Bestimmung der Systemparameter des spektroskopischen Doppelsterns β Aurigae

Leon Gleser

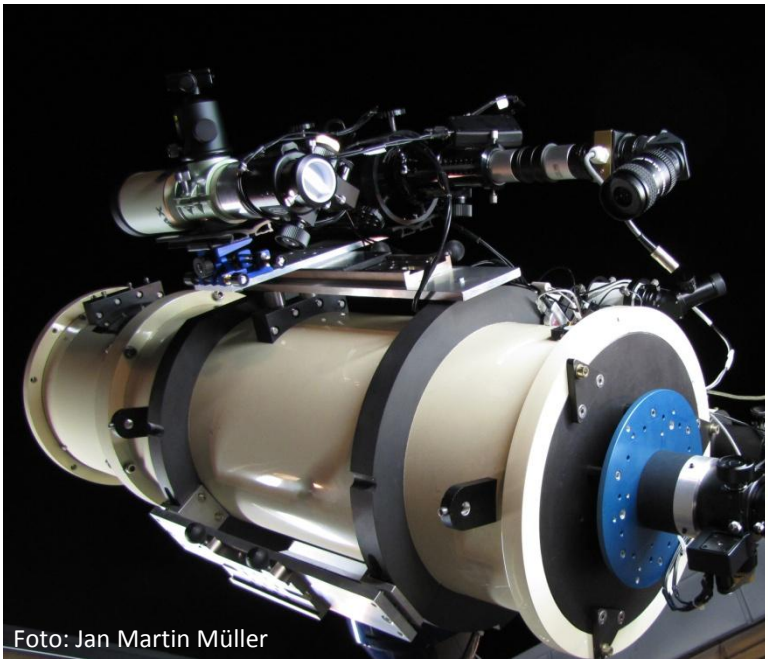


Foto: Jan Martin Müller

Carl-Fuhlrott-Gymnasium Wuppertal

Jahrgangsstufe Q1, Schuljahr 2012/2013

Projektkurs Astronomie

Kursleiter: Bernd Koch

Abgabetermin: 29.05.2013

Kontaktdaten Leon Gleser: **Telefon: 0202 / 30 35 04**

E-Mail: music@leon-gleser.de

Inhalt

1. Einleitung ... 3

2. Sternwarte des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums ... 4

3. Allgemeine Grundlagen ... 5

3.1 Beta Aurigae – ein Doppelstern ... 5

3.2 Entstehung des Lichts ... 7

3.3 Spektroskopie ... 9

3.3.1 Aufspaltung des Lichts in seine Wellenlängen ... 9

3.3.2 Arten von Spektren ... 10

3.3.3 Doppler-Effekt ... 11

4. Astronomische Geräte ... 13

4.1 Sigma 1603 CCD-Kamera ... 13

4.2 Spektrograph Lhires III ... 17

5. Aufnahme und Bearbeitung von Spektren ... 19

5.1 Aufnahme mit MaxIm DL ... 19

5.2 Ergebnis: Die aufgenommenen Spektren von Beta Aurigae ... 22

5.2.1 Rohspektren ... 22

5.2.2 Neonreferenzlinien ... 23

5.3 Überlagern von Spektren ... 25

5.3.1 Überlagern der Stern- mit den Neonspektren ... 25

5.3.2 Horizontale Ausrichtung des überlagerten Spektrums ... 26

5.4 Erzeugung des wellenlängenkalibrierten Spektrums mit VSpec ... 27

5.4.1 Erzeugung eines unkalibrierten Spektrums ... 27

5.4.2 Kalibrierung des Spektrums anhand von Neonreferenzlinien ... 28

5.5 Gauss-Fit der aufgespalteten Hα-Spektrallinie ... 30

5.6 Messergebnisse ... 33

6. Herleitung der Formeln für die Massen und die Bahnradien der beiden Sternkomponenten ... 34

6.1 Herleitung der Formeln für die Kreisbahn ... 34

6.2 Formeln für die elliptische Umlaufbahn 36

7. Auswertung der Messergebnisse 38

7.1 Radialgeschwindigkeit 38

7.2 Auswertung mit Spectroscopic Binary Solver 39

7.3 Abschätzung der Inklination i 45

7.4 Berechnung der Massen und Bahnradien 47

7.5 Simualtion der Lichtkurve mit dem Eclipsing Binary Simulator 49

8. Schlussbetrachtung 50

Anhang 51

Danksagung an Olivier Thizy 51

Abschlusserklärung 51

1. Einleitung

Das Universum bietet viel Geheimnisvolles und Interessantes. Aus diesem Grund entschied ich mich, in diesem Schuljahr am Projektkurs Astronomie teilzunehmen und mehr über Sterne und Planeten sowie ihre Beobachtung zu erfahren. So war auch schnell das Interesse an der Spektroskopie geweckt, mit der ich mich in einem Workshop im Herbst 2012 befasste und die Grundlagen hierzu erlernte. Daher wollte ich gerne auch meine Facharbeit über ein spektroskopisches Thema schreiben. Dabei wählte ich das Thema Doppelsterne aus, da es eine Arbeit an eigenen Spektren und eine Auswertung der eigenen Messergebnisse ermöglichen würde. Zudem bekam die CFG-Sternwarte den Spektrographen Lhires III der Firma Shelyak geliehen, der eine gute Auflösung versprach. Da der Doppelstern β Aurigae am günstigsten am Himmel stand und zudem aufgrund seiner Helligkeit ein schönes Beobachtungsobjekt ist, befasste ich mich mit diesem Doppelstern. Leider war das Wetter außerordentlich ungünstig, sodass nur an vier Abenden beobachtet werden konnte. Um dennoch eine eigene Auswertung der Messpunkte vornehmen zu können, wurden weitere Werte aus der Literatur hinzugenommen. In dieser Arbeit sollen die Bahnparameter für β Aurigae anhand der Messungen ermittelt und die Bahnen möglichst realitätsnah simuliert werden.

2. Sternwarte des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums

Die Sternwarte auf dem Dach des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums wurde am 30. Oktober 2009 eingeweiht und bietet seitdem vor allem Schülern und Studenten, aber auch externen Besuchergruppen die Möglichkeit, die Arbeit mit Teleskopen und astronomischen Geräten kennen zu lernen, Himmelsobjekte zu beobachten und Facharbeiten mit eigenen Auswertungen anzufertigen. Die Idee zu diesem Projekt kam von Dipl. Mathematiker und Physiker Michael Winkhaus, OStR am CFG, der den Bau in die Wege leitete und die nötigen Gelder durch das Einwerben von Spenden beschaffte. Nun betreibt er zusammen mit Dipl.-Physiker Bernd Koch eine einzigartige und hervorragend ausgestattete Sternwarte, die für die Amateurastronomie ideale Voraussetzungen bietet.

Insgesamt verfügt die Sternwarte über sieben Inseln, die alle genau in der Nord-Süd-Achse angeordnet sind. Während sich sechs Inseln im Freien befinden, und die Möglichkeit zur Montage verschiedener Teleskope, wie dem Celestron 11 oder dem Pentax 75, bieten, ist die siebte Insel überdacht und an den zugehörigen Aufenthaltsraum mit 3 Computern angeschlossen. Hier ist das 12,5 Zoll-Newton-Cassegrain-Teleskop (Abb. 1)[1] fest montiert und bietet insbesondere für langfristige und aufwendige Projekte eine angenehme Arbeitsatmosphäre. Zur Durchführung von astronomischen Beobachtungen sind die Inseln mit Laptops, Kameras (z. B. EOS 450d und AlCCd) sowie zahlreichen Okularen, Filtern und USB-Schnittstellen ausgerüstet. Zudem gehört zu jeder Beobachtungsinsel ein Dados-Spektrograph, eine Taukappe und Stirnlampen, damit man im Dunkeln überhaupt etwas sieht.

Bei der Vorbereitung eines Beobachtungsabends steht an erster Stelle die Mitnahme warmer Kleidung. Gerade im Winter, wenn die Abende lang und daher sehr gut geeignet zum Beobachten sind, liegen die Temperaturen auf dem Dach oftmals im Minusbereich. Hinzu kommt zum Teil starker Wind, der Mütze, Schal und Handschuhe unabdingbar macht.

Zum Spektroskopieren wurde das Teleskop verwendet, das in der Sternwarte fest installiert ist und dementsprechend nicht aufgebaut werden musste. Zudem besitzt die Insel 7, in der das Teleskop montiert ist, ein aufklappbares Dach und ist mit den Computern über eine USB-Schnittstelle im Aufenthaltsraum verbunden, sodass man als Beobachter auch zwischendurch ins Warme gehen kann. Auch der Lhires III wurde fest am Teleskop montiert.

[1] Foto: Jan Martin Müller

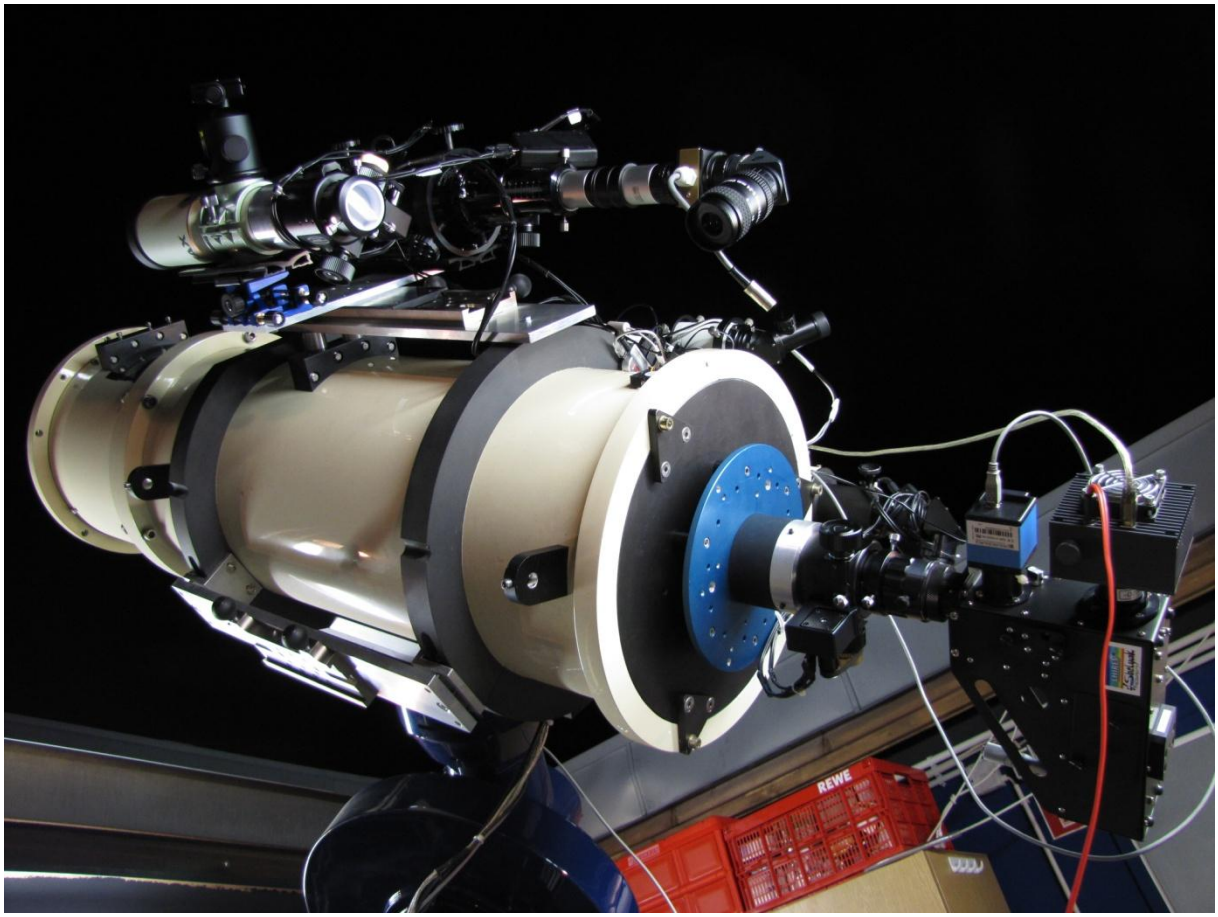


Abbildung 1: 12,5 Zoll-Newton-Cassegrain-Teleskop

3. Allgemeine Grundlagen

3.1 Beta Aurigae – ein Doppelstern

Doppelsterne sind Systeme aus zwei Sternen, die sich umeinander in kreisförmigen oder elliptischen Bahnen um einen gemeinsamen Schwerpunkt bewegen. Dabei können sie von unterschiedlicher Größe und Leuchtkraft sein. Der Doppelstern β Aurigae, genannt „Menkalinan“, ist der zweithellste Stern des Sternbildes Fuhrmann (Abb. 2)[2].[3]

Seine Koordinaten sind folgende:

Rektaszension: 05h 59m 32s

Deklination: +44° 56‘ 51‘‘

[2] http://www.stellarium.org/de/
[3] vgl.: http://de.wikipedia.org/wiki/Menkalinan

Abbildung 2: Das Sternbild Fuhrmann mit Menkalinan (Software Stellarium)

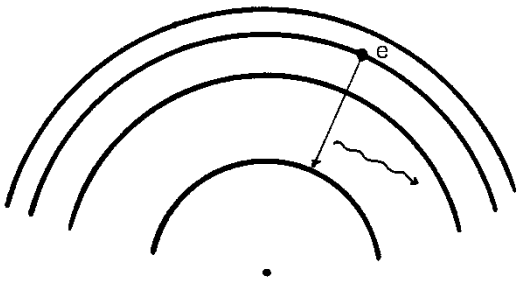
Beta Aurigae besteht aus zwei Komponenten, die in etwa die gleiche Größe und Leuchtkraft besitzen und sich in einer Periode von 3,960004 Tagen um einen gemeinsamen Schwerpunkt bewegen. Darüber hinaus existiert noch ein dritter Stern, der zu dem Sternsystem hinzu gezählt werden könnte, der jedoch 8,5 Magnituden schwächer ist als die beiden Hauptkomponenten und daher im Folgenden keine Betrachtung findet. Die Helligkeit des Doppelsterns schwankt zwischen +1,85 und +1,93 Magnituden. Die absolute Helligkeit beträgt 0,55/0,76 Mag. , wodurch er deutlich leuchtkräftiger als die Sonne (4,8 Mag) ist.

Das Spektrum von Doppelsternen zeichnet sich durch eine Aufspaltung der Spektrallinien aus. Diese entsteht durch die Bewegung der Sterne in verschiedene Richtungen und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, da hierbei der Dopplereffekt eintritt.

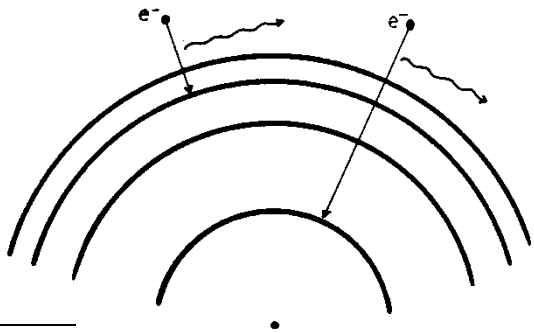
3.2 Entstehung des Lichts

Licht entsteht dadurch, dass ein Elektron Energie verliert, wenn es einen niedrigeren energetischen Zustand einnimmt. Dazu muss der Atomkern mit den umlaufenden Elektronen betrachtet werden. Diese Elektronen können den Atomkern nicht beliebig umlaufen, sondern nur auf bestimmten Bahnen, den sogenannten Elektronenschalen. Im Grundzustand befindet sich jedes Elektron auf der Stufe mit der niedrigstmöglichen Energie. Diese befindet sich möglichst nah zum Atomkern. Wird das Elektron jedoch angeregt, kann es bei Aufnahme der entsprechenden Energie in den nächsthöheren Energiezustand wechseln. Da es jedoch bestrebt ist, wieder in den alten niedrigen Energiezustand zurückzugelangen, gibt es die Energie wieder ab. Dadurch entsteht Licht.
Insgesamt gibt es drei Arten solcher Übergänge:[4]

<u>Gebunden-gebunden-Übergänge:</u>
Die Elektronen wechseln innerhalb eines Atoms in einen niedrigeren Energiezustand. Dabei kann nur das Licht einer bestimmten Wellenlänge ausgesandt werden, da sich die Elektronen nur auf bestimmten Energieniveaus befinden können.



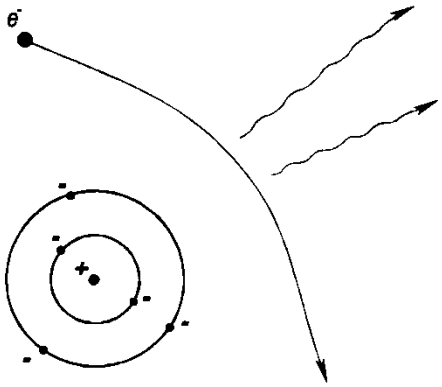
<u>Frei-Gebunden-Übergänge:</u>
Die Elektronen werden von einem positiv geladenen Ion angezogen und treten in die äußere Schale ein. Dabei müssen sie so viel Energie abgeben, dass sie dieses Energieniveau erreichen. Da die Bewegungsenergie der Elektronen zuvor unterschiedlich sein kann, kann auch Licht aller Wellenlängen entstehen.



[4] Winkhaus, Michael: Was ist Licht und wie zerlegen wir es?

Frei-frei-Übergänge:

Dabei fliegt ein Elektron so dicht an einem Ion vorbei, dass seine Bewegungsenergie geändert wird. Auch hierbei kann Licht aller Wellenlängen entstehen.



Die Wellenlänge des entstehenden Lichts lässt sich dabei aus der Energiedifferenz der beiden Energieniveaus errechnen:

$$\lambda = \frac{1{,}98 \cdot 10^{-25}}{\Delta E} J \cdot m$$

Auf diese Weise lässt sich anhand der Wellenlänge zurückverfolgen, in was für Atomen Gebunden-gebunden-Übergänge stattgefunden haben. So ergeben sich verschiedene Serien von Licht bestimmter Wellenlängen, die in einem bestimmten Element entstehen. Für den Wasserstoff sind das folgende Serien (Abb. 3):

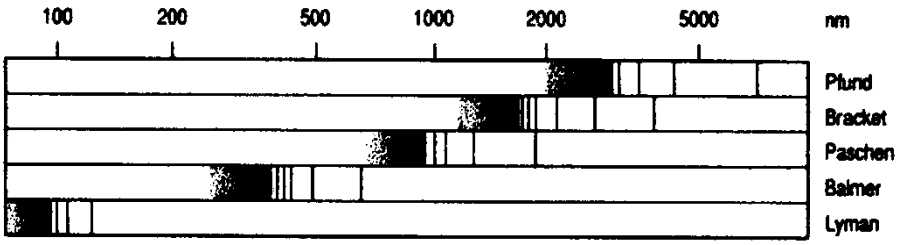


Abbildung 3: Serien des Wasserstoffs

3.3 Spektroskopie

3.3.1 Aufspaltung des Lichts in seine Wellenlängen

Der Spektrograph spaltet das natürliche Licht in die einzelnen unterschiedlichen Farben, die sich in dem Licht befinden, auf. Dazu macht man sich ein physikalisches Prinzip zu Nutze: Interferenz.

Die Lichtstrahlen werden nur durch zwei dünne Spalte in einer Platte hindurch gelassen. Dabei überlagern sich die Wellen der beiden Lichtquellen jeweils, sodass zum einen eine konstruktive Interferenz entsteht, wo zwei Hügel der Wellen aufeinandertreffen, und eine destruktive Interferenz, wo ein Wellenhügel und ein Wellental aufeinandertreffen. Bei der konstruktiven Interferenz wird das Lichtsignal verstärkt und doppelt so hell, bei der destruktiven Interferenz hingegen heben sich die Wellen auf.

So kommt es, dass auf einer Wand, die hinter der Platte steht, im genauen Mittelpunkt zwischen den beiden Lichteinlässen ein heller Streifen erkennbar ist, und dann zu beiden Seiten jeweils abwechselnd ein dunkler und ein heller Streifen. Dies hängt damit zusammen, dass „Jedesmal, wenn der Wegunterschied ein ganzes Vielfaches der Wellenlänge beträgt, […] wir einen hellen Interferenzstreifen [vorfinden] und dazwischen liegen dunkle Streifen“[5] (Abb. 4). Die so entstehende Abfolge des Lichts wiederholt sich immer wieder, wobei die verschiedenen Wiederholungen der farbigen Streifen als Ordnung bezeichnet und vom Mittelpunkt aus laufend durchnummeriert werden. Zur spektroskopischen Untersuchung wird die 1. Ordnung betrachtet, da diese am hellsten ist.

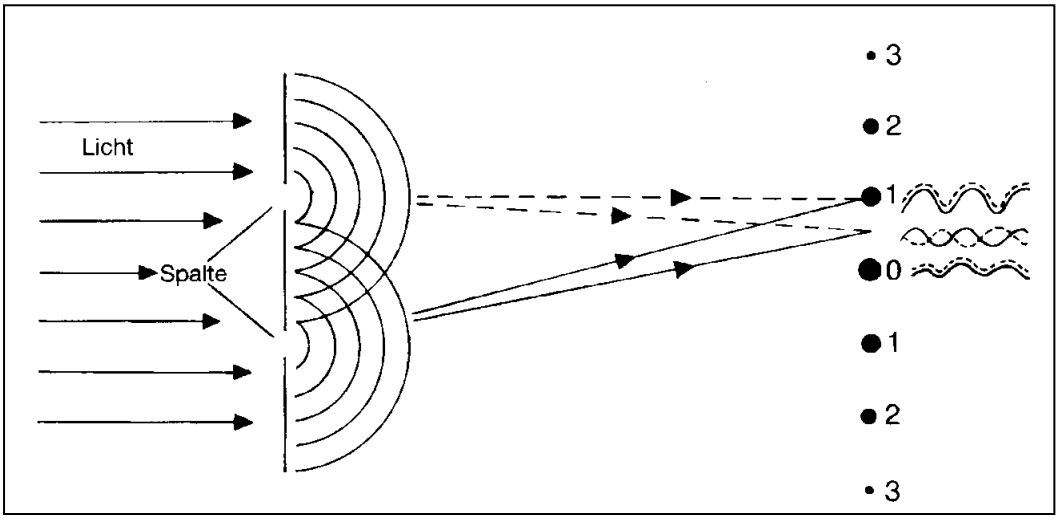


Abbildung 4: Interferenz der Lichtwellen

[5] Winkhaus, Michael: Was ist Licht und wie zerlegen wir es“ (Folie)

Da die Farben jeweils unterschiedliche Wellenlängen haben, sieht man diese im Spektrum nebeneinander. So entsteht ein kontinuierliches Spektrum, bei dem alle Farben im sichtbaren Bereich nebeneinander zu sehen sind. Dies macht es erst möglich, aus der Spektroskopie Eigenschaften der Sterne bzw. Planeten herauszufinden. Der Bereich des sichtbaren Lichts liegt dabei zwischen 380nm und 780nm Wellenlänge.[6] Historisch bedingt wird bei der Bearbeitung der Spektren die Einheit Ångström (Å) verwendet, wobei 10 Å = 1 nm. Im Spektrographen sind hunderte von Gitterlinien nebeneinander angeordnet, die zusammen den sogenannten „Spalt“ bilden. Das beobachtete Objekt muss während der Spektroskopie stets auf dem Spalt sichtbar sein, damit kein Licht verloren geht. Hierzu wird eine Spaltüberwachungskamera verwendet.

Bei den Spektren unterscheidet man drei Arten von Spektren: Emissionslinienspektren, rein kontinuierliche Spektren und Absorptionslinienspektren.

3.3.2 Arten von Spektren

Es gibt insgesamt drei verschiedene Arten von Spektren:[7]

Emissionslinienspektrum (Abb. 5)[8]:

In diesen Spektren sind einzelne Linien zu erkennen, die bei bestimmten Wellenlängen liegen. Diese entstehen, wenn nur Gebunden-gebunden-Übergänge erfolgen, da so jedes Element seine charakteristischen Linien aufweist.

Abbildung 5: Emissionslinienspektrum

Kontinuierliches Spektrum (Abb. 6):

Dieses Spektrum entsteht bei sehr heißen Oberflächen, die eine so starke Bewegung der Atome zur Folge haben, dass diese häufig aneinander stoßen und sich so die Energieniveaus

[6] vgl.: http://de.wikipedia.org/wiki/Licht
[7] Winkhaus, Michael: Erklärung der verschiedenen Spektren (Text 3)
[8] http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/391663

der Elektronen stark verändern. Dabei sind also alle Arten von Übergängen möglich und man sieht Licht aller Wellenlängen.

Abbildung 6: Kontinuierliches Spektrum

Absorptionslinienspektrum (Abb. 7):

Solche Spektren entstehen, wenn die kontinuierliche Strahlung durch Atome in einer kühleren Wolke (Photosphäre, äußere Atmosphäre) dringt. Dabei werden die Elektronen, die sich im Grundzustand befinden, angeregt, in das höhere Energieniveau zu wechseln und nehmen genau die erforderliche Energie aus der Lichtwelle. Dadurch wird das Licht dieser Wellenlängen absorbiert und es entstehen dunkle Linien im Spektrum. Diese Linien sind die gleichen wie im Emissionslinienspektrum.

Abbildung 7: Absorptionslinienspektrum

Dadurch lassen sich aus diesen Absorptionslinien Rückschlüsse auf die vorhandenen Elemente eines Sterns ziehen. Dabei muss allerdings betont werden, dass es nur möglich ist, den Stern von außen zu betrachten, der Kern jedoch ist für die heutige Wissenschaft noch nicht ergründbar.

3.3.3 Doppler-Effekt

Der Doppler-Effekt entsteht, wenn sich eine Quelle, die Wellen aussendet, dem Empfänger nähert oder sich entfernt. Dies können Schallwellen oder wie in diesem Fall Lichtwellen eines Sterns sein, der sich auf die Erde zu- oder von ihr wegbewegt. Durch die Bewegung werden die jeweiligen Wellen gestaucht oder gestreckt, sodass sich die Wellenlänge des Lichts verschiebt.

Mit folgender Formel[9] wird das Verhältnis zwischen Wellenlänge und Geschwindigkeit des Objektes ausgedrückt:

$$\lambda_B = \lambda_S - \frac{v_S}{f_S}$$

S und B stehen für Beobachter und Sender der Lichtwellen

Im Spektrum von Beta Aurigae kann dieser Effekt sehr gut beobachtet werden. Da sich jeweils eine Sternkomponente auf den Betrachter zu bewegt und die andere sich gleichzeitig entfernt, verschieben sich die Spektrallinien in verschiedene Richtungen. Dies ist besonders gut an der Hα-Linie zu beobachten. So entsteht eine Aufspaltung, deren einzelne Wellenlängen durch andere Referenzlinien wie Neonlinien gemessen werden können. Auf diese Weise lassen sich umfassende Erkenntnisse über den Doppelstern gewinnen, die in dieser Projektarbeit thematisiert werden.

[9] http://de.wikipedia.org/wiki/Dopplereffekt

4. Astronomische Geräte

4.1 Sigma 1603 CCD-Kamera

Zur Aufnahme der Spektren wurde die SIGMA 1603 CCD-Kamera (Abb. 8[10]) verwendet. Der Sensor hat folgende Daten:

Tabelle 1: Sensordaten der Sigma 1603 CCD

Typ	Full Frame; „Blue Plus“
Auflösung	1536 x 1024 Pixel
Pixelgröße	9 x 9 µm
Aktive Sensorfläche	13,8 mm x 9,2 mm
Dunkelstrom	1,2 e^-/Pixel/s (bei 0° C)
Ausleserauschen	Ca. 16 e^-
Belichtungszeiten	0,5s … 24h
Auslesezeit	7,2 sec (Vollbild)

Abbildung 8: SIGMA 1603 CCD-Kamera

[10] Handbuch für die SIGMA 402, SIGMA 261, SIGMA 1603, SIGMA 3200

Die SIGMA-Kamera ist eine CCD-Kamera, d. h. sie verfügt über einen CCD-Sensor. Dieser Sensor besteht aus in Reihen angeordneten lichtempfindlichen Pixeln, in denen das einfallende Licht seine Energie auf Elektronen in einem Halbleiter überträgt, die sich in einem sogenannten Potentialtopf sammeln. Wenn die Belichtungszeit abgelaufen ist, werden die Ladungen aus dem Potentialtopf immer eine Zelle weiter verschoben und so nacheinander vom Ausleseverstärker verstärkt und anschließend ausgelesen (Abb. 9)[11].

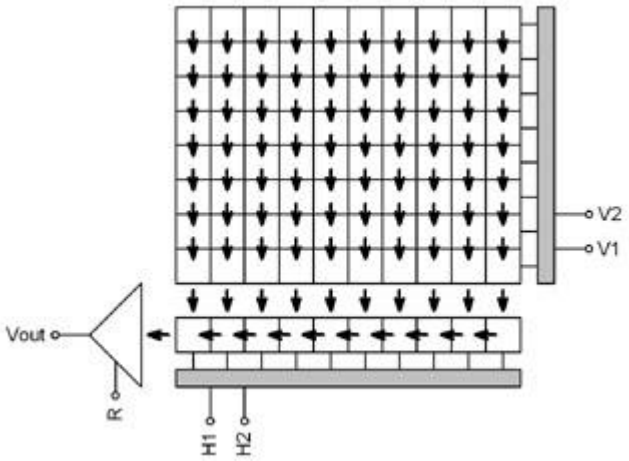


Abbildung 9: Ausleserichtung des Full-Frame-CCD-Sensors

„Full Frame“ bedeutet, dass die gesamte Sensorfläche zum Belichten verwendet wird. Dadurch ist es erforderlich, einen Verschluss vor den Sensor einzubauen, da andernfalls immer neues Licht aufgefangen würde. Aus diesem Grund sind auch keine sehr kurzen Belichtungszeiten möglich, da der Mechanismus des Verschlusses nicht schnell genug hierfür ist. Der Vorteil ist, dass die Nutzung der vollen Sensoroberfläche eine hohe Lichtausbeute bzw. Quanteneffizienz ermöglicht, da das gesamte einfallende Licht verarbeitet wird.

Im Gegensatz dazu gibt es auch Interline-Transfer-CCDs (Abb. 10), die neben einer Reihe von lichtempfindlichen Pixel-Zellen jeweils eine abgedeckte Nebenzelle besitzen. Die Ladungen werden zunächst in die Nebenzellen verschoben und dann ausgelesen. Dadurch kann auf einen Verschluss verzichtet und sehr kurze Belichtungszeiten erreicht werden. Der Nachteil hieran ist, dass die Quanteneffizienz aufgrund der abgedeckten Zellen abnimmt. Dies wird

[11] http://ccd.mii.cz/art?id=303

zum Teil durch Linsen, die das Licht auf die lichtempfindlichen Pixel fokussieren ausgeglichen, es kann aber nicht die Lichtausbeute der Full-Frame-Sensoren erreicht werden.[12]

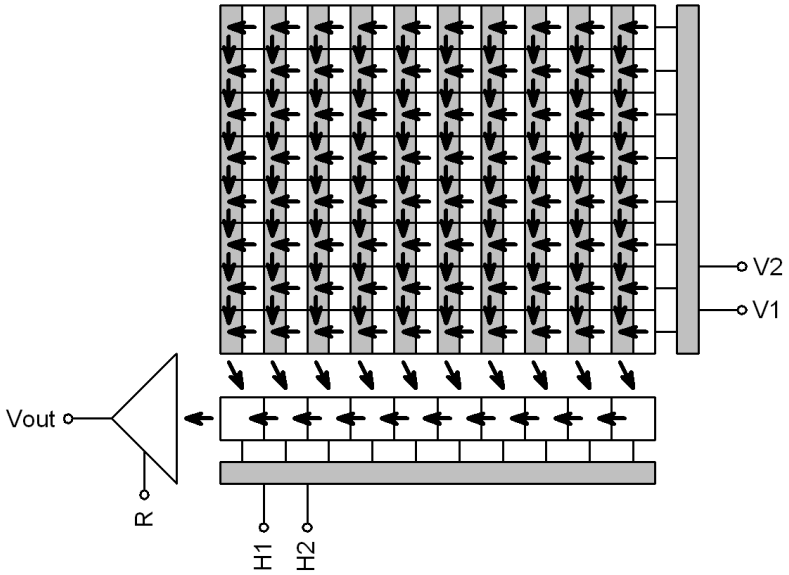


Abbildung 10: Ausleserichtung eines Interline-Transfer-CCD-Sensors

Die Quanteneffizienz (Abb. 11)[13] umfasst bei der SIGMA 1603 CCD einen Bereich von ca. 300 bis über 1100 nm, wobei die Lichtausbeute bei ca. 650 nm am größten ist, also bei Hα. Aus diesem Grund eignet sich diese Kamera sehr gut zur Spektroskopie von Beta Aurigae, da die Aufspaltung bei Hα gemessen wird.

Da der Chip immer ein gewisses Rauschen erzeugt, d. h. Elektronen auch ohne tatsächlichen Lichteinfall ausgelöst werden, die zu Fehl- bzw. Hotpixeln führen, ist eine Kühlung der Kamera notwendig, die bei der SIGMA-Kamera integriert ist.[14]

[12] http://de.wikipedia.org/wiki/CCD-Sensor
[13] http://www.nova-ccd.de/kodak_inside.htm; bearbeitet durch Tobias Guthoff
[14] http://www.nova-ccd.de/sigma2.html

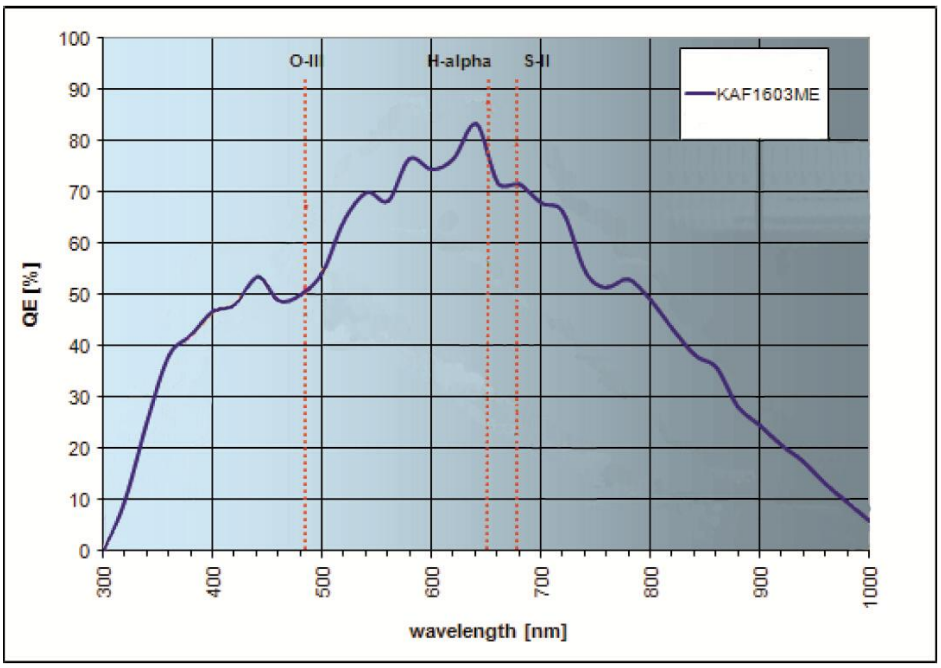
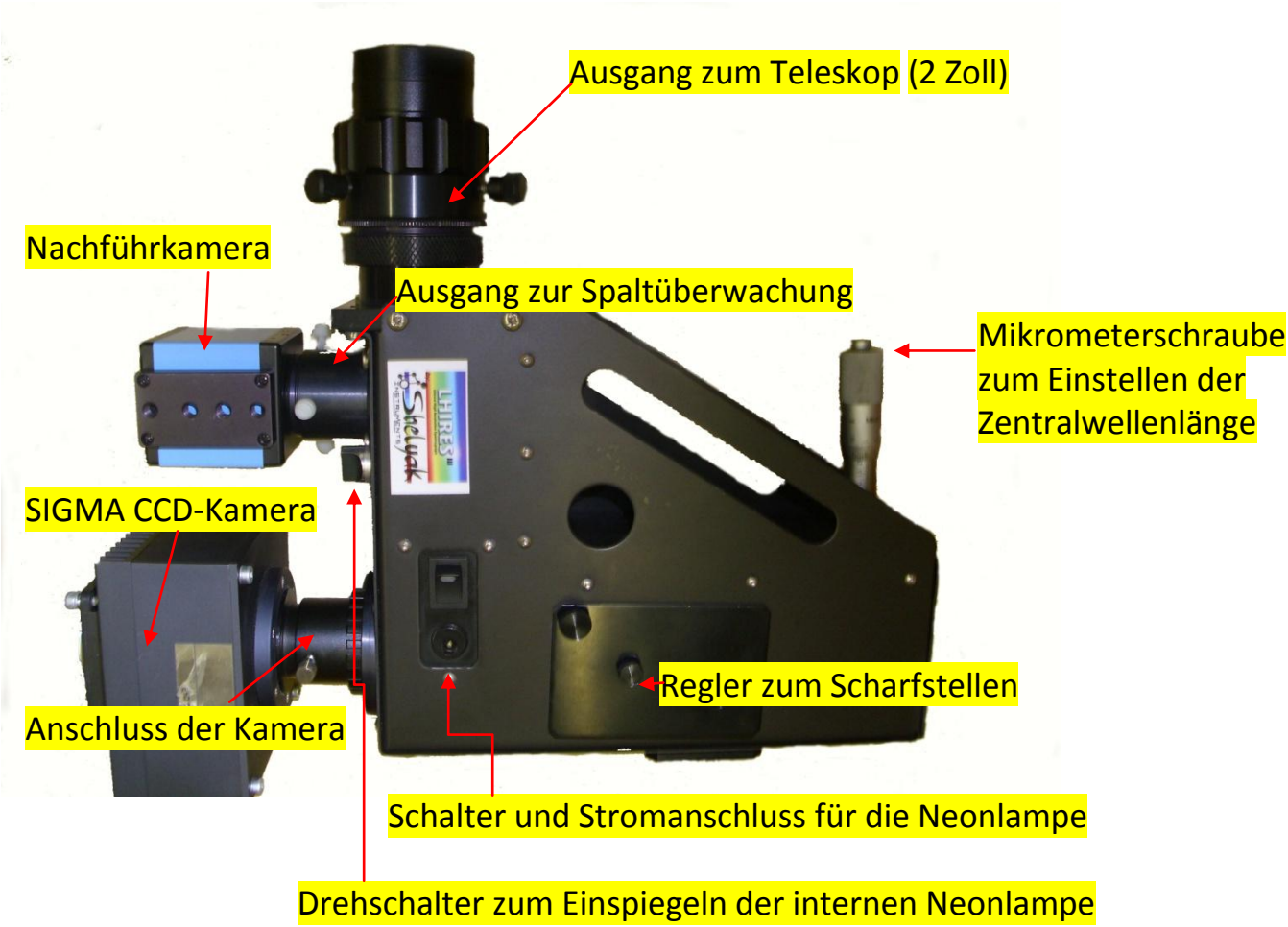


Abbildung 11: Quanteneffizienz des CCD-Sensors KAF 1603ME

4.2 Spektrograph Lhires III

Der Lhires III ist ein hochauflösender Spektrograph, der von Christian Buil und Shelyak instruments für die Amateurastronomie entwickelt wurde. Er ist sowohl für die Beobachtung mit dem bloßen Auge geeignet als auch zur Aufnahme von Spektren mit CCD-, SLR-Kameras oder Webcams.[15]

Die Auflösung des Spektrographen beträgt max. 17000 und er ist optimal geeignet für Teleskope mit Blende 10, jedoch auch einsetzbar im Bereich von f/8 bis f/12.[16]



[15] vgl.: http://www.shelyak.com/dossier.php?id_dossier=46
[16] vgl.: http://thizy.free.fr/shelyak/LhiresIII/DC0004A%20-%20Lhires%20III%20User%20Guide%20-%20English.pdf, S.6

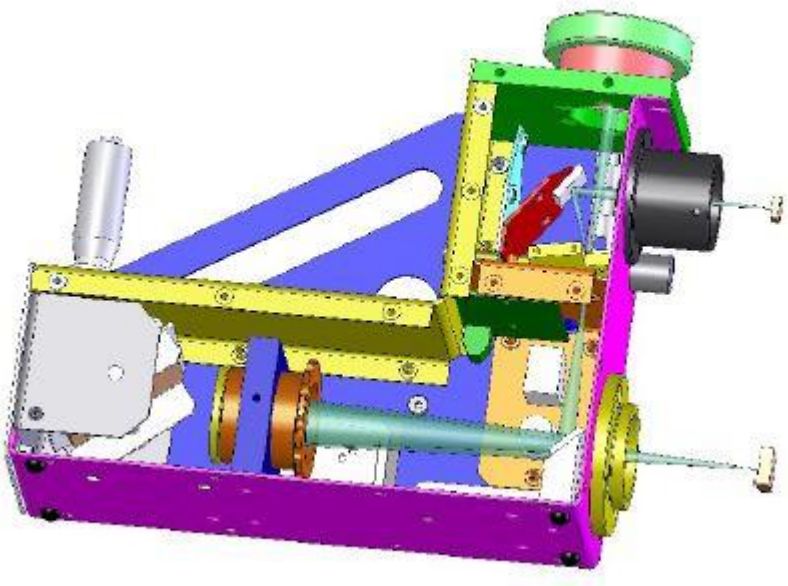


Abbildung 12: Innenansicht des Lhires III

Das Licht tritt über den Lichteinfall durch das Teleskop in den Spektrographen ein und geht durch die Spaltplatte (Abb. 12)[17]. Diese war für die Aufnahmen mit einem 35 µm-Spaltplatte bestückt. Das so entstandene Licht des Spektrums wird über Spiegel vergrößert und ist so an der Beobachtungsöffnung sichtbar. Der Spalt kann währenddessen über den Ausgang zur Spaltüberwachung beobachtet werden. Mit der Mikrometerschraube lässt sich die Zentralwellenlänge, bei der man spektroskopiert, einstellen.

[17] http://thizy.free.fr/shelyak/LhiresIII/DC0004A%20-%20Lhires%20III%20User%20Guide%20-%20English.pdf

5. Aufnahme und Bearbeitung von Spektren

5.1 Aufnahme mit MaxIm DL

Zur Erstellung von Aufnahmen wird das Programm MaxIm DL[18] verwendet.

Zunächst wird die SIGMA-Kamera per USB-Kabel an den Computer angeschlossen. Über "Camera Control" wird das Fenster zum Konfigurieren der Kamera aufgerufen. Es muss nun die entsprechende Kamera über „Options" im Feld „Camera 1" ausgewählt werden, also „SIGMA" (Abb. 13).

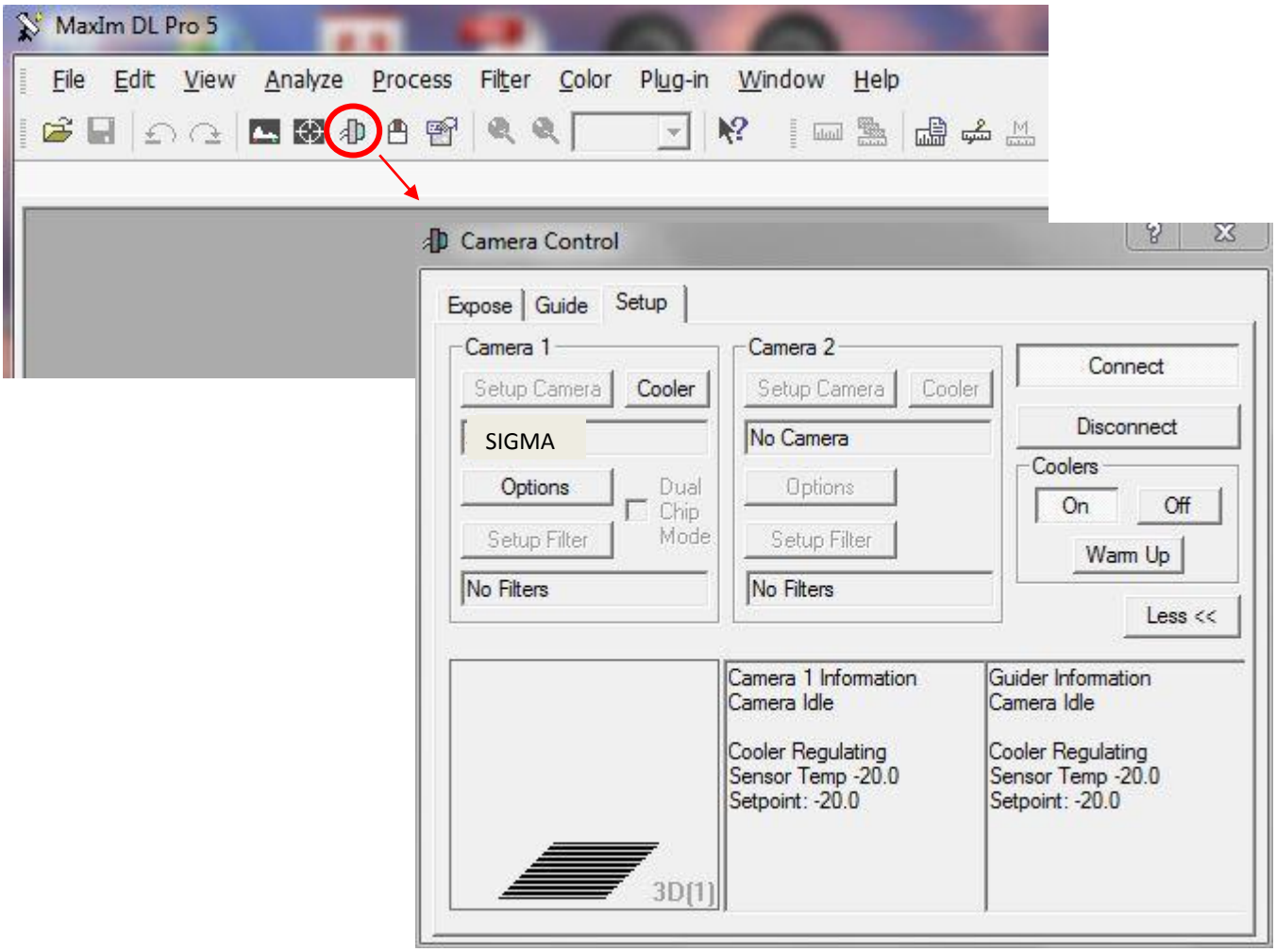


Abbildung 13: Im Fenster Camera Control wird die Kamera konfiguriert

[18] http://cyanogen.com/maxim_main.php

Anschließend wird die Kamera über den Button „Connect“ mit dem Programm verbunden. Nun muss der Kühler über „Coolers: On“ eingeschaltet werden, da ein zu schneller Übergang von Zimmertemperatur zu den kalten Temperaturen, die auf dem Dach herrschen, zu Schäden an dem Gerät führen könnte. Die Temperatur ist in der Regel auf „Cooler“ bei -20°C anzusetzen, wobei es sein kann, dass je nach Außentemperatur die Kühlung nicht ganz dieses Niveau erreicht. Dies ist daran zu erkennen, wenn die Kühlerleistung bei ca. 100 % liegt, die Temperatur jedoch nicht dem gewünschten Wert entspricht. In diesem Fall sollte die Temperatur höher angesetzt werden.

Anschließend kann mit dem Aufnehmen begonnen werden. Dazu wird der Aufnahmemodus im „Expose“ auf „LRGB“, „Single“ und „X-Binning 1“ gestellt (Abb. 14). Wenn mit einer kurzen Belichtungszeit das Spektrum anhand der Neonreferenzlinien, die durch die interne Neonlampe des Lhires III eingespiegelt werden, scharf gestellt worden ist, kann das Spektrum des Sterns aufgenommen werden. Die Belichtungszeit für β Aurigae betrug 300 Sekunden.

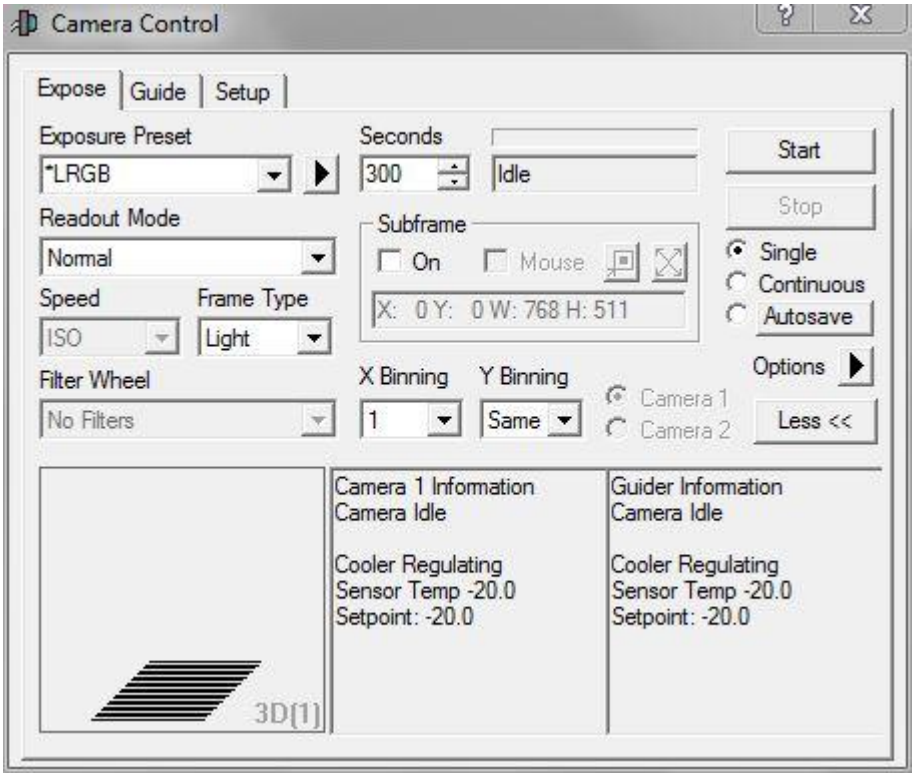


Abbildung 14: Camera Control

Eine gute Aufnahme ist bei β Aurigae danach zu beurteilen, ob die Linien scharf zu erkennen sind. Um ein möglichst sehr gutes Spektrum zu erhalten, sollten mehrere Aufnahmen gemacht werden, von denen dann die beste ausgewählt werden kann. Es besteht auch die Möglichkeit, mehrere Spektren zu einem zu stacken, um ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis zu erreichen, was aber zur Messung der Aufspaltung nicht notwendig ist, da Beta Aurigae ein heller Stern zweiter Größenklasse ist und damit das Spektrum hell genug wird. Zur Messung von beispielsweise Exoplaneten würde dies nicht ausreichen. Für Beta Aurigae wurde jedoch jeweils ein ausgewähltes Spektrum bearbeitet.

Sind genügend Aufnahmen gemacht, wird noch ein Dunkelbild mit der gleichen Belichtungszeit erzeugt, indem „Frame Type“ = „Dark“ gewählt wird. Dieses wird verwendet, um das Rauschen auf der Aufnahme zu reduzieren. Das Dunkelbild kann anschließend ebenfalls in MaxIm DL vom ausgewählten Spektrum abgezogen werden (Abb. 15). Über den Menüpunkt „Pixel Math“ können mathematische Operationen mit dem Bildmaterial durchgeführt werden.

Hierbei muss „Substract“ gewählt werden, da das Dunkelbild ja vom Spektrum abgezogen werden soll. Nun wird im ersten Feld das Bild des Spektrums ausgewählt und im zweiten Feld das Dark-Bild. So erhält man das fertige Spektrum, das nun weiterverarbeitet werden kann.

