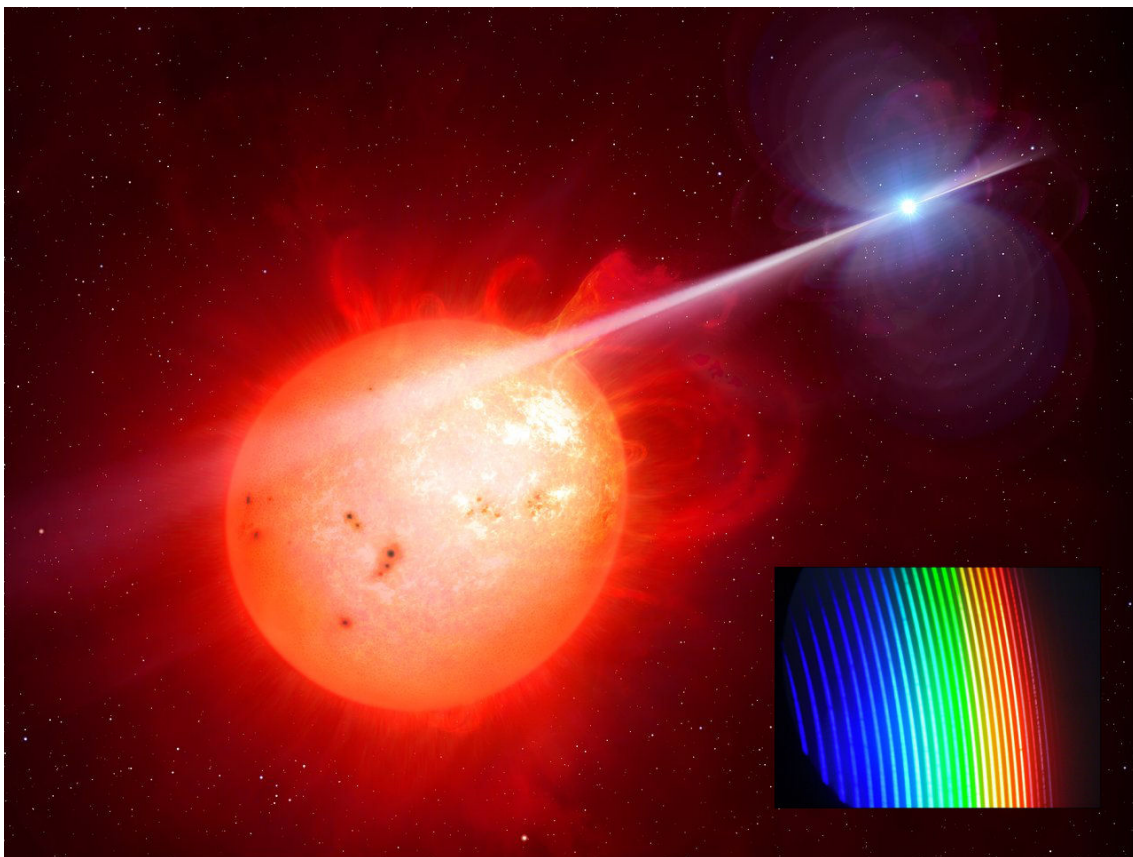


Das ganze Spektrum in einem Schuss

Echelle-Spektroskopie für Amateurastronomen

Wissenschaft muss nicht etwas für Profiastronomen bleiben – dank wachsender Kenntnisse bei Amateuren und erschwinglicher Instrumente können auch Amateure weit vorne mitmischen. Echelle-Spektrografen eröffnen Sternfreunden viele neue Möglichkeiten für faszinierende Messungen. Aber was kann man damit wissenschaftlich erreichen? Und sind Instrumente von der Stange der beste Weg?

Thomas Eversberg - Februar 2017



Viele Doppelsternsysteme lassen sich nur mit Hilfe von Spektrografen durch die Doppler-Verschiebungen ihrer Spektrallinien identifizieren. Ein Echelle-Spektrograf bietet dabei den entscheidenden Vorteil, dass er einen extrem breiten Wellenlängenbereich in hoher Auflösung abbildet – Und somit viele verschiedene Linien zur Messung von Radialgeschwindigkeiten genutzt werden können (Wikipedia, Thomas Eversberg/Klaus Vollmann).

Die Spektroskopie ist das Paraded Pferd wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns. Wir wüssten ohne spektroskopische Messungen weder, wie die Sonne ihre Energie erzeugt, noch wäre uns die kosmologische Struktur des Universums bekannt. Kurz: Ein Verständnis unserer Welt wäre unmöglich. Mit Spektrografen für Amateurastronomen kann dieses zentrale Werkzeug auch an sehr kleinen Fernrohren eingesetzt und damit echte Forschung betrieben werden. Die Bürgerwissenschaft, auch »Citizen Science« genannt, ist prinzipiell also zumindest in der Stellerastronomie an vorderster Front angekommen: Amateure müssen sich nicht mehr auf die

Auswertung bereits online zur Verfügung gestellter Daten beschränken, sondern können selbst aktive Wissenschaft betreiben. Professionelle Astronomen sprechen deshalb bereits von einer neuen Ära in der astronomischen Forschung.

Interessanterweise begegnen aber selbst erfahrene Amateurastronomen der Spektroskopie mit großem Respekt: Viele nehmen sie als komplex, wenig verständlich und schwer durchführbar wahr. Auf die nötigen Instrumente trifft das jedoch nicht zu, denn kleine Spektrografen sind lediglich eine Anordnung optischer Elemente von der Stange. Im Selbstbau sind sie sogar recht preisgünstig – schon eine CCD-Kamera kostet deutlich mehr. Indes, spektroskopische Messungen und die Reduktion und Interpretation der Daten sind durchaus anspruchsvoll und bedürfen eines signifikanten Arbeitsaufwands und einer permanenten Lernbereitschaft. Wer aber schließlich ein gewisses Niveau erreicht, spielt plötzlich in einer Liga mit der professionellen Wissenschaft.

