



Astrospektroskopie im Unterricht

– Praktische Umsetzung der Astrospektroskopie mit einem Beugungsgitter –

PETER, HINGSAMER

P.HINGSAMER@GMAIL.COM

Zusammenfassung

Der Einsatz von spektroskopischen Methoden ist in der Astronomie ein wichtiger Grundpfeiler der Informationsgewinnung. Aus den Spektren der Sterne können dabei wichtige physikalische Eigenschaften abgeleitet werden. Spektroskopie wird zwar im Unterricht behandelt, allerdings beschränken sich die praktischen Arbeiten meist rein auf qualitative Aussagen. Im Rahmen dieser Arbeit soll eine Möglichkeit aufgezeigt werden, quantitative Untersuchungen an Sternen im Rahmen des Schulunterrichts durchzuführen. Die dafür benötigten Materialien sind meist vorhanden oder können kostengünstig erworben werden. Trotzdem ist es mit diesem Verfahren möglich, präzise die Eigenschaften von Sternen zu bestimmen und einzelne Elemente und Moleküle in Sternatmosphären nachzuweisen, die sich in mehreren hundert Parsec Entfernung zur Erde befinden.

1 Einleitung

Betrachtet man den Sternenhimmel in einer klaren Nacht, fallen die verschiedenen Sternfarben auf. Besonders das Sternbild des Orion zeigt Sterne, welche von rot (Beteigeuze, α -Ori) über blau (Riegel, β -Ori) bis zu weiß (Gürtelsterne des Orion) übergehen. In diesen Farben steckt sehr viel Information in Form der verschiedenen Intensitäten ihrer einzelnen Wellenlängen.

In der Astronomie ist Spektroskopie die wichtigste Methode um Informationen über Sterne, Planeten und den Kosmos zu erhalten. In der Schule beschränken sich spektroskopische Methoden aber hauptsächlich auf rein qualitative Beurteilung oder benötigen Teleskope (Fischer 2011, Hofschulz 2013).

In Österreich ist Astronomie kein eigenständiges Unterrichtsfach, sondern wird in den Lehrplänen der Physik behandelt. Doch durch die starke Vernetzung und vielen Berührungspunkte von Astronomie und Biologie, Chemie und Physik kommen viele Themen der Astronomie im regulären naturwissenschaftlichen Unterricht vor.

Hier sei vor allem der Bereich der Astrophysik hervorzuheben, welcher am Schnittpunkt der Astronomie und Physik zu finden ist. Astrophysik beschäftigt sich u. a. mit elektromagnetischen Wellen und deren Analyse und versucht damit Aussagen über kosmische Objekte zu treffen (Clausnitzer 2021).

Ein weiterer Grund für das Einbauen astronomischer Themen ist die Motivation der Schüler*innen: Astronomie gilt als eines der beliebteren Themen im Physikunterricht (Hochwarter 2017).

In dieser Arbeit soll eine für Lehrer*innen einfach durchzuführende Methode vorgestellt

werden, Astrospektroskopie im Rahmen des Unterrichts durchzuführen und die gewonnenen Spektren zu analysieren.

2 Hintergrund

Sternentstehung und ihr Leben auf der Hauptreihe

Als notwendige Voraussetzung für die Sternentstehung gelten zwei Faktoren: Eine dichte Gaswolke (ab 300 Moleküle pro Kubikmeter) und eine maximale Temperatur von 30 K. Sind diese Voraussetzungen gegeben, kann sich das Gas unter dem Einfluss der Gravitation immer weiter verdichten. Durch die zunehmende Verdichtung wird die Gravitationsenergie immer mehr in Wärmeenergie umgewandelt. Die Photonen können ab einem gewissen Grad nicht mehr die Gaswolke verlassen und die Temperatur steigt an. Es entsteht ein Protostern. Dieser hat bereits die Oberflächentemperatur eines Sterns, allerdings findet noch keine Kernfusion statt. Kann der Stern nun noch mehr Materie aufnehmen und seine Kerntemperatur steigt auf ca. 10^7 K an, setzt die Kernfusion ein und der Stern beginnt sein Leben auf der Hauptreihe (Bennett, Donahue et al. 2010).

