

Spektren – Fingerabdrücke der Sterne

Natalie Fischer und Monika Maintz

Die meisten Sterne sind so unendlich weit von uns entfernt – und doch füllt unser Wissen über sie ganze Bände. Woher wissen wir dies alles, wenn das einzige, was wir von ihnen sehen können, ihr Licht ist? Es liegt am Licht selbst! Während die Astronomen früherer Generationen bis ins 19. Jahrhundert das Licht der Sterne fast ausschließlich zu deren Positionsbestimmung nutzten, blicken sie heute mit riesigen Teleskopen in den Himmel, um aus dem Licht eines Sternes die Geschichte seines Lebens zu lesen: die Richtung des Lichts, seine Helligkeit, sein Spektrum und Polarisationsmessungen geben Aufschluss über seinen Ort und seine Bewegung, seinen Energieoutput, seine chemische Zusammensetzung, Temperatur, Dichte, sein Magnetfeld und vieles mehr. Doch sind diese Größen nicht etwa zeitlich unveränderlich! Oft sind es gerade diese Veränderungen, aus denen Astronomen neue Schlüsse ziehen können. Im vorliegenden SuW-Artikel geht es um solche Veränderungen: im Doppelsternsystem WR140 (Abb. 1) kommen sich ein Wolf-Rayet-Stern und sein Doppelsternpartner auf ihren Bahnen umeinander immer näher, beide Sterne verlieren durch Sternwind beachtlich an Masse. Was passiert, wenn sich diese beiden Sterne annähern? Durch eine mehrwöchige Messkampagne wurde dieses Ereignis in Form einer Vielzahl von Sternspektren festgehalten. Was Astronomen aus solchen Spektren teilweise alles ablesen können, ist Inhalt dieses WiS!-Beitrags.

Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag		
Physik	Mechanik, Schwingungen und Wellen, Quantenphysik	3. Keplersches Gesetz , Schwerpunkt, Doppler-Effekt (akustisch , optisch), elektromagnetische Wellen , elektromagnetisches Spektrum , Spektrallinien , Emission, Absorption
Astronomie	Sterne, Astropraxis	Spektralklassen , Spektralklassifikation, Emissionsspektrum, Absorptionsspektrum, kontinuierliches Spektrum, Sternmassen , Doppelsternsysteme , Wolf-Rayet-Sterne

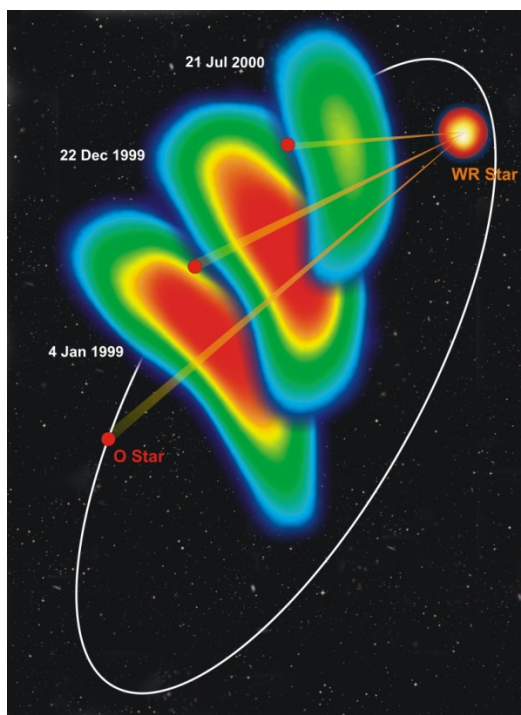


Abbildung 1:

WR140: Der etwa 50 Sonnenmassen schwere Wolf-Rayet-Stern (WR) und sein etwa 20 Sonnenmassen schwerer Doppelsternpartner (O) umkreisen einander mit einer Umlaufzeit von etwa 7,9 Jahren. Vor allem der WR-Stern verfügt über einen stark ausgeprägten stellaren Wind, bei seinem Partner ist er etwas geringer. Dort, wo beide stellaren Winde kollidieren, kommt es zu einer starken Radiostrahlung, deren Region (siehe farbiger Bereich) mit dem Umlauf der beiden Sterne umeinander wandert. (Quelle: Dougherty et al., NRAO/AUI/NSF)

Licht

Wir empfinden unsere Welt als „hell“. Das liegt daran, dass wir Menschen einen Lichtempfänger in unserem Körper haben: unsere Augen. Doch können wir damit nur Licht detektieren, dessen Wellenlänge zwischen 390 und 760 nm liegt, daher nennen wir es das „sichtbare Licht“. Alle anderen Wellenlängen sind für unser Auge unsichtbar. Zu ihrer Messung müssen wir uns künstlicher Lichtempfänger bedienen.

Aufgabe 1:

Welche künstlichen „Lichtempfänger“ kennen wir aus dem Alltag?

Lösung 1:

Im Alltag kennen wir viele Gegenstände, die mit „Licht“ empfangen zu tun haben. Neben unseren Augen sind es u. a. Fotoapparate (CCD-Chips, Fotoplatte bzw. -film), Röntgenapparate, Antennen (Radios), Satellitenschüsseln, Fernbedienungen, IR-Kameras, etc.

Was ist Licht?

Licht ist eine elektromagnetische Welle. Sie breitet sich im Vakuum mit der Lichtgeschwindigkeit $c=299792,458$ km/s aus. Die Lichtgeschwindigkeit ist die Maximalgeschwindigkeit, mit der ein Signal überhaupt übertragen werden kann. In einem lichtdurchlässigen Medium ist sie jedoch geringer als im Vakuum.

Das sichtbare Licht besteht aus verschiedenen „Farben“. Diese hängen von der Wellenlänge des Lichts ab. Im sichtbaren Bereich nimmt die Wellenlänge vom roten Licht hin zu gelben, grünen und blauen Licht ab, im für unser Auge unsichtbaren Bereich schließen sich zu kleineren Wellenlängen hin die UV-Strahlung, die Röntgen- und die Gamma-Strahlung an, im langwelligen Bereich die Infrarot-, Mikrowellen- und die Radiostrahlung (Abb. 2).

$$c = \lambda \cdot \nu$$

c: Lichtgeschwindigkeit

λ : Wellenlänge des Lichts

ν : Frequenz des Lichts

Licht kann auch mit Atomen und Molekülen wechselwirken, ganz so wie ein Teilchenstrom. Diese „Lichtteilchen“ nennen wir Photonen. Die Energie eines Photons ist mit der Farbe des Lichts bzw. dessen Wellenlänge verknüpft.

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

E: Energie des Lichts

c: Lichtgeschwindigkeit

λ : Wellenlänge des Lichts

ν : Frequenz des Lichts

h: Plancksches Wirkungsquantum = $6,626 \cdot 10^{-34}$ Js

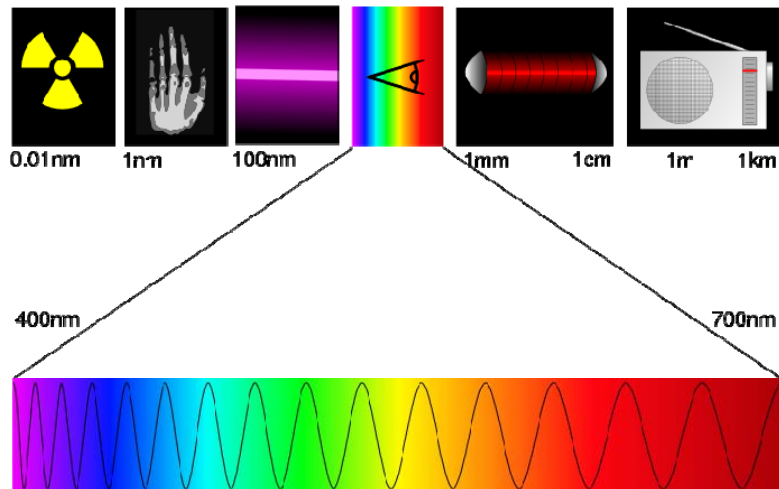


Abbildung 2: Das elektromagnetische Spektrum

(Quelle: <http://www.sternenecke.ch/Medien/images/Sternwissen/Spektrum.png>)

Licht entsteht durch atomare Prozesse: Veränderungen in der Elektronenhülle der Atome und Moleküle sind meist mit der Emission oder Absorption von Licht verbunden. Aber auch durch subatomare Prozesse wird Licht freigesetzt, sowie bei der Bewegung schneller Elektronen durch starke Magnetfelder (Synchrotron-Strahlung).