Ein zentrales Problem astronomischer Forschung stellen die begrenzten Beobachtungszeiten an größeren Teleskopen dar – vor allem, wenn physikalische Effekte nur in längeren Zeiträumen erkennbar werden. So kann es vorkommen, dass Wissenschaftler kurzfristige Helligkeitsschwankungen bei Sternen messen, wie sie durch Sternwinde, kurzperiodische Doppelsterne, Magnetfelder oder Pulsationen verursacht werden. Das bedeutet dann aber noch nicht, dass diese Schwankungen nicht auch langfristigen Änderungen unterworfen sind, wie sie bei einigen anderen Sterntypen bekannt sind. Allerdings arbeitet kein Profiastronom Monate bis Jahre für Daten eines Objekts, um dann nur eine einzige Publikation zu schreiben. Deshalb sind in diesen Fällen Amateursternwarten besonders gefragt. Seitdem sich die Spektroskopie in der Amateurszene etabliert hat, wurden zahlreiche Messungen auf Profiniveau durchgeführt und deren Ergebnisse auch professionell veröffentlicht.

Das ganze Spektrum in einem Schuss

Die Entwicklung erhielt in den letzten Jahren einen weiteren Schub, da nun auch so genannte Echelle-Spektrografen von Amateuren für kleine Fernrohre gebaut wurden und fertige Geräte im Amateurmarkt erhältlich sind (siehe Anhang). Gegenüber den weiter verbreiteten Standard-Spektrografen, die auf den jeweils zu nutzenden Spektralbereich eingestellt werden müssen, liegt hier der Vorteil eines Echelle-Spektrografen: Er kann ohne bewegliche Teile und in einer einzigen Aufnahme das gesamte visuelle Spektrum eines Zielobjekts aufnehmen – und das in sehr hoher Auflösung. Abbildung 1 zeigt dies an einem Echelle-Spektrum des Be-Sterns zeta Tauri aufgenommen vom Amateur Joan Guarro Flo mit seinem Selbstbau-Echelle in Barcelona.

Auf den ersten Blick scheint es sich um ein Spektrum niedriger Auflösung zu handeln. Tatsächlich zeigen die beiden Wellenlängenausschnitte, dass es sich um ein hochaufgelöstes Echelle-Spektrum handelt, welches verschiedene atomare Linien simultan abbildet. Somit können mehrere Spektrallinien und ihre Erzeugungsorte und –prozesse gleichzeitig untersucht werden. Es eröffnen sich also interessante Einsatzmöglichkeiten zur Untersuchung stellarer Effekte, die dem Amateur bisher verschlossen blieben. Die folgenden Beispiele sollen den großen Wert der Echelle-Spektroskopie für die astronomische Forschung aufzeigen.

Die Umgebung eines Sterns bestimmen

Wenn man mit einem Echelle-Spektrografen gleichzeitig viele Effekte in unterschiedlichen Atomlinien beobachten kann, hat das unter anderem direkte Konsequenzen auf die geometrische Interpretation von Sternumgebungen, insbesondere wenn sie Material durch Sternwind abwerfen, wie das massereiche Sterne tun: Die Anregungsenergien der Linien im Spektrum eines Sterns erlauben Rückschlüsse darauf, welche Temperaturen das sie erzeugende Gas hat. Und weil die

Sternwindtemperatur vereinfacht gesagt mit dem Abstand vom Stern abnimmt, hat man damit einen Messparameter für die lokale Sternumgebung.

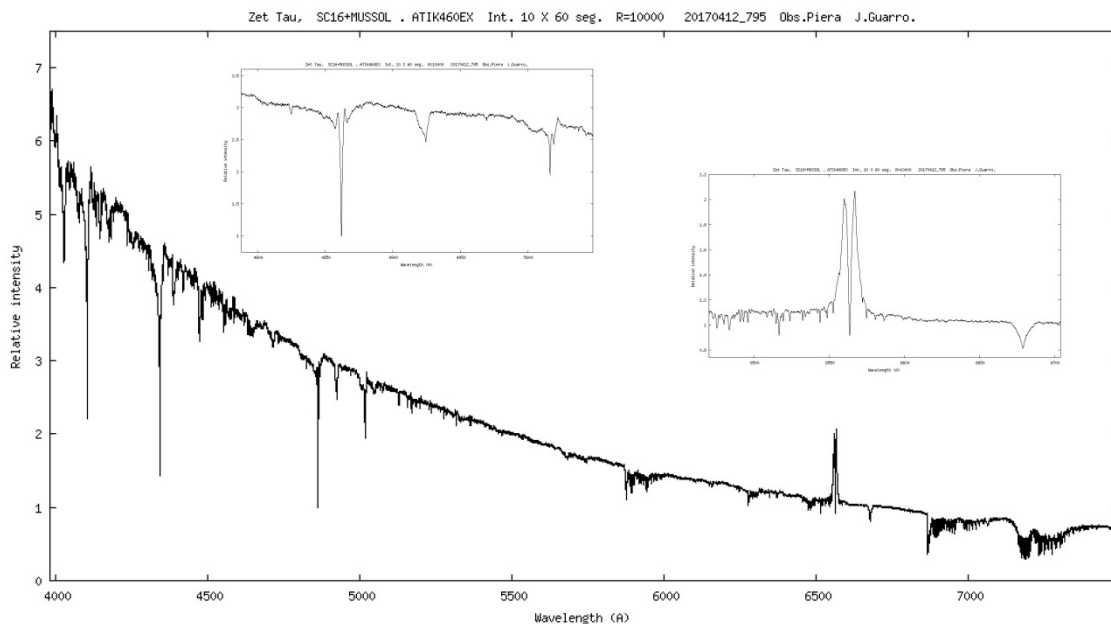


Abb. 1: Echelle-Spektren können den gesamten optischen Wellenlängenbereich in einer Aufnahme abbilden (Joan Guarro Flo).