Der Stern verbringt üblicherweise einen Großteil seines Lebens auf der Hauptreihe, wo das Wasserstoffbrennen vorherrscht. Abhängig von ihrer Masse verbleiben Sterne im Bereich 10^6 bis mehr als 10^{11} Jahre auf dieser. Die Lebensdauer ist abhängig von der Sternmasse. Es gilt, je größer die Masse umso kürzer die Lebenszeit eines Sterns, da massereiche Sterne heißer und damit auch heller brennen (Bennett, Donahue et al. 2010).

Spektralklassen und Hertzsprung-Russel Diagramm

Anhand ihrer Leuchtkraft und der Zusammensetzung des Lichts können Sterne in verschiedene Sternklassen eingeteilt werden (siehe Tab. 1). Hierfür gibt es für jede Sternklasse charakteristische Elemente und Moleküle, die zur Einteilung genutzt werden können (Kaler 1994). Diese Elemente sind typisch für die jeweilige Temperatur und damit auch für die Masse des Sterns. Aufgrund dieses Zusammenhangs kann das Hertzsprung-Russel Diagramm erstellt werden. Dieses setzt die Leuchtkraft mit der Temperatur, und damit der Sternklasse, in ein Verhältnis. Für Sterne auf der Hauptreihe lassen sich zusätzlich Informationen über die Sterngröße und Masse ablesen. Damit ist es möglich, ausgehend von der Sternklasse, Rückschlüsse auf Masse, Lebensdauer, Temperatur und Größe eines Sterns zu ziehen (Bennett, Donahue et al. 2010).

Typ	Linien	Temp [10^3 K]	Bsp
O	He II	28,0 – 50,0	Gürtelsterne des Orion
B	He I	9,9 – 28	Rigel
A	H	7,4 – 9,9	Vega
F	H Metalle	6,0 – 7,4	Polaris
G	Ca II, Metalle	4,9 – 6,0	Capella, Sonne
K	Ca I+II, Moleküle	3,5 – 4,9	Aldebaran
M	TiO	2,0 – 3,5	Beteigeuze

Tab. 1: Die Hauptgruppen der Harvard-Spektraltypen (Kaler 1994). Typ: Spektraltyp, Linien: Charakteristische Linien im Spektrum, Temp: Oberflächentemperatur, Bsp.: Beispiele.

Verlassen Sterne die Hauptreihe aufgrund des zuneigehenden Wasserstoffvorrats, haben sie, ausgehend von der Masse, verschiedene Entwicklungsrichtungen. Bei massearmen Sternen ist dies das Ende als weißer Zwerg, massereiche Sterne sterben in einer Supernova. Bevor es jedoch zu einer Supernova kommt, werden diese Sterne zu roten Überriesen. Diese Überriesen sind verhältnismäßig kühl, wodurch sich auch Moleküle wie Titanoxid bilden können (Kaler 1994).

Entstehung von Spektren

Regen Photonen Elektronen an, können sie diese auf ein höheres Energieniveau heben. Fallen Elektronen von einem höheren auf ein niedrigeres Energieniveau wird elektromagnetische Strahlung frei. Diese Energie ist genau definiert

und entspricht der Energiedifferenz der einzelnen Schalen. Die Menge der Energie ist genau mit einer Wellenlänge verbunden, welche in einem Spektrum als Absorptions- oder Emissionslinie sichtbar ist. Diese Linien können genau einem Element bzw. Molekül zugeordnet werden (Kaler 1994).

Im Inneren eines Sterns entsteht die Strahlung, welche aufgrund des hohen Drucks und der hohen Temperatur ein kontinuierliches Spektrum aufweist. Dies wird im ersten Kirchhoffschen Gesetz beschrieben:

(1) Gase unter hohem Druck und Festkörper erzeugen bei hoher Temperatur ein kontinuierliches Spektrum.

Die beiden weiteren Gesetze beziehen sich auf die Entstehung der Spektren, welche in der Sternatmosphäre ausgebildet werden:

(2) Heiße Gase geringer Dichte erzeugen ein Emissionsspektrum.

(3) Ein Kontinuum wird nach dem Durchgang durch ein Gas mit geringer Dichte ein Absorptionsspektrum aufweisen (Kaler 1994).

