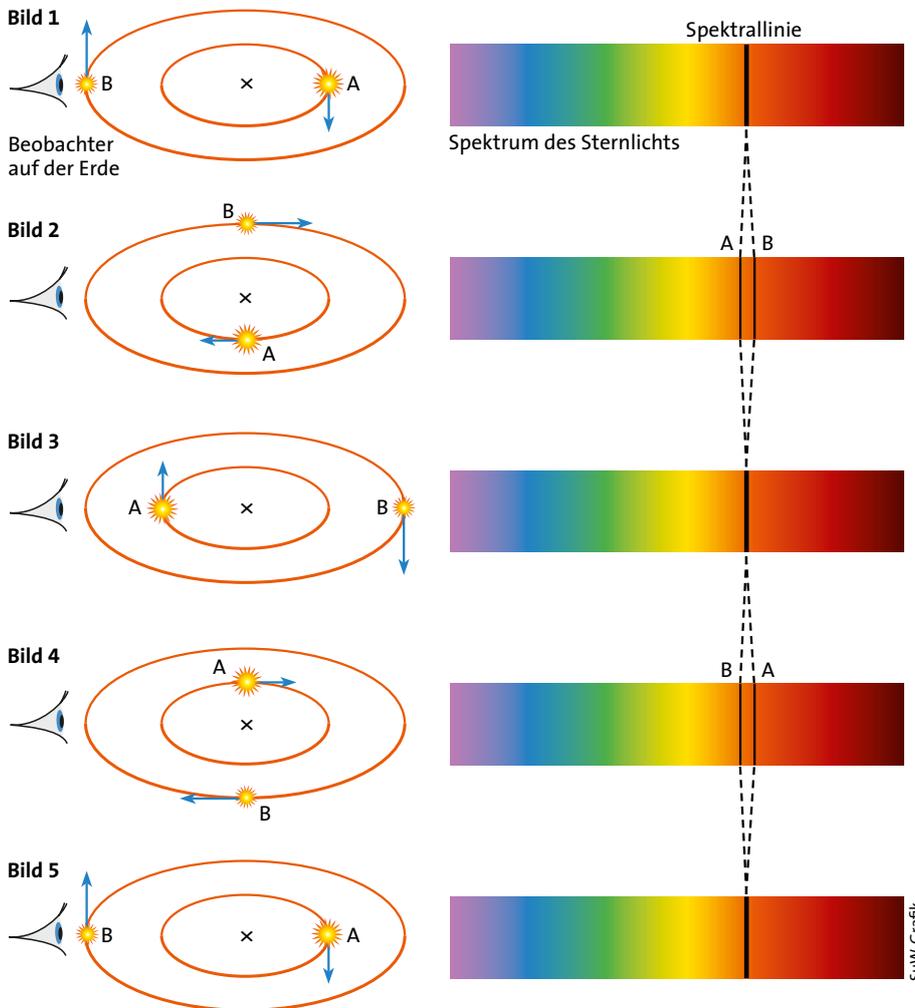
Und nutzt man BACHES, geht die Wahrscheinlichkeit vollends gegen null: In der Datenbasis <http://exoplanets.org> findet sich nur ein einziger durch die Radialgeschwindigkeitsmethode entdeckter Planet, den der Apparat verlässlich detektieren kann: Der Stern HIP 87330 im Skorpion weist eine Geschwindigkeitsamplitude von rund 1,8 Kilometern pro Sekunde auf, verursacht durch einen sehr nahen Begleiter mit einer Masse von mindestens 15 Jupitermassen. Darüber hinaus gibt es lediglich zwei weitere durch die Transitmethode entdeckte Exoplaneten, deren Nachweis mit BACHES noch möglich wäre.

Für eine aktive Jagd nach unbekanntem Exoplaneten eignen sich die beiden

Mit dem Echelle-Spektrografen BACHES ermittelte ein Team um Stefan Kozłowski die Radialgeschwindigkeit des Doppelsterns HIP 3810 im Sternbild Fische. Die Zeit ist hier in Bruchteilen der Periode angegeben: Eine Phase von 0,5 entspricht einer halben Periode, 1,0 der vollen Periode. Die Forscher konnten die beiden Komponenten des Systems eindeutig getrennt nachweisen. Der mittlere Messfehler relativ zur Modellkurve beträgt 1,2 bis 1,4 Kilometer pro Sekunde.



SuW-Grafik, nach: Kozłowski, S. et al.: BACHES – A Compact Echelle Spectrograph for Radial Velocity Surveys with Small Telescopes. In: MNRAS 443, S. 158–167, 2014, Fig. 16



Die Sterne A und B eines engen Systems verraten sich durch die dunklen Linien im Spektrum des Gesamtlichts. Infolge des Doppler-Effekts scheinen sich die Linien periodisch aufzuspalten und wieder miteinander zu verschmelzen. Eine Bewegung auf den Beobachter zu entspricht einer Blauverschiebung der Linien, eine Bewegung von ihm weg einer Rotverschiebung.