Auf diese Weise untersuchen Astronomen Be-Sterne wie zeta Tauri aber auch O- und Wolf-Rayet-Sterne, die sich evolutionär aus O-Sternen entwickeln. Diese Giganten besitzen bis zu 100 Sonnenmassen und leuchten Millionen mal heller als die Sonne. Dadurch entwickeln sie einen



Abb. 2: Wolf-Rayet-Sterne sind überaus massereich und erzeugen einen starken Sternwind, der nahe am Stern optisch dicht ist. Um einige dieser Objekte lassen sich spiralförmige Windstrukturen beobachten, die entstehen, wenn schnelle Windanteile eines rotierenden Sterns mit den langsameren bei Überschallgeschwindigkeit kollidieren.

extremen Sternwind, der rund eine Milliarde Mal stärker ist als der Sonnenwind. Bei Wolf-Rayet-Sternen ist der Wind bis zu einer Distanz von etwa zwei Sternradien vom Zentralgestirn sogar optisch dick – ihre Photosphäre ist also unsichtbar. Seit rund 30 Jahren ist nun bekannt, dass O-Sterne spiralförmige Windstrukturen aufweisen. Diese gehen aus heißen Flecken höherer Leuchtkraft hervor, von denen der Sternwind mit höheren Geschwindigkeiten ausgeht. Durch die Rotation des Sterns kollidieren die lokal schnellen Windregionen bei Überschallgeschwindigkeit (rund 2000 Kilometer pro Sekunde) mit dem »langsamen« Wind, was spiralförmige Dichteerhöhungen des Windplasmas erzeugt. Vor einiger Zeit entdeckten Astronomen solche Strukturen auch bei Wolf-Rayet-Sternen, jedoch nur über relativ kurze Zeiträume (Abb. 2). Deren Spiralen erstrecken sich hinunter bis zur Photosphäre. Deshalb ist es möglich, sie spektroskopisch als Sonde durch die undurchsichtige zentrale Windregion rund um den Gasriesen zu nutzen: Erscheinen die Strukturen in verschiedenen Elementlinien in gewissen periodischen Abständen, so lassen sich Informationen über die Rotation des Sterns, die Position heißer Flecken und eventuell sogar über das Sterninnere gewinnen.

Allerdings nehmen solche Messungen viel Beobachtungszeit in Anspruch und erfordern eine zeitlich lückenlose Überwachung des Objekts. Deshalb schlossen sich im Jahr 2013 sechs Profi- und vier Amateursternwarten aus der ganzen Welt zusammen, um den Wolf-Rayet-Stern WR 134 simultan zu beobachten. Der untersuchte Stern steht im Sternbild Schwan und ist rund acht Magnituden hell. Somit konnten ihn schon sehr kleine Teleskope spektroskopisch vermessen – und das sogar in urbanen Gegenden: Und so kam es, dass Dong Li in der 13-Millionen-Einwohner-Metropole Tianjin an seinem Celestron C11 vom Dach seines Wohnhauses umgeben von Wolkenkratzern unter einem unmöglichen Seeing (Abb. 3) zusammen mit Grant Hill am 10 Meter Keck-Teleskop auf Hawaii Daten für diese Messungen lieferte. Beide trafen sich dann als Koautoren der entsprechenden Publikation.



Abb. 3: Sogar in einer städtischen Umgebung mit extrem viel Streulicht und extrem schlechtem Seeing sind noch verlässliche spektroskopische Messungen möglich: Der Amateurastronom Dong Li beobachtete auf seinem Hausdach in der chinesischen 13-Millionen-Einwohner-Stadt Tianjin einen Wolf-Rayet-Stern mit seinem Spektrografen (Dong Li).

Aus den aufgenommenen Spektren ermittelten die Forscher die Positionen charakteristischer Linien und trugen sie über die Zeit auf. Eine periodische Verschiebung einer Linie hin zu kleineren und größeren Wellenlängen entspricht dann aufgrund des Dopplereffekts einer Rotation des Sterns mit derselben Periode. Überraschenderweise ließen die Messergebnisse auf nur zwei Spiralstrukturen im Sternwind schließen. Eine genauere Analyse der Daten ergab, dass diese um etwa 90 Grad in der geografischen Länge und um rund 50 Grad in der Breite getrennt waren (Abb. 4). Der Einsatz mehrerer Echelle-Spektrografen in der Kampagne ermöglichte es außerdem, diese Effekte auch in Linien mit unterschiedlichen Anregungsenergien zu beobachten – also bei verschiedenen Temperaturen. Daraus konnten die Forscher, wie oben erklärt, die Ausdehnung der Spiralen auf mindestens 30 Sternradien bestimmen. Zudem zeigten sie, dass diese Strukturen in einen

turbulenten, geklumpten Wind eingebettet sind und etwa 40 Tage lang existieren, also für rund 18 Rotationen (Abb. 4). Ob die Strukturen zyklisch kommen und gehen, konnten die Astronomen allerdings nicht herausfinden – selbst die ausgedehnte Beobachtungszeit von 120 Tagen war dafür zu kurz.

Radialgeschwindigkeiten ganz genau messen

Eine weitere Besonderheit von Echelle-Spektrografen ist deren hohe Genauigkeit bei der Messung von Radialgeschwindigkeiten. Diese beschreiben die Bewegung eines astronomischen Objekts, z.B. eines Sterns, entlang der Sichtlinie zum Beobachter.