Ein weiterer Zusammenhang, der mit Hilfe von Spektren beschrieben werden kann, ist die Verschiebung der Maxima bei kälteren Sternen zu größeren Wellenlängen. Diese folgen der Planck-Verteilung für schwarze Körper und können theoretisch berechnet werden (siehe Abb. 1) (Kaler 1994).

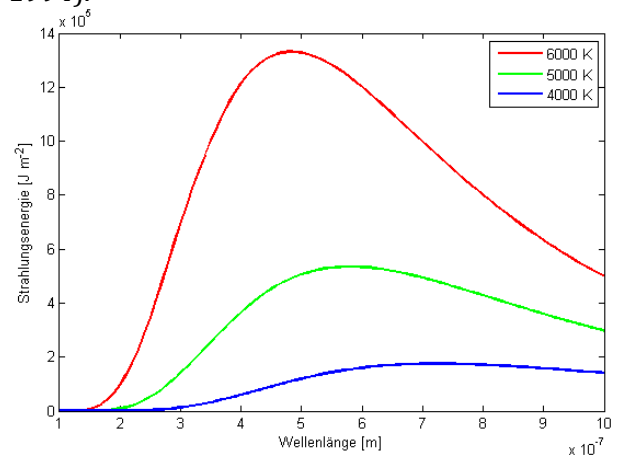


Abb. 1: Planck Verteilung für schwarze Körper bei verschiedenen Temperaturen

3 Material und Methoden

Material Übersicht

Im Allgemeinen werden von Amateuren, um Spektren von Sternen im Bereich des sichtbaren Lichts aufzunehmen, ein Beugungsgitter und eine Digitalkamera sowie etwaige Adapter benötigt. Zusätzlich ist für eine quantitative Auswertung eine geeignete Software empfehlenswert.

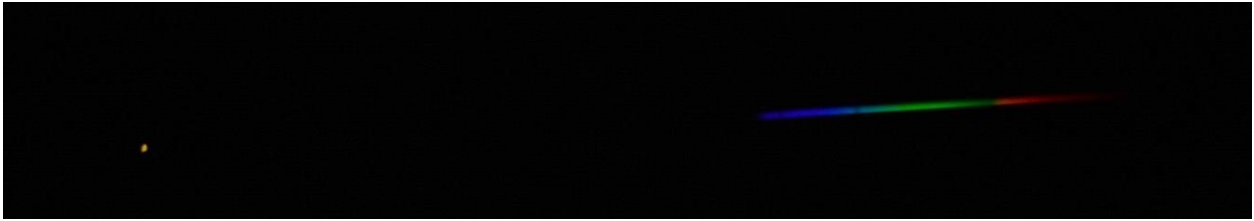


Abb. 2: Aufnahme des Spektrums von Vega. Punkt Links Beugung 0. Ordnung, Spektrum links 1. Ordnung. (Nikon D5200: 105 mm; 1"; ISO 1000)