Geräte somit nicht. Dennoch können sie in etlichen anderen Forschungsbereichen wertvolle Begleiter sein: So lassen sich die meist deutlich höheren Radialgeschwindigkeiten von spektroskopischen Doppelsternen mit den Echelle-Spektrografen messen und in der Folge die Bahnparameter und Massen der Komponenten bestimmen. Dabei wird die Dopplerverschiebung auf besonders eindrucksvolle Weise deutlich: Haben beide Partner eine ähnlich hohe Leuchtkraft, so sind auch ihre Spektrallinien im Spektrum gleichermaßen zu sehen. Je nach Bahnphase des Umlaufs erscheinen die Linien desselben Elements dann mehr oder weniger deutlich voneinander getrennt; über die Zeit hinweg scheinen sie auseinander hervorzugehen und sich voneinander zu entfernen, bevor sie wieder aufeinander zu laufen und verschmelzen (siehe Grafik oben).

Ferner lassen sich mit den Instrumenten Sternwinde, also ein von der Oberfläche ausgehender kontinuierlicher Materiestrom, sowie Sternpulsationen untersuchen: Der breite Wellenlängenbereich der Geräte erlaubt es, viele Spektrallinien gleichzeitig zu analysieren, die auf unterschiedliche Elemente an verschiedenen Orten im Stern oder in seiner Umgebung zurückgehen. Damit kann der Nutzer auf die dreidimensionale Beschaffenheit von Objekten rückschließen, die bei direkter Beobachtung im Teleskop lediglich als Punktquelle erscheinen.

Man darf also getrost festhalten, dass die Entwicklungen der modernen Astrospektroskopie auch für den Amateurbereich spannend sind – ob man allerdings viele tausend Euro für einen Echelle-Spektrografen investiert, muss man gründlich abwägen.



PAUL HEEREN ist Physiker und promoviert derzeit an der Landessternwarte Heidelberg im Bereich Echelle-Spektroskopie und Exoplaneten.

Literaturhinweise

Eversberg, T.: Sternwindtango auf Teneriffa. In: *Sterne und Weltraum* 12/2009, S. 70–75

Eversberg, T.: Spektroskopische Abenteuer. In: *Sterne und Weltraum* 7/2012, S. 76–84

Eversberg, T., Vollmann, K.: Spectroscopic Instrumentation. Fundamentals and Guidelines for Astronomers. Springer Verlag, Heidelberg 2015

Eversberg, T.: Off-the-shelf Echelle Spectroscopy: Two Devices on the Test Block. In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 128, S. 1–6, 2016

Gerstheimer, R.: Astrophysik mit dem Lichtspalter. In: *Sterne und Weltraum* 2/2012, S. 72–80

Kozłowski, S. et al.: BACHES – A Compact Échelle Spectrograph for Radial Velocity Surveys with Small Telescopes. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 443, S. 158–167, 2014

Lemke, D.: Dunkle Linien im Farbenbild der Sonne. Teil 1: Fraunhofer – Handwerker, Wissenschaftler, Unternehmer. In: *Sterne und Weltraum* 12/2014, S. 46–57

Lemke, D.: Dunkle Linien im Farbenbild der Sonne. Teil 2: Fraunhofers Linien – Schlüssel zur Astrophysik. In: *Sterne und Weltraum* 1/2015, S. 44–53

Mugrauer, M. et al.: FLECHAS – A New Échelle Spectrograph at the University Observatory Jena. In: *Astronomische Nachrichten* 335, S. 417–427, 2014

Pribulla, T. et al.: Affordable Échelle Spectroscopy with a 60 cm Telescope. In: *Astronomische Nachrichten* 336, S. 682–689, 2015

Schanne, L.: Doppelsternen auf der Spur. In: *Sterne und Weltraum* 7/2010, S. 68–75

Dieser Artikel und Weblinks im Internet:
www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1546433

W I S Didaktische Materialien:
www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1421033

Spektrum LIVE

VERANSTALTUNGSREIHE ZUM
40-JÄHRIGEN JUBILÄUM DES VERLAGS
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

In unserem Jubiläumsjahr laden wir Sie zu spannenden Vorträgen, lehrreichen Seminaren und Workshops ein. Lernen Sie Wissenschaft mit **Spektrum** in einem neuen Format kennen – live!

Auftakt der Veranstaltungsreihe mit einem Vortrag des Geruchsforschers

Prof. Hanns Hatt

Die Macht der Düfte

Welche Rolle spielen Riechrezeptoren außerhalb der Nase?

Wann? 12. April 2018, 19.00 Uhr

Wo? MAINS Mathematik-Informatik-Station,
Kurfürstenanlage 52, 69115 Heidelberg

Eintritt frei! Anmeldung unter live@spektrum.de

Teilchenphysik für jedermann

Leitung: Prof. Matthias Schott

Wann? 25. Mai 2018, 10.00–18.00 Uhr

Wo? Institut für Physik, Johannes Gutenberg- Universität Mainz

In diesem eintägigen Workshop konstruieren und betreiben die Teilnehmer einen eigenen Detektor und weisen kosmische Höhenstrahlung nach. Spezielle Vorkenntnisse sind nicht erforderlich.

Jetzt anmelden!

Spektrum.de/live