Das Spektrum einer Lichtquelle

Eine Lichtquelle, wie z. B. eine Glühlampe oder auch ein Stern, sendet in der Regel Licht unterschiedlicher Wellenlänge aus. Wird diese Strahlung nach Wellenlänge sortiert nebeneinander gelegt, so erhält man das (elektromagnetische) Spektrum der Strahlung. Dieses „Nebeneinander“ geschieht z. B. durch einen Spektralapparat, er spaltet das Licht räumlich getrennt in seine Bestandteile auf.

Aufgabe 2:

Beobachte das Sonnenspektrum mit Hilfe eines einfachen Spektralapparates (z. B. Gitter, Prisma oder Spalt), sowie Spektren verschiedener Leuchtquellen z. B. im Haus. Wie sehen die einzelnen Spektren aus? Wie unterscheiden sie sich?

Lösung 2:

Siehe nachfolgenden Text mit Abb. 4.

Je nach Aussehen unterscheidet man verschiedene Arten von Spektren: kontinuierliche Spektren, Linienspektren (Emissionsspektren), Absorptionsspektren und Bandenspektren (Abb. 3). Das Spektrum einer Lichtquelle ist wie ein Fingerabdruck. Leuchtende Gase im Labor haben ein ihrer atomaren Zusammensetzung entsprechendes charakteristisches Linien- oder Bandenspektrum. Das Spektrum eines nicht miteinander wechselwirkenden Gasgemisches ist als Überlagerung der Einzelspektren zu erkennen. Sternspektren sind in der Regel Absorptionsspektren. Aus einem Spektrum lässt sich außerdem die Intensitätsverteilung der Strahlung (d. h. die abgestrahlte Lichtmenge) in Abhängigkeit von der Wellenlänge bestimmen.

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

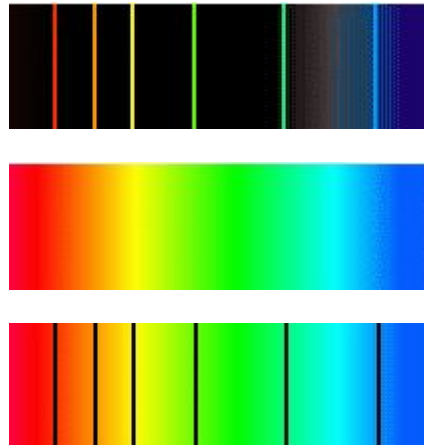


Abbildung 3: Das diskrete Emissionsspektrum eines Gases A (oben) kann direkt mit Hilfe eines Spektralapparates gemessen, ebenso das kontinuierliche Emissionsspektrum (Mitte) einer Glühlampe. Beim diskreten Absorptionsspektrum (unten) wurde das Licht der Glühlampe vor Erreichen des Spektralapparates durch das Gas A geleitet. Dieses filtert Licht einzelner Wellenlängen heraus, die den für das gas charakteristischen Emissionslinien entsprechen. Die „herausgefilterten Wellenlängen („Lücken“) erscheinen als dunkle Absorptionslinien im kontinuierlichen Spektrum. Das Aussehen eines Spektrums hängt somit nicht nur von der Lichtquelle ab, sondern auch von dem Weg, den das Licht von seiner Quelle bis zum Empfänger genommen hat!

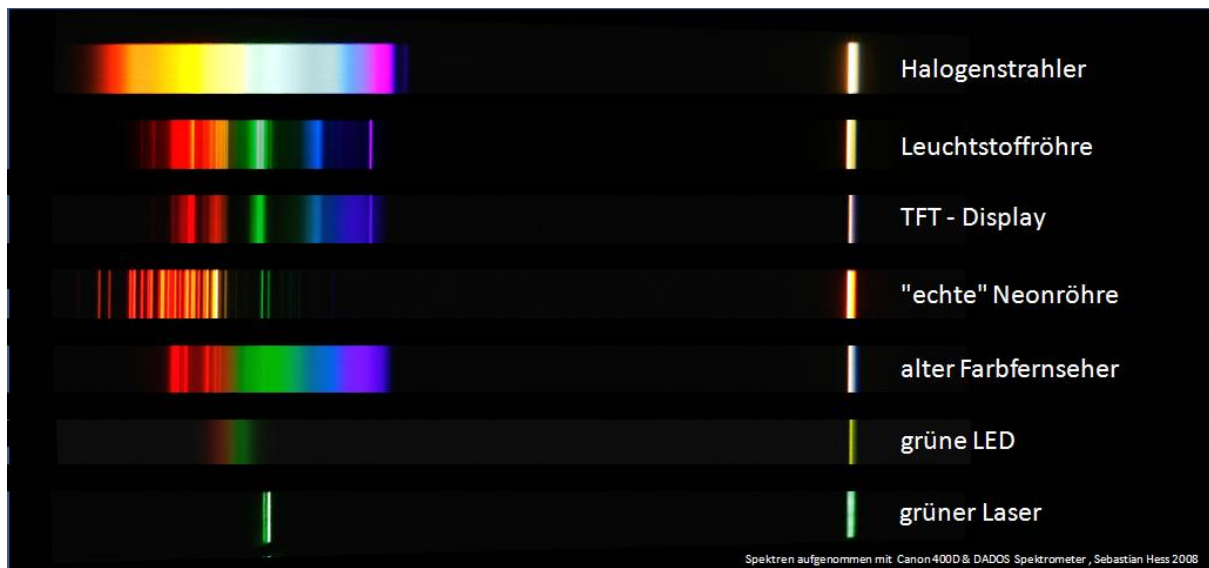


Abbildung 4: Spektren verschiedener Strahler im Haushalt (Quelle: mit freundlicher Genehmigung www.sebastian-hess.eu/spektroskopie.html)

Aufgabe 3:

Was kann einen Lichtstrahl auf seinem Weg von der Quelle bis zum Empfänger verändern?

Lösung 3:

- Wechselwirkt Licht mit Materie, so kann ein Teil des Lichts von ihr reflektiert (Reflexion), ein Teil absorbiert (Absorption) und ein Teil gestreut werden (Streuung). Es fehlen dann unter Umständen Linien bestimmter Wellenlängen im Spektrum.
- An der Grenzfläche zwischen zwei Medien tritt wegen der unterschiedlichen Lichtgeschwindigkeiten in den Medien eine von der Wellenlänge des Lichts abhängige Brechung auf.
- Beim Auftreffen von Licht auf Materie wird außer Energie auch Impuls übertragen, wodurch ein Druck (Strahlungsdruck) ausgeübt wird.
- Überlagern sich zwei Lichtwellen, so kann eine totale oder teilweise Verstärkung oder Auslöschung eintreten (Interferenz).
- Licht breitet sich normalerweise geradlinig aus. Trifft Licht aber auf ein Hindernis (Beugung) oder durchsetzt es das Schwerfeld großer Massen, so gibt es Abweichungen.
- Ist die Lichtquelle in Bewegung, kommt es zu einer Verschiebung der Linien im Spektrum im Vergleich zu einem Spektrum, dessen Quelle sich in Richtung des Beobachters nicht bewegte (Doppler-Effekt).

Im Weltall zeigen sich viele dieser Effekte: Gasatome interstellarer Wolken können Licht absorbieren (dunkle interstellare Absorptionslinien), kleine Staubteilchen können das Licht „verrotten“ (interstellare Extinktion) und „ausrichten“ (Polarisation), in einem Magnetfeld auch drehen oder (fast) völlig verschlucken (Dunkelwolke). Ein massereicher Stern in der Nachbarschaft kann durch seine Gravitation das Licht ebenfalls ablenken (Microlensing). Und zu guter Letzt verfälscht unsere eigene Erdatmosphäre das Licht der Sterne durch Aberration und Refraktion. Szintillation (unruhige Luftbewegung der irdischen Atmosphäre) und die atmosphärische Extinktion durch Aerosole schwächen das Licht nochmals ab.

