

Oskar-Maria-Graf-Gymnasium, Neufahrn

Seminararbeit

über das Thema

**Bestimmung der Bahnparameter spektroskopischer
Doppelsterne**

Autor: Valentin Thoss

Prüfer: Herr Dr. Ober & Herr Ostermann

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Grundlagen	1
2.1	Physikalische Grundlagen	1
2.2	Quantitative Vermessung	4
2.2.1	Berechnung der Radialgeschwindigkeit	4
2.2.2	Radialgeschwindigkeits-Zeit-Kurve	5
2.2.3	Bestimmung des Zeitpunkts für die maximale Aufspaltung	6
2.3	Besonderheiten und Probleme bei der Vermessung	6
2.3.1	Inklinationswinkel	6
2.3.2	Doppelsternsysteme mit unterschiedlichen Bahnradien	7
2.3.3	Eigenbewegung der Erde	7
2.3.4	Auflösung des Spektrographen	8
2.3.5	SB1-Systeme	8
3	Messung	8
3.1	Das Doppelsternsystem β Aurigae	8
3.2	Vorbereitung	9
3.2.1	Ermittlung der optimalen Beobachtungszeit	9
3.2.2	Vorbereitung des Spektrographen	10
3.3	Beobachtung	10
3.3.1	Equipment	10
3.3.2	Vorgehen	10
3.3.3	Aufnahmen	11
3.3.4	Probleme	12
4	Auswertung	12
4.1	Verarbeitung der Spektren	12
4.1.1	Nachbearbeitung der Aufnahmen	12
4.1.2	Kalibrierung	13
4.2	Ermittlung der Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda$	13
4.3	Vergleich mit anderen Aufnahmen	15
5	Berechnung der Bahnparameter	16
5.1	Bahngeschwindigkeit	16
5.2	Weitere Bahnparameter	17
5.3	Vergleich mit Literaturwerten	18

6	Ausblick	19
7	Literatur	20

1 Einführung

Doppelsterne sind keine Seltenheit - 77% aller Sterne in der Milchstraße liegen in Doppelsternsystemen vor. Sie sind für die Astronomie von großer Bedeutung, da sie eine wichtige Quelle für Massen, Radien, Bahnparameter und Leuchtkräfte sind. Doch nicht alle Doppelsterne sind für diese Vermessung geeignet. Spektroskopische Doppelsterne gehören zu dem Typ der Doppelsternsysteme, die eine besondere Art der Vermessung verlangen [1]. Sie unterscheiden sich von visuellen Doppelsternen signifikant bezüglich ihrer Bahngeometrie und der Art und Weise ihrer Vermessung. Spektroskopische Doppelsterne sind dadurch gekennzeichnet, dass die beiden Sterne mit sehr geringen Bahnradien und hoher Geschwindigkeit um den gemeinsamen Schwerpunkt kreisen. Die geringe Entfernung der beiden Sterne erschwert dabei eine optische Trennung und macht eine Vermessung mit gewöhnlichen Methoden problematisch. Deshalb werden diese Art der Doppelsterne mithilfe ihres Spektrums bezüglich ihrer Bahnparameter untersucht. Durch die Rotation der beiden Sterne entsteht für den Beobachter ein Dopplereffekt, welcher bei spektroskopischen Aufnahmen messbar ist und die Grundlage der Vermessung dieser Art von Doppelsternen darstellt.

In meiner Arbeit möchte ich die physikalischen Grundlagen von spektroskopischen Doppelsternen und ihrer Vermessung erläutern und mithilfe dieser Methodik das Doppelsternsystem β Aurigae bezüglich der Bahnparameter untersuchen.

2 Grundlagen

2.1 Physikalische Grundlagen

Zur Betrachtung des Dopplereffekts und der physikalischen Grundlagen der Vermessung von spektroskopischen Doppelsternen gehen wir zunächst von einem Doppelsternsystem ohne Exzentrizität aus. Beide Sterne bewegen sich auf einer exakten Kreisbahn, wobei sie die gleiche Entfernung zum Schwerpunkt (Bahnradius) haben. Weiterhin setzen wir voraus, dass der Inklinationwinkel¹ 90° beträgt. Für die Betrachtungen des Dopplereffekts wird vorausgesetzt, dass sich das Gesamtsystem, d.h. der gemeinsame Schwerpunkt nicht relativ zum Beobachter bewegt.

¹Winkel zwischen Sichtlinie und Bahnnormale

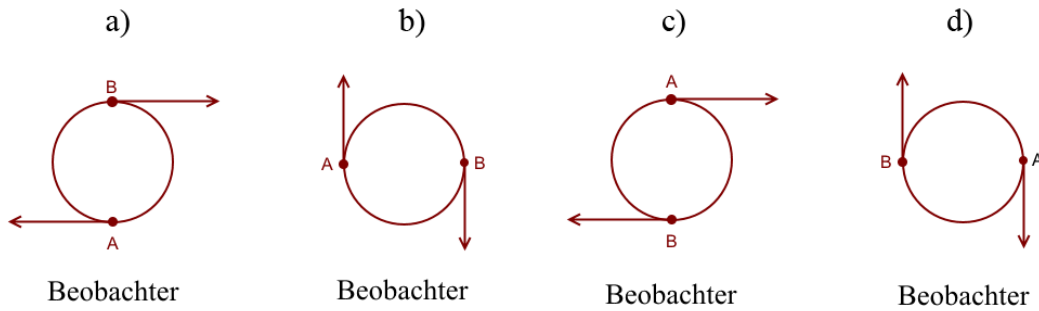


Abbildung 1: Schema: Doppelsternsystem mit den Sternen A und B - Pfeile entsprechen dem Vektor der Geschwindigkeit

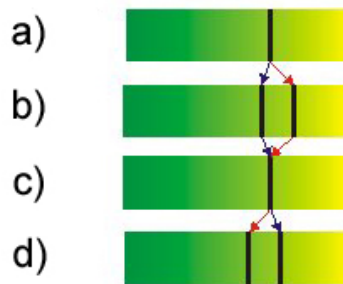


Abbildung 2: Beobachtetes Spektrum zu den in Abb. 1 gezeigten Konstellationen
 Quelle: www.leifiphysik.de/content/fixsterne-spektroskopische-doppelsterne

Im Folgenden wollen wir nun die in Abbildung 1 gezeigten Szenarien des Doppelsternsystems betrachten und den damit verbundenen Dopplereffekt und seine Auswirkungen auf das Spektrum erläutern. Unter dem Dopplereffekt versteht man eine Veränderung der Wellenlänge des Lichts aufgrund der Bewegung der Lichtquelle oder des Beobachters [7]. In den Abbildungen 1a bzw. 1c ist sichtbar, dass in diesen Szenarien der Vektor der Bahngeschwindigkeit beider Sterne senkrecht zur Beobachtungsrichtung steht. Keiner der beiden Sterne bewegt sich in Richtung zum Beobachter. Es entsteht kein Dopplereffekt. Es existiert keine messbare Radialgeschwindigkeit² und im Spektrum wird demnach keine Rot- oder Blauverschiebung gemessen, die durch Bewegung in diesem Doppelsternsystem verursacht wird (siehe Abbildung 2a bzw. 2c). Beobachtet man die beiden Sterne nach Verstreichen eines Viertels des Umlaufs erneut, so tritt der Fall ein, welcher in den Abbildungen 1b bzw. 1d gezeigt ist. Bei 1b ist die gesamte Bahngeschwindigkeit des Sterns A vom Beobachter weg gerichtet. Die Radialgeschwindigkeit entspricht zu diesem Zeitpunkt

²Geschwindigkeitskomponente entlang der Sichtlinie des Beobachters

also der Bahngeschwindigkeit. Das Licht, welches den Beobachter von diesem Stern erreicht, unterliegt dem Dopplereffekt. Die Lichtwelle wird durch die Bewegung des Sterns A vom Beobachter weg "gedehnt" und somit vergrößert sich die Wellenlänge (vgl. Abbildung 3). Nimmt man ein Spektrum des Sterns auf, so wird es in den roten Bereich verschoben - man spricht von Rotverschiebung. Für Stern B ist bei Abbildung 1b dessen gesamte Bahngeschwindigkeit auf den Beobachter gerichtet. Die Lichtwelle wird "gestaucht" und somit verkleinert sich die Wellenlänge. Es liegt eine Blauverschiebung vor (vgl. Abbildung 3). Ein Spektrum dieses Sterns zu diesem Zeitpunkt würde sich also entgegengesetzt zu jenem von Stern A verschieben. Zum Zeitpunkt des Umlaufs der beiden Sterne, der in 1b bzw. 1d gezeigt wird, erreichen die Rot- und Blauverschiebung für die beiden Sterne ihr Maximum. Insgesamt ergibt sich eine kontinuierliche Veränderung der Spektrallinie, wie in Abbildung 2 zu sehen ist [1, 2, 3, 4, 5, 6].

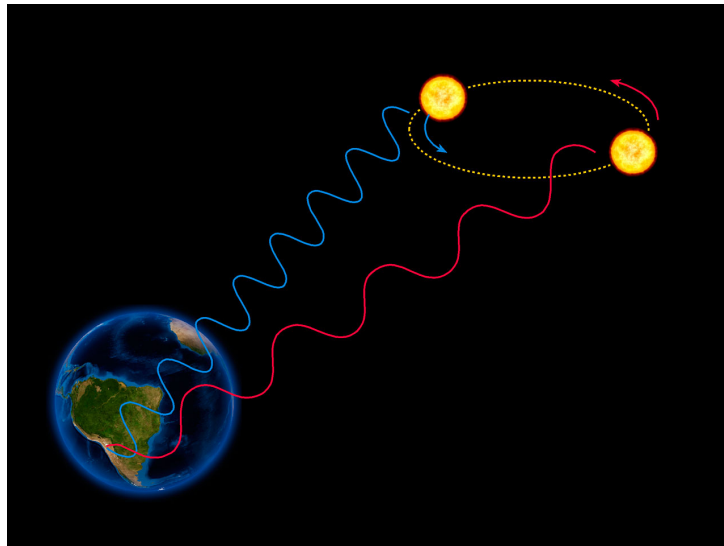


Abbildung 3: Darstellung des Dopplereffekts für ein Doppelsternsystem, Quelle:
<http://www.eso.org/public/images/eso0722e>

In Abbildung 4 sind viele Spektren eines spektroskopischen Doppelsterns chronologisch nach dem Zeitpunkt ihrer Aufnahme geordnet. Es ist deutlich zu sehen, wie sich das Spektrum kontinuierlich verändert. Je nach Beobachtungszeit sind eine oder zwei Linien zu sehen.

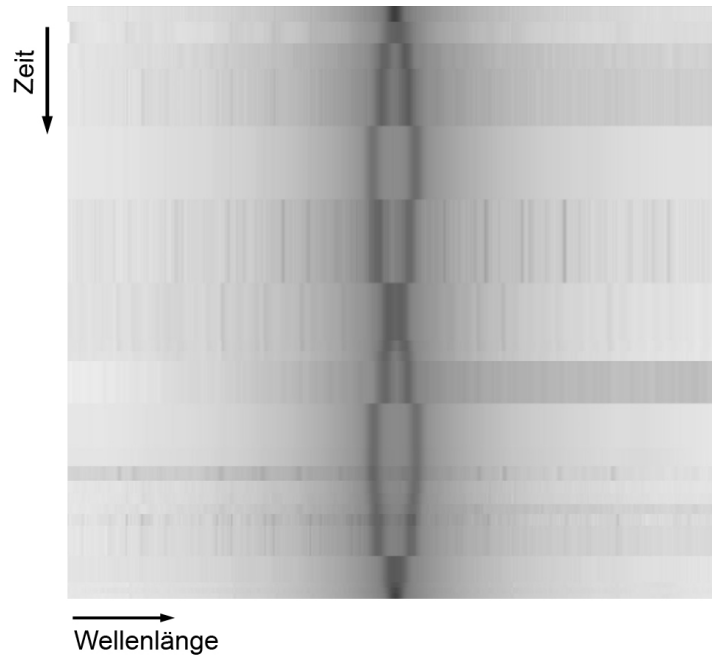


Abbildung 4: Zeitliche Veränderung des Spektrums eines spektroskopischen Doppelsternsystems, Quelle: http://www.shelyak.com/dossier.php?id_dossier=22&lang=2

2.2 Quantitative Vermessung

2.2.1 Berechnung der Radialgeschwindigkeit

Mithilfe der ermittelten Wellenlänge der verschobenen Spektrallinie und der bekannten Wellenlänge der nicht verschobenen Spektrallinie lässt sich nun mithilfe der Formel des Dopplereffekts für Licht [2, 7]

$$v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot c \quad (1)$$

die Radialgeschwindigkeit v_r für einen der Sterne des Doppelsternsystems zum Zeitpunkt der Messung des Spektrums berechnen. Bei der Berechnung der Radialgeschwindigkeit mit Gleichung (1) wird angenommen, dass die Geschwindigkeit sehr viel kleiner ist als die Lichtgeschwindigkeit c [7]. Dabei gibt $\Delta\lambda$ die Differenz zwischen der gemessenen Wellenlänge ohne Verschiebung und der gemessenen Wellenlänge mit Rot- oder Blauverschiebung durch einen der beiden Sterne an (vgl. Abb. 5). λ ist die Wellenlänge der nicht verschobenen Spektrallinie und c ist die Lichtgeschwindigkeit.

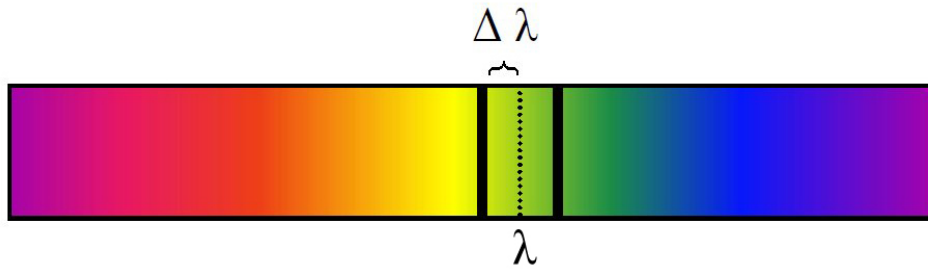


Abbildung 5: Verschiebung der Wellenlänge - $\Delta\lambda$, Quelle:
<http://spektroskopie.fg-vds.de/pdf/Spektrum34.pdf>

2.2.2 Radialgeschwindigkeits-Zeit-Kurve

Betrachtet man nun berechnete Radialgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Phase des Sterns, ergibt sich für das anfangs beschriebene System ohne Exzentrizität eine Sinuskurve (Abbildung 3, oben links), wobei wir als Phase 0 den Zustand beschreiben, welcher in Abbildung 1a gezeigt wird. Mithilfe der Radialgeschwindigkeits-Zeit-Kurve (RG-Kurve) lassen sich zahlreiche Bahn- und Stern Daten ermitteln, womit sie für die Vermessung einen zentralen Bestandteil darstellt. Auch bezüglich der Bahngeometrie lassen sich mithilfe solcher Kurven Aussagen treffen, da sich beispielsweise für eine Bahn mit Exzentrizität eine andere Kurve ergeben würde. Die folgende Abbildung zeigt vier unterschiedliche Bahngeometrien von Doppelsternsystemen und die für das Sternsystem zugehörige RG-Kurve.

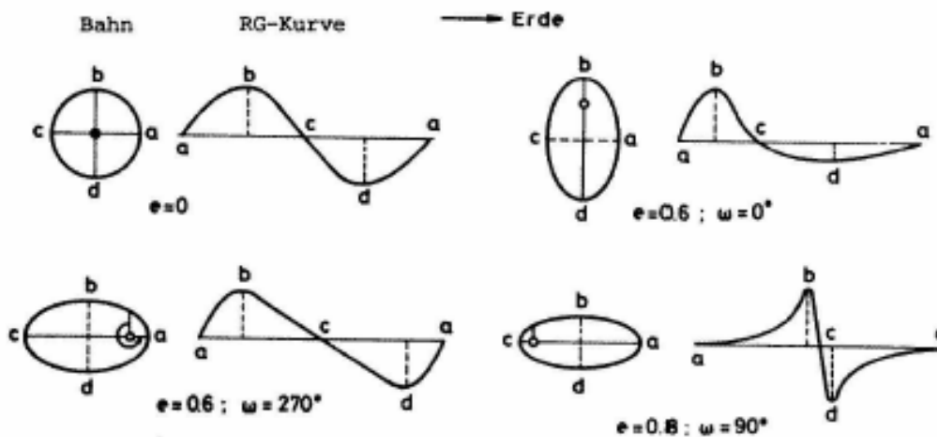


Abbildung 6: RG-Kurven für unterschiedliche Bahngeometrien, Quelle:
<http://spektroskopie.fg-vds.de/pdf/Spektrum34.pdf>

2.2.3 Bestimmung des Zeitpunkts für die maximale Aufspaltung

Bahngeschwindigkeit und Radialgeschwindigkeit entsprechen einander nur, wenn die maximale Rot- oder Blauverschiebung vorliegt (vgl. Abb. 1b bzw. 1d und 2b bzw. 2d). Daher muss zunächst die maximale Verschiebung der Spektrallinie beobachtet werden. Nicht immer ist die genaue Phase und somit die momentane Konstellation des Sterns vor der Beobachtung bekannt. Zur Lösung dieses Problems werden daher zu vielen verschiedenen Zeitpunkten eine Reihe von Aufnahmen des Spektrums gemacht. Die Zeitpunkte der Aufnahmen werden, wie in der Astronomie üblich, zunächst in Julianische Tage umgerechnet und anschließend auf die Phase zurückgerechnet [8]. In der entstandenen RG-Kurve wird nun der größte Betrag für die Radialgeschwindigkeit ermittelt, welches folglich die maximale Verschiebung für eine bestimmte Spektrallinie dieses Sterns ist.

Eine einfachere Methode, die Zeitpunkte des Maximums bereits vor der Beobachtung zu bestimmen, besteht darin, das Julianische Datum für diesen Zeitpunkt in der Literatur zu recherchieren und dann zu ermitteln, wann das nächste Maximum zu erwarten ist.

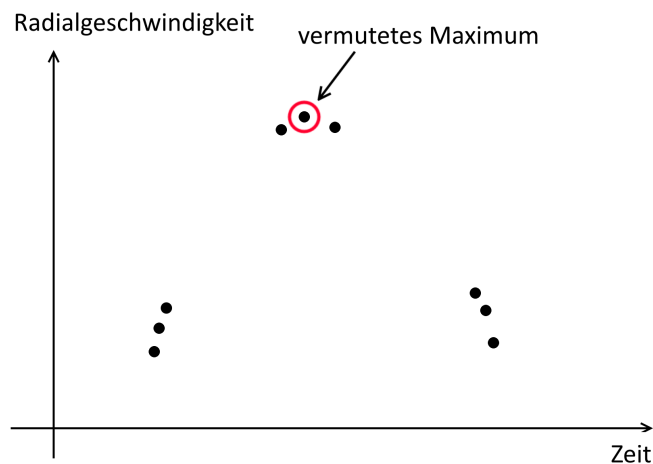


Abbildung 7: Ermittlung des Maximums aus der RG-Kurve

2.3 Besonderheiten und Probleme bei der Vermessung

2.3.1 Inklinationwinkel

Um die Vermessung möglichst exakt durchzuführen ist es wichtig die Besonderheiten der Bahngeometrie zu beachten. Dabei beeinflusst unter anderem der Inklinationwinkel die Berechnung und muss bei der Ermittlung der Bahngeschwindigkeiten berücksichtigt werden (vgl. Abb. 8). Ist die Bahnebene des Doppelsterns gegenüber der Sichtlinie geneigt, kann die Geschwindigkeit des Sterns in Relation zum Beobachter nicht mehr nur in der

Ebene mit zwei Vektoren beschrieben werden. Im dreidimensionalen Raum kommt ein dritter Vektor hinzu. Nach Abbildung 8 gilt: $\sin i = \frac{v_r}{v}$ und $v = \frac{v_r}{\sin i}$. Daraus folgt, dass bei bekanntem Inklinationwinkel die gemessene Radialgeschwindigkeit durch den Sinus des Winkels zu dividieren ist um die tatsächliche Bahngeschwindigkeit zu erhalten.

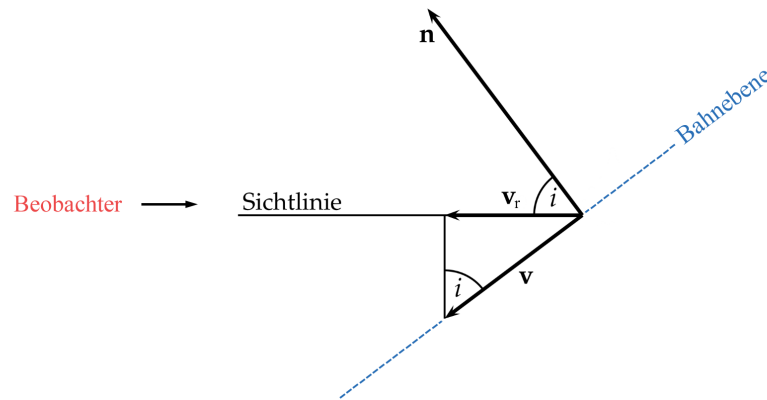


Abbildung 8: i : Inklinationwinkel, v_r : Radialgeschwindigkeit, v : tatsächliche Bahngeschwindigkeit, n : Bahnnormale, Quelle: <http://docs.sfiz-bw.de/phag/skripte/astonomie.pdf>

Die Formel für die Bestimmung der Radialgeschwindigkeit unter Berücksichtigung des Inklinationwinkels lautet nun:

$$v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda \cdot \sin i} \cdot c \quad (2)$$

2.3.2 Doppelsternsysteme mit unterschiedlichen Bahnradien

Nicht alle spektroskopischen Doppelsternsysteme liegen in der Konstellation vor, wie sie Abbildung 1 darstellt. Liegen zwei Sterne mit unterschiedlichen Massen vor, umkreisen sie den gemeinsamen Schwerpunkt in unterschiedlicher Entfernung. Daraus resultiert bei gleicher Umlaufdauer eine unterschiedliche Bahngeschwindigkeit. Für die Aufspaltung der Spektrallinie bedeutet dies, dass $\Delta\lambda$ für beide Sterne unterschiedliche Werte annimmt. Bei der Berechnung der Bahngeschwindigkeit müssen beide Sterne daher getrennt betrachtet werden.

2.3.3 Eigenbewegung der Erde

Wird die Beobachtung über einen längeren Zeitraum (>3 Monate) durchgeführt, ist bei der Berechnung der Bahndaten der Umlauf der Erde um die Sonne zu berücksichtigen. Da sich die Erde zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit einer bestimmten Geschwindigkeit auf

den Stern zu oder von ihm weg bewegt, wird eine unterschiedliche Radialgeschwindigkeit gemessen.

2.3.4 Auflösung des Spektrographen

Ein weiteres Problem, dass die Beobachtung eines spektroskopischen Doppelsterns beeinträchtigen könnte, ist die begrenzte Auflösung des Spektrographen. Das Gitter im Spektrographen hat nur eine bestimmte Anzahl Linien/mm und kann Spektren somit nur mit einer begrenzten Genauigkeit und Auflösung aufnehmen. Da die gemessene Aufspaltung $\Delta\lambda$ jedoch, abhängig von der Bahngeschwindigkeit, nur einige Ångström beträgt, ist eine gewisse Mindestauflösung des Spektrographen notwendig um die zwei Linien zu trennen.

2.3.5 SB1-Systeme

Bei einem sogenannten SB1-System (single-line spectroscopic binaries) hat einer der beiden Sterne des Doppelsternsystems eine deutlich geringere Leuchtkraft. Ist diese für die Spektroskopie zu gering, ist im Spektrum nur eine Spektrallinie zu sehen, welche sich durch den Dopplereffekt verschiebt. Für die Bestimmung der Bahnparameter bedeutet dies, dass nur für einen der beiden Sterne Messungen und Berechnungen möglich sind, da vom anderen Stern keine Daten erfasst werden können.

3 Messung

3.1 Das Doppelsternsystem β Aurigae

Das Doppelsternsystem β Aurigae, auch bekannt als Menkanlinan, ist das zweithellste Objekt im Sternbild Fuhrmann und 81 Lichtjahre von der Erde entfernt. Zusätzlich zur Klassifikation als spektroskopischer Doppelstern ist β Aurigae auch ein Bedeckungsveränderlicher, wobei die scheinbare Helligkeit zwischen +1,85 und +1,93 mag schwankt. Er gehört der Spektralklasse A2 an, erscheint also bläulich und besitzt eine Oberflächentemperatur von 9350 K. Der optimale Beobachtungszeitraum für das Sternsystem ist Oktober bis April. β Aurigae ist zwar zirkumpolar, während der Zeit von Mai bis September aber sehr nah am Horizont und somit mitunter nicht zu beobachten. Die für die Vermessung wichtige Bahngeometrie von β Aurigae ist nahezu ideal. Das Sternsystem weist keine Exzentrizität auf und die Bahnebene ist bei einem Inklinationwinkel von 76° nur gering gegenüber der Sichtlinie des Beobachters geneigt [9].

3.2 Vorbereitung

3.2.1 Ermittlung der optimalen Beobachtungszeit

Da die Messungen durch technische Probleme am schuleigenen Observatorium und das Wetter auf den Zeitraum September - November eingeschränkt wurden, war es nötig die Beobachtung zu einem möglichst späten Zeitpunkt während dieses Zeitfensters durchzuführen, da das Sternsystem sonst durch die Horizontnähe von Bäumen und anderen Objekten verdeckt worden wäre. Zusätzlich wurde versucht, die Aufnahmen zu einer möglichst späten Uhrzeit anzufertigen, damit β Aurigae höher über dem Horizont steht.

Für die Beobachtung von spektroskopischen Doppelsternen ist es wichtig, zum Zeitpunkt der maximalen Radialgeschwindigkeiten der beiden Sterne und somit der maximalen Aufspaltung der Linien zu beobachten (vgl. 2.2.3). Daher wurde mithilfe bekannter Daten über die Zeitpunkte der Minima und Maxima der Aufspaltung von β Aurigae die optimale Beobachtungszeit ermittelt. Mit der Formel (vgl. [10])

$$Min = 2431076,7269 \pm 0,0010 + (3,96004732 \pm 0,00000032) \cdot n \quad (3)$$

lassen sich die Minima von β Aurigae berechnen. Dabei ist 2431076,7269 ein julianisches Datum³ für ein Minimum von β Aurigae, zu dem das n -fache der Umlaufdauer des Doppelsterns - 3,96 Tage - addiert wird. Um nun die Zeitpunkte der für die Beobachtung relevanten Maxima zu erhalten, ist zu dem Ergebnis die Dauer einer Viertelphase, $3,96004732/4$ zu addieren, da dies die Zeitspanne zwischen Maximum und Minimum der Aufspaltung für ein Sternsystem ohne Exzentrizität (vgl. Abb. 3, oben links) ist. Setzt man nun für n 6540 ein, um ein Datum in der Beobachtungszeit im November 2014 zu erhalten, ergibt sich nach Addition einer Viertelphase als julianisches Datum

$$\begin{aligned} Max &= 2431076,7269 \pm 0,0010 + (3,96004732 \pm 0,00000032) \cdot 6540 + \frac{3,96004732}{4} \\ &= 2456976,426 \pm 0,003 \end{aligned} \quad (4)$$

Rechnet man dieses julianische Datum in ein gregorianisches Datum um, erhält man als Zeitpunkt für das Maximum Freitag, den 14. November 2014 um 22:16 UTC. Da die Phase des Sterns 3,96 Tage beträgt können zur Ermittlung weiterer Maxima einfach $3,96/2$ Tage addiert werden, da sich das Maxima nach einer halben Phase wiederholt (vgl. Abb. 3, oben links).

³Das julianische Datum gibt die Zeit in Tagen an, die seit dem 1. Januar -4712 (4713 v. Chr.) 12:00 Uhr vergangen ist [11].

3.2.2 Vorbereitung des Spektrographen

Der für die Aufnahmen verwendete Spektrograph musste zunächst auf den Wellenlängenbereich eingestellt werden, den wir beobachten wollten. Für unsere Messung verwendeten wir die Spektrallinien H- α bei 656 nm und H- β bei 468 nm. H- α und H- β bezeichnen Absorptionslinien des Wasserstoffs, die für die Messung gut geeignet sind. Der Spektrograph wurde auf einen Wellenlängenbereich eingestellt, der diese beiden Spektrallinien enthält. Zusätzlich zur Umstellung des Wellenlängenbereiches wurde auch das optische Gitter des Spektrographen ausgetauscht. Statt dem ursprünglichen optischen Gitter mit 200 Linien/mm wurde für die Beobachtung ein 900 Linien/mm-Gitter verwendet. Dieses stellt das Spektrum deutlich genauer dar, verkleinert aber gleichzeitig den Wellenlängenbereich - für die Beobachtung von H- α und H- β reichte dieser jedoch aus.

3.3 Beobachtung

3.3.1 Equipment

Folgendes Equipment wurde für die Aufnahmen verwendet:

Teleskop: LX200-ACF, 2000mm Brennweite, Schmidt-Cassegrain

Spektrograph: DADOS, 25 μ m, 900 Linien/mm-Gitter

CCD-Kamera: ST2000-XM, 1600 x 1200 Pixel, Pixelgröße: 7,4 x 7,4 μ m

Spiegelreflexkamera: Canon EOS 1000D, 3.888 x 2.592, Pixelgröße: 5,4 x 5,4 μ m

Genutzte Software:

AstroArt 5.0

VSpec

Cartes du Ciel

3.3.2 Vorgehen

Die Beobachtungen wurden damit begonnen, das Teleskop auf den Stern β Aurigae auszurichten und den Stern nachführen zu lassen. Anschließend wurde der Spektrograph am Teleskop angebracht und die CCD-Kamera bzw. die Spiegelreflexkamera an diesem befestigt und an einen Computer angeschlossen, welcher die Kamera mit der Software *AstroArt 5.0* fernsteuerte. Im Falle der CCD-Kamera wurde per Software die Temperatur im Gehäuse auf -15° C herunter gekühlt um das Bildrauschen zu reduzieren. Zunächst

wurde eine Aufnahme der Kalibrierlampe angefertigt, mit welcher später das Spektrum einfach und schnell kalibriert werden kann. Nachdem der Spektrographen-Spalt auf β Aurigae ausgerichtet war, wurde zunächst eine Sequenz von mehreren Bildern aufgenommen und bei Verwendung der CCD-Kamera anschließend eine Sequenz von Dunkelbildern.

3.3.3 Aufnahmen

Tabellenübersicht der Beobachtungen:

Nr.	Datum	Uhrzeit (UTC)	Belichtungszeit	Anmerkung
1	14.10.2014	20:07	3s	
2	18.10.2014	20:07	3s	
3	19.10.2014	19:19, 19:36	5s	Fehleinstellung: Aufnahmen mit 800x600 Pixeln statt 1600x1200 Pixeln
4	24.10.2014	20:41, 20:44	5s	
5	03.11.2014	19:40 - 20:00	1s, 4s	
6	16.11.2014	19:15 - 20:40	5-15s	Kamera: Canon EOS 1000D

Beispiel eines unbearbeiteten Spektrums - aufgenommen am 16.11.2014 mit der Canon EOS 1000D bei einer Belichtungszeit von 15 Sekunden:



Abbildung 9: Beispiel-Spektrum 1

Beispiel eines unbearbeiteten Spektrums - aufgenommen am 03.11.2014 mit der CCD-Kamera SST2000-XM bei einer Belichtungszeit von 4 Sekunden:

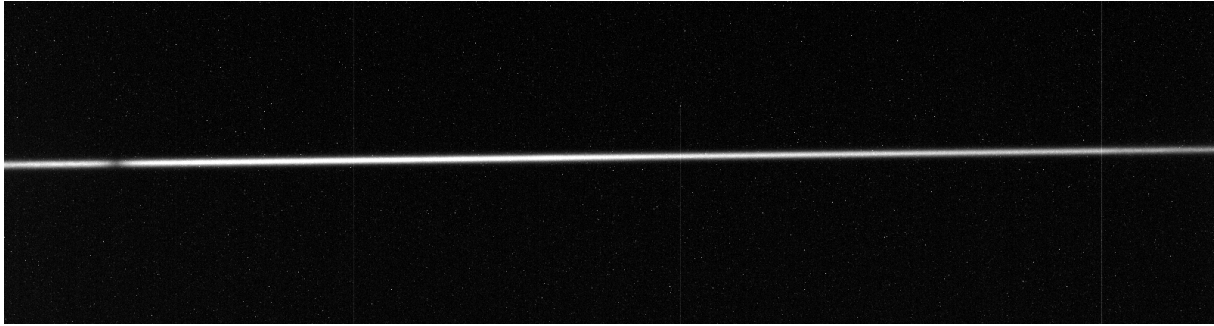


Abbildung 10: Beispiel-Spektrum 2

3.3.4 Probleme

Die Auflösung der CCD-Kamera von 1600 x 1200 war für die Beobachtung der Aufspaltung der Spektrallinien sehr niedrig und es war somit schwierig die nötigen Daten aus dem Spektrum zu erhalten. Daher wurde die Entscheidung getroffen, nach einigen Beobachtungen mit der CCD-Kamera am 16.11.2014 als Kamera die CANON EOS 1000D zu verwenden, welche mit 3.888 x 2.592 Pixeln deutlich höher auflöst und somit eine exaktere Messung ermöglicht.

Durch die technischen Probleme des Teleskops und des Schulobservatoriums sowie durch den Einfluss des Wetters war die Anzahl der Beobachtungstermine sehr eingeschränkt und somit konnten wir erst am 16.11.2014 die maximale Aufspaltung der Linien messen.

Da die Phase von β -Aurigae annähernd genau 4 Tage beträgt, misst man jede zweite Nacht nahezu die gleiche Phase. Große Teile der Phase des Doppelsternsystems sind somit nicht messbar sind, da sie unter Tageslicht auftreten. Eine Erstellung einer vollständigen RG-Kurve war somit nicht möglich. Glücklicherweise lagen Minimum und Maximum jeweils zwischen 21:00 und 23:00 UTC und somit zu beobachtbaren Zeiten.

4 Auswertung

4.1 Verarbeitung der Spektren

4.1.1 Nachbearbeitung der Aufnahmen

Bei den Aufnahmen mit der CCD-Kamera wurde zusätzlich zu den Bildern des Spektrums auch eine Sequenz von Dunkelbildern aufgenommen. Die Sequenz der Dunkelbilder

und die Sequenz der Aufnahmen des Spektrums wurden mithilfe der Software *AstroArt 5.0* gemittelt und anschließend das entstandene Dunkelbild vom gemittelten Spektrum abgezogen und somit Rauschen und Pixelfehler reduziert.

4.1.2 Kalibrierung

Für das nicht geeichte Spektrum ist bisher keine Wellenlängenskala bekannt. Da es zur Ermittlung der Bahnparameter notwendig ist, λ und $\Delta\lambda$ zu kennen, muss das Spektrum kalibriert werden. Dazu wird die Software *VSpec* verwendet. Die einfachste Methode, die Kalibrierung zu erreichen besteht darin, die im Spektrum sichtbaren Spektrallinien H- α und H- β im Programm zu markieren und ihre bekannten Wellenlängen einzugeben. Mithilfe dieser zwei Wellenlängen kann das Programm nun das Spektrum eichen und für jeden Punkt im Spektrum ist nun die Wellenlänge bekannt. Wird zusätzlich zum Spektrum während der Beobachtung eine Kalibrierkurve aufgenommen, kann hier mit dem gleichen Prinzip bei bekannten Wellenlängen das Spektrum geeicht werden.

4.2 Ermittlung der Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda$

Die größte Aufspaltung der Spektrallinien und somit der größten Wert für $\Delta\lambda$ wurde am 16.11.2014 gemessen, was in Einklang mit der Berechnung in 2.3.1 steht. Das Sternsystem befand sich demzufolge zum Zeitpunkt dieser Beobachtung annähernd in einer Konstellation, wie sie Abbildung 1b bzw. 1d veranschaulichen.

Abbildung 11 zeigt die Spektralkurve des bearbeiteten und kalibrierten Spektrums, welches am 16.11.2014 aufgenommen wurde. Die H- β -Linie und die H- α -Linie sind gut zu erkennen.

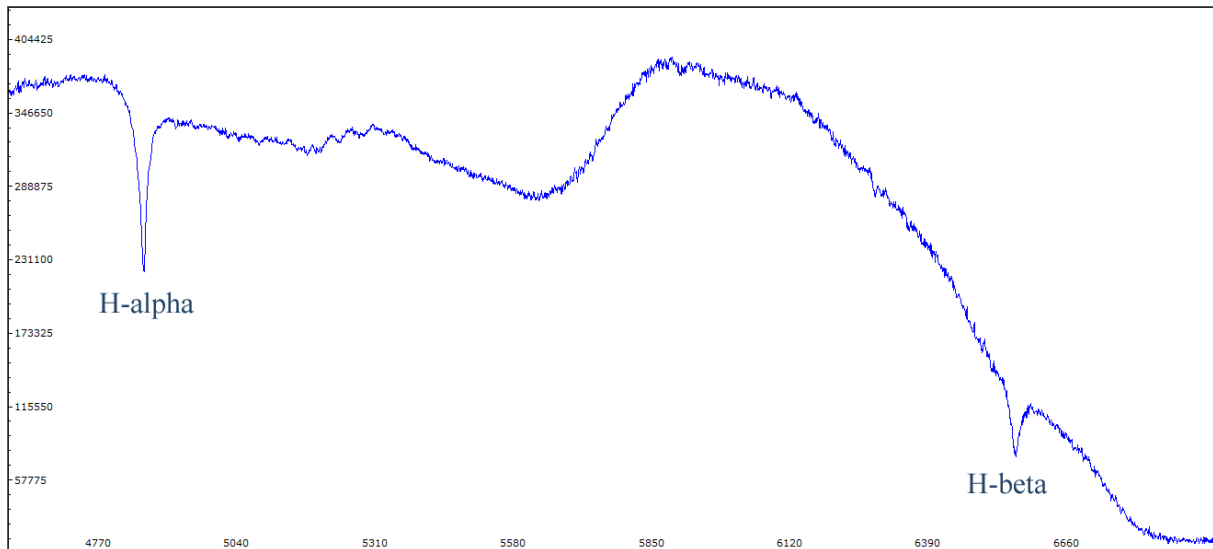


Abbildung 11: Spektrogramm, des Spektrums, welches am 16.11.2014 aufgenommen wurde. x-Achse: Wellenlänge in Ångström, y-Achse: Intensität

Mithilfe der Software *VSpec* wurde das Spektrum kalibriert. Dazu mussten die H- α -Linie und die H- β -Linie markiert werden und ihre Wellenlängen (6563 und 4861 Ångström) [12] angegeben werden. Das Programm errechnete dann, dass jeder Pixel in der Aufnahme 0,605 Ångström im Spektrum entspricht.

Im nächsten Schritt wurden die Spektrallinien H- α und H- β untersucht. Dabei wurde bei beiden Linien der erwartete "Doppel-Peak" erfasst. Abbildung 12 zeigt den "Doppel-Peak" bei der H- α -Linie.

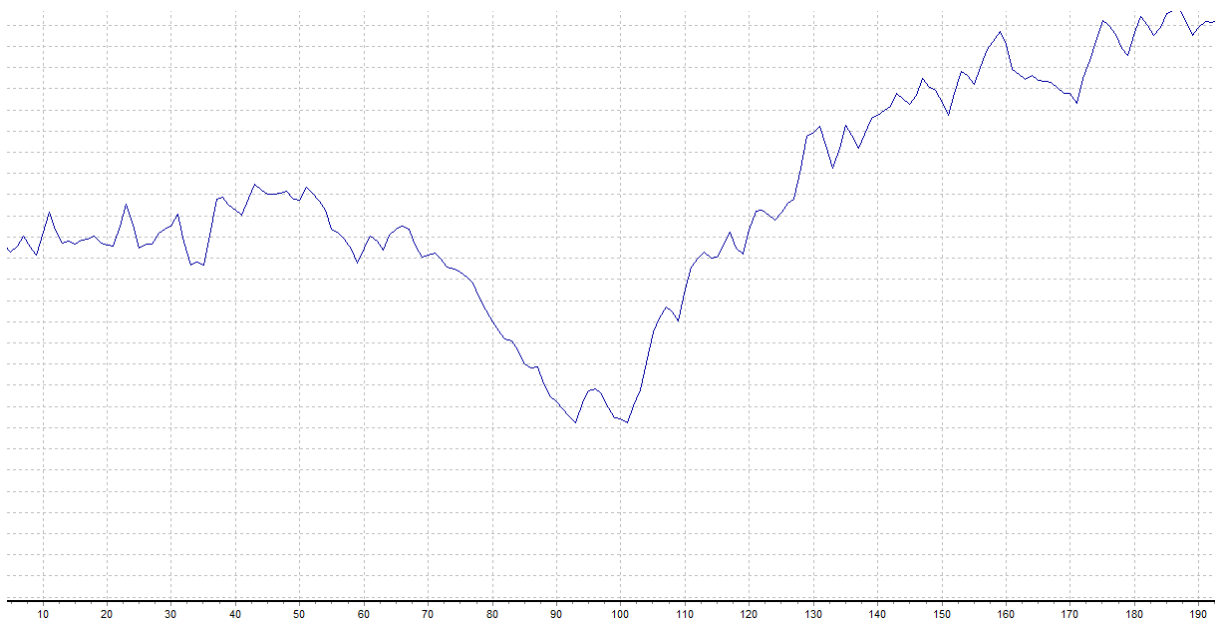


Abbildung 12: Vergrößerte H- α -Linie in der Spektrogramm des Spektrums, welches am 16.11.2014 aufgenommen wurde. x-Achse: Pixel, y-Achse: Intensität

Auch bei der H- β -Linie (Abb. 13) ist ein Doppel-Peak zu erkennen, jedoch weist das Spektrum hier ein deutlich größeres Rauschen auf. Deshalb wollen wir für die folgenden Berechnungen zunächst die Aufspaltung bei H- α betrachten.



Abbildung 13: Vergrößerte H- β -Linie in der Spektralkurve des Spektrums, welches am 16.11.2014 aufgenommen wurde. x-Achse: Pixel, y-Achse: Intensität

Die Vergrößerung von H- α (Abb. 12) zeigt, dass die beiden Linien 8 Pixel voneinander entfernt sind, bei $0,605 \frac{\text{\AA}}{\text{Pixel}}$ entspricht das einer Aufspaltung von $4,84 \text{ \AA}$. Verwendet man für die Auswertung die H- β -Linie, so ergibt sich eine Aufspaltung von 6 Pixeln, was $3,63 \text{ \AA}$ entspricht.

Ein Vergleich mit Messungen, die zu einem Zeitpunkt durchgeführt wurden als keine Aufspaltung sichtbar war, zeigt, dass λ - die nicht verschobene Spektrallinie - sich mittig zwischen den verschobenen Linien befand. Daher wird zur Ermittlung von $\Delta\lambda$ der Abstand zwischen den beiden verschobenen Spektrallinien bestimmt und anschließend halbiert. Für unsere Messung ergeben sich als Werte für die Verschiebung somit $\Delta\lambda = 2,42 \text{ \AA}$ (H- α) und $\Delta\lambda = 1,815 \text{ \AA}$ (H- β).

4.3 Vergleich mit anderen Aufnahmen

Während bei der Auswertung des Spektrums vom 16.11.2014 eine Linienaufspaltung klar erkennbar ist, ist diese in nahezu allen anderen Aufnahmen nicht zu erkennen (vgl. Abb. 14). Eine Rückrechnung des julianischen Datums zeigt, dass diese Beobachtungen

ungefähr eine Viertelphase nach bzw. vor der Beobachtung am 16.11.2014 durchgeführt wurden. Dadurch war die Konstellation des Sternsystems ähnlich der, wie sie in Abbildung 1a bzw. 1c veranschaulicht wird - die Linienaufspaltung hatte ihr Minimum.

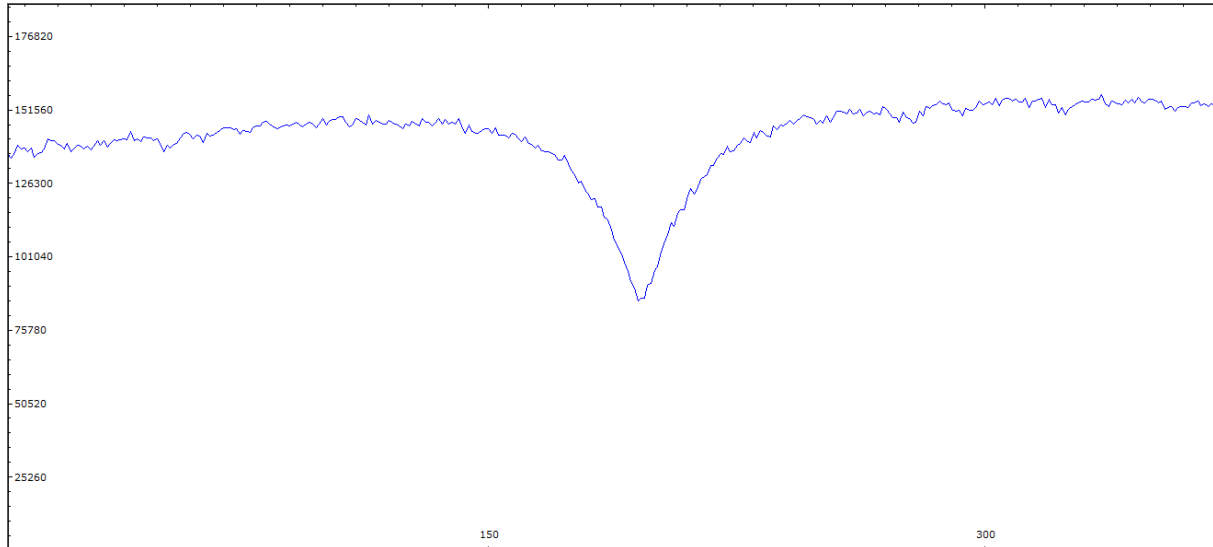


Abbildung 14: Vergrößerter Ausschnitt aus der Spektralkurve des Spektrums, welches am 24.10.2014 aufgenommen wurde. x-Achse: Pixel, y-Achse: Intensität

5 Berechnung der Bahnparameter

5.1 Bahngeschwindigkeit

Mithilfe des in 4.2 bestimmten Wertes für $\Delta\lambda$ können nun die Bahngeschwindigkeiten der beiden Sterne ermittelt werden. Für die Berechnung dieser Geschwindigkeit ist der Wert für den Inklinationwinkel (vgl. 2.4.1) zu berücksichtigen. Die vollständige Formel für die Berechnung lautet nun:

$$v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda \cdot \sin(i)} \cdot c \quad (5)$$

Da für beide Sterne der gleiche Wert für $\Delta\lambda$ gemessen wurde, muss die Berechnung nur für einen Stern ausgeführt werden. Setzt man für $\Delta\lambda$ die bei H- α ermittelten 2,42 Ångström, für λ die nicht verschobene Wellenlänge von H- α , 6563 Ångström⁴ [12], für i den bekannten Inklinationwinkel von 76° [9] und für c die Lichtgeschwindigkeit von 299792 km/s ein, so

⁴Bei dieser Berechnung wird die Verschiebung von λ durch eine Bewegung des Gesamtsystems nicht berücksichtigt, da sie vernachlässigbar gering ist (β Aurigae bewegt sich mit 18 km/s auf die Erde zu, wodurch λ um 0,4 Å verkleinert wird.).

erhält man für die Bahngeschwindigkeit $v_r = 113,9$ km/s.

$$v_r = \frac{2,42 \text{ \AA}}{6563 \text{ \AA} \cdot \sin(76^\circ)} \cdot 299792 \text{ km/s} = 113,93 \text{ km/s} \quad (6)$$

Aufgrund der Digitalisierung der Daten ist die Genauigkeit durch die Zahl der Pixel beschränkt. In unserer Messung entspricht ein Pixel $0,605 \text{ \AA}$, womit eine maximale Genauigkeit von $\pm 0,3025 \text{ \AA}$ verbunden ist. Der Wert für die Radialgeschwindigkeit liegt also unter Berücksichtigung dieser Tatsache bei $v_r = 113,9 \pm 7,1$ km/s.

Nutzt man für die Berechnung der Bahngeschwindigkeit den Wert für $\Delta\lambda$, welcher bei H- β ermittelt wurde, ergibt sich für $\Delta\lambda = 1,815 \text{ \AA}$ und $\lambda = 4861 \text{ \AA}$ [12] die Bahngeschwindigkeit $v_r = 115,3 \pm 9,6$ km/s.

5.2 Weitere Bahnparameter

Neben der Bahngeschwindigkeit können auch weitere Bahnparameter berechnet werden, darunter die Masse der Sterne und die Bahnradien. Dabei gehen wir von dem für H- α ermittelten Wert für die Radialgeschwindigkeit aus. Zunächst wollen wir die Bahnradien bestimmen. Für die bekannte Umlaufdauer T gilt für eine Kreisbahn die Formel

$$T = \frac{r \cdot 2\pi}{v_r} \quad (7)$$

welche nach dem Bahnradius r aufgelöst wird.

$$r = \frac{v_r \cdot T}{2\pi} \quad (8)$$

Als Wert erhält man für beide Sterne $r = 6.203.389$ km. Die Entfernung zwischen beiden Himmelskörpern beträgt somit etwa 12,4 Millionen km. Ein Vergleich mit der Entfernung zwischen Erde und Sonne (ca. 150 Millionen km) zeigt, wie gering der Abstand zwischen den beiden Sternen ist.

Zur Berechnung der Massen beider Sterne wird die Formel⁵

$$T^2 = \frac{4\pi^2 \cdot r^3}{G(m_1 + m_2)} \quad (9)$$

⁵ Gleichung (9) erhält man aus dem Gravitationsgesetz und dem 3. Keplerschen Gesetz [13]. G bezeichnet die Gravitationskonstante

nach $m_1 + m_2$ umgestellt. Mit

$$m_1 + m_2 = \frac{r^3 \cdot 4\pi^2}{G \cdot T^2} \quad (10)$$

lässt sich die Summe der Massen angeben. Als Ergebnis erhält man $9,649 \cdot 10^{30}$ kg. Da beide Sterne annähernd gleiche Radien besitzen, folgt aus der Formel⁶,

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{m_2}{m_1} \quad (11)$$

dass auch ihre Massen annähernd gleich sind. Daher wird die Summe der Massen $m_1 + m_2$ halbiert. Rechnet man die $4,82 \cdot 10^{30}$ kg in Sonnenmassen um ($1,985 \cdot 10^{30}$ kg), ergeben sich für beide Sterne jeweils 2,43 Sonnenmassen.

5.3 Vergleich mit Literaturwerten

In der Literatur finden sich für die Bahngeschwindigkeiten Werte von etwa 108,1 und 110,9 km/s für die beiden Sterne [14]. Die gemessenen Werte von 113,9 km/s (H- α) bzw. 115,3 km/s (H- β) stimmen damit sehr gut überein. Dabei ist auch zu bedenken, dass wir mit unserem Mess-Equipment einen Fehler von mindestens $\pm 7,1$ km/s haben. Für die Massen der beiden Sterne sind in der Literatur die Werte 2,32 und 2,38 Sonnenmassen angegeben [14]. Auch diese Werte sind sehr nah an den ermittelten Werten. Trotzdem zeigt die Genauigkeit von $\pm 7,1$ km/s, dass die Verwendung eines 900 Linien/mm-Gitter für die exakte Bestimmung von Bahnparametern kritisch sein kann. Weitere mögliche Gründe für Abweichungen von den Literaturwerten bestehen zudem in Ungenauigkeiten in den Aufnahmen. β Aurigae befand sich zum Zeitpunkt der Aufnahme 30° über dem Horizont. Bei einer Beobachtung eines Sterns in dieser Konstellation sind die Messungen von Szintillation [15] betroffen. Das Licht des Sterns von β Aurigae wird durch Luftunruhe abgelenkt und es treten Helligkeitsveränderungen auf, welche die Messungen beeinträchtigen. Bei einer Höhe von 30° über dem Horizont tritt dieser Effekt mit 90% größerem Einfluss im Vergleich zu einer Beobachtung eines Objektes, das sich im Zenit befindet, auf. Eine weitere mögliche Messungenauigkeit besteht darin, dass sich β Aurigae zum Zeitpunkt der Beobachtung nicht exakt in der Konstellation befand, wie sie Abbildung 1b zeigt. Es ist also denkbar, dass die gemessene Radialgeschwindigkeit ihr Maximum nicht genau zum Zeitpunkt der Beobachtung erreichte. Die Berechnung in 2.3.1 zeigt jedoch, dass der berechnete Zeitpunkt des Maximums nur geringfügig vom Zeitpunkt der Beobachtung abweicht. Zudem zeigt die sehr genaue Übereinstimmung der Messwerte mit den Literaturwerten, dass diese Probleme die Messung nicht negativ beeinflussten.

⁶ Gleichung (11) folgt aus der Definition für den Schwerpunkt von zwei Körpern

6 Ausblick

In meiner Seminararbeit wurden die physikalischen Grundlagen spektroskopischer Doppelsterne dargelegt und am Beispiel von β Aurigae eine erfolgreiche Vermessung durchgeführt.

Die Spektroskopie von β Aurigae zeigt, wie unter Ausnutzung physikalischer Grundlagen und Phänomene, wie dem Dopplereffekt, sehr detaillierte und genaue Messungen durchgeführt werden können. Als alleiniger Messwert diente die Aufspaltung der Linien im Spektrum. Mit diesem Wert konnten nicht nur Bahngeschwindigkeit sondern auch Radien und Massen berechnet werden. Dennoch zeigen die Messergebnisse und die Fehlerabschätzung auch, dass für die Bestimmung der Bahnparameter spektroskopischer Doppelsterne einige Mindestvoraussetzungen an das verwendete Mess-Equipment gegeben sind. Zwar reichte das 900 Linien/mm-Gitter aus um die Aufspaltung deutlich zu zeigen, eine exaktere Berechnung von Bahnparametern, insbesondere bei Doppelsternsystemen mit unterschiedlichen Massen und Radien, setzt jedoch bessere Messinstrumente voraus.

Für eine weiterführende Untersuchung könnte das Doppelsternsystems β Aurigae zusätzlich zur Betrachtung als spektroskopischer Doppelstern auch als Bedeckungsveränderlicher analysiert werden. Eine Betrachtung der Lichtkurve und eine Analyse des Doppelsternsystems auf Basis dieser Daten könnte genutzt werden, um Werte wie den Inklinationwinkel zu ermitteln.

7 Literatur

Literatur

- [1] <http://www.sternwarte.uni-erlangen.de/~drechsel/vorlesungen/physiksterne/HD/eclipse/ds-allgemein.pdf>
Zugriff 22.11.2014
- [2] <http://www.leifiphysik.de/content/fixsterne-spektroskopische-doppelsterne>
Zugriff 29.10.2014
- [3] <http://spektroskopie.fg-vds.de/pdf/Spektrum34.pdf>
Zugriff 29.10.2014
- [4] <http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/binaries/spectroscopic.html>
Zugriff 30.11.2014
- [5] <http://www.tls-tautenburg.de/research/artie/lectures/SB2.pdf>
Zugriff 29.10.2014
- [6] <http://www.baader-planetarium.de/dados/download/spektroskopie-von-Beta-Aurigae.pdf>
Zugriff 29.10.2014s
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect
Zugriff 29.11.2014
- [8] <http://www.usm.uni-muenchen.de/people/saglia/praktikum/doppelsterne/doppelsterne.html>
Zugriff 19.11.2014
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Beta_Aurigae
Zugriff 29.10.2014
- [10] Times of minimum for AR Aur and beta Aur and a new period determination for beta Aurigae, *Information Bulletin on Variable Stars*, 4533, 1., 11/1997
- [11] http://de.wikipedia.org/wiki/Julianisches_Datum
Zugriff 23.11.2014
- [12] <http://de.wikipedia.org/wiki/Balmer-Serie>
Zugriff 30.11.2014

- [13] http://de.wikipedia.org/wiki/Keplersche_Gesetze
Zugriff 29.11.2014
- [14] Stellar Astrophysics with a Dispersed Fourier Transform Spectrograph. II. Orbits of Double-lined Spectroscopic Binaries, *The Astronomical Journal*, Volume 142, Issue 1, article id. 6, 11 pp. , 07/2011
- [15] [http://de.wikipedia.org/wiki/Szintillation_\(Astronomie\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Szintillation_(Astronomie))
Zugriff 30.11.2014
- [16] <http://www.astrospectroscopy.de/Heidelbergtagung/Thizy1.pdf>
Zugriff 27.11.2014
- [17] http://www.shelyak.com/dossier.php?id_dossier=22&lang=2
Zugriff 29.10.2014
- [18] <http://astrowww.phys.uvic.ca/~tatum/celmechs/celm18.pdf>
Zugriff 29.10.2014
- [19] <http://docs.sfiz-bw.de/phag/skripte/astronomie.pdf>
Zugriff 29.11.2014

Ich erkläre hiermit, dass ich die Seminararbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

....., den

Ort

Datum

.....
Unterschrift des Verfassers