Astronomen bestimmen die Radialgeschwindigkeit über den Dopplereffekt: Demnach entspricht eine Verschiebung von Absorptionslinien in einem Spektrum hin zu kleineren Wellenlängen einer Bewegung des vermessenen Objekts auf uns zu, und umgekehrt (Blau- und Rotverschiebung). Ein Standard-Spektrograf mit hoher Auflösung bildet aber bei jeder Messung nur ein schmales Spektrum mit wenigen Linien ab, die gemittelte Radialgeschwindigkeiten liefern. Erst der Echelle-Spektrograf ermöglicht es, einen breiten Wellenlängenbereich von vielen hundert Angström bei gleichzeitig hoher Auflösung aufzunehmen. So stehen bei der Messung hunderte, manchmal gar tausende Spektrallinien zur Verfügung, was den Fehler der berechneten Radialgeschwindigkeit statistisch extrem verringert: Die Genauigkeit verbessert sich nämlich mit der Wurzel aus der Anzahl

gemessener Linien. Wertet der Beobachter also statt nur einer Atomlinie gleich deren 900 aus, so kann er die zugehörigen Radialgeschwindigkeiten 30-mal genauer bestimmen. Aus diesem Grund sind Echelle-Spektrografen gefragt, wenn es bei Messungen auf hohe Präzision besonders ankommt, zum Beispiel bei Doppelsternen und Exoplaneten. So wurde der erste Planet außerhalb des Sonnensystems um den Stern 51 Pegasi mit dem Echelle-Spektrografen ELODIE am 1,93-Meter-Teleskop des Observatoire de Haute-Provence entdeckt, indem rund 5000 Absorptionslinien analysiert wurden! Allerdings spielte in diesem Fall nicht nur der Spektrograf eine entscheidende Rolle: Erst die stabilisierenden Maßnahmen an der eingesetzten Faseroptik und die Instrumentenkontrolle durch eine permanente interne Kalibration inklusive thermischer Stabilisierung ermöglichten die Entdeckung.

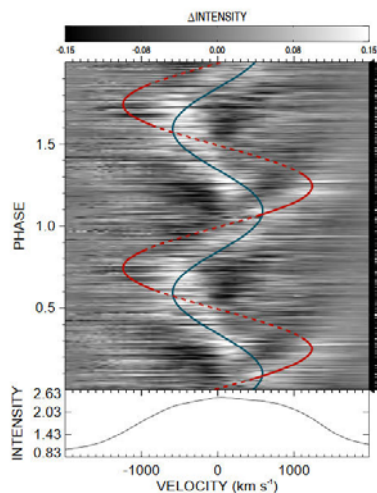


Abb. 4: Um den Wolf-Rayet-Stern 134, den eine Kampagne aus Profi- und Amateurastronomen untersuchte, existierten zu diesem Zeitpunkt zwei spiralförmige Windstrukturen. Diese wanderten an unterschiedlichen geografischen Breiten durch den Sternwind, wie die versetzten Schwingungen in der Helium-II-Linie bei 5411 Angström zeigen (Emily Aldoretta).

Kaufen oder bauen?

Wer sich für die Echelle-Spektroskopie entscheidet, braucht auch den passenden Spektrografen. Auch hier bieten sich der Kauf und der Selbstbau an. Geräte aus dem Handel sind Plug-and-Play-Systeme inklusive Nachführ- und Kalibrationseinheit und entsprechender Datenreduktions-Software. Das macht die Sache einfach, wird jedoch mit einem relativ hohen Preis erkaufte. Ein Selbstbau erfordert Hirnschmalz, einigen Arbeitsaufwand und die Anpassung frei verfügbarer Software, reduziert die Kosten jedoch erheblich.

Zwei Spektrografen im Markt

Die populärsten käuflichen Echelle-Spektrografen für kleine Teleskope sind der BACHES der Firma Baader Planetarium und der eShel der Firma Shelyak Instruments. Leider gibt es für den extrem kleinen Spektroskopie-Markt kaum Gerätetests, obwohl beide Hersteller hohe Preise verlangen: So kostet der BACHES rund 12.500 Euro, der eShel schlägt sogar mit etwa 17.000 Euro zu Buche. Nun liegen für die beiden Instrumente Untersuchungen durch professionelle Astronomen vor, die einen neutralen Einblick in ihre Leistungsfähigkeit liefern. Damit lassen sich die Datenqualität, die Stabilität und der Gebrauchswert für Profis und Amateure hinsichtlich der jeweiligen Forschungsziele abschätzen.

Die Systeme (Abb. 5 & 6) kommen mit kompletten und auch für den Amateur leicht handhabbaren Datenreduktionspaketen. Sie unterscheiden sich grundlegend in ihrem Aufbau und in ihrer Anwendungsphilosophie: Der BACHES arbeitet direkt im Teleskopfokus, das komplette Gerät muss also am Teleskop angebracht werden. Der eShel hingegen wird über eine flexible Faseroptik gefüttert, so dass das Gerät wie bei den Profis stationär und temperaturstabilisiert betrieben werden kann.



Abb. 5: Das BACHES-Seriengerät mit Nachführ- und Kalibriereinheit sowie das geöffnete Vorseriengerät (Baader Planetarium, CAOS Group ESO/MPG).

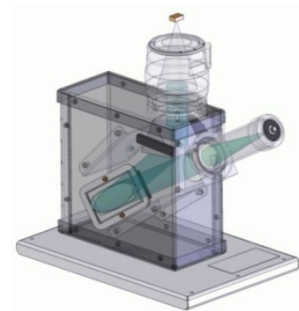
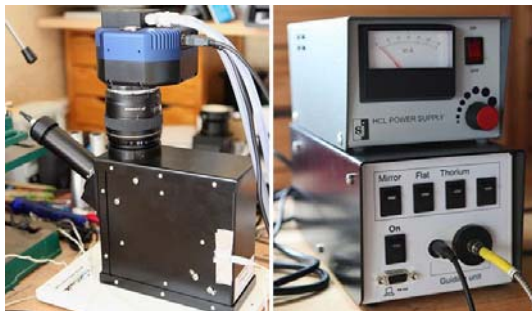


Abb. 6: Ansicht des eShel und seiner Kalibrationseinheit sowie die transparente Ansicht des geöffneten Seriengeräts (Shelyak Instruments).