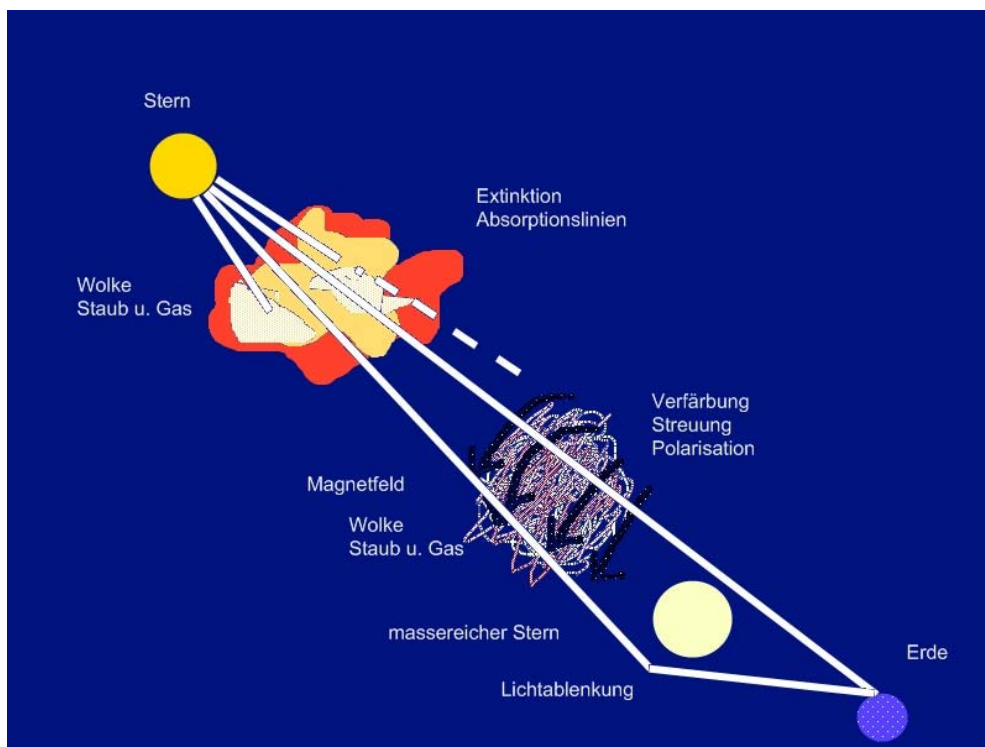


Abbildung 5: Bis das Spektrum eines Sterns tatsächlich detektiert werden kann, ist das Licht viele Millionen Kilometer unterwegs und kann durch verschiedenste Einflüsse verändert werden. Die Astronomen haben dann die schwierige Aufgabe herauszufinden, welche Informationen, die im Spektrum enthalten sind, tatsächlich von dem Stern selbst kamen und welche dem Spektrum unterwegs aufgeprägt wurden. (Bild: Natalie Fischer)

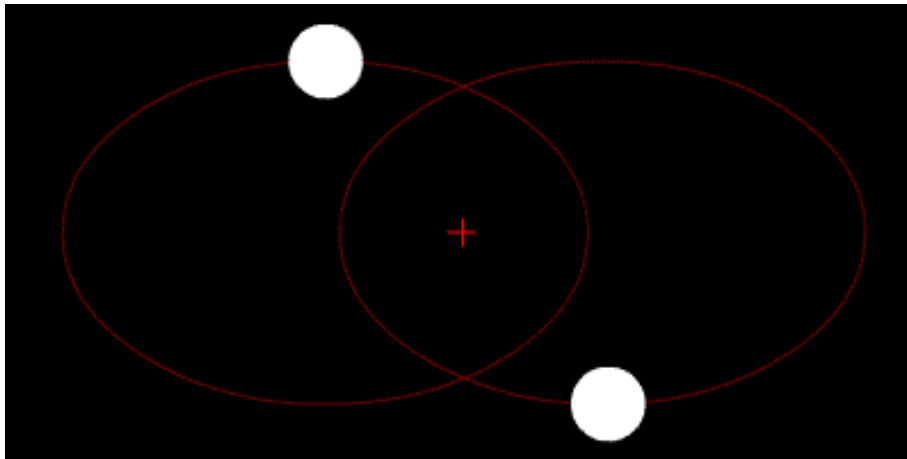


Abbildung 7: Verhalten der beiden Komponenten eines Doppelsternsystems: Die zwei Sterne sind durch ihre Schwerkraft aneinander gebunden und bewegen sich deshalb periodisch um ihren gemeinsamen Schwerpunkt. Eine animierte gif-Datei ([Animation Doppelsternumlauf](#)) ist als didaktisches Zusatzmaterial vorhanden. Dieser ist durch ein rotes Kreuz gekennzeichnet. (Bild: Wikipedia)

Viele Doppelsterne sind so weit entfernt, dass man die Bewegung der einzelnen Komponenten, wie in Abb. 7 schematisch dargestellt, auch mit den größten Teleskopen nicht beobachten kann. Um dennoch etwas über solche Sternsysteme zu erfahren, muss man sich anstelle der direkten Beobachtung einer indirekten Methode bedienen, der Spektroskopie. Dabei beobachtet man das von einem Doppelstern kommende Licht über einen möglichst langen Zeitraum und zerlegt es bei jeder Beobachtung mit Hilfe eines Spektralapparats in ein Sternspektrum. Auf diese Weise erhält man eine Serie von Spektren. Diese kann man nun analysieren. Von besonderer Bedeutung ist dabei das Verhalten der in den Sternspektren auftretenden Absorptionslinien.

Bei einem Doppelstern überlagern sich die Spektren der Einzelsterne zu einem Gesamtspektrum (Abb. 8). Charakteristische Merkmale wie Absorptionslinien lassen sich also nicht ohne weiteres den einzelnen Komponenten A oder B des Doppelsternsystems zuordnen. Da sich die Sterne umkreisen, bewegen sie sich wechselseitig einmal auf uns zu und dann wieder von uns weg. Das gilt natürlich nur, wenn wir schräg oder direkt von der Seite auf das Doppelsternsystem blicken (vgl. dazu Abb. 7, hier schaut man senkrecht von oben auf die Bahnebene der beiden Sterne). Diese Bewegung kann man als periodische Verschiebung der Absorptionslinien in einer Serie von mehreren Spektren erkennen (Abb. 9). Aufgrund dieser Verschiebung kann man die Linien der beiden Sterne, die sich in den einzelnen Spektren überlagern, nun voneinander trennen und dem jeweiligen Stern zuordnen: Diejenigen Absorptionslinien, die sich in einem Spektrum in die eine Richtung verschieben, z. B. zu kürzeren Wellenlängen bzw. in Richtung des „blauen Endes“ des Spektrums, gehören zu einer Komponente, die Absorptionslinien, die sich in die entgegengesetzte Richtung verschieben, also zu längeren Wellenlängen bzw. in Richtung des „roten Endes“ des Spektrums, gehören zur anderen Komponente des Doppelsterns.

Die Verschiebung der Absorptionslinien in den Spektren von Doppelsternsystemen, die durch den Umlauf der beiden Komponenten um den gemeinsamen Massenmittelpunkt hervorgerufen werden, ist der Schlüssel zur Erforschung der Eigenschaften von Doppelsternen. Mit ihrer Hilfe kann man herausfinden, wie viel Zeit die beiden Sterne für einen Umlauf um den gemeinsamen Schwerpunkt benötigen, wie ihre Umlaufbahnen aussehen, welche Massen sie haben, wie weit sie voneinander entfernt sind, unter welchem Winkel wir auf die Bahnebene des Doppelsterns blicken etc.

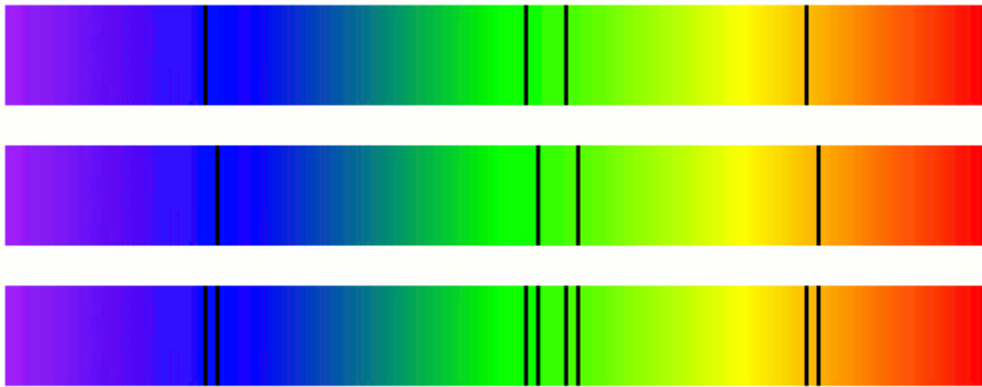


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Spektrums der Komponente A (oben) und der Komponente B (Mitte) eines Doppelsternsystems. Durch Überlagerung der beiden Einzelspektren erhält man das zum Zeitpunkt T beobachtbare Gesamtspektrum (unten). (Bild: Monika Maintz)