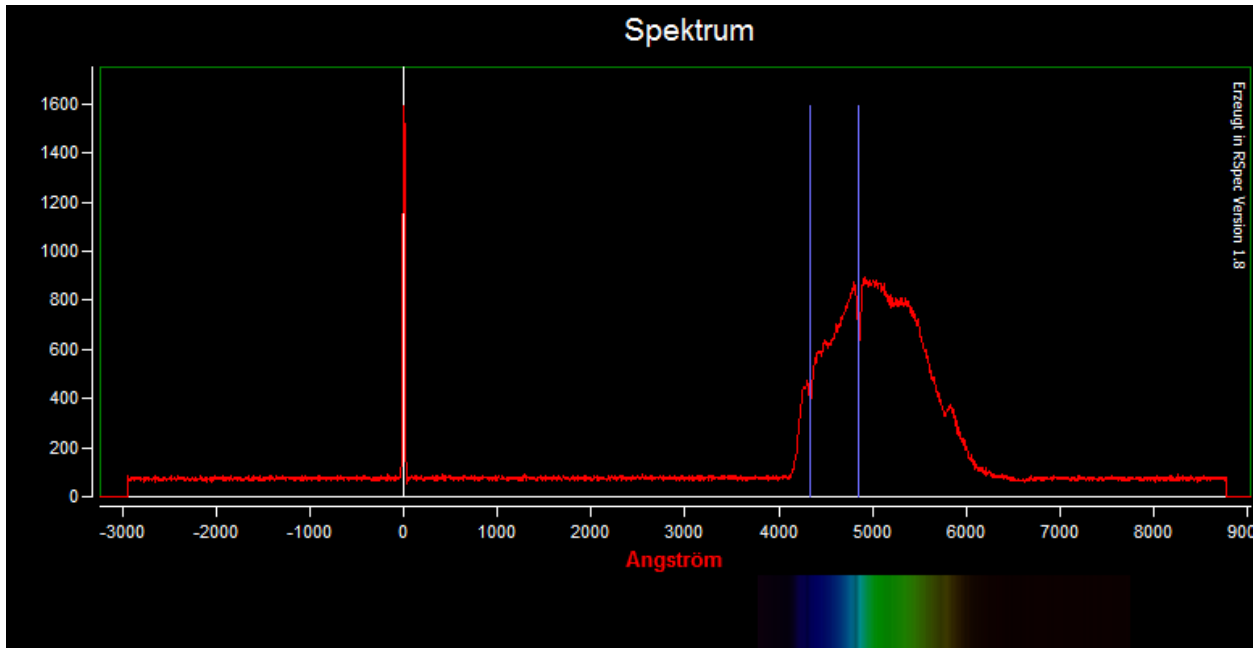


Abb. 3: Prozessiertes Spektrum von Vega (α Lyrae; rot). Die blauen Linien zeigen die für einen Stern der Klasse A typischen H γ -Linie (links, 4340 Å) und H β -Linie (rechts, 4861 Å) Linien. Die Abbildung wurde mit dem Foto aus Abb. 1 erstellt.

Im Rahmen dieser Arbeit soll das Vorgehen zur Aufnahme und quantitativen Analyse eines Sternenspektrums anhand des Star Analyser 100 und der Software RSpec beispielhaft dargestellt werden. Im ersten Schritt werden folgende Materialien benötigt (in Klammer sind die jeweiligen Richtpreise angegeben):

- Star Analyser 100 (150 €)
- Digitalkamera (ab 50 €)
- Adapterringe
- RSpec (Vollversion 109 €).

Optisches Gitter

Bei der Wahl des Star Analyser gilt es die Brennweite der Kamera zu beachten. Die Zahl entspricht der Anzahl der Linien pro mm. Aus der Anzahl der Linien kann die Gitterkonstante berechnet werden. Dies folgt der Formel:

$$g \cdot \sin \alpha = m \cdot \lambda \quad (Gl. 1)$$

auf, wobei:

$$g = \text{Gitterkonstante} \left[\frac{1}{\text{Linien pro mm}} \right]$$

$$m = \text{Beugungsordnung} \{0, 1, 2, 3, \dots\}$$

$$\lambda = \text{Wellenlänge [mm]}$$

$$\alpha = \text{Beugungswinkel}$$

Daher gilt, dass der Winkel, unter dem das Spektrum auf den Bildsensor abweichend von der 0. Ordnung erscheint, größer wird, je höher die Anzahl der Linien pro mm ist (Paton-Hawksley-Education 2014).

Dies hat eine wichtige Konsequenz für die Wahl des Gitters: Dieses sollte in Abhängigkeit des verwendeten Objektivs gewählt werden. Es gilt als Erfahrungswert:

- Brennweite des Objektivs unter 70 mm Kleinbildäquivalent: Star Analyser 200 und
- Brennweite des Objektivs zwischen 70 und 200 mm Kleinbildäquivalent: Star Analyser 100.

Für die Auswertung wird nur die Nullte und Erste Ordnung benötigt.