Die optischen Konfigurationen der beiden Geräte definieren deren Leistungen. So beträgt das bei BACHES über alle Ordnungen gemittelte maximale Auflösungsvermögen $\lambda/\Delta\lambda$ etwa 20.000. Das heißt, dass sich bei einer bestimmten Wellenlänge noch Spektrallinien voneinander getrennt auflösen lassen, die nur ein 20.000-stel dieser Wellenlänge voneinander entfernt im Spektrum liegen.

Um die Messgenauigkeit von Radialgeschwindigkeiten zu testen, wurden für beide Spektrografen verschiedene Messreihen analysiert. Der Betrieb des BACHES direkt am sich bewegenden Teleskop wirkt sich signifikant auf seine Messgenauigkeit aus. Es zeigte sich, dass der eShel rund 20mal genauere Radialgeschwindigkeiten liefert als der BACHES. Man sollte nun meinen, dass solche Abweichungen von Kalibrationsspektren kompensiert werden können (Messung vor und nach der Datenaufnahme). Doch dem ist nicht so! Auch die Kalibrationsspektren des BACHES zeigen relativ große Verschiebungen. Ein Echelle-Spektrograf sollte beim Betrieb nicht bewegt werden.

Außerdem driften die Positionen der Kalibrationslinien beim BACHES um rund 2km/s pro °C und beim eShel um rund 0.75 km/s pro °C. Nächtliche Temperaturschwankungen am Teleskop sind für den BACHES also verheerend während ein in einer isolierten Kiste stabilisierter eShel exzellente Genauigkeiten liefern kann. Ein Echelle-Spektrograf sollte beim Betrieb temperaturstabil betrieben werden.

Ihre mittleren spektralen Auflösungsvermögen können beide Geräte nur bei perfekten Beobachtungsbedingungen und perfekter Instrumentenanpassung an das Teleskop erreichen. BACHES liefert ein um 2/3 höheres über alle Ordnungen gemittelt spektres Auflösungsvermögen als eShel. Allerdings arbeitet er mit einem optischen Spalt und einem relativ kleinen Kollimator. Beide limitieren ihn damit auf Teleskope bis etwa 2,5 Meter Brennweite und etwa 25 Zentimeter Durchmesser bei einem in Mitteleuropa typischen Seeing von 2 Bogensekunden. Da der eShel stationär betrieben wird, kann der Nutzer den Spektrografen besser vor thermischen und mechanischen Einflüssen schützen, indem er ihn beispielsweise in einem abgeschlossenen Raum mit stabilisierter Temperatur betreibt. Außerdem eliminiert die Faseroptik Seeing-Schwankungen, die die Wellenlängengenauigkeiten reduzieren. Das erlaubt einen vielfältigeren Einsatz des Instruments und verbessert die Messgenauigkeiten signifikant. Der eShel kann ohne Lichtverlust auch an größeren Teleskopen bis 10 Meter Brennweite und 1,5 Meter Durchmesser optimal arbeiten.

Neue Exo-Planeten entdecken?

Exoplaneten sind zurzeit nicht nur bei Profiastronomen ein großes Thema. Können Amateure ebenfalls neue Exoplaneten mit ihren Echelle-Spektrografen entdecken? Die Antwort ist mit großer Wahrscheinlichkeit „Nein“. Um viele Absorptionslinien für Radialgeschwindigkeiten auch bei schwächeren Sternen nutzen zu können, müssen diese bei möglichst hohem Kontrast (Signal-zu-Rausch-Verhältnis - S/N) abgebildet werden. Das wiederum erfordert große Teleskope weil das S/N linear vom Teleskopdurchmesser abhängt. Darüber hinaus erfordern die Messungen kleiner Radialgeschwindigkeiten allerhöchste mechanische und thermische Stabilitäten. In der professionellen Forschung sind diese Instrumente daher immer Einzelanfertigungen für das eingesetzte Teleskop, was zu Preisen im sechsstelligen Bereich und höher führt.

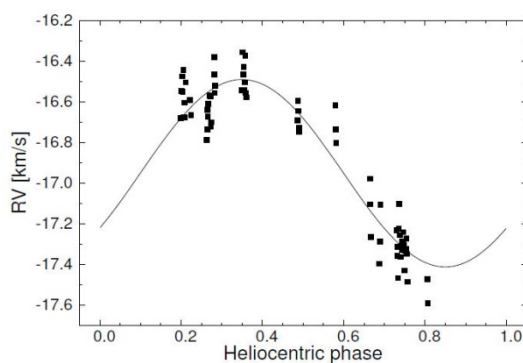


Abb. 7: Mit eShel gemessene Radialgeschwindigkeiten am Stern Tau Bootis (Punkte) sowie der spektroskopische Orbit nach Butler et al. 2006. [10] (Linie). Die Streuung der Datenpunkte beträgt rund 0.4km/s (T. Pribula).

Zeigt ein heller Stern jedoch sehr große von einem Exoplaneten verursachten Dopplerschwankungen, kann dieser u.U. auch von Amateuren gemessen werden. Die Vorteile eines stationären Spektrografenbetriebs zeigen sich an Messungen des Sterns tau Bootis mit dem eShel (Abb. 7), dessen Geschwindigkeitsschwankungen von einem „heißen Jupiter“ verursacht werden. Die geringen periodischen Änderungen bei tau Bootis können mit dem eShel schon an einem 60cm-Teleskop eindeutig verifiziert werden. Analoge Messungen wurden auch schon mit stabilen und temperaturstabilisierten Selbstbaugeräten erzielt.