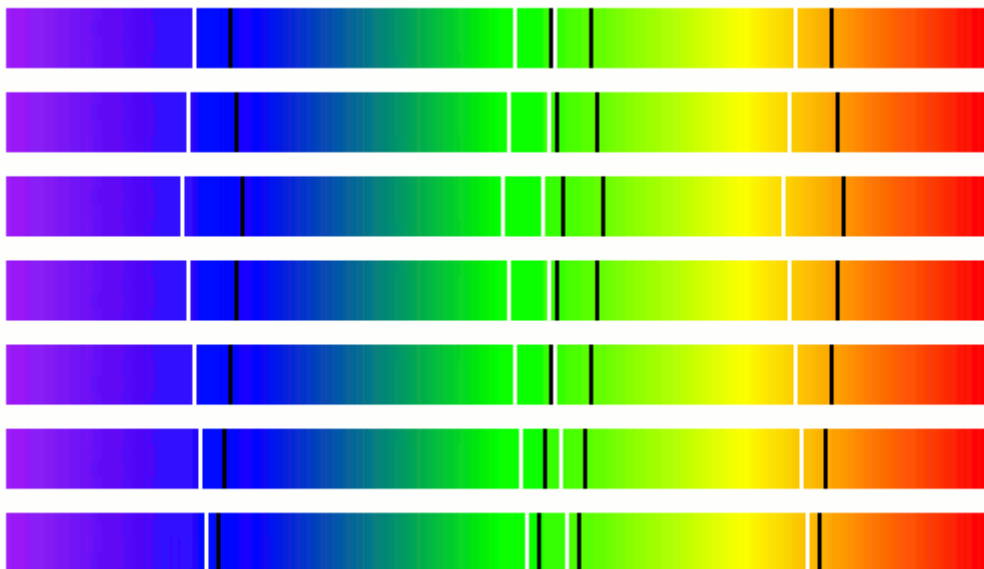


Abbildung 9: Schematische Darstellung der periodischen Verschiebung von Absorptionslinien in einer Serie von Doppelsternspektren (von unten nach oben). Die Verschiebung ist durch den Vergleich mehrerer Spektren klar zu erkennen: Die Linien der Komponente A (weiß) verschieben sich anfangs in Richtung des „blauen Endes“ des Spektrums (d.h. zu kürzeren Wellenlängen), die Linien der Komponente B (schwarz) verschieben sich in die entgegengesetzte Richtung, wandern also zum „roten Ende“ des Spektrums, d.h. zu längeren Wellenlängen. Zu einem bestimmten Zeitpunkt dreht sich die Richtung der Verschiebung um. Die Linien der Komponente A wandern dann in Richtung des „roten Endes“ und die Linien der Komponente B in Richtung des „blauen Endes“ des Spektrums usw. (Bild: Monika Maintz)

Um zu verstehen, warum es zu dieser Linienverschiebung kommt, betrachten wir den akustischen Doppler-Effekt. Diesen kennen wir aus dem Alltag, z.B. wenn ein Krankenwagen oder ein Polizeiauto mit eingeschalteter Sirene vorbeifährt. Die Höhe des Signaltons verändert sich je nachdem, ob das Fahrzeug gerade auf uns zu-, an uns vorbei oder von uns wegfährt.

In Abb. 10 und 11 ist dargestellt, wie sich Schallwellen ausbreiten, wenn sie von einem ruhenden bzw. einem sich bewegenden Objekt ausgesandt werden. Solange sich das Objekt nicht bewegt, breiten sich die Schallwellen in allen Richtungen gleichmäßig, d. h. mit derselben Wellenlänge λ aus. Das entspricht der gleichmäßigen Tonhöhe, die vom Signalhorn eines stehenden Krankenwagens erzeugt wird. Wenn sich das Objekt bewegt, werden die Schallwellen, die sich in Fahrtrichtung ausbreiten, etwas zusammengedrückt. Dadurch verkleinert sich ihre Wellenlänge und wir messen anstelle der ursprünglichen Wellenlänge λ nun die etwas kürzere Wellenlänge λ_1 . Es gilt also: $\lambda_1 < \lambda$. Dies entspricht der Tonhöhenänderung des Signaltons eines Krankenwagens, der auf uns zufährt. Der Signalton wird dabei höher.

Die Schallwellen, die sich entgegengesetzt zur Fahrtrichtung ausbreiten, werden dagegen etwas auseinandergezogen. Dadurch vergrößert sich ihre Wellenlänge und wir messen anstelle von λ eine etwas längere Wellenlänge λ_2 . Für sie gilt: $\lambda_2 > \lambda$. Dies entspricht der Tonhöhenänderung des Signaltons eines Krankenwagens, der sich von uns entfernt. Der Signalton wird dabei tiefer. Der Doppler-Effekt bewirkt also, dass sich die Wellenlänge von Schallwellen ändert, wenn sich das Objekt, das die Schallwellen aussendet, von einem Beobachter weg oder auf diesen zu bewegt.



Abbildung 10: Ausbreitung von Schallwellen (rosarote Kreisbögen), die von einem stehenden hupenden Auto erzeugt werden. Die Wellenlänge λ der Schallwellen (Abstand zwischen zwei rosaroten Kreisbögen) ist in jeder Richtung gleich. (Bild: Wikipedia, Monika Maintz)

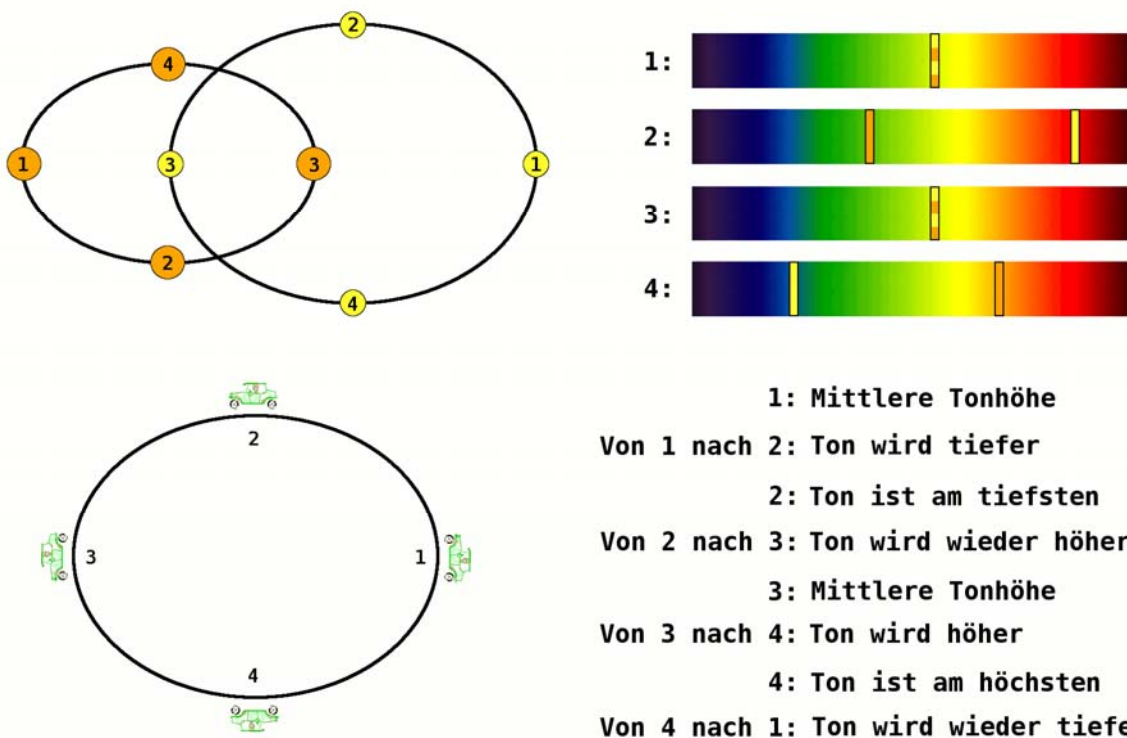


Abbildung 11: Ausbreitung von Schallwellen (rosarote Kreisbögen), die von einem fahrenden hupenden Auto erzeugt werden. In Fahrtrichtung werden die Schallwellen zusammengedrückt. Daher ist ihre Wellenlänge λ_1 etwas kleiner als λ (vgl. Abb. 10, Wellenlänge der Schallwellen, die von einem stehenden, hupenden Auto erzeugt werden). Entgegengesetzt zur Fahrtrichtung werden die Schallwellen auseinandergezogen. Ihre Wellenlänge λ_2 ist daher etwas größer als λ . (Bild: Wikipedia, Monika Maintz)

Der Doppler-Effekt tritt aber nicht nur bei Schallwellen (akustische Wellen) auf. Er ist charakteristisch für alle Wellenarten und ist immer dann zu beobachten, wenn sich die Quelle, die die Wellen erzeugt, und der Beobachter, der die Wellen registriert, relativ zueinander bewegen. Folglich muss sich der Doppler-Effekt auch bei Lichtwellen (elektromagnetischen Wellen) zeigen, wenn sich z. B. ein Stern auf einen Beobachter auf der Erde zu- bzw. von diesem wegbewegt.