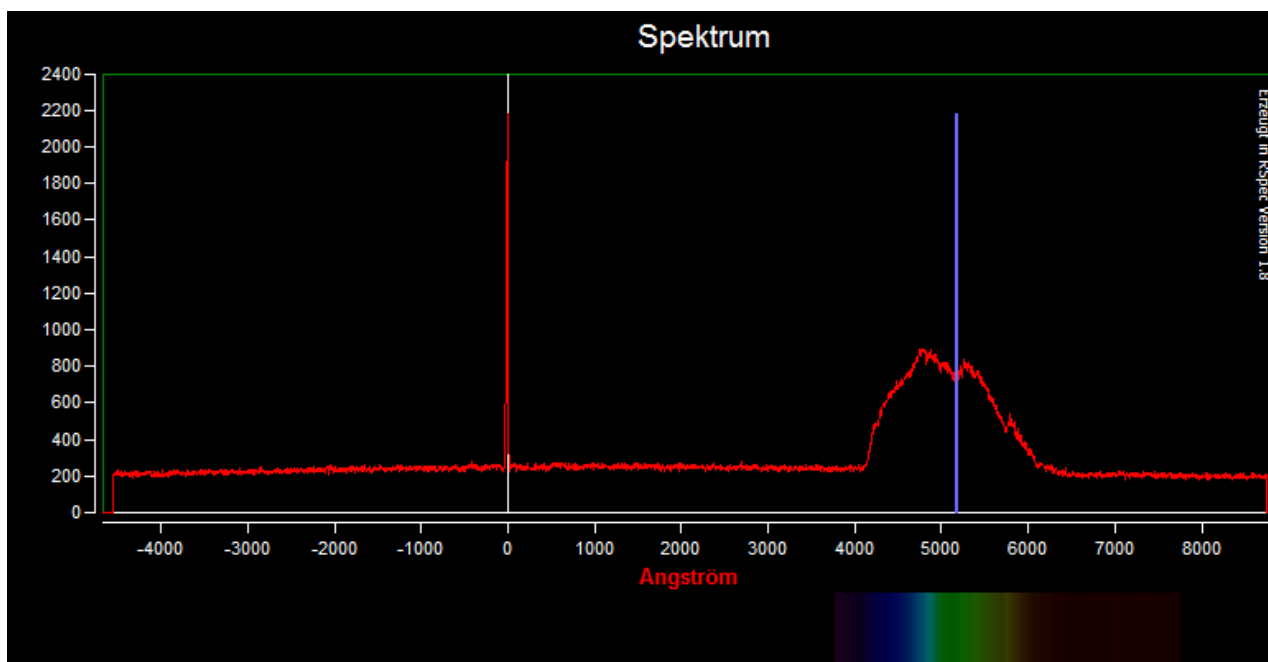


Abb. 4: Spektrum des Doppelsterns Capella (α Aur, Klasse G) mit der typischen Fe I Linie bei 5169 Å. (Nikon D5200: 105 mm; 1"; ISO 1000)