Wegen seiner Bauweise ist der BACHES zu solchen Messungen nicht in der Lage. Indes, auch dieses Gerät ermöglicht simultane Linienmessungen über den gesamten Spektralbereich und liefern damit

Daten, die dann für die Analyse vieler Spektrallinien genutzt werden können, wie die Beispiele zeta Tauri und WR 134 zeigen. Und auch wenn mit den Geräten keine neuen Exoplaneten entdeckt werden können bleiben immer noch Doppelsterne als spannende Ziele für möglichst genaue

Messungen der Radialgeschwindigkeiten. Ob der um 4500 Euro günstigere Preis des BACHES gegenüber dem eShel seine Defizite kompensiert, muss schlussendlich der Käufer entscheiden.

Zu teuer? Dann selbst bauen

Die Preise für käufliche Geräte sprengen die finanziellen Möglichkeiten der allermeisten Amateure. Trotzdem ist die Echelle-Spektroskopie auch für sie machbar. Wie wäre es mit einem Selbstbau? Obwohl die optischen Randbedingungen bei einem Echelle anspruchsvoller sind als bei einem Standard-Spektrografen, kann man alle Geometrie- und Optikparameter selbst ausrechnen oder gleich der Literatur entnehmen (siehe Eversberg, Vollmann: Spectroscopic Instrumentation – Fundamentals and Guidelines for Astronomers). Darüber hinaus finden sich in der VdS-Fachgruppe Spektroskopie viele Experten, die Unterstützung in Form diverser Werkzeuge und Beratung anbieten. Was daraus hervorgehen kann, zeigt der Echelle-Spektrograf in Abbildung 8. Dieser Holzaufbau eines Mediziners kostete inklusive aller optischen Elemente nur wenige Hundert Euro und ist dabei voll einsetzbar. Das Beispiel zeigt, dass die Echelle-Spektroskopie zwar ein anspruchsvolles Gebiet für den Amateur darstellt, aber trotzdem keine Angelegenheit für Profis und Händler bleiben muss.

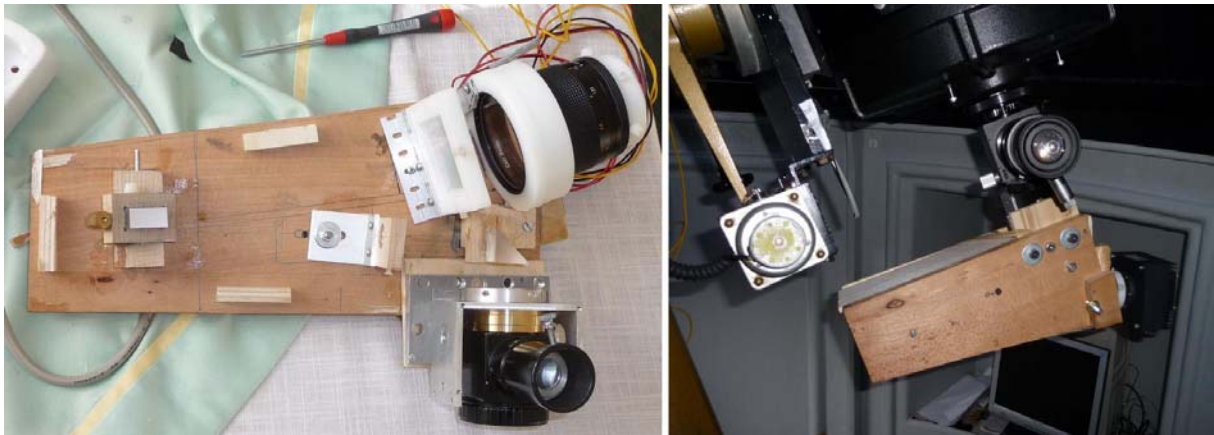


Abb. 8: Gerade für Bastler kann es eine schöne Herausforderung darstellen, einen Echelle-Spektrografen selbst zu konstruieren – was auch hohe Kosten spart. Der Mediziner Berthold Stober baute diesen Prototypen aus Holz und überführte das Design anschließend in einen Aufbau mit Elementen aus einem Metallbaukasten.

Literaturhinweise:

Aldoretta, E. J. et al.: An extensive spectroscopic time series of three Wolf-Rayet stars – I. The lifetime of large-scale structures in the wind of WR 134. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 460, S. 3407 – 3417, 2016

Butler, R. P. et al.: Catalog of nearby exoplanets. In: The Astrophysical Journal 646, S. 505 – 522, 2006

Eversberg, Th.: Einem Wolf-Rayet-Stern auf den Zahn geföhlt. Ergebnisse einer Langzeitkampagne von Amateuren und Profis. In: Sterne und Weltraum 1/2013, S. 68 – 75

Eversberg, Th.: Off-the-shelf Echelle Spectroscopy: Two Devices on the Test Block. In: Publications of the Astronomical Society of the Pacific 128, Nummer 969, 2016 [12]

Eversberg, Th.: Spektroskopische Abenteuer. Ein goldenes Zeitalter für Amateurastronomen. In: Sterne und Weltraum 12/2012, S. 76 – 84

Eversberg, Th.: Sternwindtango auf Teneriffa. Eine professionelle Langzeitbeobachtung mit Amateuren. In: Sterne und Weltraum 12/2009, S. 70 – 75

Eversberg, Thomas, Vollmann, Klaus: Spectroscopic Instrumentation – Fundamentals and Guidelines for Astronomers. Springer Praxis Books, Berlin, 2014 [13]

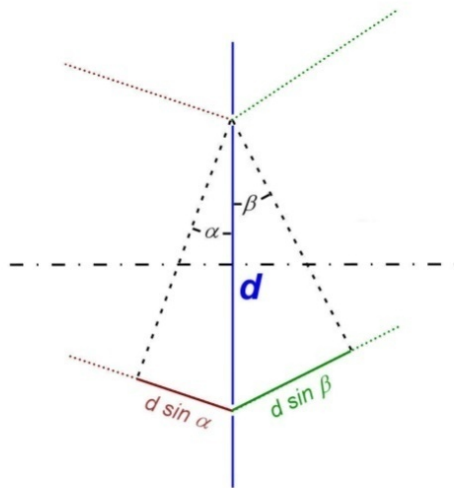
Hattenbach, J.: Deciphering Starlight. In: Sky and Telescope 9/2013, S. 30 – 35