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

Genau das beobachten wir in einem Doppelsternsystem: Durch die periodische Bewegung der beiden Komponenten um den gemeinsamen Schwerpunkt bewegen sich die Sterne abwechseln auf einen Beobachter auf der Erde zu bzw. von diesem weg. Dadurch muss sich analog zur Wellenlängenänderung bei Schallwellen auch die Wellenlänge der abgestrahlten Lichtwellen vergrößern oder verkleinern. Genau diesen Effekt beobachten wir als periodische Verschiebung von Absorptionslinien in den Spektren von Doppelsternen (Abb. 9). Der Tonhöhenänderung bei akustischen Wellen entspricht eine „Farbänderung“ bei elektromagnetischen Wellen. Man sagt: Licht wird rot- bzw. blauverschoben. Eine Rotverschiebung entspricht der Verschiebung einer Absorptionslinie zu längeren Wellenlängen und damit zum „roten Ende“ des Sternspektrums. Eine Blauverschiebung entspricht einer Verschiebung zu kürzeren Wellenlängen, also zum „blauen Ende“ des Spektrums.



1: Mittlere Tonhöhe
Von 1 nach 2: Ton wird tiefer
2: Ton ist am tiefsten
Von 2 nach 3: Ton wird wieder höher
3: Mittlere Tonhöhe
Von 3 nach 4: Ton wird höher
4: Ton ist am höchsten
Von 4 nach 1: Ton wird wieder tiefer

Abbildung 12: Zusammenhang zwischen Doppler-Effekt und Bewegungszustand bzw. Position von Objekten, die akustische (unten) oder elektromagnetische (oben) Wellen aussenden. Der Beobachter befindet sich am rechten Bildrand. Bilder oben: Wenn sich die Sterne in den Positionen 1 oder 3 befinden, ist keine Bewegung in Richtung des Beobachters feststellbar. Die Sterne scheinen quasi still zu stehen. Dementsprechend zeigt sich in den Spektren jeweils nur eine unverschobene Absorptionslinie. Auf den Positionen 2 und 4 bewegen sich die Sterne dagegen mit maximaler Geschwindigkeit auf den Beobachter zu bzw. von diesem weg. In den Sternspektren wird das durch zwei sehr stark verschobene Absorptionslinien erkennbar, die jeweils einem der Sterne zuzuordnen sind. Die Linien sind in Bezug auf die Absorptionslinie, die ein ruhender Stern aussenden würde, maximal weit verschoben. Bilder unten: Akustischer Doppler-Effekt, der durch ein hupendes, ständig im Kreis fahrendes Auto hervorgerufen wird. Die Tonhöhe der Hupe verändert sich mit der Änderung der Bewegungsrichtung des Autos in Bezug auf den Beobachter. (Bilder: Monika Maintz)

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

Untersucht man die Verschiebung der Absorptionslinien genauer, dann fällt auf, dass die Größe der Linienverschiebung mit der jeweiligen Position der Sterne auf ihrer Umlaufbahn zusammenhängt (Abb. 12, oben). Dasselbe gilt für die Tonhöhe des Signalhorns eines Krankenwagens, wenn dieser ähnlich wie die Sterne immer um einen Mittelpunkt herumfährt (Abb. 12, unten). Man kann also aus der Größe der Linienverschiebung in Sternspektren bzw. aus der Tonhöhenänderung eines Signalhorns ziemlich genau feststellen, wo sich die Sterne im Doppelsternsystem bzw. wo sich der im Kreis fahrende Krankenwagen gerade befindet. Wenn sich die Verschiebungsmuster der Absorptionslinien bzw. die Tonhöhenänderungen des Signalhorns wiederholen, haben die Sterne einen Umlauf um ihr Schwerezentrum abgeschlossen bzw. hat der Krankenwagen seinen Mittelpunkt einmal vollständig umrundet. Auf diese Weise kann man periodische Vorgänge wie die Umlaufperiode eines Doppelsterns recht einfach abschätzen.

Um die Umlaufperiode P so genau wie möglich zu bestimmen, muss man jedoch anders vorgehen. Zuerst misst man die Verschiebungen der Absorptionslinien $\Delta\lambda$ für beide Doppelsternkomponenten in möglichst vielen Spektren des zu untersuchenden Doppelsterns. Mit Hilfe der Doppler-Formel

$$\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda = \lambda_0 \cdot v/c \quad (\text{Gl. 1})$$

bzw.

$$v = (\Delta\lambda/\lambda_0) \cdot c = ((\lambda_0 - \lambda)/\lambda_0) \cdot c \quad (\text{Gl. 2})$$

rechnet man die in Wellenlängen gemessenen Linienverschiebungen in Geschwindigkeitswerte um. Dabei ist zu beachten, dass auf diese Weise nur die radialen Anteile der Umlaufgeschwindigkeiten, also nur die Sternbewegungen direkt auf den Beobachter zu oder vom Beobachter weg erfasst werden können. Bewegungen und daher auch Geschwindigkeiten schräg oder senkrecht zur Blickrichtung des Beobachters rufen in den Sternspektren keine Wellenlängenverschiebungen hervor. Zur Bestimmung dieser tangentialen Geschwindigkeitsanteile muss man andere Methoden anwenden. Daher verwendet man für die Geschwindigkeit v , die in der Doppler-Formel auftaucht, richtiger Weise den Begriff Radialgeschwindigkeit.

Zur Bestimmung der Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda$ wird die „verschobene Wellenlänge“ λ in Bezug zur „Ruhewellenlänge“ λ_0 gemessen. Dies ist die Wellenlänge, die wir messen würden, wenn der Stern, der sie abstrahlt, „in Ruhe“ wäre, also stillstehen würde. Mit c bezeichnet man die Lichtgeschwindigkeit. Im Vakuum gilt: $c = 300\,000\text{ km/s}$.

Aus Gleichung 2 wird leicht ersichtlich, dass die Radialgeschwindigkeit v direkt mit der Verschiebung $\Delta\lambda$ der Absorptionslinien verknüpft ist. Je weiter die Linien verschoben sind, desto höher ist die Radialgeschwindigkeit des Objekts, das die Lichtwellen aussendet und desto schneller bewegt es sich von uns weg oder auf uns zu.

Wenn man die Verschiebungen der Absorptionslinien in einer Serie von Doppelsternspektren gemessen und daraus die zugehörigen Radialgeschwindigkeiten berechnet hat, kann man für jede Komponente des Doppelsternsystems eine Geschwindigkeitskurve erstellen. Dazu trägt man die Werte für die Radialgeschwindigkeit (y-Achse) über dem jeweiligen Zeitpunkt (x-Achse) auf, an dem das Spektrum beobachtet wurde, das man zur Messung der Linienverschiebung und daher zur Berechnung des Radialgeschwindigkeitswertes verwendet hat.

Aus den Geschwindigkeitskurven lässt sich die Bahnperiode P des Doppelsterns ablesen. Darunter versteht man die Zeitdauer, die beide Sterne benötigen, um ihren Massenmittelpunkt einmal zu umlaufen. Dazu muss man die Kurven betrachten und herausfinden, wann sich ihr Erscheinungsbild periodisch zu wiederholen beginnt. Als Ausgangspunkte verwendet man am besten die Schnittpunkte der Kurven mit der x-Achse. Zu diesen Zeitpunkten haben beide Sterne die Radialgeschwindigkeit $v = 0$ km/s. Dem entsprechen die Positionen 1 und 3 in Abb. 12 (oben links). Die beiden Sterne stehen direkt in der Blickrichtung des Beobachters, der von rechts auf das Doppelsternsystem schaut. Daher kann dieser keine Bewegung der Komponenten feststellen. Die Sternspektren zeigen folglich auch keine Linienverschiebungen (Abb. 12, oben rechts).

Die maximalen Radialgeschwindigkeitswerte $v_1(\max)$ und $v_2(\max)$, die die Sterne annehmen, wenn sie sich direkt in der Sichtlinie des Beobachters bewegen (vgl. Abb. 12, oben links, Positionen 2 und 4), kann man ebenfalls der Geschwindigkeitskurve entnehmen. Dazu sucht man die Extrempunkte der beiden Kurven und liest die dazugehörigen Geschwindigkeitswerte ab. Diese Maximalwerte sind deshalb so wichtig, weil man mit ihnen die großen Halbachsen a_1 und a_2 der Umlaufbahnen der Doppelsternkomponenten und damit auch den mittleren Abstand a der beiden Sterne berechnen kann. Das ist wiederum wichtig, wenn man die Sternmassen bestimmen will.

Die Sternmassen berechnet man mit dem 3. Keplerschen Gesetz:

$$\frac{G}{4\pi^2} \cdot (M_1 + M_2) = a^3 / P^2 \quad (\text{Gl. 3})$$

a : Mittlerer Abstand der beiden Doppelsternkomponenten, es gilt: $a = a_1 + a_2$

G: Gravitationskonstante, $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$

Mit Hilfe der Definition des Schwerpunktes lässt sich eine Gleichung für das Massenverhältnis der beiden Sterne herleiten:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{a_2}{a_1} \quad (\text{Gl. 4})$$

Damit hat man zwei Gleichungen, um zwei Unbekannte, die Massen M_1 und M_2 zu bestimmen. Auf diese Weise kann man Sternmassen sehr präzise berechnen. Diese Methode der Massenbestimmung ist bei weitem die exakteste. Die Untersuchung von Doppelsternsystemen ist u. a. aus diesem Grund sehr wichtig.

Aufgabe 4:

Berechne die Massen M_1 und M_2 der beiden Sterne eines Doppelsternsystems. (Wir betrachten den besonders einfachen Fall eines Doppelsternsystems, das wir genau von der Seite sehen und dessen Komponenten kreisförmige Umlaufbahnen haben.) Gehe dabei folgendermaßen vor:

a) Betrachte die Serie von Doppelsternspektren in Abbildung 13. Ordne die Absorptionslinien anhand ihres Verhaltens den beiden Doppelsternkomponenten 1 und 2 zu.

b) Messe die Doppler-Verschiebungen $\Delta\lambda$ der H α -Linie für beide Doppelsternkomponenten. Die Ruhewellenlänge von H α hat den Wert $\lambda_0 = 656,3$ nm (nm = Nanometer). Lese die Wellenlänge λ_1 und λ_2 bis auf drei Nachkommastellen genau ab.

c) Berechne aus den gemessenen Linienverschiebungen $\Delta\lambda$ mit Hilfe der Doppler-Formel (Gl. 2) die Radialgeschwindigkeitswerte für beide Doppelsternkomponenten.

d) Zeichne für beide Doppelsternkomponenten eine Geschwindigkeitskurve. Lies daraus die Umlaufperiode P des Doppelsternsystems und die Extremwerte der Radialgeschwindigkeiten $v_1(\text{max})$ und $v_2(\text{max})$ für beide Komponenten ab.

e) Berechne die Massen M_1 und M_2 der Doppelsternkomponenten mit Hilfe des 3. Keplerschen Gesetzes (Gl. 3) und des Massenverhältnisses, das aus der Definition des Schwerpunktes folgt (Gl. 4). Achte auf die Verwendung der richtigen Einheiten. Rechne gegebenenfalls Einheiten in andere Einheiten um. Verwende zur Berechnung der beiden großen Halbachsen a_1 und a_2 folgende Definitionen:

$$a_1 = \frac{P}{2\pi} \cdot v_1(\text{max}) \quad \text{und} \quad a_2 = \frac{P}{2\pi} \cdot v_2(\text{max})$$

f) Rechne die Sternmassen in Sonnenmassen um ($M_{\text{Sonne}} = 1,989 \cdot 10^{30}$ kg).

g) Die großen Halbachsen der Doppelsternkomponenten a_1 und a_2 sowie ihr mittlerer Abstand a werden üblicherweise in Astronomischen Einheiten angegeben ($1\text{AE} = 1,496 \cdot 10^8$ km, dies entspricht dem mittleren Abstand Erde–Sonne). Rechne a_1 , a_2 und a von km in AE um.

Serie von Doppelsternspektren

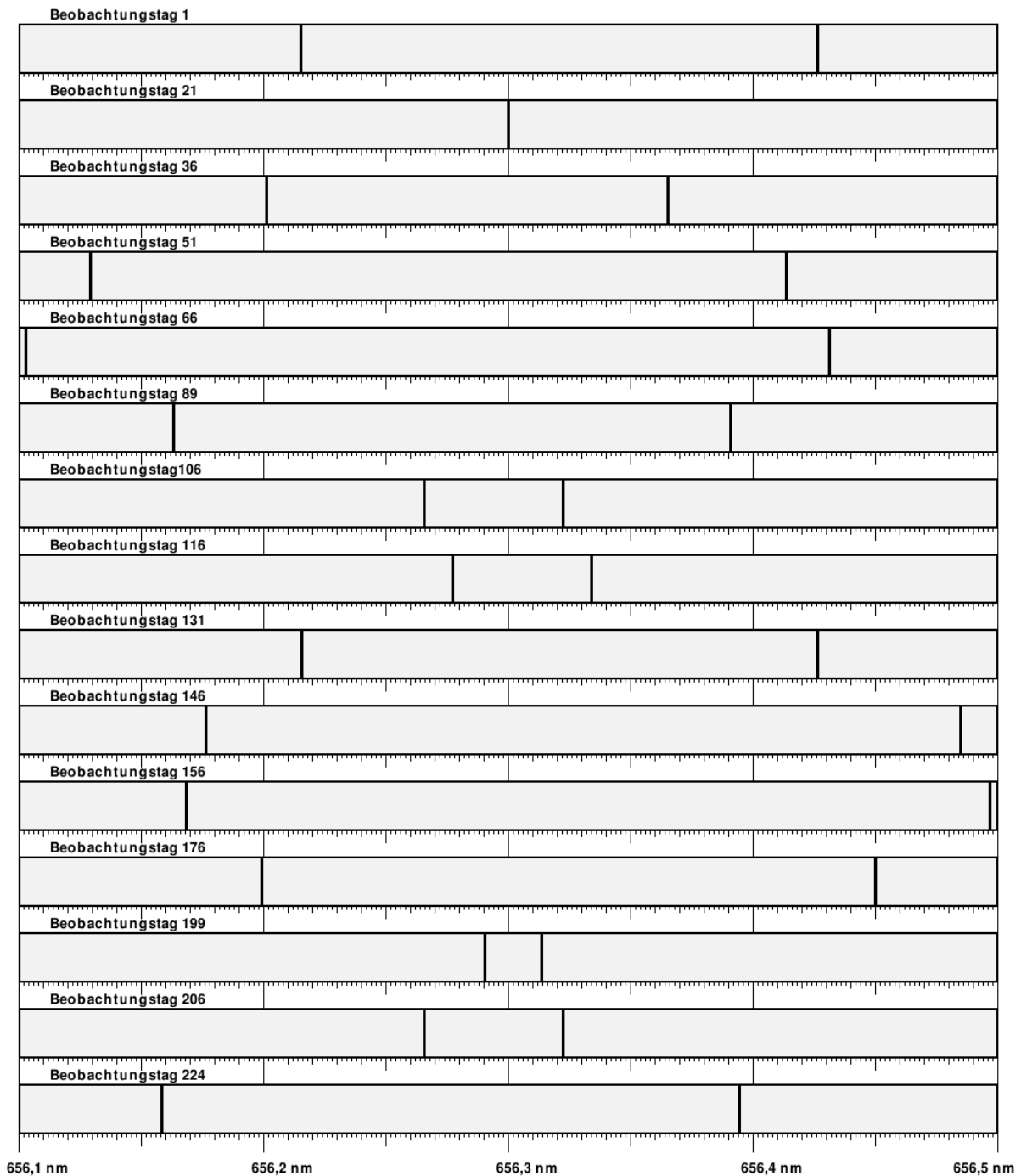


Abbildung 13a: Serie von Doppelsternspektren. Die Spektren sind von oben nach unten entsprechend ihres Aufnahmedatums angeordnet. Sie zeigen nur einen winzigen Ausschnitt um den Bereich von 656,3 nm (= Wellenlänge λ_0 der H α -Linie von Wasserstoff in einem ruhenden System). Die Absorptionslinien (schwarze Linien) markieren die Positionen der Wellenlängen λ_1 und λ_2 der H α -Linien der beiden Doppelsternkomponenten. Aufgrund des Doppler-Effekts sind sie periodisch um die Ruhewellenlänge $\lambda_0=656,3$ nm verschoben. (Bild: Monika Maintz)

Serie von Doppelsternspektren

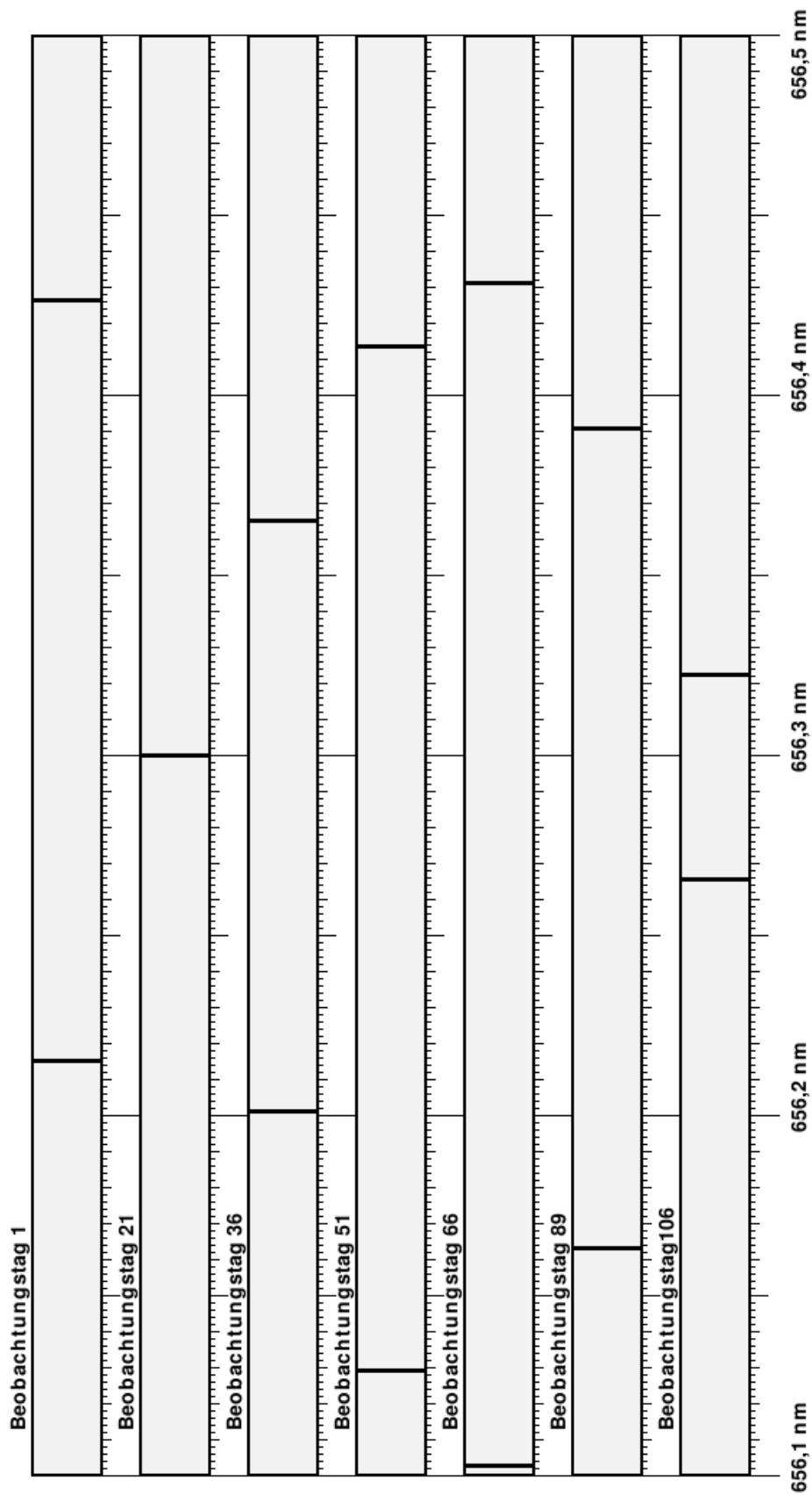


Abbildung 13b: Die Doppelsternspektren der Beobachtungstage 1, 21, 36, 51, 66, 89 und 106 in vergrößerter Darstellung. (Bild: Monika Maintz)

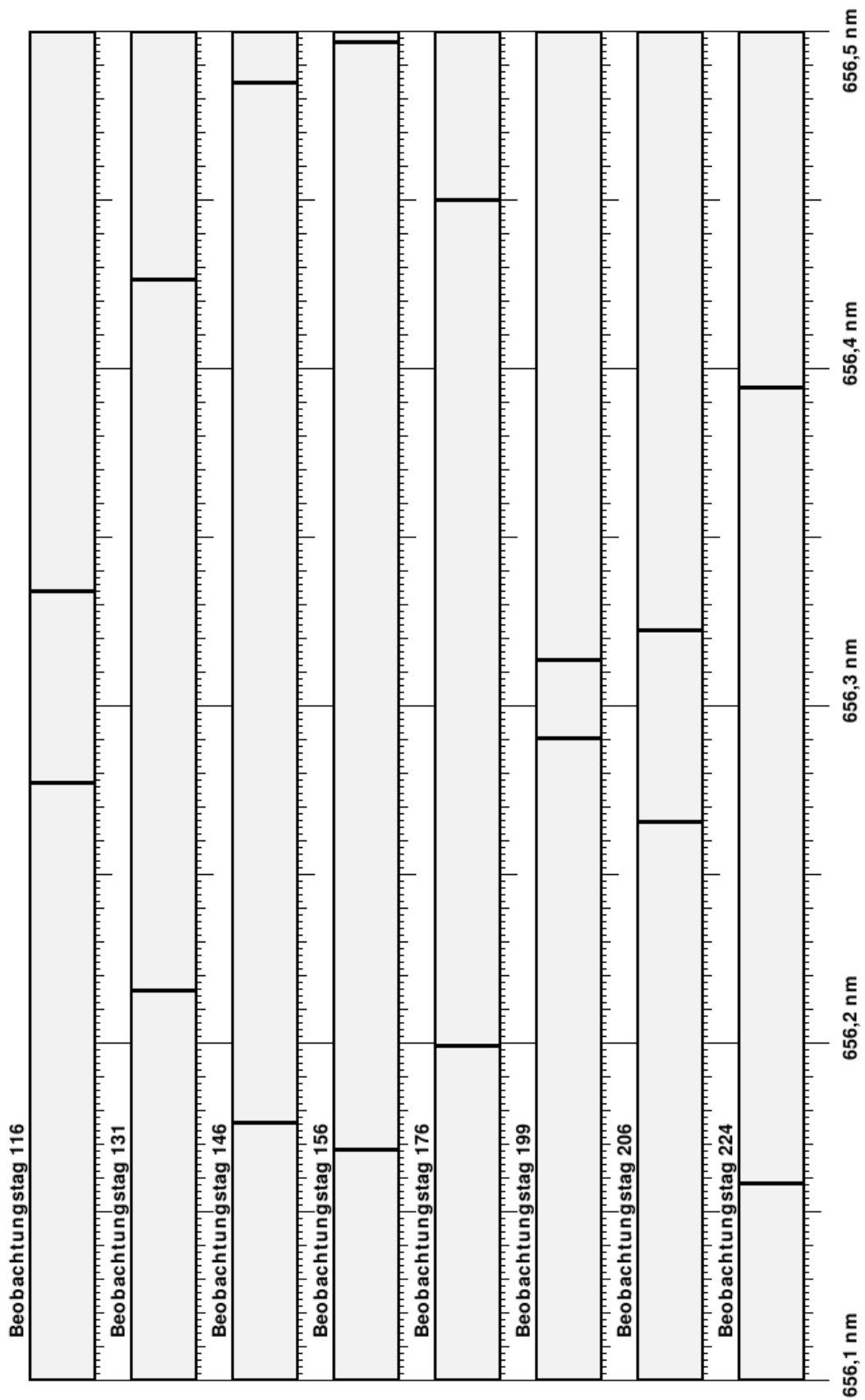


Abbildung 13c: Die Doppelsternspektren der Beobachtungstage 116, 131, 146, 156, 176, 199, 206 und 224 in vergrößerter Darstellung. (Bild: Monika Maintz)

Lösung 4a:

Die Zuordnung der Absorptionslinien zu den Doppelsternkomponenten ist in Abb. 14 dargestellt: Die grün markierten Linien gehören zur Komponente 1, die schwarz markierten Linien gehören zur Komponente 2. Im zweiten Spektrum von oben (Beobachtungstag 21) liegen die Absorptionslinien genau an derselben Stelle. Die Wellenlängen λ_1 und λ_2 entsprechen in diesem Fall der Ruhewellenlänge λ_0 . Beide Sterne stehen direkt in der Blickrichtung des Beobachters und zeigen daher keine Bewegung in radialer Richtung, also vom Beobachter weg oder zum Beobachter hin.

Serie von Doppelsternspektren

Stern 1 + Stern 2



Abbildung 14: Zuordnung der Absorptionslinien zu den Komponenten des Doppelsternsystems. Komponente 1: grüne Linien, Komponente 2: schwarze Linien. (Bild: Monika Maintz)

Lösungen 4b und 4c:

Beob.tag	λ_1 in nm	$\Delta\lambda_1$ in nm	v_1 in km/s	λ_2 in nm	$\Delta\lambda_2$ in nm	v_2 in km/s
1	656,216	0,084	38,57	656,427	-0,127	-57,85
21	656,300	0,000	0,00	656,300	0,000	0,00
36	656,366	-0,066	-30,00	656,202	0,098	45,00
51	656,414	-0,114	-51,96	656,129	0,171	77,94
66	656,431	-0,131	-60,00	656,103	0,197	90,00
89	656,391	-0,091	-41,68	656,163	0,137	62,52
106	656,323	-0,023	-10,42	656,266	0,034	15,63
116	656,277	0,023	10,42	656,334	-0,034	-15,63
131	656,216	0,084	38,57	656,427	-0,127	-57,85
146	656,177	0,123	56,38	656,485	-0,185	-84,57
156	656,169	0,131	60,00	656,497	-0,197	-90,00
176	656,199	0,101	45,96	656,451	-0,151	-68,94
199	656,291	0,009	4,19	656,314	-0,014	-6,28
206	656,323	-0,023	-10,42	656,266	0,034	15,63
224	656,394	-0,094	-43,16	656,158	0,142	64,74

Lösung 4d:

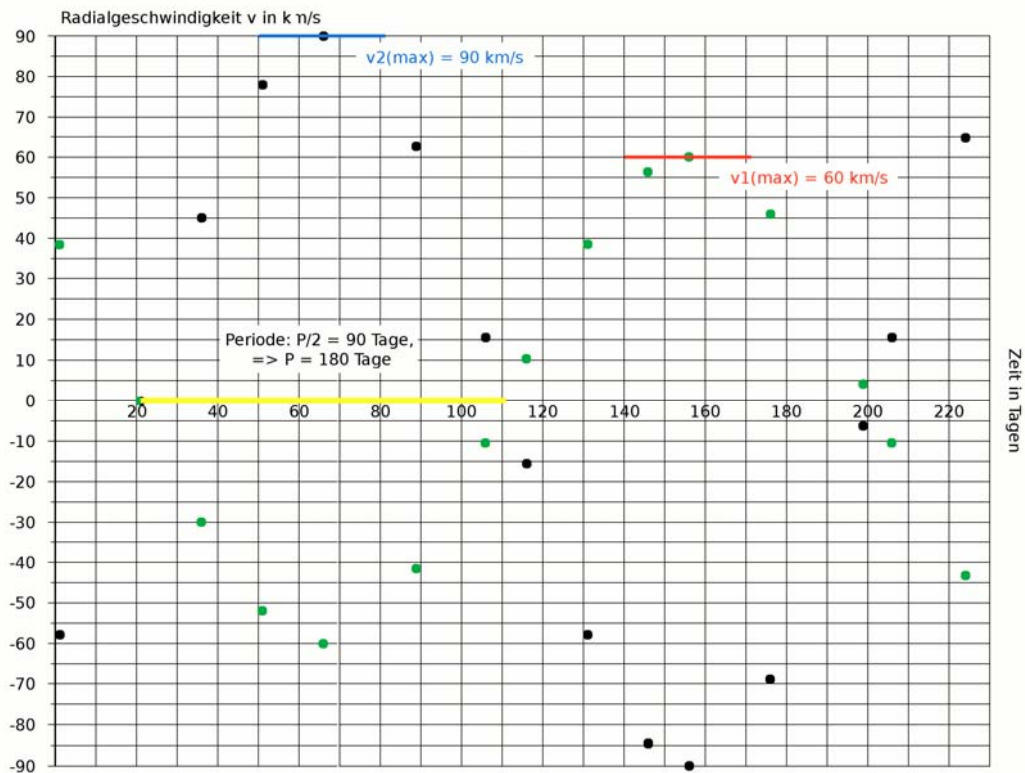


Abbildung 15: Geschwindigkeitskurven für die beiden Komponenten des Doppelsternsystems (Stern 1: grün, Stern 2: schwarz). (Bild: Monika Mainz)

Die Maximalgeschwindigkeiten $v_1(\text{max})$ und $v_2(\text{max})$ sind durch die Hochpunkte der Kurven gegeben. Die Periode kann man mit Hilfe der Nulldurchgänge der Kurven bestimmen. Daraus ergeben sich folgende Werte:

$$P = 180 \text{ Tage} = 180 \cdot 86400 \text{ s} = 1,5552 \cdot 10^7 \text{ s}$$

$$v_1(\text{max}) = 60 \text{ km/s}$$

$$v_2(\text{max}) = 90 \text{ km/s}$$

Lösung 4e, 4f und 4g:

$$a_1 = 1,4851 \cdot 10^8 \text{ km} = 1,4851 \cdot 10^{11} \text{ m} = 0,99 \text{ AE}$$

$$a_2 = 2,2277 \cdot 10^8 \text{ km} = 2,2277 \cdot 10^{11} \text{ m} = 1,49 \text{ AE}$$

$$a = a_1 + a_2 = 3,7128 \cdot 10^8 \text{ km} = 3,7128 \cdot 10^{11} \text{ m} = 2,48 \text{ AE}$$

$$M_1 = 7,513 \cdot 10^{31} \text{ kg} = 37,77 M_{\text{Sonne}}$$

$$M_2 = 5,008 \cdot 10^{31} \text{ kg} = 25,18 M_{\text{Sonne}}$$

Weiterführende Links

- WiS!-Artikel „Sternspektren und Spektralklassifikation“ (Dr. Oliver Schwarz)
<http://www.wissenschaft-schulen.de/artikel/716058>
- WiS!-Artikel „Farben und Spektren der Sterne selbst erleben“ (Dr. Olaf Fischer)
<http://www.wissenschaft-schulen.de/artikel/803315>
- VdS-Fachgruppe Spektroskopie
 Die VdS-Fachgruppe Spektroskopie (<http://spektroskopie.fg-vds.de>) ist die Anlaufstelle für Fragen aus dem Amateurbereich rund um die Spektroskopie. Es gibt ein einladendes Forum (<http://spektroskopie.fg-vds.de/forum/index.php>) sowie eine Spektren-Datenbank (<http://stahl.homelinux.org:8000/otmar/specdb/>), die Spektren zu vielen Himmelskörpern bereithält.
- Mit Hilfe des *Very Long Baseline Array Radioteleskops* haben Astronomen schon einmal WR140 über einen längeren Zeitraum beobachtet: <http://www.nrao.edu/pr/2005/wr140/>. Dazu gehört ein Film über die Entwicklung der Region, in der sich die stellaren Winde beider Sterne treffen <http://www.nrao.edu/pr/2005/wr140/wr140.swf> (deutsche Übersetzung unter: <http://www.astronews.com/news/artikel/2005/04/0504-009.shtml>).
- Unter der folgenden Internetadresse findet man eine animierte Seite zu Doppelsternen mit entsprechenden Aufgaben:
http://leifi.physik.uni-muenchen.de/web_ph12/umwelt_technik/12doppelsterne/spektrosk.htm
- Das Online-Portal „Lehrer Online“ bietet unter <http://www.lehrer-online.de/786448.php> einen sehr schönen Beitrag zur Auswertung eines mit einem DADOS-Spektrographen selbst gewonnenen Spektrums des Sterns Wega, für dessen Auswertung und Interpretation Kenntnisse der Oberstufen-Schulphysik ausreichend sind.