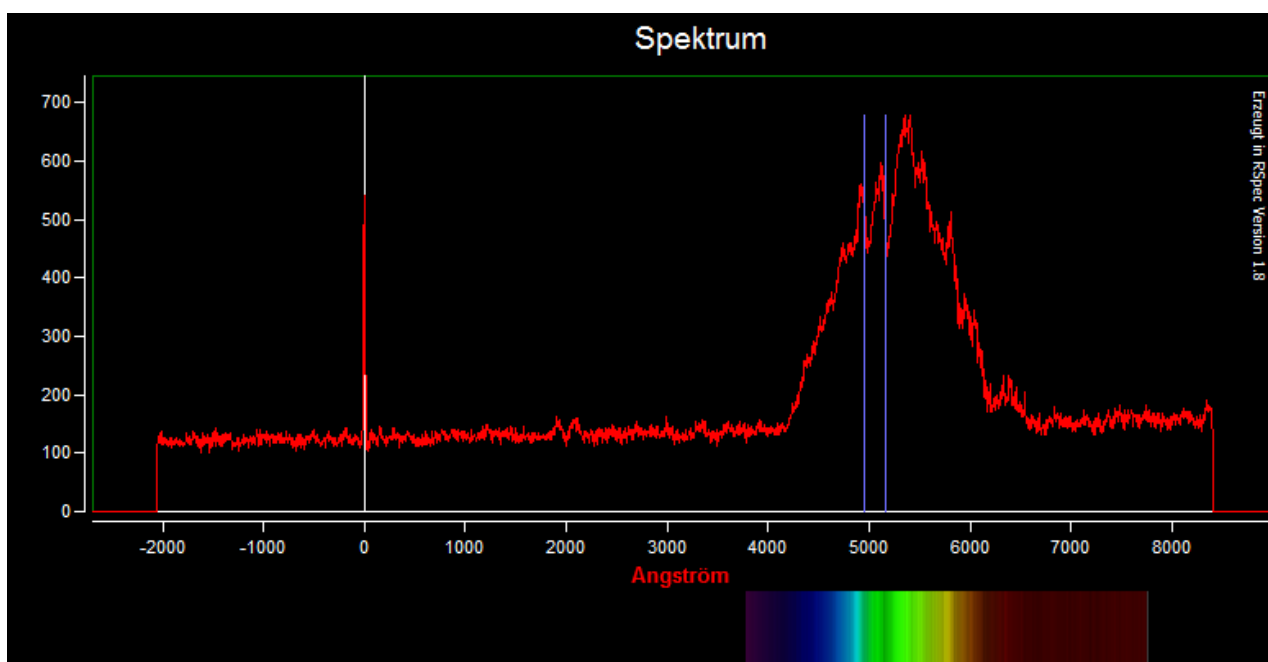


Abb. 5: Spektrum von Beteigeuze (β -Ori, Klasse M). Die blauen Linien zeigen die TiO Linien bei 4995 Å und 5166 Å. (Nikon D5200: 105 mm; ,1,5"; ISO 1600)

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass eine höhere Anzahl an Linien nicht zu einer höheren Auflösung und besseren Ergebnissen führt (Paton-Hawksley-Education 2014). Zusätzlich erklärt diese Formel die Funktionsweise der Entstehung des Farbspektrums in Abhängigkeit der Wellenlänge, da Licht mit kürzerer Wellenlänge stärker abgelenkt wird als Licht mit längerer Wellenlänge (Tipler und Mosca 2014).

Digitalkamera und Adapterringe

Als Digitalkamera kann jegliches Gerät gewählt werden, für das es die Möglichkeit gibt, den Star Analyser zu montieren. Ebenso ist es möglich eine Webcam in Kombination mit einem Teleskop zu verwenden. Die Aufnahme selbst stellt keine besonderen Anforderungen an die Kamera. Aus praktischen Gründen empfiehlt es sich