Kozłowski, S. K. 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 [8]

Pribulla, T. et al.: Affordable échelle spectroscopy with a 60 cm telescope. In: Astronomische Nachrichten 336, S. 682 – 689, 2015 [9]

Anhang: Das Arbeitsprinzip von Standard- und Echelle-Spektrografen

Das Grundprinzip der meisten Spektrografen ist die Beugung von Licht an einem so genannten optischen Gitter sowie die Interferenz der entsprechenden Beugungsstrahlen (Prismen-Spektrografen folgen dem Prinzip der Lichtbrechung). Diese Beugungsgitter sind in der Regel transparente Gläser mit mehreren Hundert Beugungselementen (Linien) pro Millimeter (Abb A). Manchmal kommen aber auch Reflexionsgitter zum Einsatz, die eine spiegelartige Oberfläche mit vielen Rillen als Beugungselemente aufweisen.



Eine unter dem Einfallswinkel α einfallende ebene sinusförmige Lichtwelle einer bestimmten Wellenlänge λ wird nach der Beugung bei bestimmten Dispersionswinkeln β sowie den Gitterabständen d zyklisch verstärkt bzw. abgeschwächt (sie interferiert). Dieser Prozess ist völlig analog zu Wasserwellen, die von zwei Ursprüngen ausgehen und miteinander wechselwirken. Da diese Interferenz zyklisch erfolgt, gilt sie auch bei dem ganzzahligen Vielfachen n der Wellenlänge. Daraus ergibt sich die berühmte Gittergleichung (genaue Herleitungen der Gleichung finden sich im Internet).

$$n \cdot \lambda = d \cdot (\sin \alpha + \sin \beta)$$

Abb. A: Geometrische Interpretation zur Interferenzbedingung eines parallel auf zwei Linien einfallenden Lichtstrahls und dessen Beugung an diesen zwei Linien (Thomas Eversberg / Klaus Vollmann).

Um diese Gleichung besser zu verstehen, wählen wir das Koordinatensystem so, dass der Einfallswinkel $\alpha = 0$ sei:

$$n \cdot \lambda = d \cdot \sin \beta$$

Für jeden Dispersionswinkel β ist das Produkt $n \cdot \lambda$ bei vorgegebenem Gitterlinienabstand d also konstant. Das heißt, dass eine bestimmte Lichtwellenlänge β innerhalb einer festen Ordnung in genau eine Richtung β gebeugt wird. Bei höheren Ordnungen wird der Beugungswinkel entsprechend größer. Bei niedrigen benachbarten Ordnungen (kleine Dispersionswinkel) fällt das nicht auf, da diese dann so weit auseinander liegen, dass die beiden Spektren nicht überlappen. Hier messen die meisten Standard-Spektrografen.

Wechselt man aber zu höheren Dispersionswinkeln, rücken die Spektren der einzelnen Ordnungen weiter und weiter zusammen bis sie bei hohen n geometrisch überlappen. Ein spezielles Reflexionsgitter, das Echelle (nach französisch »échelle«: Leiter), kann diese Ordnungen (typischerweise $n > 30$) in hoher Auflösung und hoher Intensität nutzbar machen. Der Echelle-Spektrograf bildet dann in einem schmalen Winkelbereich $\Delta\beta$ viele verschiedene Spektralbereiche $\Delta\lambda$ in mehreren hohen Ordnungen n ab. Die geometrische Überlagerung der einzelnen Spektren führt jedoch dazu, dass eine Punktlichtquelle hinter dem Echelle-Gitter als weißer Spektralstreifen abgebildet wird, denn die addierten Einzelspektren in den verschiedenen Ordnungen sind in Dispersionsrichtung gegeneinander verschoben. Die einzelnen Spektren vermischen sich (Abb. B & C).

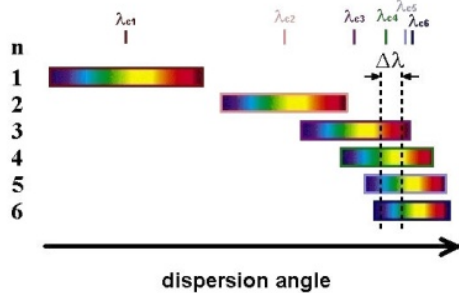


Abb. B & C: In höheren Ordnungen n (hier willkürlich gewählt) wächst der Dispersionswinkel β für eine bestimmte Wellenlänge λ_c , und die zugehörigen Spektren überlappen sich immer weiter. Ein Echelle-Spektrograf nutzt diese hohen Ordnungen, weshalb die Dispersionsabbildung direkt hinter dem Gitter weiß erscheint (Thomas Eversberg/Klaus Vollmann).

Der »Trick« eines Echelle-Spektrographen ist nun der so genannte Cross-Disperser (Querzerleger): Ein weiteres Dispersionselement, beispielsweise ein Prisma, steht im Lichtpfad hinter dem Gitter, mit seiner Dispersionsrichtung senkrecht zur Beugungsrichtung (Abb. D). Die einzelnen Spektren werden daher geometrisch voneinander getrennt und können über eine Kameraoptik abgebildet werden.

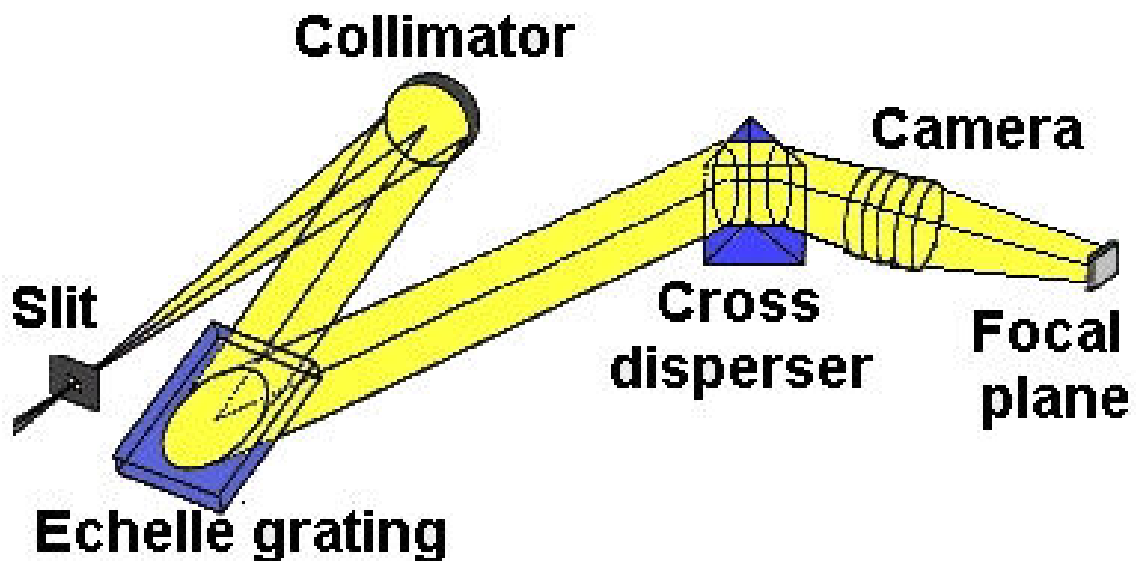


Abb. D: Prinzip eines Echelle-Spektrographen mit Prismen-Cross-Disperser. Das vom Teleskop kommende Licht wird von einem mechanischen Spalt oder einer Faseroptik auf eine einheitliche Länge in Dispersionsrichtung gebracht und von einem Kollimator parallelisiert. Das Echellegitter beugt das Licht in hohen Ordnungen, viele Spektren sind überlagert. Der Cross-Disperser (hier ein Prisma) trennt diese Ordnungen senkrecht zur Dispersionsrichtung des Echellegitters. Die nun zweidimensionale Abbildung aller spektralen Ordnungen wird mit einer Kameraoptik in der Fokalebene abgebildet (Thomas Eversberg / Klaus Vollmann).

Da die abgebildeten Ordnungen verschiedene Wellenlängenbereiche beinhalten, werden sie am Cross-Disperser unterschiedlich stark gebeugt oder gebrochen und somit geometrisch getrennt. Im Kamerafokus dahinter erscheinen sie dann als viele parallel angeordnete Einzelspektren, von denen jedes einen kleinen Wellenlängenbereich abbildet (Abb. E & F). Im Verlauf der Datenreduktion kann

der Nutzer die Ordnungen miteinander verbinden und erhält schließlich ein, ununterbrochenes, hochaufgelöstes Spektrum.

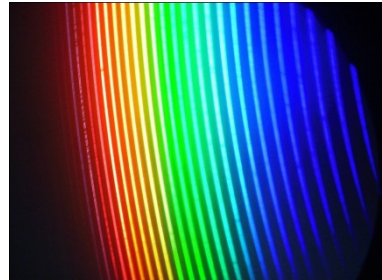
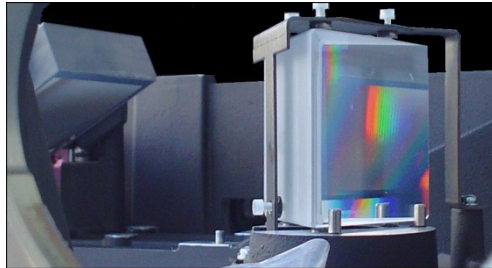


Abb. E & F: Farbige Abbildung vieler Echelle-Spektren unterschiedlicher Ordnung nach dem Durchgang durch einen Prismen-Cross-Disperser (Thomas Eversberg / Klaus Vollmann).

Im Überblick: BACHES Echelle Spektrograf

Hersteller: Baader Planetarium GmbH, www.baader-planetarium.de

Zubehör: Kalibrationseinheit mit Thorium-Argon-Lampe und Halogen-Flatfield-Lampe (optional), Datenreduktionssoftware

Technische Daten: mittleres Auflösungsvermögen ~ 20.000 , Spaltbreiten von 25 μm , 50 μm , Einsatz direkt am Teleskop (f/10 Eingangsstrahl)

Preis: ~ 12.500 Euro für Spektrograf + Kalibrationseinheit

Getestet durch: Kozłowski, S. K. et al., 2014

Messergebnisse: kurzfristige Streuung der Kalibrationslinien bis 6 km/s, hauptsächlich durch mechanische Verwindungen; nächtliche Drift von 18 km/s durch thermische Einflüsse; Genauigkeit der Radialgeschwindigkeiten $\sim 1,3$ km/s (nur durch zusätzliche Stabilisierungen erreichbar)

Im Überblick: eShel Echelle Spektrograf

Hersteller: Shelyak Instruments, www.shelyak.com

Zubehör: Kalibrationseinheit mit Thorium-Argon-Lampe und LED-Flatfield-Lampe (optional), Fiberoptik, Datenreduktionssoftware

Technische Daten: mittleres Auflösungsvermögen ~ 12.000 , Anschluss über Glasfaser mit 50 μm »Spaltdurchmesser«, $\sim f/6$ Eingangsstrahl

Preis: ~ 15.000 Euro für Komplettsystem

Getestet durch: Pribulla, T. et al., 2015

Messergebnisse: nächtliche Drift der Kalibrationslinien bis 0,25 km/s, durch thermische Einflüsse; Genauigkeit der Radialgeschwindigkeiten $\sim 0,4$ km/s