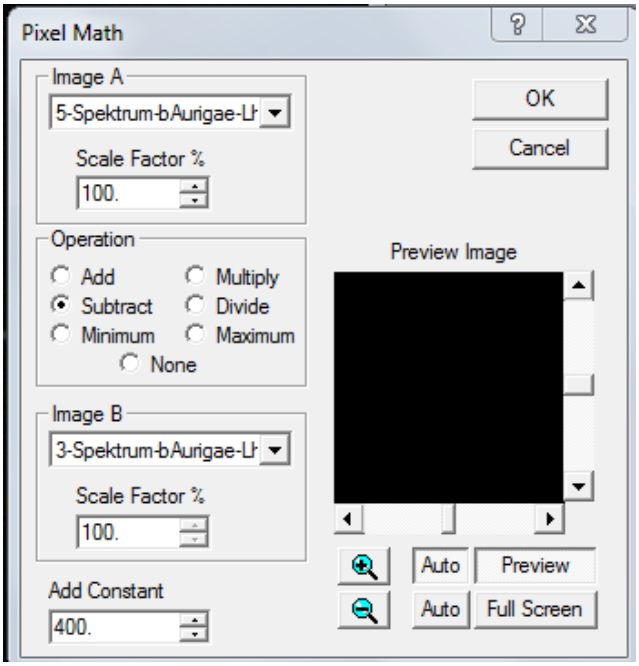


Abbildung 15: Pixel Math – Abzug des Dunkelbildes

5.2 Ergebnis: Die aufgenommenen Spektren von β Aurigae

5.2.1 Rohspektren

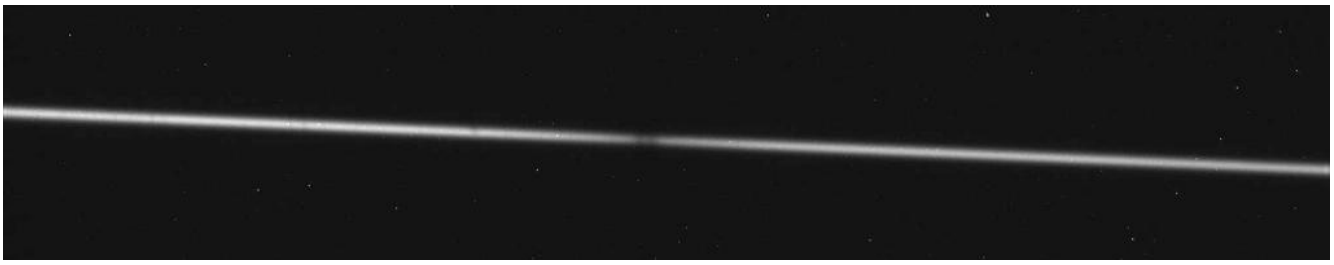


Abbildung 16: Spektrum 1: 11.01.2013 21:49:25 UT

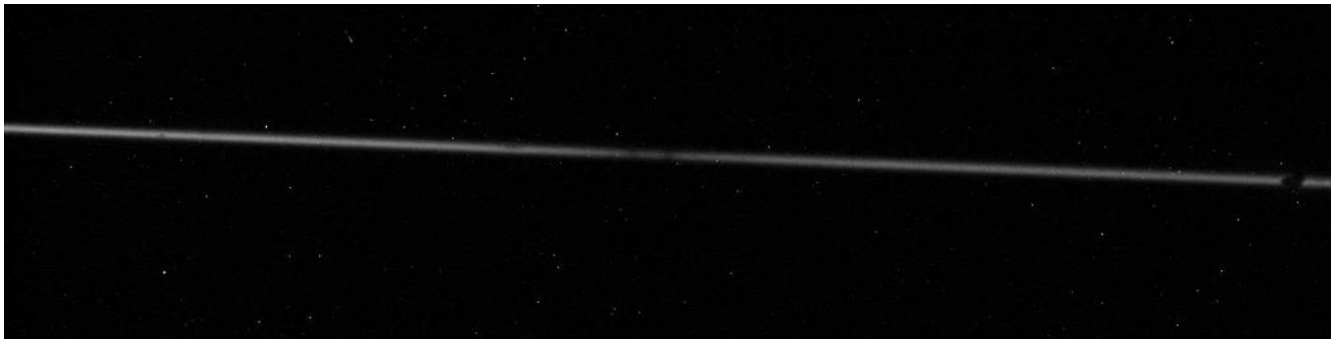


Abbildung 18: Spektrum 2: 12.01.2013 19:17:15 UT

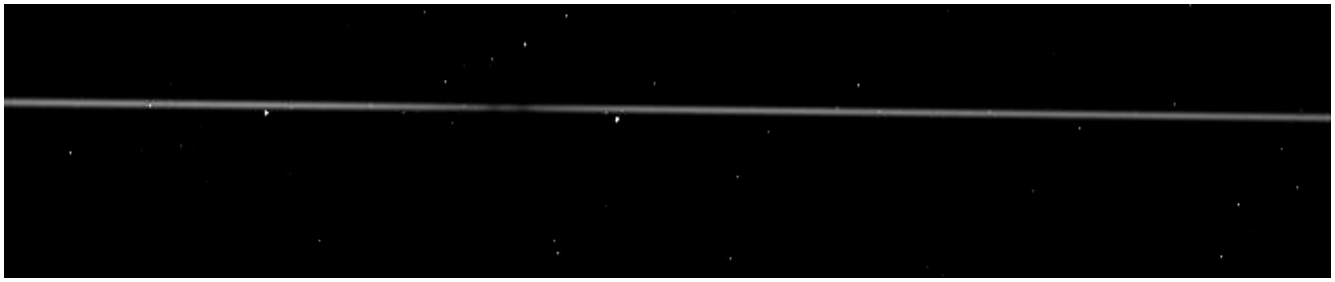


Abbildung 17: Spektrum 3: 13.02.2013 18:03:55 UT

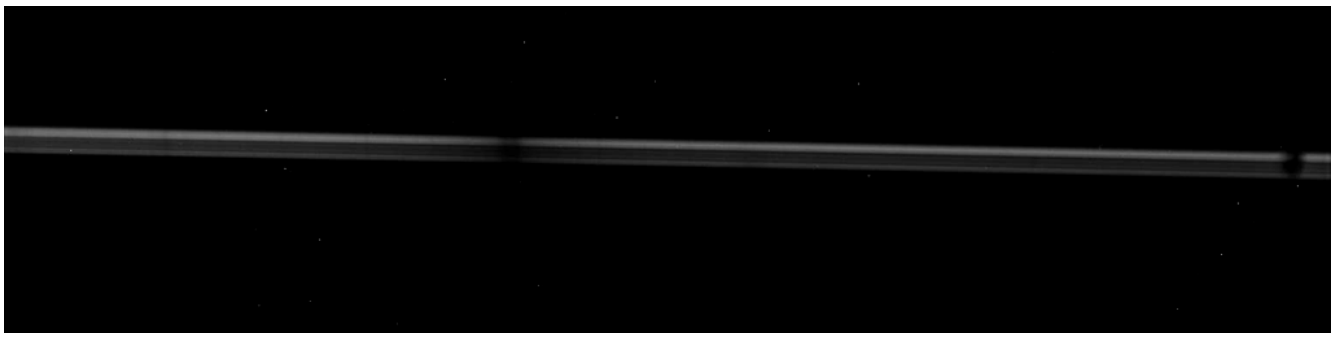


Abbildung 19: Spektrum 4: 13.03.2013 21:36:36 UT

5.2.2 Neonreferenzlinien

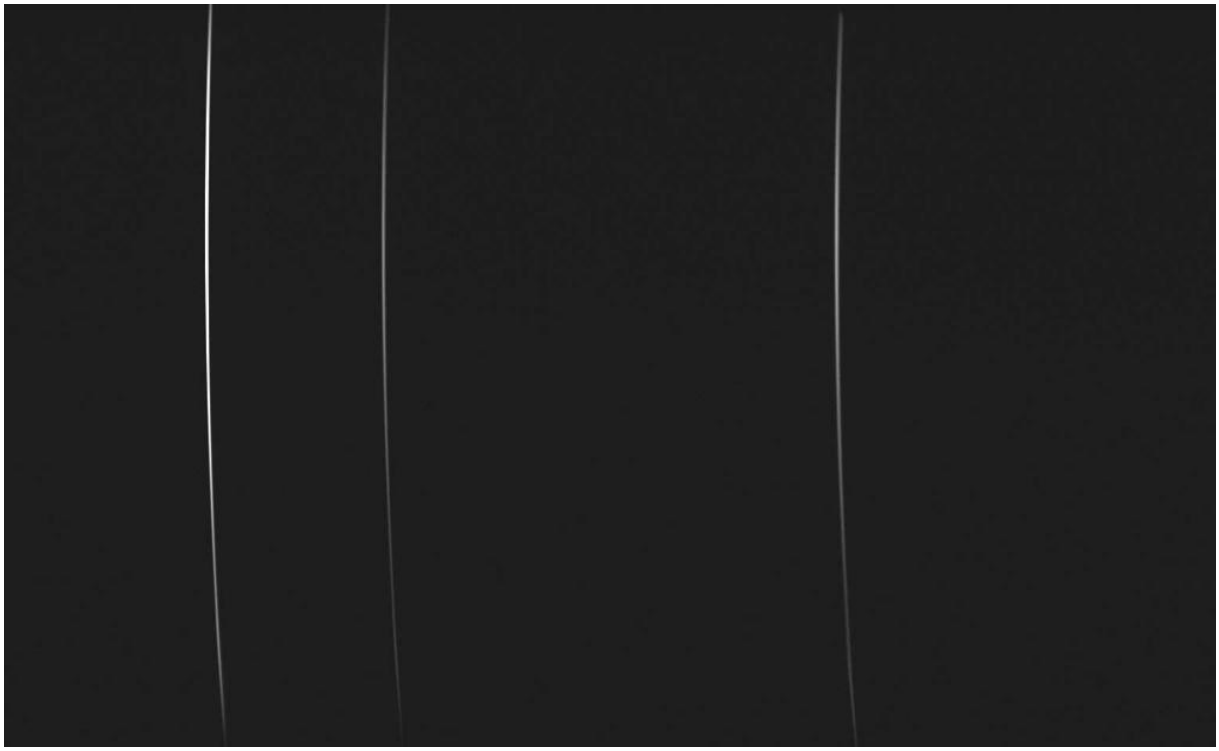


Abbildung 20: Neonreferenzspektrum 1: 11.01.2013 21:58:27 UT

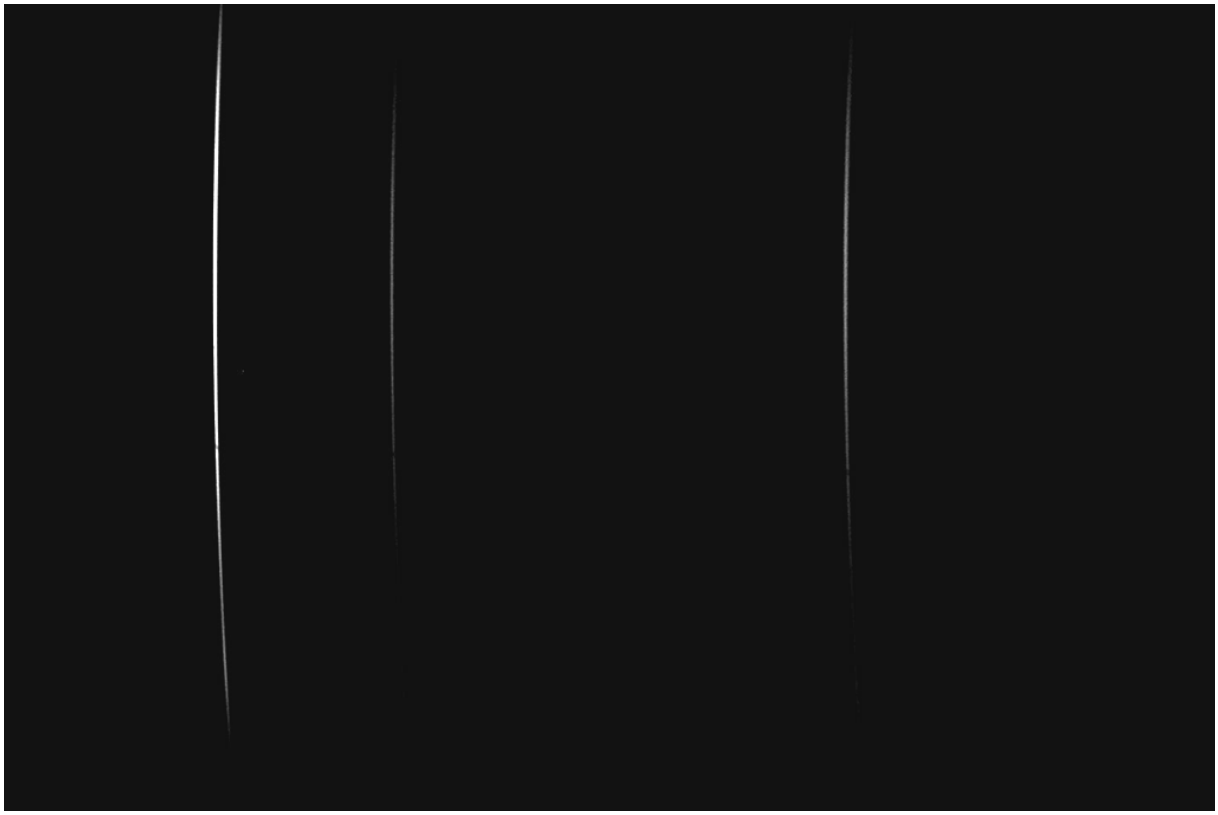


Abbildung 21: Neonreferenzspektrum 2: 12.01.2013 20:12:52 UT

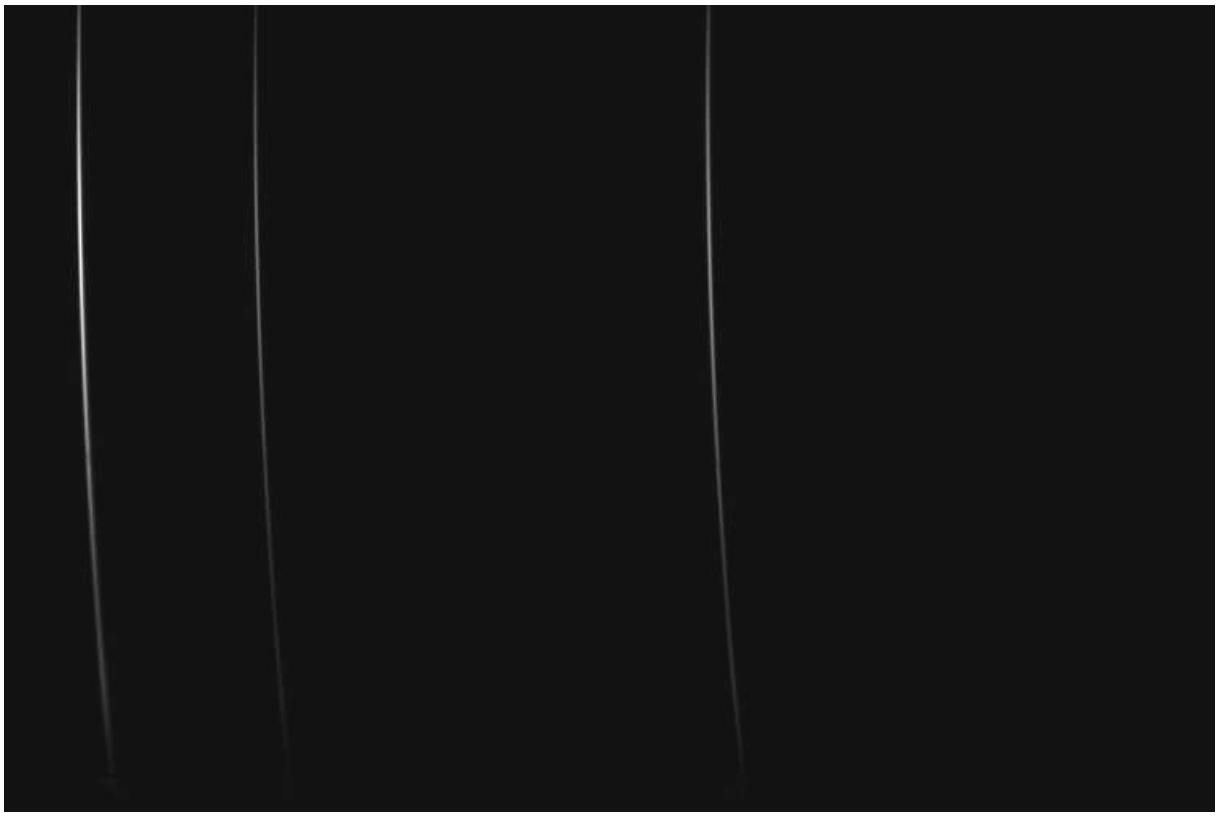


Abbildung 22: Neonreferenzspektrum 3: 13.02.2013 18:10:19 UT

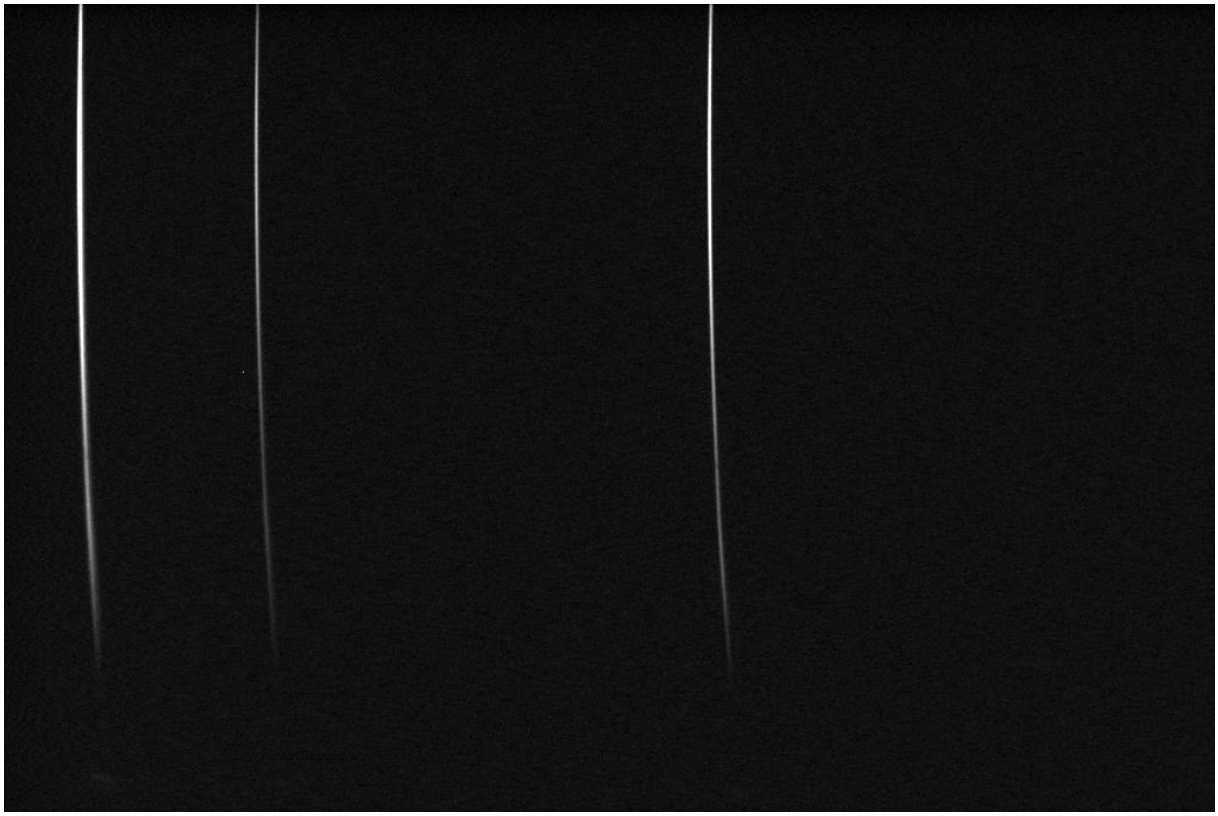


Abbildung 23: Neonrefernzspektrum 4: 13.03.2013 21:07:32 UT

Um die Aufspaltungen bei Hα messen zu können, ist es notwendig, Referenzlinien zu haben, anhand derer das Spektrum kalibriert werden kann. Dies erfolgt zeitnah zur Aufnahme des Sternspektrums mit einer internen Neonlampe im Spektrographen Lhires III. Durch die Überlagerung der beiden Spektren ist es schließlich möglich, eine Kalibrierung und damit auch eine Messung der Aufspaltung vorzunehmen.

5.3 Überlagern von Spektren

5.3.1 Überlagern der Sternspektren mit den Neonspektren

Anschließend werden die Sternspektren und die zugehörigen Neonreferenzspektren überlagert, damit eine Kalibrierung des jeweiligen Sternspektrums erfolgen kann.

Zum Überlagern wird die Software Giotto[19] verwendet. Hier können über „Bildüberlagern – Überlagere Bilder automatisch“ automatisch die Parameter für die Überlagerung festgelegt werden (Abb. 24). Es muss eine Rohbildquelle ausgewählt werden, bei der es sich in der Regel um „Alle Bilder in einem Ordner“ handelt. Dabei muss beachtet werden, dass die zu überlagernden Spektren immer in einen gemeinsamen Ordner ohne weitere Dateien verschoben werden sollten, da im Programm alle Bilder aus diesem Ordner überlagert werden.

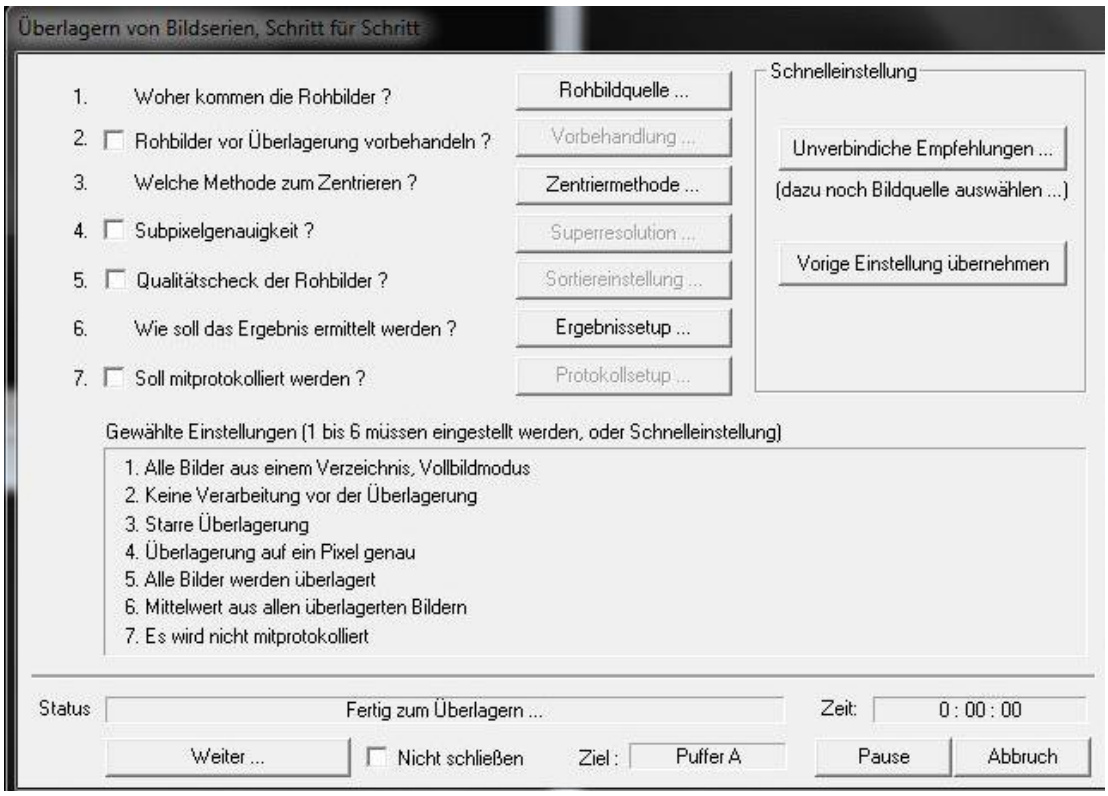


Abbildung 24: Parameter für die Überlagerung

[19] http://www.giotto-software.de/

Es erfolgt keine Zentrierung und zur Ermittlung des Ergebnisses wird „Mitteln“ gewählt. Die restlichen Optionen werden alle nicht angewählt.
So erhält man in dem zuvor angewählten Puffer das fertige Summenbild.

Zur Überprüfung, ob sich die Aufnahmeeinstellungen während der Aufnahme nicht verändert haben, wird jeweils ein Neonspektrum, das zeitlich vor der Aufnahme des Sternspektrums, und eines, das danach gemacht wurde, ausgewählt. Diese beiden Spektren werden dann wie im oben beschriebenen Verfahren überlagert. Im Idealfall passen die Spektren genau aufeinander, was bedeutet, dass sich in Ausrichtung und Scharfstellung der Kamera und des Spektrographen nichts verändert hat.

Es ist abschließend noch zu sagen, dass es optimal wäre, wenn die Neonlinien mit einer externen Neonlampe erzeugt werden könnten, die im Gegensatz zur internen Neonlampe im Lhires III das Licht des Sternspektrums nicht überstrahlt. Dann könnte man die Spektren direkt mit den Neonlinien zusammen aufnehmen, was die Bearbeitung und die Fehlervermeidung erheblich verbessern würde.

5.3.2 Horizontale Ausrichtung des überlagerten Spektrums

Nun muss das Sternspektrum ausgerichtet werden. Dies kann wieder in MaxIm DL erfolgen, indem über „Edit – Rotate“ (Abb. 25) ein Wert in Grad zur Drehung angegeben wird. Hierbei sollte möglichst kleinschrittig verfahren werden, bis das Spektrum nach Augenmaß genau horizontal ausgerichtet ist. Dies ist notwendig, damit später möglichst viel Licht für das Spektrum verwendet werden kann.
„CW“ bedeutet Drehung im Uhrzeigersinn, „CCW“ entgegen dem Uhrzeigersinn.

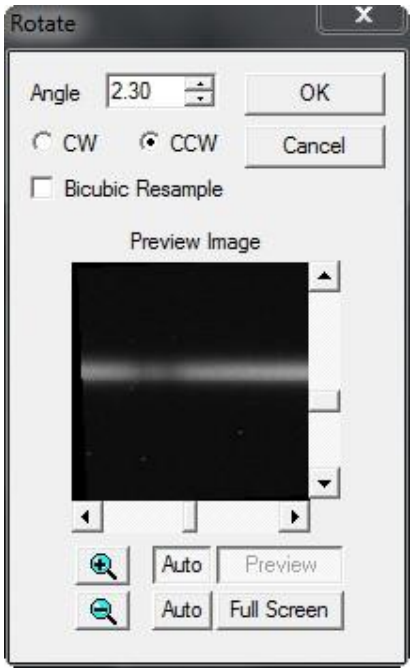


Abbildung 25: Edit - Rotate

5.4 Erzeugung des wellenlängenkalibrierten Spektrums mit VSpec

5.4.1 Erzeugung eines unkalibrierten Spektrums

Ist die Überlagerung vollendet, kann ein wellenlängenkalibriertes Spektrum erzeugt werden. Dazu wird die Software Visual Spec[20] verwendet. Diese zeigt über den Menüpunkt „Display reference binning zone“ ein rotes Rechteck, das an das Spektrum angepasst werden muss (Abb. 26).

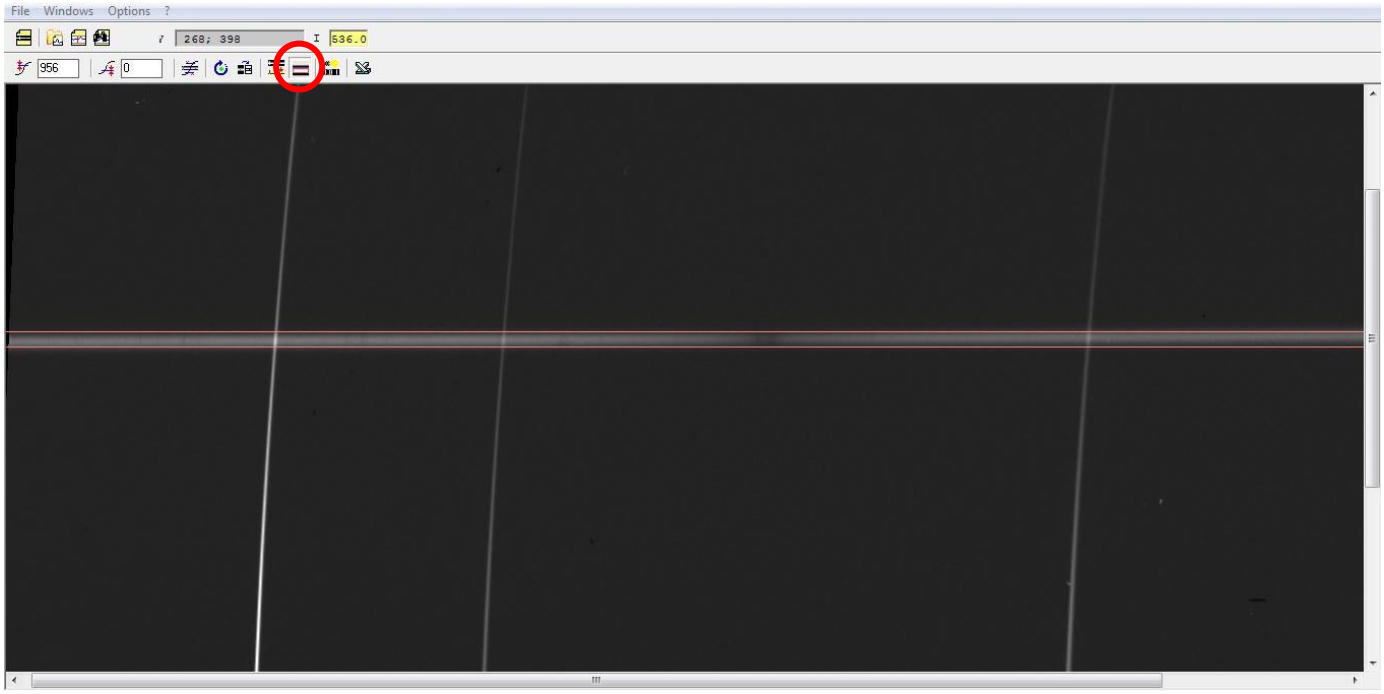


Abbildung 26: Das Spektrum wird mit dem roten Rechteck eingerahmt

Anschließend wird über „Object binning“ aus den Aufnahmen ein unkalibriertes Spektrum erzeugt (Abb. 27).

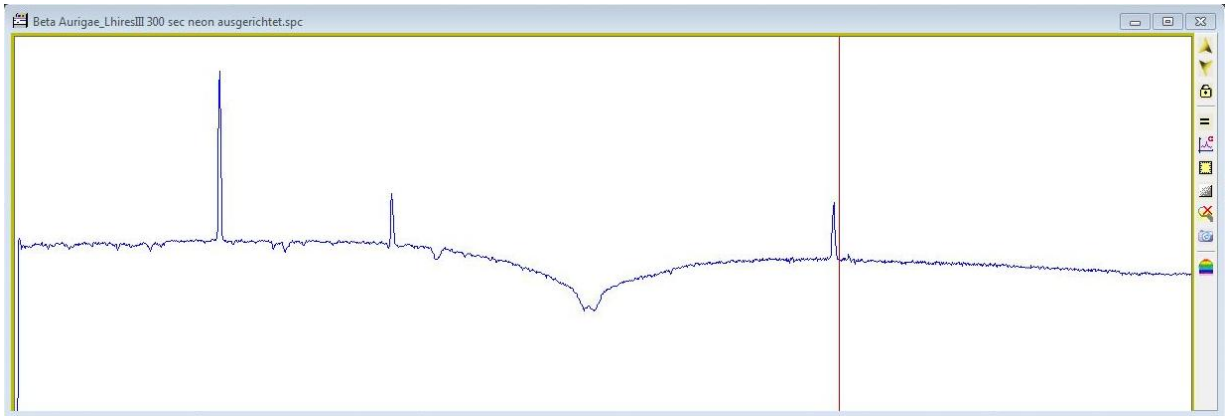


Abbildung 27: Erzeugung eines unkalibrierten Spektrums

[20] http://www.astrosurf.com/vdesnoux/

Auf diesem sind deutlich die Neonlinien zu erkennen, durch die es möglich wird, das Spektrum zu kalibrieren.

5.4.2 Kalibrierung des Spektrums anhand von Neonreferenzlinien

Hierzu wird die Funktion „Calibration multiple lines“ gewählt und der Ausschnitt um eine Neonlinie herum mit der Lupe stark vergrößert.

Nun muss ein Bereich um die Neonlinie herum markiert werden, in dessen Mitte sich das Maximum der Neonlinie befindet (Abb. 29). Im nun aufgehenden Eintragsfeld wird der Wert der Neonlinie in Ångström (Å) eingetragen.
Zur Kalibrierung wurden folgende Neonlinien verwendet (Abb. 28):

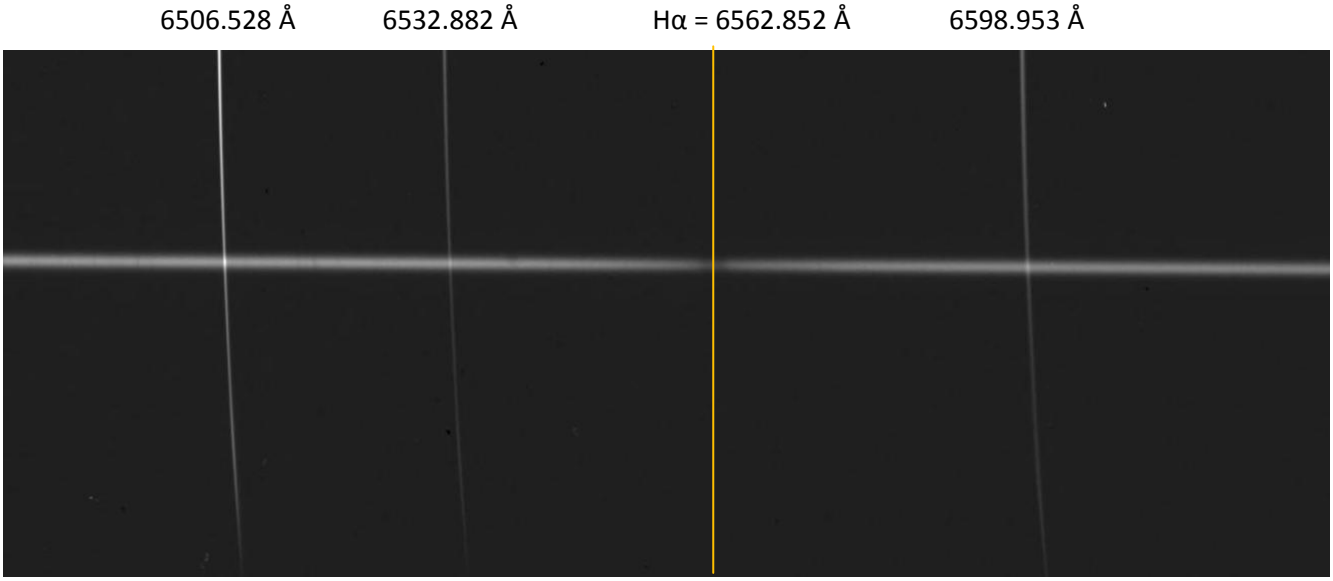


Abbildung 28: Neonlinien zur Kalibrierung der Spektren; Hα: Laborwellenlänge

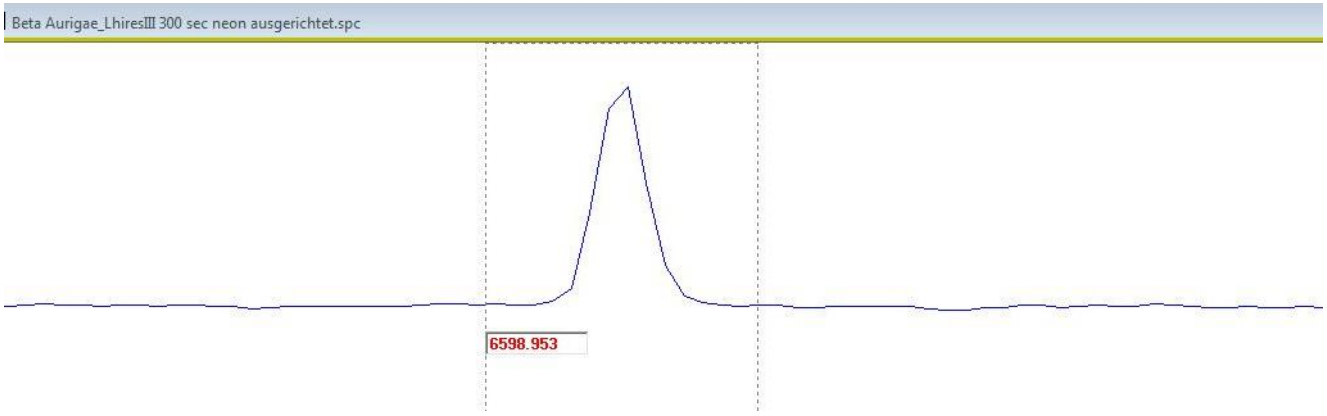


Abbildung 29: Markierung der Neonreferenzlinie

Wichtig ist, dass im Fenster „Non linear calibration“ (Abb. 30), das sich parallel dazu öffnet, „Degre 1“ eingestellt ist, da das Programm eine Gleichung erstellt, bei der für nur drei Neonreferenzlinien ein einfaches Polynom erforderlich ist. Andernfalls kann das Ergebnis bei der Kalibrierung verfälscht werden. Dann wird über „Calcul“ die Kalibrierung abgeschlossen.

Als Ergebnis erhält man zum einen eine Dispersionskurve, die möglichst gerade verlaufen sollte, und Werte für „d_lambda“, die die Abweichung der einzelnen Neonlinie vom erzeugten Polynom darstellen. Diese Werte sollten möglichst klein sein, da dann eine sehr exakte Kalibrierung möglich ist.

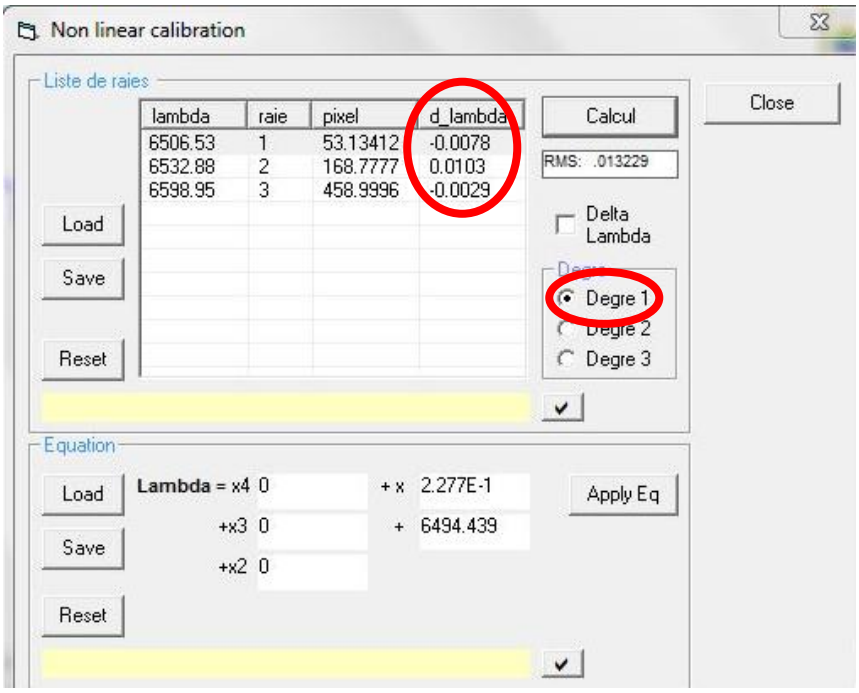


Abbildung 30: Das Fenster zeigt das Ergebnis der Kalibrierung

Es ist gut zu sehen, dass die Abweichungen nur bei etwa einem Hundertstel liegen. Dies ist zur Kalibrierung der Doppelsternspektren ausreichend. Nun ist das Spektrum wellenlängenkalibriert, sodass weitere Bearbeitungsschritte folgen können. Es sollen die Differenzen der beiden Aufspaltungen zur Hα-Linie (6562,852 Å) gemessen werden. Dazu könnte man per Augenmaß das Minimum der jeweiligen Aufspaltung bestimmen. Da dies aber zum einen durch die Asymmetrie der Aufspaltungen und durch die Ungenauigkeit der „Augenmaß-Betrachtung“ erschwert wird, kann hier der „Gauss-Fit“ des Programms VSpec eine gute Lösung sein.

5.5 Gauss-Fit der aufgespalteten Hα-Spektrallinie

Durch diese Funktion wird mit Hilfe einer mathematischen Funktion eine durchgehende Kurve über die Absorptionslinie gelegt. Dazu muss der Beginn und das Ende der Linie markiert werden, indem man den Cursor mit gedrückter rechter Maustaste über den Bereich der Kurve zieht. Dabei muss besonders darauf geachtet werden, dass der Beginn und das Ende der Kurve getroffen werden. Anschließend wird im Menü „Spectrometry“ die Option „Gaussian Fit“ gewählt (Abb. 31[21]).

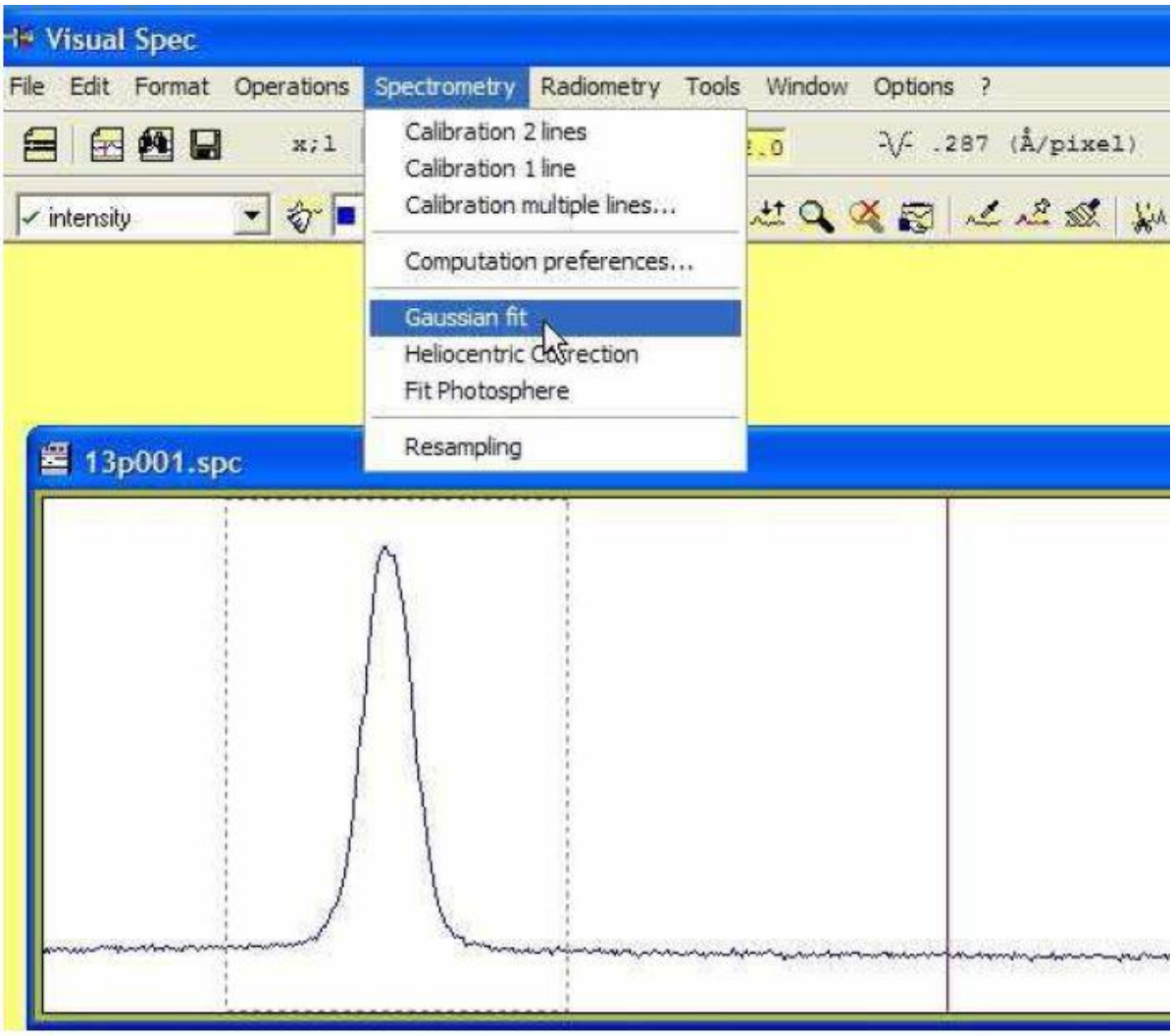


Abbildung 31: Auswahl des Bereichs zum Fitten

[21] http://www.astrosurf.com/vdesnoux/tutorial9.html

Im Idealfall ist nun im Spektrum eine durchgehende Kurve zu sehen, die genau auf der Aufspaltung liegt (Abb. 32).

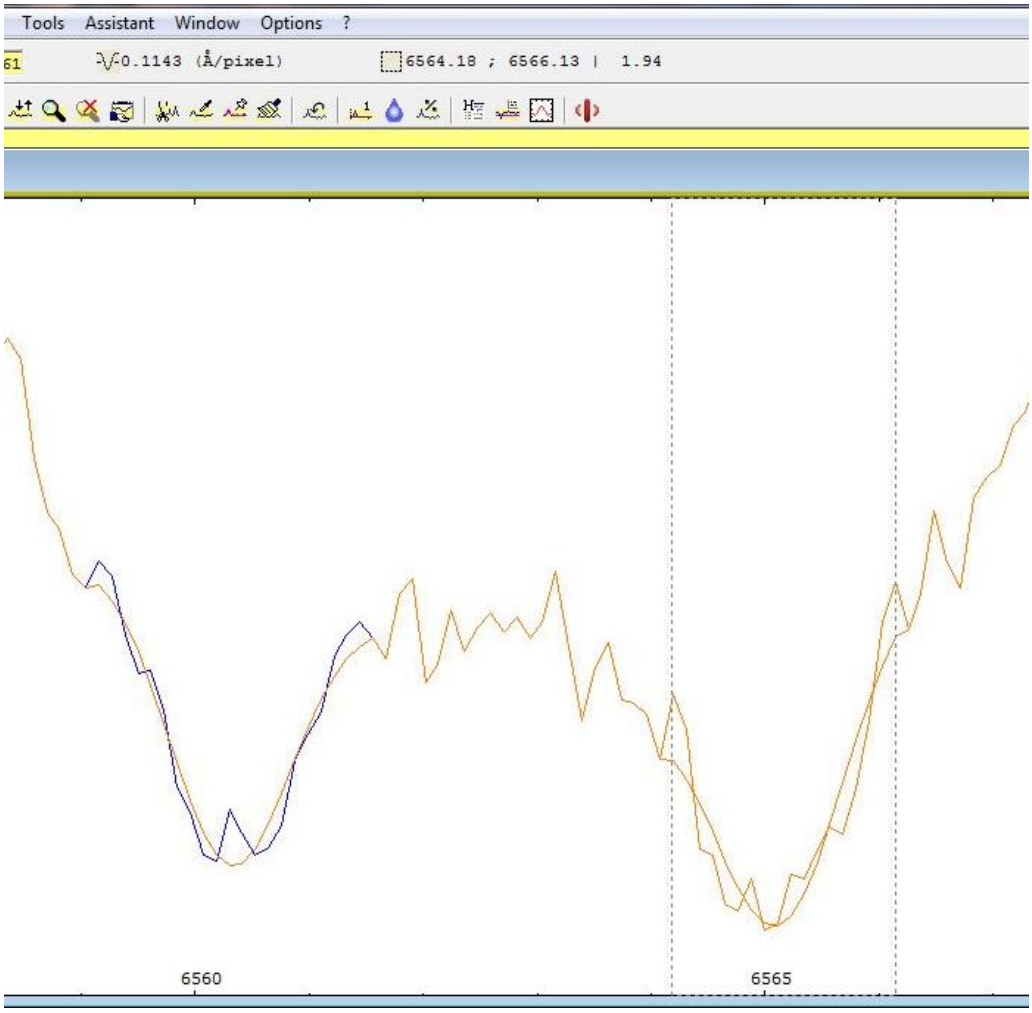


Abbildung 32: Gefittete Kurve in der Aufspaltung – Spektrum 2 12.01.2013 19:17:15 UT

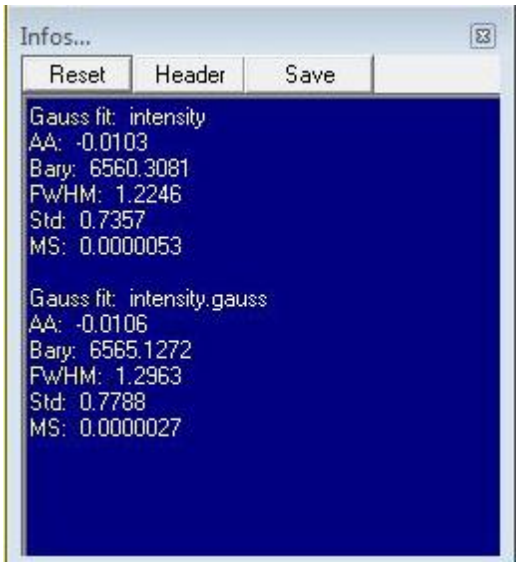


Abbildung 33: Der Header "Infos" zeigt die Ergebnisse des Gauss-Fits

Im blauen Fenster „Infos“ (Abb. 33), das nun erscheint, lassen sich die relevanten Daten ablesen:

„Bary“ ist die Mitte der Kurve, d. h. der für die Auswertung wichtige Wellenlängenwert der maximalen Absorption.

„FWHM“ stellt die Breite der Spektrallinie auf halber Höhe dar. Dieser Wert ist jedoch für Beta Aurigae hier nicht relevant.

Es muss jedoch immer überprüft werden, ob der Wert mit dem Augenmaßwert übereinstimmt. So gab es beim letzten Spektrum Probleme, da der Gaussian Fit deutlich andere Werte aufzeigte, als nach Augenmaß ablesbar waren (Abb. 34). In solchen Fällen sollte selbst entschieden werden, ob der Gauss-Fit akzeptable Werte liefert. Bei dem betroffenen Spektrum wurde schließlich der Wert nach Augenmaß genommen.

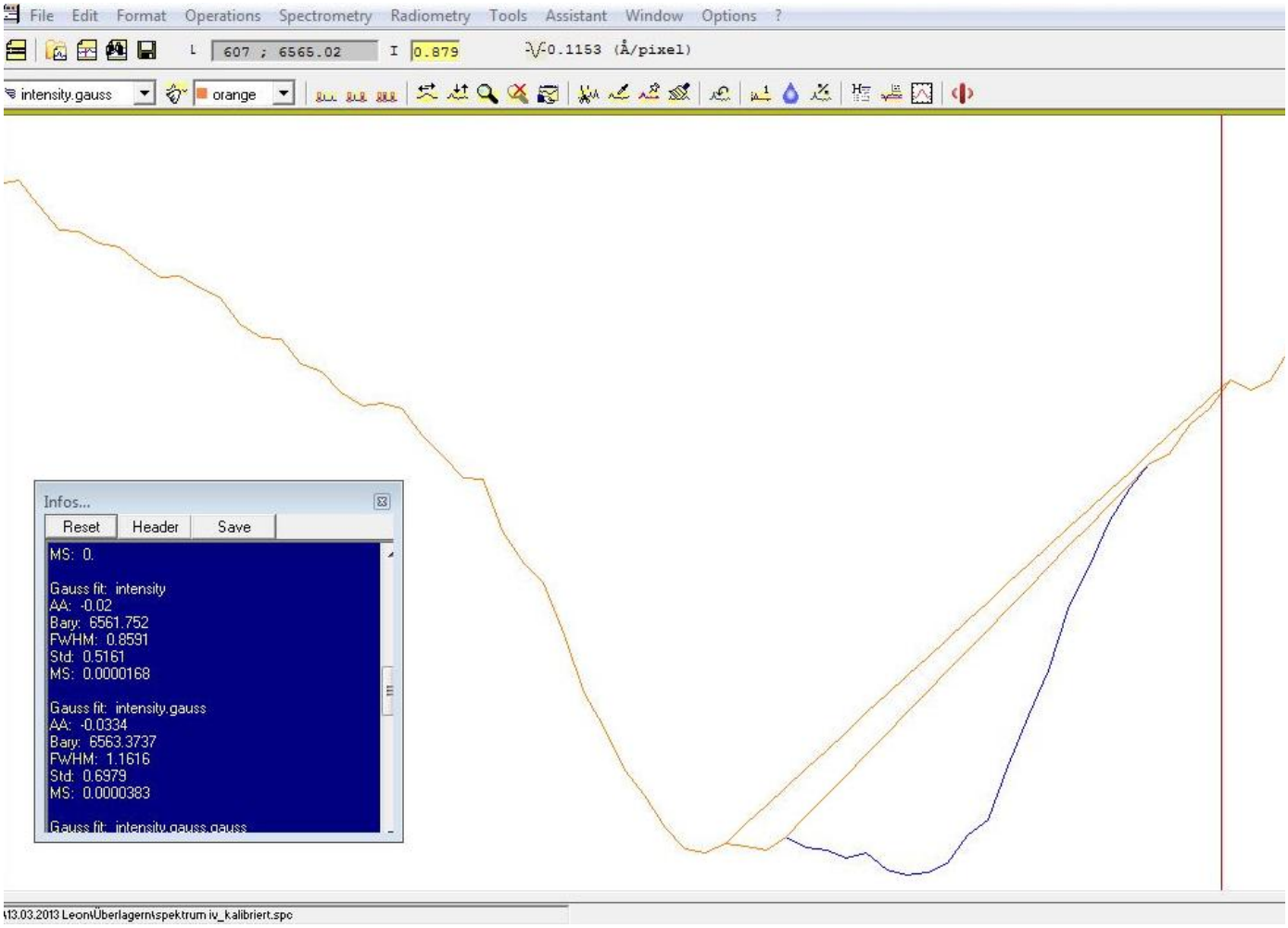


Abbildung 34: Der Gaussian Fit kann in Einzelfällen kein geeignetes Ergebnis liefern

5.6 Messergebnisse

Bei den vier Spektren konnten nach dem vorher erläuterten Verfahren die Differenzen der beiden Spektrallinien zur Hα-Laborwellenlänge gemessen werden, die zur Berechnung der Radialgeschwindigkeiten benötigt werden.

Tabelle 2: Messergebnisse

λ_1, λ_2: Wellenlänge der ersten bzw. zweiten Sternkomponente; Laborwellenlänge $\lambda_{H\alpha}$ = 6562,852 nm

$\Delta\lambda_1 = \lambda_1 - 6562{,}852$ nm ; $\Delta\lambda_2 = \lambda_2 - 6562{,}852$ nm

Datum	Gemessene Werte		Differenzen zur Laborwellenlänge Hα	
Aufnahmezeitpunkt	λ_1 [Å]	λ_2 [Å]	$\Delta\lambda_1$ [Å]	$\Delta\lambda_2$ [Å]
Spektrum I 11.01.2013 21:49:25 UT	6561.4222	6563.1479	-1,4298	0,2959
Spektrum 2 12.01.2013 19:17:15 UT	6559.4561	6565.1272	-2,5439	2,2752
Spektrum 3 13.02.2013 18:10:19 UT	6560.8947	6564.7954	-1,9573	1,9434
Spektrum 4 13.03.2013 21:36:36 UT	6561.7531	6563.373	-1,0989	0,521

6. Herleitung der Formeln für die Massen und die Bahnradien der beiden Sternkomponenten

Auf Basis der Werte der maximalen Radialgeschwindigkeiten K_1 und K_2 der beiden Sternkomponenten von β Aurigae können weitere Erkenntnisse über den Stern gewonnen werden. So ist es möglich, mithilfe von physikalischen Gesetzen Formeln herzuleiten, die eine Berechnung der Sternmassen und der Bahnradien möglich machen.

6.1 Herleitung der Formeln für die Kreisbahn

Zur Vereinfachung wird davon ausgegangen, dass β Aurigae eine Kreisbahn besitzt. Bei einer Ellipsenbahn müssen weitere Bahnparameter berücksichtigt werden.
Als Ausgangpunkt werden das Gravitationsgesetz und das 2. Newtonsche Gesetz[22] verwendet.

Gravitationsgesetz:

$F = G \cdot \frac{M_1 \cdot M_2}{r^2}$ mit $G = 6{,}67384 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s}$

2. Newtonsches Gesetz:

$F_1 = M_1 \cdot a_1$ $F_2 = M_2 \cdot a_2$

Es werden jeweils die Gleichungen der beiden Sternkomponenten betrachtet.
Daraus folgt für die Beschleunigung a:

$a_1 = \frac{F}{M_1} = \frac{G \cdot M_2}{r_1^2}$ $a_2 = \frac{F}{M_2} = \frac{G \cdot M_1}{r_2^2}$

Mithilfe der Winkelgeschwindigkeit lässt sich die Beschleunigung als „Zentripetalkraft“[23] ausdrücken. Die Winkelgeschwindigkeit steht wiederum in Abhängigkeit von der Umlaufzeit (Periode T).

$$a = \omega^2 \cdot r = (\frac{2\pi}{T})^2 \cdot r = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot r$$

[22] Vgl.: http://de.wikipedia.org/wiki/Newtonsche_Gesetze#Zweites_newtonsches_Gesetz
[23] http://de.wikipedia.org/wiki/Beschleunigung

So ergibt sich folgende Gleichung:

$$a_1 + a_2 = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot (r_1 + r_2) = G \cdot \frac{M_1 + M_2}{(r_1 + r_2)^2}$$

Durch Umstellen der Variablen erhält man eine Formel für die Summe der beiden Massen, die sich damit aus der Periode und den maximalen Radialgeschwindigkeiten K_1 und K_2 errechnen lässt.

$$M_1 + M_2 = \frac{4\pi^2}{G \cdot T^2} \cdot (r_1 + r_2)^3 = \frac{T \cdot (K_1 + K_2)^3}{2\pi \cdot G \cdot (\sin i)^3}$$

Dies ist also die erste wichtige Formel, um die Bahnkomponenten auszurechnen. Da die Bahnneigung i=Inklination nicht bekannt ist, muss dieser Faktor stehenbleiben. Eine Abschätzung dieses Parameters lässt sich aber anhand der Bahnradien und der Sternradien abschätzen.

So ergibt sich zunächst:

$$(M_1 + M_2) \cdot (\sin i)^3 = \frac{T \cdot (K_1 + K_2)^3}{2\pi \cdot G}$$

Nun sollen aber die Massen auch einzeln ausgerechnet werden können und man möchte auch die Bahnradien erhalten.

$$F = M_1 \cdot a_1 = M_2 \cdot a_2 = M_1 \cdot \omega^2 \cdot r_1 = M_2 \cdot \omega^2 \cdot r_2$$

$M_1 \cdot r_1 = M_2 \cdot r_2$ also: $\frac{M_1}{M_2} = \frac{r_2}{r_1}$

Die Verhältnisse der Massen und der Bahnradien sind also umgekehrt proportional zueinander.

Damit ergeben sich die Bahnradien r_1 und r_2:

$$r_1 \cdot \sin i = \frac{K_1 \cdot T}{2\pi}$$

$$r_2 \cdot \sin i = \frac{K_2 \cdot T}{2\pi}$$

Das Verhältnis von Massen und Bahnradien lässt sich auch nach einer Massenkomponente auflösen.

$$M_1 = M_2 \cdot \frac{r_2}{r_1}$$

Dementsprechend kann die bereits bekannte Summe der beiden Massen nun auch durch eine der beiden Massen ausgedrückt werden.

$$M_1 + M_2 = M_2 \cdot \left(1 + \frac{r_1}{r_2}\right) = M_2 \cdot \frac{r_1 + r_2}{r_1}$$

Dabei kürzt sich der Faktor sin i heraus, sodass er hier zunächst nicht mehr berücksichtigt werden muss.

Damit lassen sich die Massen mithilfe der Formel für die Summe der Massen und den Formeln für die Bahnradien für beide Komponenten berechnen.

$$M_2 = \frac{M_1 + M_2}{r_1 + r_2} \cdot r_1$$

$$M_1 = \frac{M_1 + M_2}{r_1 + r_2} \cdot r_2$$

6.2 Formeln für die elliptische Umlaufbahn

Da Doppelsterne in der Regel eine elliptische Umlaufbahn besitzen, reicht hierfür die Berechnung für die Kreisbahn nicht aus. Es müssen noch weitere Parameter berücksichtigt werden, die von Thizy[24] erläutert werden:

K = maximale Radialgeschwindigkeit (Semi-Amplitude)

e = Exzentrizität

ω = Länge des Periastrons

ν = wahre Anomalie

γ = Systemgeschwindigkeit

α = große Halbachse

Dabei kommt er auf folgende Formel für die Radialgeschwindigkeit:

$$r = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{1 + e \cdot \cos \nu}$$

[24] http://www.shelyak.com/dossier.php?id_dossier=22&lang=2

Daraus wird deutlich, dass bei einer Kreisbahn die zusätzlichen Terme mit der Exzentrizität wegfallen.

Für die maximalen Radialgeschwindigkeiten gibt an:

$$K_{1,2} = \frac{2\pi \cdot a_{1,2} \cdot \sin i}{P\sqrt{1-e^2}}$$

P = Periode ; i = Inklination

Dr. J. B. Tatum[25] leitet aus den Keplerschen Gesetzen folgende Formel für die Radialgeschwindigkeit bei elliptischen Bahnen her:

$V_{rad} = K\,[\cos(v + \omega) + e\cos(\omega)] + \gamma$

Diese Berechnungen sollen der Ausgangspunkt für die nun folgende Ermittlung der Bahnparameter für β Aurigae sein.

[25] http://astrowww.phys.uvic.ca/~tatum/celmechs/celm18.pdf

7. Auswertung der Messergebnisse

7.1 Radialgeschwindigkeit

Es konnten insgesamt vier Spektren aufgenommen werden, die jeweils unterschiedlich weite Aufspaltungen aufweisen. Durch die Kalibrierung der Spektren und die Messung der jeweiligen Aufspaltung kann die Differenz zur Hα-Laborwellenlänge ermittelt werden. Die Radialgeschwindigkeit berechnet sich nach folgender Formel:

$v_r = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \cdot c$ c = 299.792.458 $\frac{m}{s}$; $\Delta\lambda = Differenz\ zu\ H\alpha$; $\lambda_0 = 6562{,}852$ Å

Die Ergebnisse sind aus folgender Tabelle ersichtlich:

Tabelle 3: Differenzen zur Hα-Laborwellenlänge und die resultierenden Radialgeschwindigkeiten der Messungen

Datum	Differenzen zu Hα		Radialgeschwindigkeit v	
Aufnahmezeitpunkt	Δ_1 [Å]	Δ_2 [Å]	v_1 [km/s]	v_2 [km/s]
Spektrum I 11.01.2013 21:49:25 UT	-1,4298	0,2959	-65,314	13,517
Spektrum 2 12.01.2013 19:17:15 UT	-2,5439	2,2752	-116,206	103,932
Spektrum 3 13.02.2013 18:10:19 UT	-1,9573	1,9434	-89,41	88,775
Spektrum 4 13.03.2013 21:36:36 UT	-1,0989	0,521	-50,198	23,799

Es wird deutlich, dass kein Zeitpunkt getroffen wurde, an dem die beiden Sterne genau voreinander standen. Dann hätte es im Spektrum nur eine Absorptionslinie gegeben, wodurch die Differenzen und die Radialgeschwindigkeiten jeweils gleich gewesen wären. Dieser Zeitpunkt wäre der Nullpunkt der Periode gewesen, das heißt die Phase, also der Zeitpunkt in der Periode, wäre zu diesem Zeitpunkt 0 gewesen.

Anmerkung: Die Spektren werden in den folgenden Abbildungen jeweils wie in der Tabelle angegeben nummeriert.

7.2 Auswertung mit Spectroscopic Binary Solver

Der Spectroscopic Binary Solver[26] ermöglicht es, anhand von eigenen Messwerten die Bahnparameter wie Exzentrizität und maximale Radialgeschwindigkeiten zu bestimmen und dadurch ein Phasendiagramm des Doppelsterns zu erhalten.

Da aufgrund der Wetterlage nur vier Messungen durchgeführt werden konnten, ist es notwendig, andere Werte aus der Literatur hinzuzuziehen, um ein Phasendiagramm zu erstellen und Sternmassen sowie Bahnradien herauszufinden. Dazu werden die eigenen Messwerte nun in weitere Werte von Thizy eingeordnet. Dazu wird eine Tabelle (Abb. 35[27]) mit seinen Messwerten und dem zugehörigen Heliozentrischen Julianischen Datum zur weiteren Auswertung der eigenen Daten als Grundlage genommen:

	Déterminations Vspec		Déterminations PeakFit			
Phase	V1	V2	V1	V2	HJD	Source
0.040	-1.9	-38.8	4.0	-49.3	2454393.642319	Thizy/Masviel
0.122	-105.1	62.5	-106.0	63.7	2454338.523799	Thizy/Cochard
0.149	-105.9	65.8	-105.6	68.1	2454358.430345	Thizy
0.161	-112.0	70.4	-113.6	69.0	2454172.357280	Barbotin
0.174	-114.6	75.3	-116.4	76.3	2454358.531744	Thizy
0.178	-120.3	75.5	-124.8	75.2	2454172.426093	Thizy/Cochard
0.197	-118.2	81.9	-122.3	82.3	2454358.620222	Thizy
0.198	-127.2	84.4	-128.5	81.9	2454172.503476	Thizy/Cochard
0.200	-124.0	79.0	-133.1	79.5	2453970.550290	Thizy/Cochard
0.216	-127.3	89.0	-131.5	85.8	2454172.573610	Thizy/Cochard
0.217	-124.7	84.2	-127.7	85.9	2454386.419786	Thizy/Ribeiro
0.246	-127.7	88.4	-130.9	88.7	2454386.537857	Thizy/Ribeiro
0.276	-123.1	87.9	-129.5	87.7	2454386.656107	Thizy/Ribeiro
0.399	-79.4	37.9	-78.0	38.8	2454169.340206	Barbotin
0.414	-73.3	36.9	-74.4	37.3	2454173.357798	Thizy/Cochard
0.432	-50.9	36.0	-57.2	34.4	2454173.429431	Thizy/Cochard
0.450	-49.9	25.3	-47.1	20.7	2454173.502344	Thizy/Cochard
0.627	53.4	-110.1	53.9	-111.2	2454154.401586	Thizy/Cochard
0.727	83.3	-128.0	82.8	-135.0	2454384.479687	Thizy/Ribeiro
0.755	92.5	-124.4	90.3	-130.5	2454384.592097	Thizy/Ribeiro
0.782	82.5	-127.8	81.9	-134.2	2454384.697696	Thizy/Ribeiro
0.873	47.0	-84.0	47.2	-87.7	2454337.540339	Thizy/Cochard
0.917	35.7	-79.1	33.0	-76.7	2454171.390028	Barbotin
0.920	30.8	-72.4	31.3	-75.5	2454353.564205	Thizy/Cochard
0.958	-5.9	-32.5	12.8	-42.6	2453973.552152	Thizy/Cochard

Abbildung 35: Messergergebnisse von Thizy - Die grün umrandeten Werte werden in eine Editor-Tabelle übertragen

Mit der Software Spectroscopic Binary Solver kann nun ein Phasendiagramm erstellt und eine Abschätzung der Bahnelemente durchgeführt werden. Dazu müssen die eigenen Werte in die Tabelle mit den Werten Thizys eingetragen werden. Hierzu muss auch das Heliozentrische Julianische Datum (HJD) ermittelt werden, das sich über ein Javascript im Internet (Abb. 36)[28] berechnen lässt.

[26] http://www.vub.ac.be/STER/JAD/JAD10/jad10_3/jad10_3.pdf
[27] http://www.shelyak.com/dossier.php?id_dossier=22&lang=2
[28] http://www.physics.sfasu.edu/astro/javascript/hjd.html

Die zugehörigen Objektkoordinaten (entnommen aus der astronomischen Datenbank SIMBAD[29]) lauten:

RA = α = 05 h 59 m 31,7 s

DE = δ = 44° 56‘ 50,8‘‘

INPUTS

UT Date (MM/DD/YYYY) 01 / 11 / 2013 UT Time: 21 : 49 : 25

Object RA: 05 h 59 m 31,7 s DEC: 44 ° 56 ' 50,8 "

OUTPUTS

```
1/11/2013   21:49:25
Sun -- RA: 19h 33m   DEC: -21° 41'
Earth -- RA: 7h 33m   DEC: 21° 41'
Object -- RA: 89.77916666666667°   DEC: 44.93555555555555°
Earth -- X,Y,Z: -0.36920699156499387,0.8526593694038075,0.3696730949736915
Object -- X,Y,Z: 0.0027284363741067264,0.7078964064918618,0.7063110032491786
Light Time: 7.183214909266578 minutes
Julian Date: 2456304.4093171298
Heliocentric Julian Date: 2456304.414305473
```

Abbildung 36: Das Javascript berechnet das HJD

Damit können die Werte für beide Sterne in die Editor-Tabelle (Abb. 37) eingegeben werden. Wichtig ist dabei, dass das HJD mit einem Komma und die jeweilige Geschwindigkeit mit einem Punkt als Trennzeichen eingetragen werden.

STAR1		
2454393,642319	-1.9	0
2454338,523799	-105.1	0
2454358,430345	-105.9	0
2454172,357280	-112.0	0
2454358,531744	-114.6	0
2454172,426093	-120.3	0
2454358,620222	-118.2	0
2454172,503476	-127.2	0
2453970,550290	-124.0	0
2454172,576310	-127.3	0
2454386,419786	-124.7	0
2454386,537857	-127.7	0
2454386,656107	-123.1	0
2454169,340206	-79.4	0
2454173,357798	-73.3	0
2454173,429431	-50.9	0
2454173,502344	-49.9	0
2454154,401586	53.4	0
2454384,479687	83.3	0
2454384,592097	92.5	0
2454384,697696	82.5	0
2454337,540339	47.0	0
2454171,390028	35.7	0
2454353,564205	30.8	0
2453973,552152	-5.9	0
2456304,414307	-65.3	0
2456305,308604	-116.2	0
2456337,260237	-89.4	0
2456365,400417	-50.2	0

STAR2		
2454393,642319	-38.8	0
2454338,523799	62.5	0
2454358,430345	65.8	0
2454172,357280	70.4	0
2454358,531744	75.3	0
2454172,426093	75.5	0
2454358,620222	81.9	0
2454172,503476	84.1	0
2453970,550290	79.0	0
2454172,576310	89.0	0
2454386,419786	84.2	0
2454386,537857	88.4	0
2454386,656107	87.9	0
2454169,340206	37.9	0
2454173,357798	36.9	0
2454173,429431	36.0	0
2454173,502344	25.3	0
2454154,401586	-110.1	0
2454384,479687	-128.0	0
2454384,592097	-124.4	0
2454384,697696	-127.8	0
2454337,540339	-84.0	0
2454171,390028	-79.1	0
2454353,564205	-72.4	0
2453973,552152	-32.5	0
2456304,414307	13.5	0
2456305,308604	103.9	0
2456337,260237	88.8	0
2456365,400417	23.8	0

Abbildung 37:

Editor-Tabelle;

gelb markierte Bereiche sind die eigenen Messwerte

[29] http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-basic?Ident=beta+aur&submit=SIMBAD+search

Anschließend wird die Software Spectroscopic Binary Solver[30] geöffnet und über „Read File“ die Editor-Tabelle mit den Werten aufgerufen. Die Software bestimmt die Periode über den Button “Period” (Abb. 38). Sie beträgt mit den Werten P=3,96420^{d}. In Anbetracht des Literaturwertes P=3,96004 d[31] hat die Software nur eine geringe Abweichung gefunden.

Abbildung 38: Periodensuche: Die eigenen Messpunkte sind mit ★ und ★ markiert.

Anschließend werden auch die restlichen Werte über „Solve“ errechnet. Das Programm probiert dabei verschiedene Werte für die Parameter Exzentrizität e, Systemgeschwindigkeit γ, Länge des Periastrons ω und maximale Radialgeschwindigkeiten K_1 und K_2 aus, sodass die Bahn „gefittet“ wird und eine kleinstmögliche Abweichung angestrebt wird (Abb. 39). Die verbliebene Abweichung ist im Feld „RMS“ dargestellt und sollte möglichst gering sein.

[30] http://www.shelyak.com/dossier.php?id_dossier=22&lang=2
[31] http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR-S?V*%20bet%20Aur

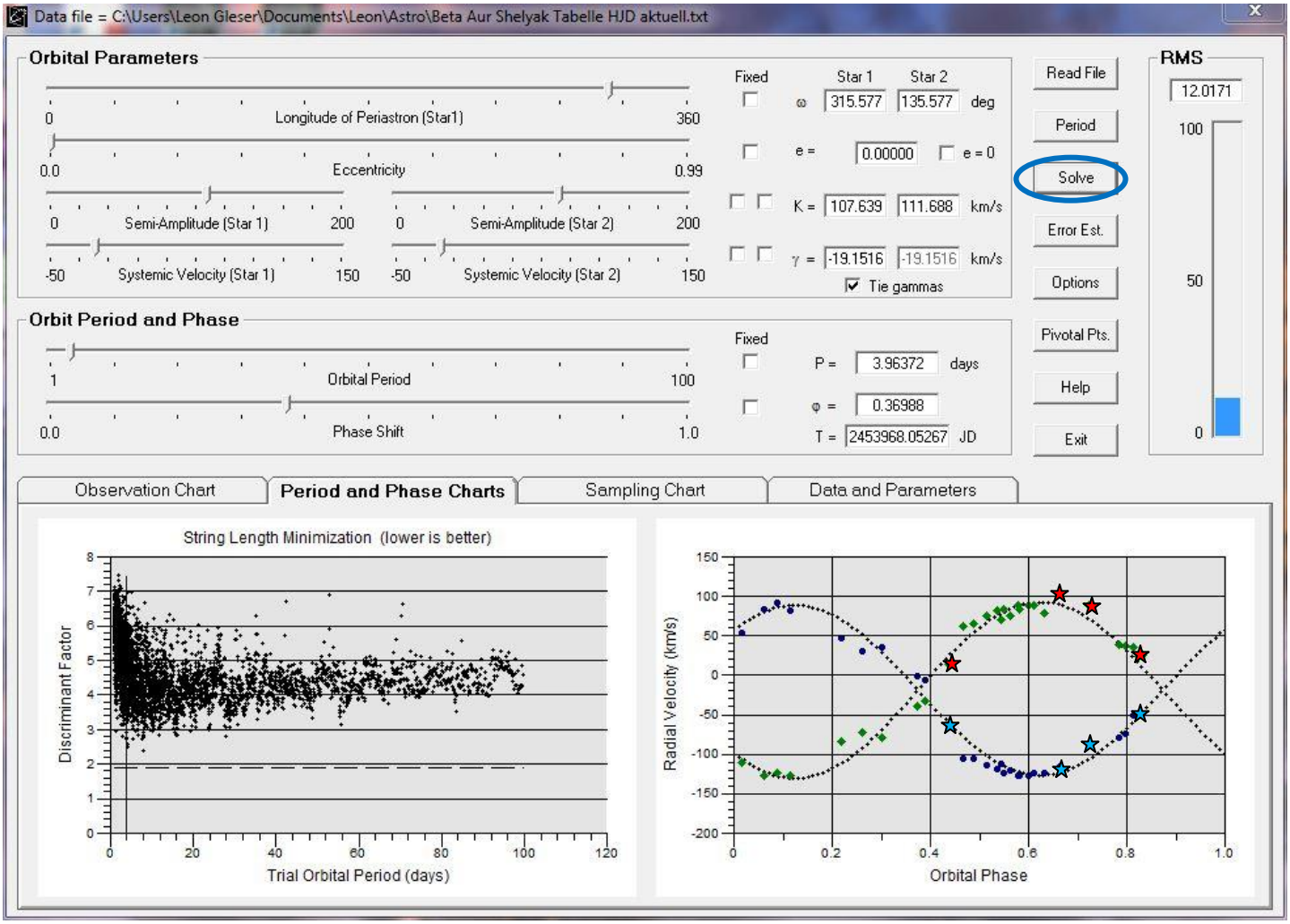


Abbildung 39: Die Software passt die Kurve an die gemessenen Werte an - Die eigenen Messpunkte sind mit ★ und ★ markiert.

Als Ergebnis erhält man ein Diagramm (Abb. 40), das die Kurven der beiden Bahnkomponenten und die gemessenen Werte zeigt. Die eigenen Werte wurden anhand der Radialgeschwindigkeit zugeordnet. Es ist gut zu sehen, dass die eigenen Werte ziemlich

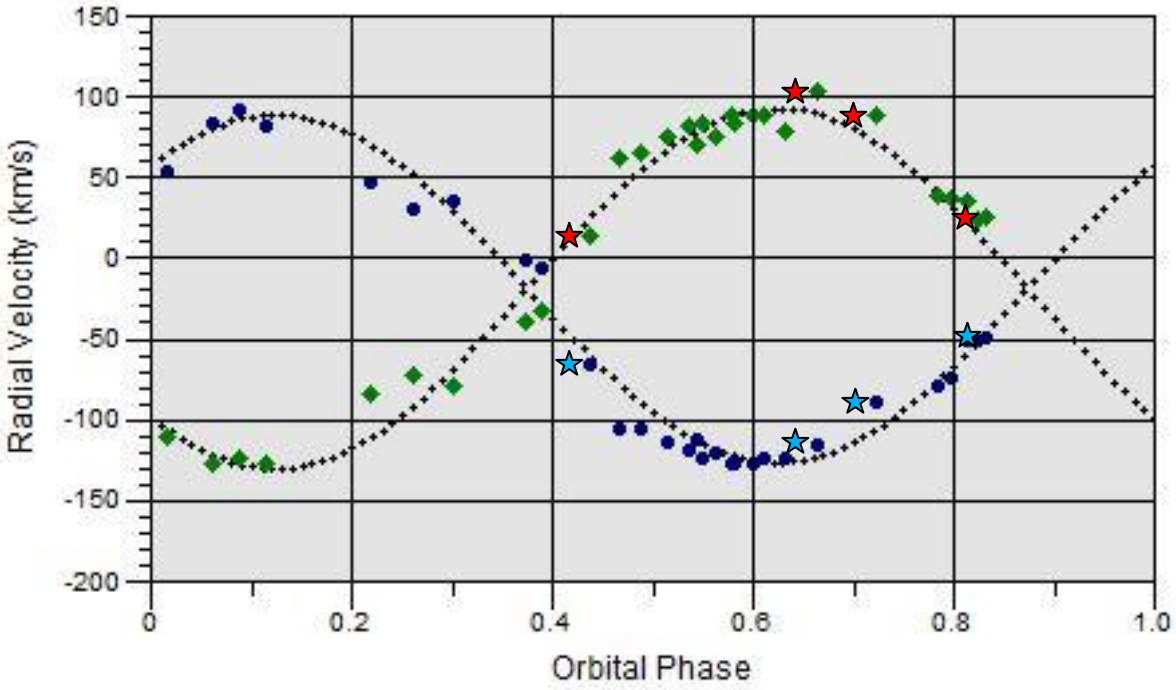


Abbildung 40: Phasendiagramm - Die eigenen Messpunkte sind mit ★ und ★ markiert.

genau auf die Kurve passen. Abweichungen können sich aus Messungenauigkeiten sowohl bei der Aufnahme als auch bei der Vermessung des Spektrums ergeben. Es ist auffällig, dass der Wert für die Exzentrizität 0 beträgt, da dies bedeutet, dass es sich um eine Kreisbahn handelt.

Allerdings kann nun noch überprüft werden, ob die Software es geschafft hat, die Werte auch der richtigen Phase zuzuordnen. Der Phasenwert ist der Zeitpunkt in der Periode, an dem ein Spektrum gemacht wird, gerechnet auf P=1. Die Phase ist also der relative Zeitpunkt. Zur Berechnung wird eine Excel-Tabelle (Abb. 41)[32] verwendet, mit der es möglich ist, den Phasenwert aus dem HJD zu berechnen:

Source: "Eclipsing binaries observed with the WIRE satellite. II. Beta Aurigae and non-linear limb darkening in light curves", Southworth J., Bruntt H., Buzasi D.L. Astron. Astrophys. 467, 1215-1226 (2007).						
Datum	HJD Beobachtung 12.12.11	HJD Min I = T0	Periode P [d]	DT [d]	DT/P	Phase
2.2.2012 21:50 UT	2455960.41362792	2453827.19569000	3.96004673	2133.21793792	538.68504171	0.68504171
11.1.2013 21:49:25 UT	2456304.41430773	2453827.19569000	3.96004673	2477.21861773	625.55287516	0.55287516
12.1.2013 19:17:15 UT	2456305.30860412	2453827.19569000	3.96004673	2478.11291412	625.77870492	0.77870492
13.2.2013 18:10:19 UT	2456337.26023749	2453827.19569000	3.96004673	2510.06454749	633.84720399	0.84720399
13.3.2013 21:36:36 UT	2456365.40041667	2453827.19569000	3.96004673	2538.20472667	640.95322599	0.95322599
Object -- RA: 89.88333333333333° DEC: 44.9475°						
Earth -- X,Y,Z: -0.6856638491704763,0.6678520000705419,0.28954929104127225						
Object -- X,Y,Z: 0.0014411407356751007,0.7077529373696458,0.7064585640771992						

Abbildung 41: Excel-Tabelle zur Berechnung der Phase DT=Differenz zum Phasennullpunkt T0; DT/P = Quotient aus DT und der Periode

Beim Vergleich mit dem Phasendiagramm wird deutlich, dass die Phasen andere Werte haben als vom SBS angegeben. Dies liegt daran, dass die Software nicht den Phasennullpunkt t_0 bestimmt, an dem die Radialgeschwindigkeiten gleich sind, sodass die Phasenwerte insgesamt verschoben sind. Dementsprechend muss das Phasendiagramm noch auf den Phasennullpunkt ausgerichtet werden. Dazu wird es um ca. 1,5 nach rechts verschoben. Dann stimmen die Phasenwerte jeweils mit den Werten der Tabelle überein.

Dies ist in der Software dadurch zu lösen, dass der Parameter „Phase Shift φ" so verschoben wird, dass die Werte mit den errechneten Phasenwerten übereinstimmen. Dann muss „Fixed" für den Parameter gewählt werden und nochmals eine Berechnung über „Solve" durchgeführt werden (Abb. 42).

[32] Eclipsing binaries observed with the WIRE satellite. II. Beta Aurigae and non-linear limb darkening in light curves", Southworth J., Bruntt H., Buzasi D.L. Astron. Astrophys. 467, 1215-1226 (2007).

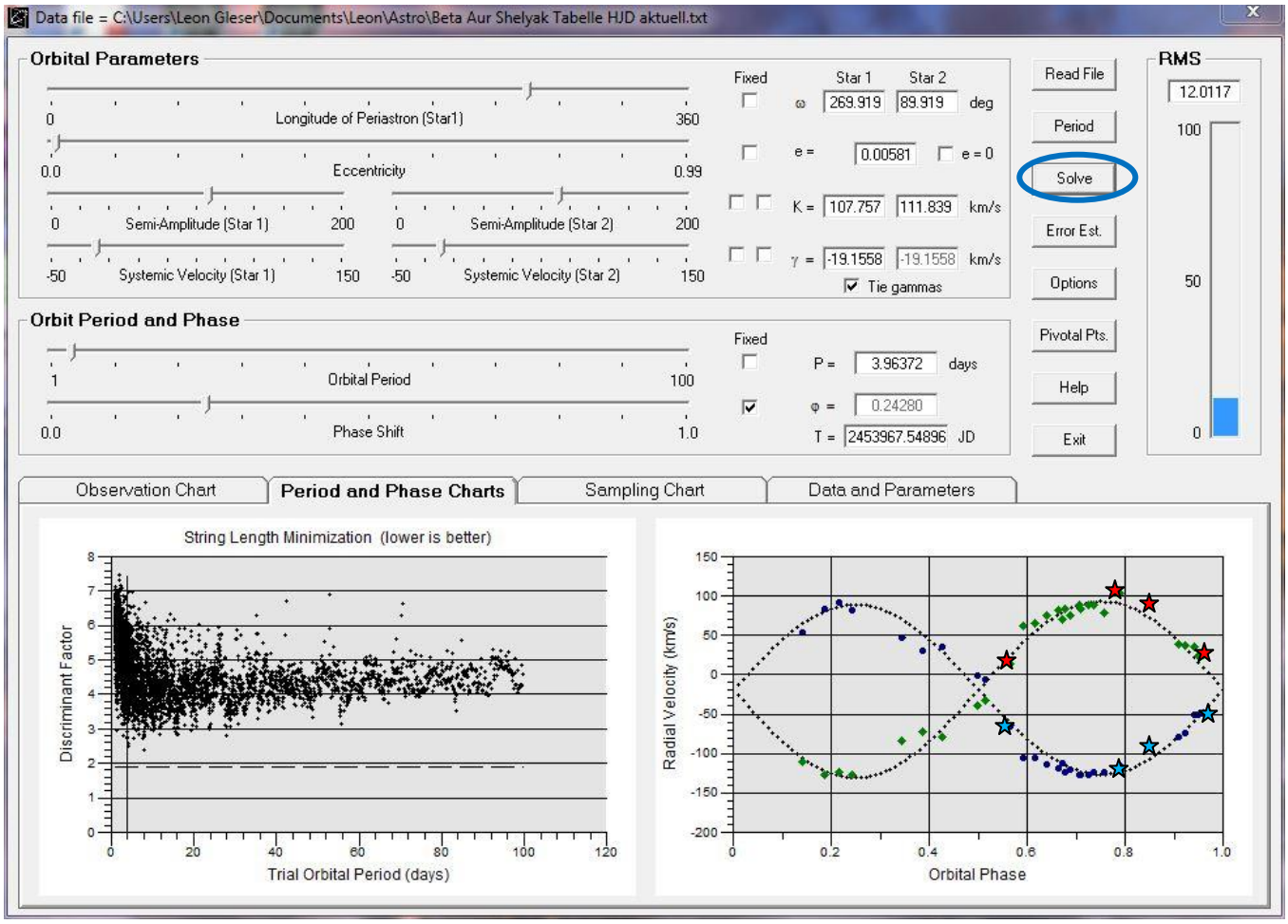


Abbildung 42: Solve mit der verschobenen Phase - Die eigenen Messpunkte sind mit ★ und ★ markiert.

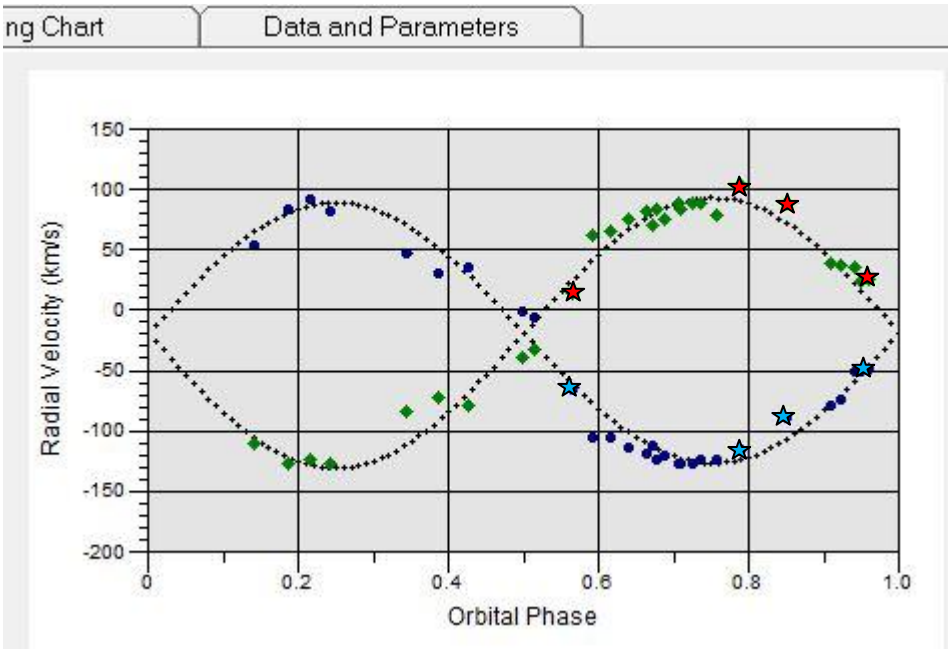


Abbildung 43: Ergebnis: Phasendiagramm von Beta Aurigae
Die eigenen Messpunkte sind mit ★ und ★ markiert.

So ergibt sich nun das fertige Phasendiagramm (Abb. 43), in das sich die eigenen Werte gut einpassen.

Es ist gut zu erkennen, dass Beta Aurigae laut des Phasendiagramms eine Kreisbahn aufweisen muss, da die beiden Schnittpunkte der Kurven in gleichem Abstand voneinander liegen. Wäre die Bahn elliptisch, so hätten die Schnittpunkte deutlich unterschiedlich große Abstände voneinander.

7.3 Abschätzung der Inklination i

Die Lichtkurve von Beta Aurigae sieht nach Thizy wie folgt aus (Abb. 35)[33].

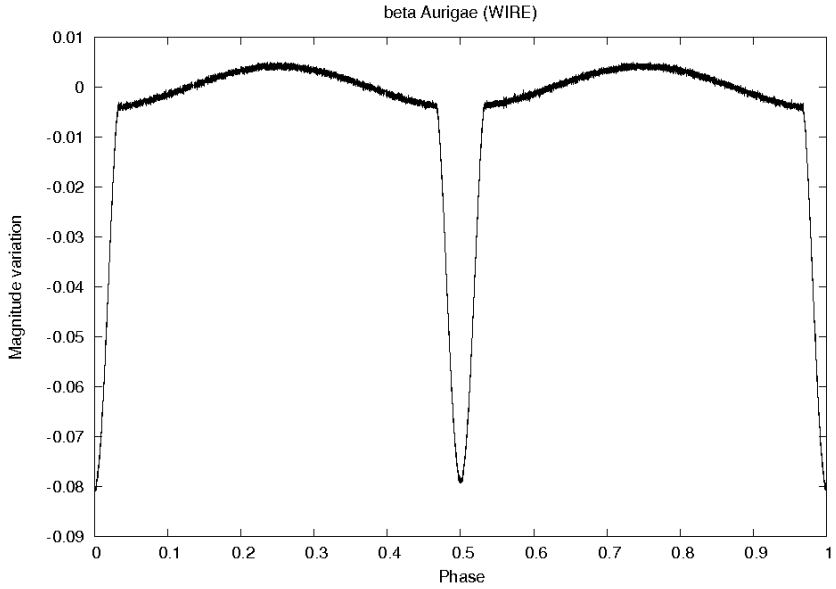


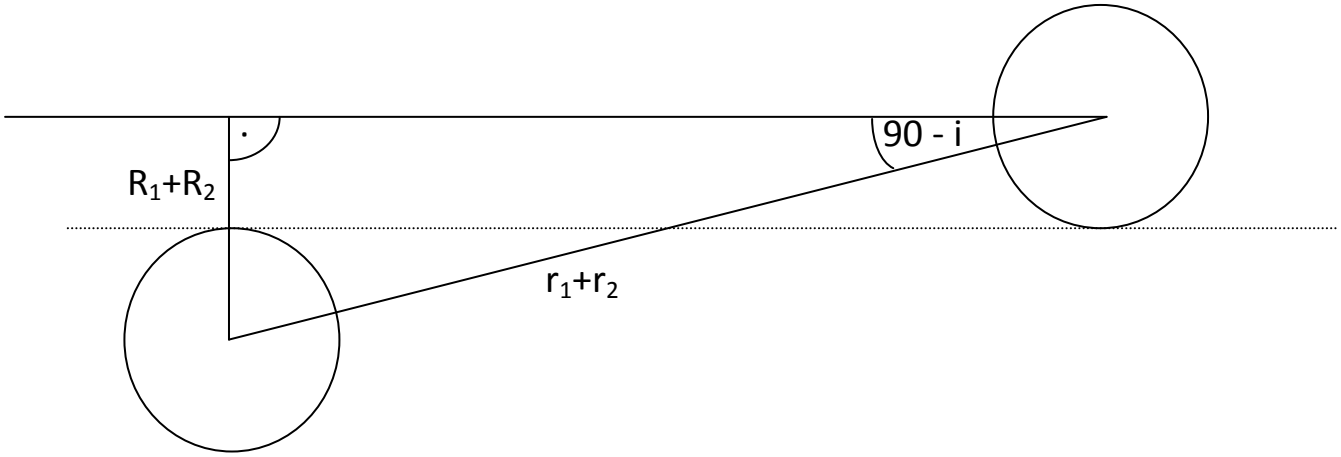
Abbildung 44: Lichtkurve von beta Aurigae in Magnituden

Man sieht, dass der Lichtabfall jeweils nur sehr gering ist (0,08 mag) und sich zwei spitze Minima ergeben. Dies zeigt, dass Beta Aurigae ein bedeckungsveränderlicher Stern ist, das heißt, dass sich die beiden Sternkomponenten nur partiell überdecken. Da der Lichtabfall jeweils nur 0.08 Größenklassen beträgt, ist dies der Fall. Außerdem ist ersichtlich, dass die Abschnitte in gleichem Abstand zueinander stehen, sodass die beiden Komponenten auch etwa gleich groß sein müssen.

[33] http://arxiv.org/abs/astro-ph/0703634v1.pdf

Daraus lässt sich die Inklination i abschätzen:

Geht man davon aus, dass die beiden Komponenten sich nur minimal überdecken, ergibt sich ein rechtwinkliges Dreieck.



Dabei gilt: $\sin(90 - i) = \frac{R_1+R_2}{r_1+r_2}$

Die beiden Bahnradien wurden bestimmt, die Sternradien können in der Literatur herausgefunden werden: Danach ist $R_1 = 2{,}77\ R_\odot$ und $R_2 = 2{,}63\ R_\odot$[34].

Sonnenradius $R_\odot = 6{,}96342 \times 10^5$ km

$r_1 = 5{,}873 \cdot 10^6$ km $= 8{,}434\ R_\odot$ und $r_2 = 6{,}096 \cdot 10^6$ km $= 8{,}754\ R_\odot$

So können die gegebenen Werte in die Gleichung eingesetzt und die Inklination ermittelt werden.

$$\sin(90 - i) = \frac{2{,}77\ \mathrm{R}\odot + 2{,}63\ \mathrm{R}\odot}{r_1 + r_2}$$

$\sin(90 - i) = \frac{2{,}77\ \mathrm{R}\odot + 2{,}63\ \mathrm{R}\odot}{8{,}434\ \mathrm{R}\odot\ + 8{,}754\ \mathrm{R}\odot} = 0{,}31418$

$$\sin^{-1}(0{,}31418) = 18{,}3113$$

$$90 - i = 18{,}3113\ \rightarrow i = 71{,}7°$$

[34] http://adsabs.harvard.edu/abs/1994A&A...291..777N

7.4 Berechnung der Massen und Bahnradien

Der Spectroscopic Binary Solver gibt nach dem Fitten der Kurve als maximale Radialgeschwindigkeiten $|K_1| = 107{,}757$ km/s und $|K_2| = 111{,}839$ km/s an. Nun können die Bahnradien und die Massen der Sterne errechnet werden. Dazu wird die Systemumlaufszeit wie vom Programm errechnet mit T = 3,96372 d = 342465,408 s angenommen.

$$r_1 \cdot \sin i = \frac{K_1 \cdot T}{2\pi} = \frac{107{,}757\frac{km}{s} \cdot 342465{,}408\ s}{2\pi} = 5{,}873 \cdot 10^6 km = 5{,}873 \cdot 10^9 m$$

$$r_1 = \frac{5{,}873 \cdot 10^9 m}{\sin(71{,}7°)} = 6{,}186 \cdot 10^9 m$$

$$r_2 \cdot \sin i = \frac{K_2 \cdot T}{2\pi} = \frac{111{,}839\frac{km}{s} \cdot 342465{,}408\ s}{2\pi} = 6{,}096 \cdot 10^6 km = 6{,}096 \cdot 10^9 m$$

$$r_2 = \frac{6{,}096 \cdot 10^9 m}{\sin(71{,}7°)} = 6{,}421 \cdot 10^9 m$$

Damit ergeben sich auch die Massen:

$$M_1 + M_2 = \frac{4\pi^2}{G \cdot T^2} \cdot (r_1 + r_2)^3 = \frac{4\pi^2 \cdot (6{,}186 \cdot 10^9\ m + 6{,}421 \cdot 10^9\ m)^3}{6{,}67384 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s} \cdot (342465{,}408\ s)^2}$$

$$= 1{,}012 \cdot 10^{31}\ kg$$

$$M_1 = \frac{M_1 + M_2}{r_1 + r_2} \cdot r_2 = \frac{1{,}012 \cdot 10^{31}\ kg}{12{,}607 \cdot 10^9\ m} \cdot 6{,}421 \cdot 10^9\ m = 5{,}154 \cdot 10^{30}\ kg$$

$$M_2 = \frac{M_1 + M_2}{r_1 + r_2} \cdot r_1 = \frac{1{,}012 \cdot 10^{31}\ kg}{12{,}607 \cdot 10^9\ m} \cdot 6{,}186 \cdot 10^9\ m = 4{,}966 \cdot 10^{30}\ kg$$

Aus diesen Werten kann die Masse der Sterne in Sonnenmassen ausgerechnet werden.

$M_{Sol} = 1{,}98 \cdot 10^{30}$ kg

$$M_1 = \frac{4{,}966 \cdot 10^{30}}{1{,}98 \cdot 10^{30}} = 2{,}603\ M_{Sol}$$

$$M_2 = \frac{5{,}154 \cdot 10^{30}}{1{,}98 \cdot 10^{30}} = 2{,}508\ M_{Sol}$$

Die Werte stimmen mit den vom Programm errechneten Werten des Programmes (Abb. 45), die man über den Button „Error estimate“ im Fenster „Data and parameters“ erhält, gut überein.

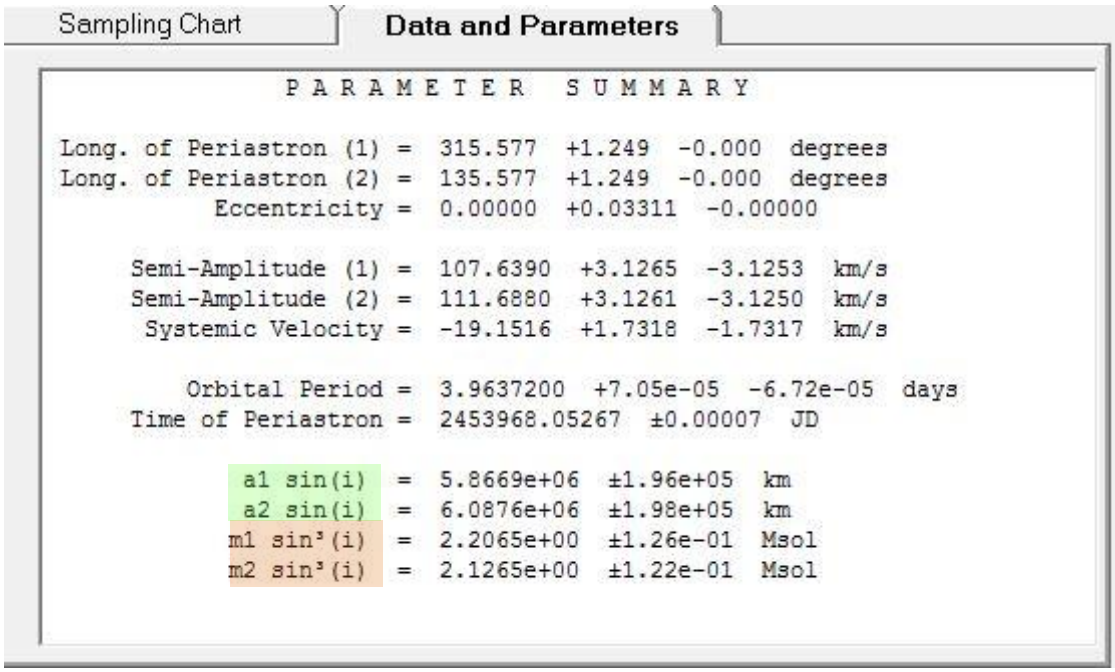


Abbildung 45: Im Fenster „Data and Parameters“ gibt der SBS die einzelnen errechneten Bahnparameter an. a steht für die Bahnradien.

Es fällt auf, dass die Massen der beiden Sterne nahezu identisch sind. Außerdem gibt das Programm eine Kreisbahn an, da die Exzentrizität bei 0 liegt. Dies macht es möglich, die Berechnungsmethode, die eigentlich nur für eine Kreisbahn geeignet ist, auch auf dieses Sternsystem anzuwenden.

7.5 Simulation der Lichtkurve mit dem Eclipsing Binary Simulator

Abschließend ist es möglich, mit dem Eclipsing Binary Simulator (Abb. 36)[35] die Lichtkurve anhand der Parameter von β Aurigae zu simulieren. Dazu werden für die Sternkomponenten jeweils die Massen (mass) und Sternradien (radius) eingestellt, die berechnet worden sind. Die Temperaturwerte werden jeweils aus der Literatur[36] übernommen. Auch die Summe der Bahnradien (separation) und die Exzentrizität, die ja nahezu 0 betrug, wird eingestellt. Der Wert der Inklination wurde zur Erreichung einer möglichst genauen Simulation aus der Literatur von Southworth[37] übernommen.

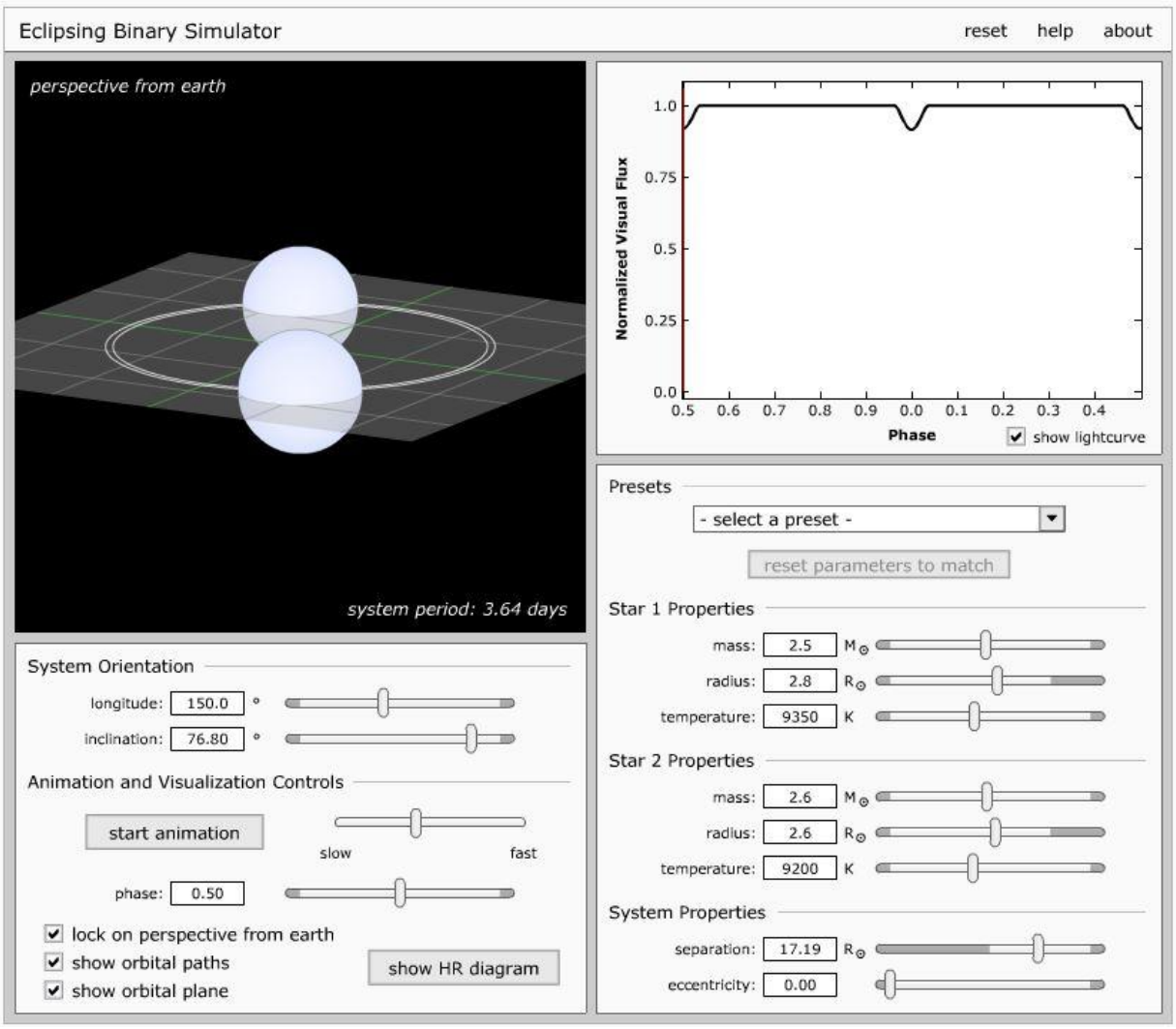


Abbildung 46: Eclipsing Binary Simulator mit beta Aurigae

[35] http://astro.unl.edu/naap/ebs/animations/ebs.html
[36] http://en.wikipedia.org/wiki/Beta_Aurigae
[37] http://www.aanda.org/articles/aa/abs/2007/21/aa7184-07/aa7184-07.html

8. Schlussbetrachtung

Zum Abschluss sollen die mit Hilfe des Spectroscopic Binary Solvers und gegebenen Werten von Thizy ermittelten Parameter für β Aurigae mit anderen Werten aus der Literatur verglichen werden. Dazu wird die Arbeit von Behr et al. 2011[38] hinzugezogen:

Tabelle 4: Vergleich der eigenen Messwerte mit Behr et al.

Parameter	Behr et al.	Eigene Messwerte
P (d)	3,69004	3,96372
K_1 (km/s)	108,053	107,757
K_2 (km/s)	110,911	111,839
γ (km/s)	-17,552	-19,1558
M_1 ($M_\odot$)	2,3885	2,603
M_2 ($M_\odot$)	2,3270	2,508

Es zeigt sich, dass mithilfe der Werte von Thizy durchaus aus den eigenen Messwerten die Bahnparameter für β Aurigae errechnet werden konnten. Der Spectroscopic Binary Solver bot dafür eine ausgesprochen gute Möglichkeit, die Bahn computerbasiert zu fitten, um ein Phasendiagramm zu erhalten. Dabei liegen die Werte sehr nah an den Werten der Profi-Astronomen, was zeigt, dass es auch an der Sternwarte am CFG möglich ist, sehr genaue Messungen durchzuführen und Erkenntnisse zu gewinnen.

Weitergehend könnten nun jupiterähnliche Exoplaneten spektroskopiert werden, die jeweils um einen Mutterstern kreisen, da diese ebenfalls eine Aufspaltung der Spektrallinien aufweisen. Hierbei ist jedoch jeweils nur das Spektrum des Muttersterns zu sehen, da der Exoplanet von seinem Licht überstrahlt wird, sodass das Phasendiagramm nur jeweils mit einer Kurve erstellt werden kann. So erfolgt eine Berechnung der minimalen Masse, die der Exoplanet haben kann. Außerdem ist noch eine deutlich größere Genauigkeit erforderlich, da die Aufspaltungen wesentlich kleiner sind (weniger als 1000 m/s) und damit Messfehler und Abweichungen möglichst vermieden werden müssen. Dies ist aber durchaus möglich und kann die Betrachtungen in dieser Arbeit vertiefen.

[38] http://iopscience.iop.org/1538-3881/142/1/6/pdf/1538-3881_142_1_6.pdf

Anhang

Danksagung an Olivier Thizy

Wir, der Projektkurs Astronomie im Schuljahr 2012/2013, danken insbesondere Olivier Thizy von der Firma Shelyak für die freundliche Leihgabe eines Lhires III Spektrographen zur Durchführung unserer spektroskopischen Messungen am Be-Stern Alkyone.
http://www.shelyak.com

Abschlusserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder dem Inhalt nach aus anderen Werken entnommen wurden, in jedem einzelnen Fall mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe. Verwendete Informationen aus dem Internet sind der Arbeit als PDF auf einer CD beigefügt.

Ich bin damit einverstanden, dass die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit in der Bibliothek der Schule zugänglich gemacht wird.

Ort, Datum, Unterschrift