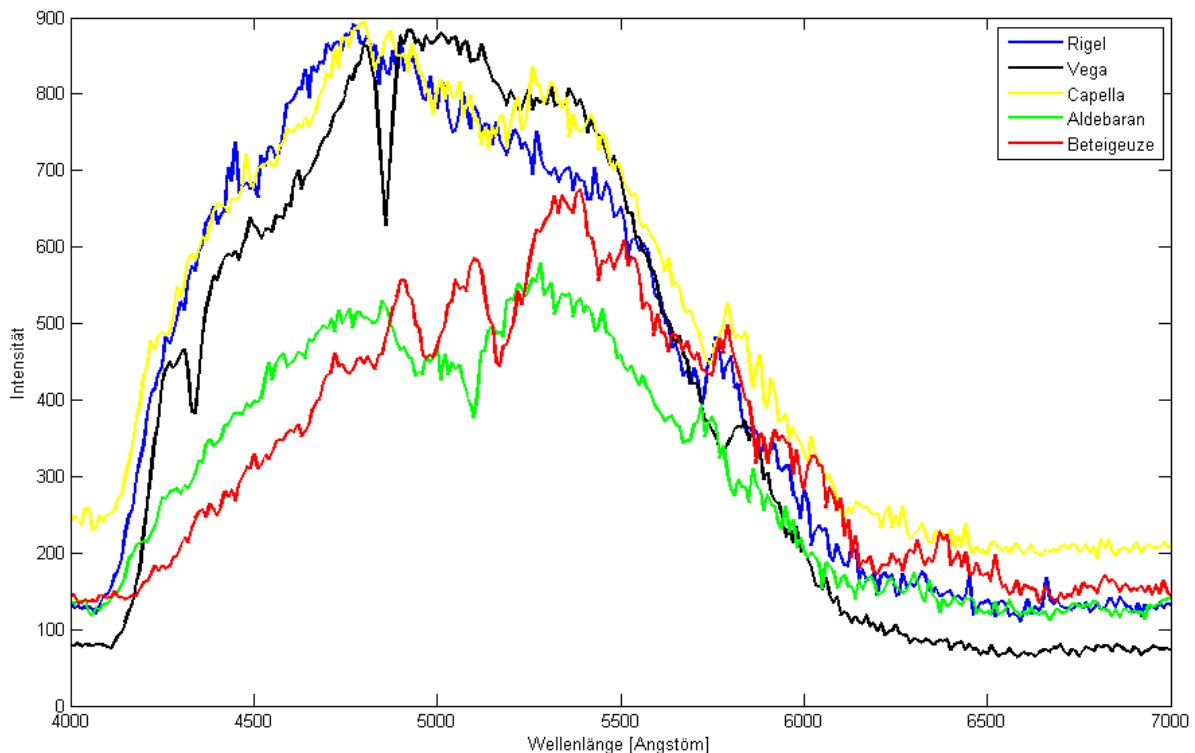


Abb. 6: Die Intensität der Spektren in Abhängigkeit von der Sternklasse als Richtwert für Temperatur von „Heiß“ (Rigel) nach „Kalt“ (Beteigeuze).

aber, ein Setup zu verwenden, welches die Einstellung einer konstanten Brennweite ermöglicht. Details dazu unten.

Software

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Software RSpec verwendet. Diese kann unter www.rspectro.com in einer 30 Tage Testversion kostenlos heruntergeladen werden. Eine Vollversion kostet in Form einer Einzelplatzlizenz derzeit 109 € (Field 2018).

4 Durchführung

Aufnahme

Das hier vorgestellt Vorgehen bezieht sich auf Erfahrungswerte mit einer Nikon D5200 und einem 18-105 mm Zoomobjektiv. Für die eigene Arbeit ist das Austesten mit dem eigenen Material notwendig. Die hier gegebenen Angaben können allerdings als Orientierung verwendet werden.

Für die Aufnahme des Fotos sind im einfachsten Fall außer einer Kamera, Stativ und Gitter keine weiteren Geräte notwendig. Auf ein Stativ mit Nachführung kann verzichtet werden, solange die Belichtungszeit in Sekunden unter dem Wert von $500 / \text{Brennweite in mm}$ Kleinbildäquivalent bleibt. Dieser Wert ist ein seit vielen Jahren weitergegebener Richtwert aus der

Astrofotografie und verhindert eine Verformung der Objekte durch die Erdrotation.

In der Praxis erzielt man die besten Ergebnisse mit einer Belichtungszeit von ca. einer bis zwei Sekunden. Die ISO Einstellung soll entsprechend gewählt werden, wobei ein Rauschen keine negativen Auswirkungen auf das Ergebnis hat, da es zufällig über das gesamte Spektrum auftritt. Wichtig ist das Spektrum scharf abzubilden nicht der Stern.

Als Ergebnis erhält man ein Foto eines Spektrums wie in Abb. 1 dargestellt.

Kalibrierung des Spektrums

Für die Auswertung unbekannter Spektren ist es notwendig, ein Referenzspektrum aufzunehmen, mit dessen Hilfe der Umrechnungsfaktor $\text{\AA}/\text{Pixel}$ ermittelt werden kann. Hierzu bietet es sich an, einen bekannten Stern mit charakteristischen Absorptionslinien zu fotografieren (siehe Abb. 2). Ein für diesen Zweck aufgrund seiner Helligkeiten, charakteristischen H β -Linie und leichten Auffindbarkeit häufig gewählter Stern ist Vega (siehe Abb. 3).

Bei der Kalibrierung entspricht die Nullte-Ordnung Null \AA der Ersten-Ordnung, die bekannte H β -Linie 4861 \AA . Aufgrund der Näherung für kleine Winkel kann nun ein linearer Umrechnungsfaktor für $\text{\AA}/\text{Pixel}$ ermittelt werden (siehe Gl. 1).

Dieser Schritt ist notwendig, da jede Kamera und jede Brennweite einen unterschiedlichen Abstand zwischen Nullter und Erster Ordnung haben. Bei gleichbleibender Ausrüstung und gleicher Brennweite kann dieser Faktor allerdings einfach übernommen werden und die Kalibrierung muss nur bei Änderungen in der Ausrüstung durchgeführt werden.

Details zur Kalibrierung in der Software RSpec finden sich auf der Website www.rspect-astro.com.

Ergebnisse

Hier seien beispielhaft einige Spektren aus verschiedenen Sternklassen wiedergegeben.

Klasse G: Capella

Capella ist ein Doppelstern im Sternbild des Fuhrmanns und befindet sich in einer Entfernung von 12,9 Parsec (pc). Typisch sind die Eisen (Fe I) Linie (siehe Abb. 4) (Zimmermann und Gürtler 2008).

Klasse M: Beteigeuze

Beteigeuze ist der zweithellste Stern im Sternbild des Orion und ein Roter Überriese. Er ist ein Stern der Spektralklasse M mit einer Oberflächentemperatur von 3600 K. Sein Radius beträgt das 800-fache des Sonnenradius, was in etwa der Bahn der Erde um die Sonne entspricht. Beteigeuze befindet sich in einer Entfernung von 131 pc. Aufgrund seiner niedrigen Temperatur können bereits TiO Moleküle nachgewiesen werden (siehe Abb. 5) (Zimmermann und Gürtler 2008).

Planck-Verteilung

Die in Abb. 6 dargestellten Verteilungen zeigen einen Verlauf der Intensitätsmaxima in den langwelligeren Bereich bei kühleren Sternen, wie er nach der Planck-Verteilung zu erwarten ist (siehe Abb. 6).

5 Diskussion

Die in dieser Arbeit vorgestellte Erstellung von Sternenspektren zeigt eine einfache und gleichzeitig präzise Methode zur Charakterisierung von Sternen. Durch die gewonnenen Spektren ist eine Zuordnung zu Sternklassen (OBAFGKM) möglich und damit in weiterer Folge eine Beschreibung der wichtigsten physikalischen Eigenschaften eines unbekanntes Sterns.

Aufgrund des schnellen Aufbaus ist es auch möglich, direkt mit den Schüler*innen Spektren zu erstellen. Diese können in weiterer Folge im Rahmen des Unterrichts ausgewertet werden. Die Fächer und Themenbereiche, welche hier berührt werden, gehen weit über die Astronomie hinaus: So sind ein Wissen über Optik, Elektromagnetische Wellen, Kernphysik und

Quantenphysik notwendig, um die Details zu verstehen. Gleichzeitig ist es aber möglich, nur mit oberflächlichem Wissen Ergebnisse zu erzielen. Daher kann eine innere Differenzierung erfolgen. Beispielsweise erfordert die reine Anwendung eines Transmissionsgitters kein tieferes Verständnis für genauen Vorgänge am Gitter. Trotzdem können interessierte Schüler*innen sich die geometrischen Zusammenhänge erarbeiten.

Ein weiterer Punkt, der für die Anwendung der Spektroskopie im Unterricht spricht, ist die Möglichkeit, als Schüler*in weit entfernte Objekte mit hoher Genauigkeit zu analysieren und damit ein grundlegendes Verständnis für die quantitative Naturwissenschaft Physik zu erlangen.

6 Kommentar

Es soll an dieser Stelle nicht verschwiegen werden, dass (Amateur) Astronomie sehr viel Geduld und Erfahrung benötigt. Wenn eine Lehrperson dieses Thema in den Unterricht einbauen möchte, ist es notwendig, neben warmer Kleidung eine große Portion Geduld und Frustrationstoleranz mitzubringen.

„Per aspera ad astra“

7 Literatur

- Bennett, J. O., et al. (2010). *Astronomie: die kosmische Perspektive*, Pearson Studium.
- Clausnitzer, L. (2021) „Ist die Astronomie ein Spezialgebiet?“, *Sterne und Weltraum, Spektrum der Wissenschaft*.
- Field, T. (2018). *RSpect*.
- Fischer, O. (2011) "Tatort" Schule - Spektroskopie erleben.
- Hochwarter, M. (2017). "Interessensforschung in Salzburg - Interessenstudie Physik 2016." *Delta Phi B*.
- Hofschulz, O. (2013). *Erforschung der Sonne, wis - wissenschaft in die schulen!*
- Kaler, J. B. (1994). *Sterne und Ihre Spektren*. *Astronomische Signale aus Licht*, Spektrum Akademischer Verlag.
- Paton-Hawksley-Education (2014). *Star Analyser 100. User Manual*.
- Tipler, P. A. und G. Mosca (2014). *Physik: für Wissenschaftler und Ingenieure*, Springer Berlin Heidelberg.
- Zimmermann, H. und H. Gürtler (2008). *ABC Astronomie*. Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag.