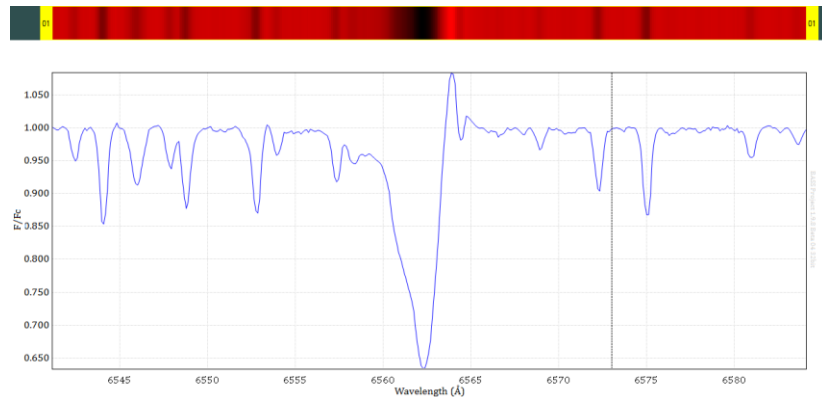
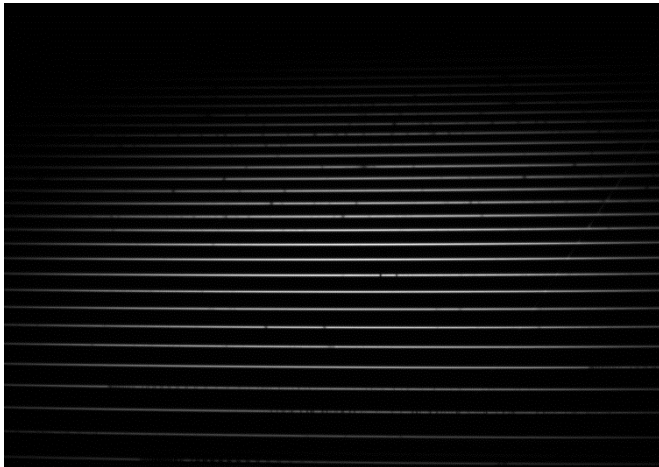


# Variationen im Sternwind des Riesensterns Deneb im Sternbild Schwan



Carl-Fuhlrott-Gymnasium, Wuppertal

Jahrgangsstufe Q1

Projektarbeit im Rahmen des Projektkurses Astronomie 2017/2018

Kursleiter: Bernd Koch

Abgabedatum: 30.05.2018

Juliane Neußer

Adresse: Lilienstr. 27

42369 Wuppertal

Deutschland

Email: [juliane\\_neusser@web.de](mailto:juliane_neusser@web.de)

Leon Deveaux

Adresse: Teschensudberger Str. 3a

42349 Wuppertal

Deutschland

Email: [leon.deveaux@online.de](mailto:leon.deveaux@online.de)

## Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| 1 Einleitung.....   | 4  |
| 1.1 Themenwahl .....  | 4  |
| 2 Physikalische Grundlagen.....                               | 5  |
| 2.2 Entstehung der Spektrallinien (Beispiel Wasserstoff)..... | 6  |
| 3 Klassifikation von Sternen.....                             | 13 |
| 3.1 Spektralklassifikation .....                              | 13 |
| 4 Doppler-Effekt.....   | 16 |
| 4.1 Der relativistische Dopplereffekt.....                    | 16 |
| 5 LBV-Sterne .....  | 17 |
| 6 Theoretische Grundlagen zu Deneb ( $\alpha$ Cygni) .....    | 19 |
| 6.1 Allgemeines zu Deneb.....                                 | 19 |
| 6.2 P-Cygni-Profil .....                                      | 20 |
| 6.2.1 Entstehung .....  | 20 |
| 6.2.2 Auswertung.....   | 21 |
| 7 Technisches Equipment.....                                  | 22 |
| 7.1 Teleskop (CDK 20) .....                                   | 22 |
| 7.1.1 Technische Daten .....                                  | 24 |
| 7.2 Montierung.....   | 25 |
| 7.3 Die Aufnahmekamera für den BACHES .....                   | 26 |
| 7.4 Der BACHES Echelle Spektrograf.....                       | 27 |
| 7.4.1 Funktionsweise .....                                    | 28 |
| 7.4.2 Technische Daten .....                                  | 28 |
| 8 Der experimentelle Aufbau .....                             | 29 |
| 9 Aufgabenstellung.....                                       | 32 |
| 10 Aufnahme der Spektren .....                                | 32 |
| 10.1 Vorbereitungen.....                                      | 32 |
| 10.1.1 ClockSync .....  | 33 |
| 10.1.2 Keypad .....   | 33 |
| 10.1.3 SpecTrack.....   | 33 |
| 10.2 Anfahren des Zielsterns .....                            | 34 |
| 10.3 Aufnahme der Spektren .....                              | 35 |
| 11 Kalibrierung der Spektren von Deneb .....                  | 36 |
| 11.1 Vorbereitung der Spektren in <i>Maxim DL</i> .....       | 36 |

|   |    |
|---|----|
| 11.2 Kalibrierung mit MIDAS.....                              | 37 |
| 11.3 Normierung der Spektren.....                             | 41 |
| 12 Auswertung der Sternspektren .....                         | 43 |
| 12.1 Deneb Spektren im Zeitraum 22.06.2014 - 19.10.2017 ..... | 44 |
| 12.1.1 Datentabelle und Erläuterung.....                      | 45 |
| 12.2 Variationen im P-Cygni-Profil .....                      | 46 |
| 12.3 Vergleich mit anderen Langzeitbeobachtungen .....        | 47 |
| 13 Fehlerdiskussion .....                                     | 49 |
| 14 Danksagung .....   | 51 |
| 15 Abschlusserklärung.....                                    | 52 |

# 1 Einleitung

Nach der ersten Informationsveranstaltung zum Projektkurs Astronomie an unserer Schule, dem Carl-Fuhlrott-Gymnasium, waren wir uns im Klaren darüber, dass dieses Angebot die richtige Wahl für uns sei. Zuvor hatten wir bereits durch verschiedene astronomische Präsentationen einen Einblick in die Welt der Astronomie bekommen und unser Interesse wurde geweckt.

Das Weltall und die in ihm beherbergten Galaxien und Sterne faszinierten uns von Beginn an.

Die Gelegenheit eine astronomische Forschungsarbeit zu erstellen und mit professionellem Equipment arbeiten zu können, übertraf unsere Erwartungen gänzlich.

Uns war bewusst, welche Möglichkeiten Astronomen mit hochwertigen Observatorien heutzutage haben, doch als wir erfuhren, dass auch wir mit solchem Material würden arbeiten dürfen, ergriffen wir diese Chance und begannen mit der Arbeit am Corrected Dall-Kirkham 20 Teleskop (im Folgenden CDK 20).

## 1.1 Themenwahl

Nachdem wir uns einen thematischen Überblick der Astronomie verschafft hatten, beschlossen wir, unseren Fokus auf die Spektroskopie zu legen.

Der sogenannte „Fingerabdruck“ eines Sterns, welcher durch das Licht, das vom Stern abgestrahlt wird, entsteht, kann unheimlich viele Auskünfte über diesen geben. Dass mit einem solchen Spektrum sogar Geschwindigkeiten von Sternwinden gemessen werden können, führte uns letztendlich zu unserem Thema.

Hierbei waren die Besonderheiten der Sterne, dessen Winde wir zu messen begannen, ein weiterer wichtiger Faktor. Die Giganten der Galaxie, die blauen Überriesen, sind trotz ihrer großen Entfernung zur Erde noch gut mit dem bloßen Auge zu beobachten. Die enorme Energieabstrahlung macht diese Sterngruppe und besonders Deneb ( $\alpha$  Cygni) zum perfekten Objekt für unsere Projektarbeit.

# 2 Physikalische Grundlagen

## 2.1 Das Bohr'sche Atommodell

Die folgenden Informationen geben Grundlagen zum Verständnis der Projektarbeit wieder. Um unsere Forschungsarbeit nachvollziehen zu können, sollten diese bekannt sein.

Der Physiker Ernest Rutherford entwickelte im Jahre 1911 ein Atommodell, welches besagte, dass die negativ geladenen Elektronen im Atom um den positiv geladenen Atomkern kreisen. Was anhand dieses Modells nicht erklärt werden konnte, war die Energieerhaltung innerhalb des Atoms. Insofern die Elektronen um den Kern kreisten, so würden diese elektromagnetische Energie abstrahlen, wobei sie einen Energieverlust erleiden und in den Kern abstürzen würden. Da Atome allerdings eine Stabilität besitzen, weist dieses Modell große Lücken auf.

Aufgrund dieser Problematik revolutionierte der Physiker Niels Bohr im Jahre 1913 das Rutherford'sche Atommodell, durch das Einführen von Postulaten. Er stellte die Theorie auf, dass die Energie eines Elektrons im Atom nur diskrete Werte annehmen und nicht zwischen verschiedenen Werten schwanken kann. Die Elektronen kreisen auf bestimmten Bahnen, die jeweils für einen bestimmten Energiewert stehen und als diskret bezeichnet werden. Jede der Bohr'schen Bahnen entspricht einem ganzzahligen Vielfachen der de-Broglie-Wellenlänge. Dies ist anhand einer Umformung der Quantenbedingung sichtbar und führt dazu, dass jedes Teilchen eine bestimmte Wellenlänge besitzt.

$$2\pi r_n = n \cdot \lambda$$

$2\pi r \rightarrow$  Umfang der Elektronenbahn

$\lambda \rightarrow$  Lambda (Wellenlänge)

$n \rightarrow$  Hauptquantenzahl

Diese Umformung ergibt, dass der Umfang der n. Elektronenbahnen ( $2\pi r_n$ ) das n. Vielfache der Wellenlänge  $\lambda$  sein muss.

Elektronen versuchen immer, sich auf der niedrigstmöglichen Bahn aufzuhalten. Der Grundzustand bei  $n = 1$  beschreibt dieses Niveau, allerdings können sich dort nur zwei Elektronen aufhalten, weswegen sie sich von innen nach außen auf den weiteren Schalen anordnen. Auf diesen könne sich immer acht Elektronen gleichzeitig befinden.

Aufgrund dieser Annahme kommt es im Modell Bohrs zu einer stehenden Welle der Elektronen auf den Bahnen (siehe Abb. 1).

Das Bohr'sche Modell besagt allerdings, dass der Ort bzw. die Bahn eines jeden Elektrons beinahe genau bestimmbar sind, was wie inzwischen anhand der Heisenberg'schen Unschärferelation bewiesen, nicht möglich ist. Das Heisenberg'sche Konzept ist Teil der Quantenphysik und besagt, dass der Ort und Impuls eines beliebigen Körpers nicht genau zu bestimmen ist.

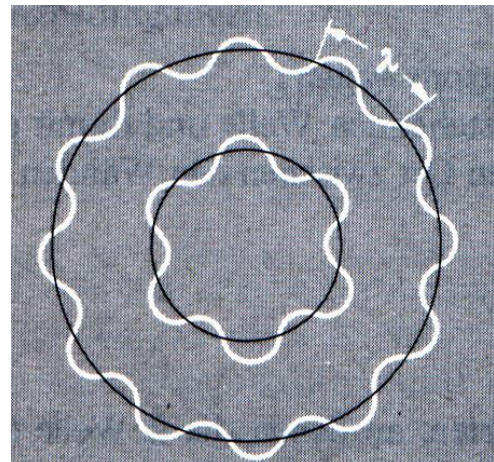


Abbildung 1- Darstellung einer Elektronenwelle nach Bohr

Heutzutage dominiert das Modell der Orbitale, nach dem sich die Elektronen in einem Raumbereich (Orbital) mit einer Aufenthaltswahrscheinlichkeit befinden. Dies befürwortet die Heisenberg'sche Unschärferelation.

Um jedoch die Theorie der Emission und des Energiezustandes eines Elektrons vereinfacht darzustellen, kann das Bohr'sche Atommodell genutzt werden, da es am folgenden Beispiel des Wasserstoffes, richtige Werte ergeben hat.<sup>123</sup>

## 2.2 Entstehung der Spektrallinien (Beispiel Wasserstoff)

Jeder Form von Strahlung liegt ein Energieverlust von Elektronen zugrunde, was somit auch auf Licht, also auf ein Photon zutrifft.

Da das Bohr'sche Atommodell bezüglich des Wasserstoffes zum Verständnis genutzt werden kann, kann man nun anhand des Wasserstoffes die Entstehung von Spektrallinien im Spektrum erklären. Besonders interessant ist hier die H-alpha Linie, da diese im Mittelpunkt unseres Projektes steht.

Es gibt drei verschiedene Wege, wie eine Spektrallinie entstehen kann. In jedem Fall wird überschüssige Energie des Elektrons nach außen in Form einer Lichtwelle bzw. eines Photons abgegeben.

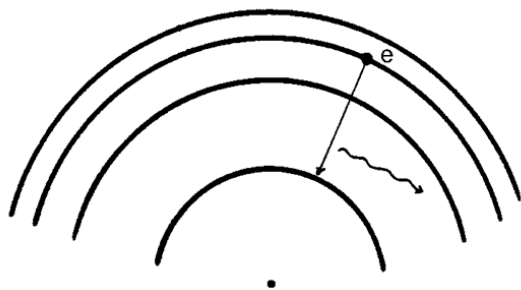


Abbildung 2 - „Elektronensprung und Relaxation“

Michael Winkhaus

Der erste der drei Wege wird durch Stoßimpulse oder anderweitige Strahlungsenergie hervorgerufen. Insofern diese auf das gebundene Elektron treffen, so wird dieses in den angeregten Zustand gehoben. Umfasst die hinzugefügte Energie genau die Menge, die benötigt wird um eine Elektronenbahn mit höherem Energieniveau zu erreichen, so „springt“ das Elektron dorthin.

Allerdings versucht das Elektron weiterhin auf dem niedrigstmöglichen Energieniveau zu verweilen, weswegen es nach kurzer Zeit wieder „herunterfällt“. Diesen Vorgang bezeichnet man als Relaxation, wobei das Elektron relaxiert.

Dabei wird Energie in Form von Lichtwellen emittiert, die der Energiedifferenz der beiden Niveaus entspricht. Es entsteht ein Photon. Je höher die Differenz, desto höher ist die Energie des erzeugten Photons.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> <https://www.leifiphysik.de/atomphysik/klassische-atommodelle> Zugriff: 03.01.18

<sup>2</sup> <https://www.weltdrphysik.de/gebiet/atome/atome-und-quantenphysik/das-bohrsche-atommodell-in-der-heutigen-physik/> Zugriff: 03.01.18

<sup>3</sup> Unterlagen Winkhaus „Theorie zur (Stern-)Spektroskopie“

<sup>4</sup> Unterlagen Winkhaus „Tageskurs Spektroskopie“

$$\Delta E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta E}$$

Diese kann als  $\Delta E = E_n - E_m$  ( $E = h \cdot f \rightarrow$  Planck'sches Wirkungsquantum) beschrieben werden, wobei  $E_n$  die Energie des höheren Niveaus und  $E_m$  die des niedrigeren Niveaus bezeichnet. Die Wellenlänge  $\lambda$  des abgestrahlten Lichts ist antiproportional zur Energiedifferenz, was bei hoher Differenz zu einer kurzwelligen (blauverschoben) und bei niedrigerer Differenz zu einer langwelligen (rotverschoben) Wellenlänge führt.

Nicht immer relaxiert das Elektron in einem Schritt. Es kann auch in mehreren Schritten zurück in seinen Ursprungszustand „fallen“. In diesem Fall entstehen niedrigere Differenzen, was zu mehreren kurzwelligen emittierten Lichtwellen führt.

Der zweite Weg beschreibt ein zunächst freies, energiereiches Elektron, das mit einem positiv geladenen Ion eine Bindung eingeht. Für den entstehenden Atomverband hat das Elektron (gebunden) überschüssige Energie, die wie bei der ersten Variante in Form eines erzeugten Photons abgestrahlt wird. Hinzufügen sollte man an dieser Stelle noch, dass die Wellenlänge allein von der Energie des Photons abhängt.

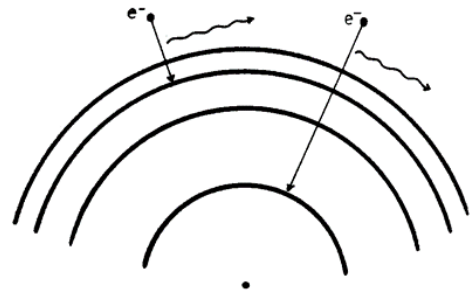


Abbildung 3 - Energiedifferenzen der Emission aufgrund verschiedener „Elektronensprünge“

Michael Winkhaus

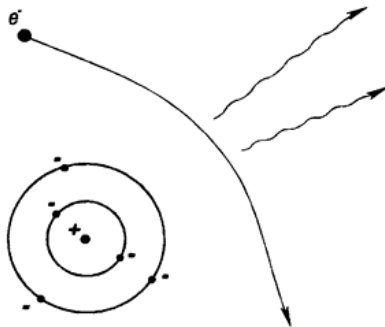


Abbildung 4 – Photonenemission durch Energiedifferenzen eines Elektrons

Michael Winkhaus

Bei der dritten Variante, wird die Energie aufgrund einer Differenz in der Bewegungsenergie abgestrahlt. Fliegt ein freies Elektron an einem positiv geladenen Ion vorbei und bindet sich nicht, aber verändert seine Bahn, so entsteht eben diese Differenz. Das Elektron strahlt die Energie durch eine Lichtemission ab, dessen Wellenlänge auch hier von der Energie des Elektrons abhängig ist. <sup>5</sup>

<sup>5</sup> Unterlagen Winkhaus „Tageskurs Spektroskopie“

## 2.3 Spektralserien des Wasserstoffatoms

Als Spektralserien werden jene Spektrallinien eines Atoms beschrieben, die einen gemeinsamen Grundzustand vorweisen. Dies bindet die Elektronen ein, welche nach Anregung mit unterschiedlicher Anregungsenergie in den gleichen gemeinsamen Grundzustand relaxieren.

Die Energieniveaus oder auch Schalen, von denen aus das Elektron in seinen Grundzustand zurückfällt, werden der Reihe nach mit griechischen Buchstaben betitelt (1.  $\alpha$ , 2.  $\beta$ , etc.).

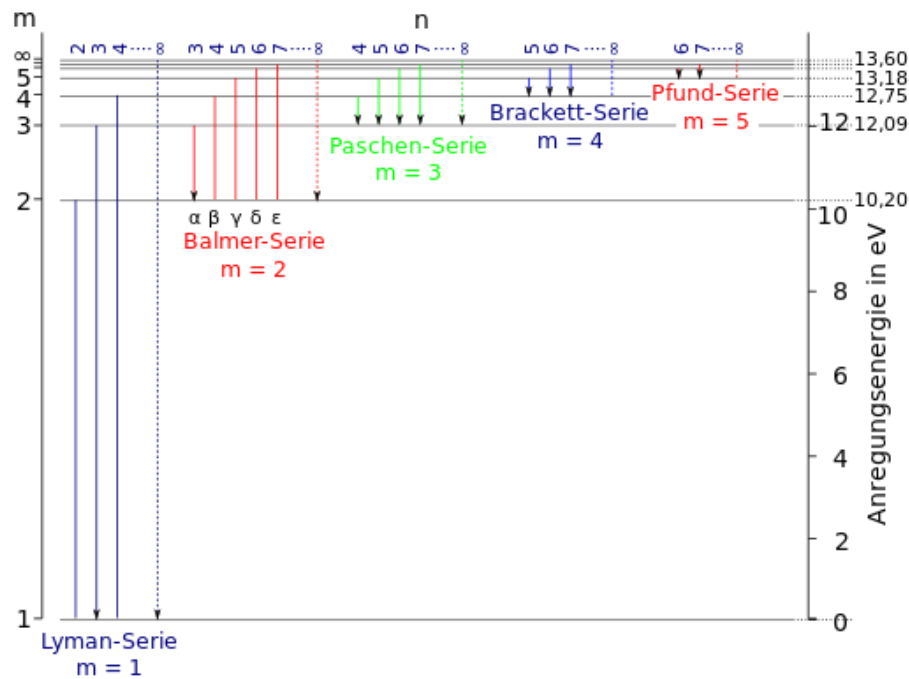


Abbildung 5 – die Spektralserien des Wasserstoffatoms

<https://de.wikipedia.org/wiki/Balmer-Serie#/media/File:Wasserstoff-Termschema.svg>

Zugriff: 03.01.18

Die Balmer-Serie, welche aufgrund ihrer für uns am besten sichtbaren Emissionslinien die wichtigste Rolle innehat, beschreibt die Relaxation des Elektrons von der n. auf die zweite Schale. Die Relaxation von der n. auf die erste Schale gehört zur Lyman-Serie, auf die dritte Schale zur Paschen-Serie, auf die vierte Schale zur Brackett-Serie und auf die fünfte Schale zur Pfund-Serie (siehe Abb. 5). Im Bereich der Balmer-Serie liegt zudem die bekannte H-alpha Linie, welche sich bei ca. 656,282 nm befindet (siehe Abb. 6).<sup>6</sup>

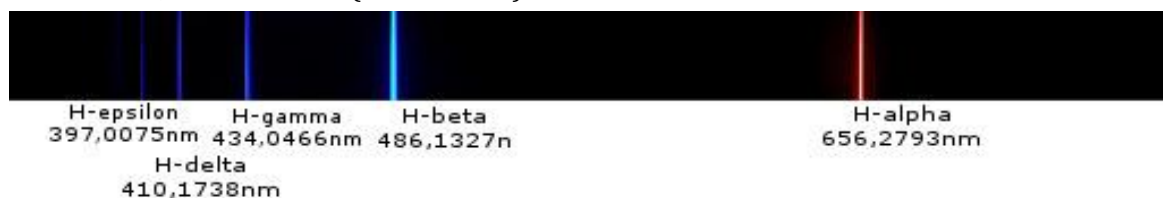


Abbildung 6 - Balmer Serie des Wasserstoffs (bearbeitet: H-zeta nicht beschrieben und nur schwach sichtbar)

[https://de.wikipedia.org/wiki/Balmer-Serie#/media/File:Visible\\_spectrum\\_of\\_hydrogen.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Balmer-Serie#/media/File:Visible_spectrum_of_hydrogen.jpg) Zugriff: 03.01.18

<sup>6</sup> Unterlagen Winkhaus „Tageskurs Spektroskopie“



## 2.4 Berechnung des Energieniveaus im Wasserstoffatom

Einführung in die Quantenphysik:

Nach Albert Einstein gilt:  $E = h * f$

Nach der Wellentheorie gilt:  $f = \frac{c}{\lambda}$

Übertragung der Quantenmechanik auf das Wasserstoffatom nach Bohr:

Nach de-Broglie wird der Quantenphysikalische Ansatz auf Elektronen übertragen

$$E_{e^-} = h * f$$

Impuls:

$$p = m * c \text{ und } E = mc^2 = h * f (\Rightarrow m = \frac{h*f}{c^2}) \text{ sowie } f = \frac{c}{\lambda}$$

$$\text{Ergibt } p = \frac{h}{c^2} * \frac{c}{\lambda} * c = \frac{h}{\lambda}$$

$$\text{Dies Übertragen auf die Elektronen } p_{e^-} = \frac{h}{\lambda}$$

### **Die erlaubten diskreten Bahnen der Elektronen im Wasserstoffatom:**

$$\text{Coulombkraft im Vakuum: } \frac{1}{4\pi\epsilon_0} * \frac{e^2}{r^2}$$

$\epsilon_0$ : Elektrische Feldkonstante

Die Coulombkraft beschreibt die Anziehungskraft zwischen zwei Punktladungen.

Als Ansatz setzt man die Coulombkraft gleich der Zentralkraft

$$F_c = F_z$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} * \frac{e^2}{r^2} = m\omega^2 r = \frac{m * v^2}{r}$$

$$\Leftrightarrow e^2 = 4\pi\epsilon_0 m * v^2 * r \quad (Gl. 1)$$

Die Elektronenwelle in Atomen nach de-Broglis Modell:

$$2\pi r = n * \lambda \quad (Gl. 2)$$

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad \text{Wobei } p = m * v$$

$$\Rightarrow m * v = \frac{h}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{h}{m*v} \quad \text{diese Formel wird nun in Gl. 2 eingesetzt}$$

$$2\pi r = n \frac{h}{m*v} \Leftrightarrow v = \frac{n*h}{2\pi*r*m} \quad (Gl. 3)$$

Nun wird Gl. 3 in Gl. 1 eingesetzt:

$$e^2 = 4\pi\epsilon_0 * r * m * \left( \frac{n*h}{2\pi*r*m} \right)^2 = \frac{\epsilon_0*n^2*h^2}{\pi*r*m}$$

$$\Leftrightarrow r_n = \frac{\epsilon_0*h^2}{\pi e^2*m} * n^2$$

Es werden folgende Zahlenwerte eingesetzt:

$$\epsilon_0 = 8,854 * 10^{-12} \frac{C^2}{m^2 N}$$

$$h = 6,626 * 10^{-34} Js$$

$$e = 1,6021 * 10^{-19} C$$

$$m_e = 9,109 * 10^{-31} kg$$

$$\Rightarrow r_n = 5,3 * 10^{-11} m * n^2$$

An dieser Stelle ist festzustellen, dass beinahe der genaue Ort und Impuls des Elektrons bestimmbar ist, was wie bereits angesprochen dem Heisenberg'schen Konzept widerspricht. Aufgrund dieser Annahme ist somit belegt, dass das Modell nicht realistisch ist.

## Die Energiezustände im H-Atom:

Die Gesamtenergie des Elektrons, setzt sich aus der potentiellen Energie, die es durch die Bahn hat und der kinetischen Energie, die es durch die Rotationsgeschwindigkeit hat zusammen.

$$Gesamtenergie = W_{pot} + W_{kin}$$

$$W_{pot} = \int_r^{\infty} F dr \quad (Kraft * Weg)$$

- Arbeit, die aufgebracht werden muss, um das Elektron aus dem Einflussbereich des Kerns zu entfernen

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} * \frac{Q * q}{r^2} = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_0} * \frac{1}{r^2} \\ &= - \int_r^{\infty} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} * \frac{1}{r^2} \\ &= - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} * \frac{1}{r} \end{aligned}$$

Dem Elektron muss also Energie zugeführt werden

$$W_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{Einschub: Gl.1: } e^2 = 4\pi\epsilon_0 m * v^2 * r \Leftrightarrow v^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 * m * r}$$

$$\frac{1}{2}m * \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 * m * r} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0} * \frac{1}{r}$$

$$W_{Gesamt} = E = - \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0} * \frac{1}{r}$$

Für r wird nun das eben berechnete  $r_n$  eingesetzt:

$$E_n = \frac{-e^4 * m}{8\epsilon_0^2 h^2} * \frac{1}{n^2}$$

Auch hier werden wieder Zahlenwerte eingesetzt:

$$\begin{aligned} E_n &= -2,18 * 10^{-18} J * \frac{1}{n^2} \\ &= -13,6 eV * \frac{1}{n^2} \end{aligned}$$

### **Berechnung der Bahnenergien:**

$$E = E_m - E_n = \frac{e^4 * m}{8 \varepsilon_0^2 * h^2} * \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = h * f$$

Hier ist das m nicht die Masse, sondern die Nummer der Schale von der das Elektron in den Grundzustand (hier: n) relaxiert.

$$\Rightarrow f = \frac{e^4 * m}{8 \varepsilon_0^2 * h^3} * \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) = Ry * \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

$$Ry = \text{Rydberg-Konstante} = 3,29 * 10^{15} \text{ Hz}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{c}{Ry * \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)}$$

Für n = 1 und m = 2, 3, 4, : Lyman-Serie (UV)

Für n = 2 und m = 3, 4, 5, : Balmer-Serie (Rot bis UV)

Für n = 3 und m = 4, 5, 6, : Paschen-Serie (IR)

Für n = 4 und m = 5, 6, ... : Brackett-Serie (IR)

Für n = 5 und m = 7, 8, ... : Pfund-Serie (IR)

# 3 Klassifikation von Sternen

## 3.1 Spektralklassifikation

Die Spektralklassifikation ist in Bezug auf ihre physikalische Nützlichkeit eine der wichtigsten Klassifizierungsgrößen von Sternen, da sie sich mit der Oberflächentemperatur des Sterns befasst. Die berühmteste Klassifikation in diesem Bereich ist die sogenannte Harvard-Klassifikation. Diese teilt die Sterne anhand ihrer Spektrallinien, welche von der Lichtintensität und somit laut dem Planck'schen Strahlungsgesetz auch ihrer Helligkeitsverteilung abhängt, in mehrere Spektralklassen ein.

Den Spektraltypen werden die Buchstaben O-B-A-F-G-K-M zugeordnet, wobei O-A als frühe, F-G als mittlere und K-M als späte Spektralklassen bezeichnet werden. Diese Einordnung bezieht sich auf das Alter der Sterne und der damit verbundenen Oberflächentemperatur. Die heißesten Sterne mit der Bezeichnung O-A besitzen eine Oberflächentemperatur von 7500K bis zu 50000K, die Spektralklassen F-G im Bereich eine Temperatur zwischen 5000K und 7500K und die Oberflächentemperatur der kühleren Spektraltypen K-M befindet sich zwischen 3000K und 5000K.

Eigenschaften der Spektralklassen:

- O Intensives, kontinuierliches Spektrum, Absorptionslinien des ionisierten Heliums (He II)
- B Starke Balmer-Serie, Linien des neutralen Heliums
- A Balmer-Serie im Maximum, Linien des ionisierten Kalziums (Ca II)
- F Starke Balmer-Serie, stark ausgeprägte Kalziumlinien (Ca II), Metalllinien (Fe I)
- G Starke Kalziumlinien (Ca II, Ca I), sehr schwache Balmer-Serie, intensive Eisenlinien (Fe I)
- K Intensive Eisenlinien und andere Metalllinien (Ca II), zahlreiche Molekülbanden
- M Viele Linien neutraler Metalle, starke Titanoxid-Banden (TiO), Kalziumlinien (Ca I) <sup>7</sup>

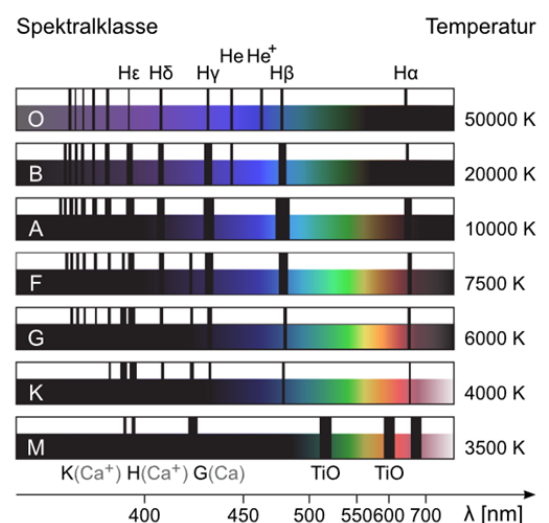


Abbildung 7 - Spektralklassen als Spektren dargestellt

<https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7004> Zugriff: 18.01.18

<sup>7</sup> Tageskurs Spektroskopie, Michael Winkhaus „Theorie zur (Stern-)Spektroskopie“, „Kriterien und Grobklassifikation“, „Harvard Klassifikation von Sternspektren“, „Aussehen und Analyse der Sternspektren“

## 3.2 Leuchtkraftklassen

Anhand der Spektren kann ebenso eine Aussage über die Leuchtkraft eines Sterns getroffen werden. Das Morgan-Keenan-System (M-K-System) definiert acht Leuchtkraftklassen bzw. Entwicklungsstadien, die römisch nummeriert werden.

Leuchtkraftklasse O – Hyperriesen

Leuchtkraftklasse I – Überriesen

*(Leuchtkraftklassen Ia-0, Ia, Iab, Ib - Unterteilung der Überriesen nach abnehmender Leuchtkraft)*

Leuchtkraftklasse II – Helle Riesen

Leuchtkraftklasse III – „normale“ Riesen

Leuchtkraftklasse IV – Unterriesen

Leuchtkraftklasse V – Zwerge (Hauptreihensterne)

Leuchtkraftklasse VI – Unterzwerge

Leuchtkraftklasse VII – Weiße Zwerge <sup>89</sup>

## 3.3 Hertzsprung-Russell-Diagramm

Jegliche dieser Sterne sind im Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) eingeordnet.

Auf dessen X-Achse befinden sich die jeweiligen Oberflächentemperaturen der Sterne und deren zugehörige Harvard-Klassifikation mit abnehmender Temperatur von links nach rechts. Die auf der Y-Achse aufgetragenen Leuchtkraftklassen werden in Sonnenleuchtkraft angegeben. Hierbei sind die Leuchtkraftklassen 0-VII beginnend mit Klasse 0 von oben nach unten angeordnet.

Für jeden Entwicklungszustand ist im Diagramm ein bestimmter Bereich definiert, der sich an Typ und Alter des Sterns orientiert. Zwar können einige Sternklassen wesentlich größere Bereiche abdecken, sind hier jedoch nur in bestimmten Bereichen dargestellt. Dies hilft bei der Veranschaulichung der Sternentwicklung. Jeder Stern durchläuft in seinem Leben auf individuelle Weise die verschiedenen Zustände, die im Diagramm aufgetragen sind.

Mit Hilfe des Diagramms und der dort in Relation gesetzten Klassifizierungen können ungefähre Aussagen über Alter, Oberflächentemperatur, Größe, Phase des Sterns und weitere Eigenschaften getroffen werden. <sup>10</sup>

Wie in Abbildung 8 sichtbar, befindet sich Deneb ( $\alpha$  Cygni) im oberen, mittleren Bereich des Hertzsprung-Russell-Diagramms (roter Pfeil). Er gehört zu den blauen Überriesen (Leuchtkraftklasse I) und ist ein Spektralklassentyp A2.

---

<sup>8</sup> <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7004> Zugriff: 18.01.18

<sup>9</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Klassifizierung\\_der\\_Sterne#Spektraltypen\\_durch\\_Spektren](https://de.wikipedia.org/wiki/Klassifizierung_der_Sterne#Spektraltypen_durch_Spektren) Zugriff: 18.01.18

<sup>10</sup> Material Michael Winkhaus, „Leuchtkraft-Klassifikation und HRD“

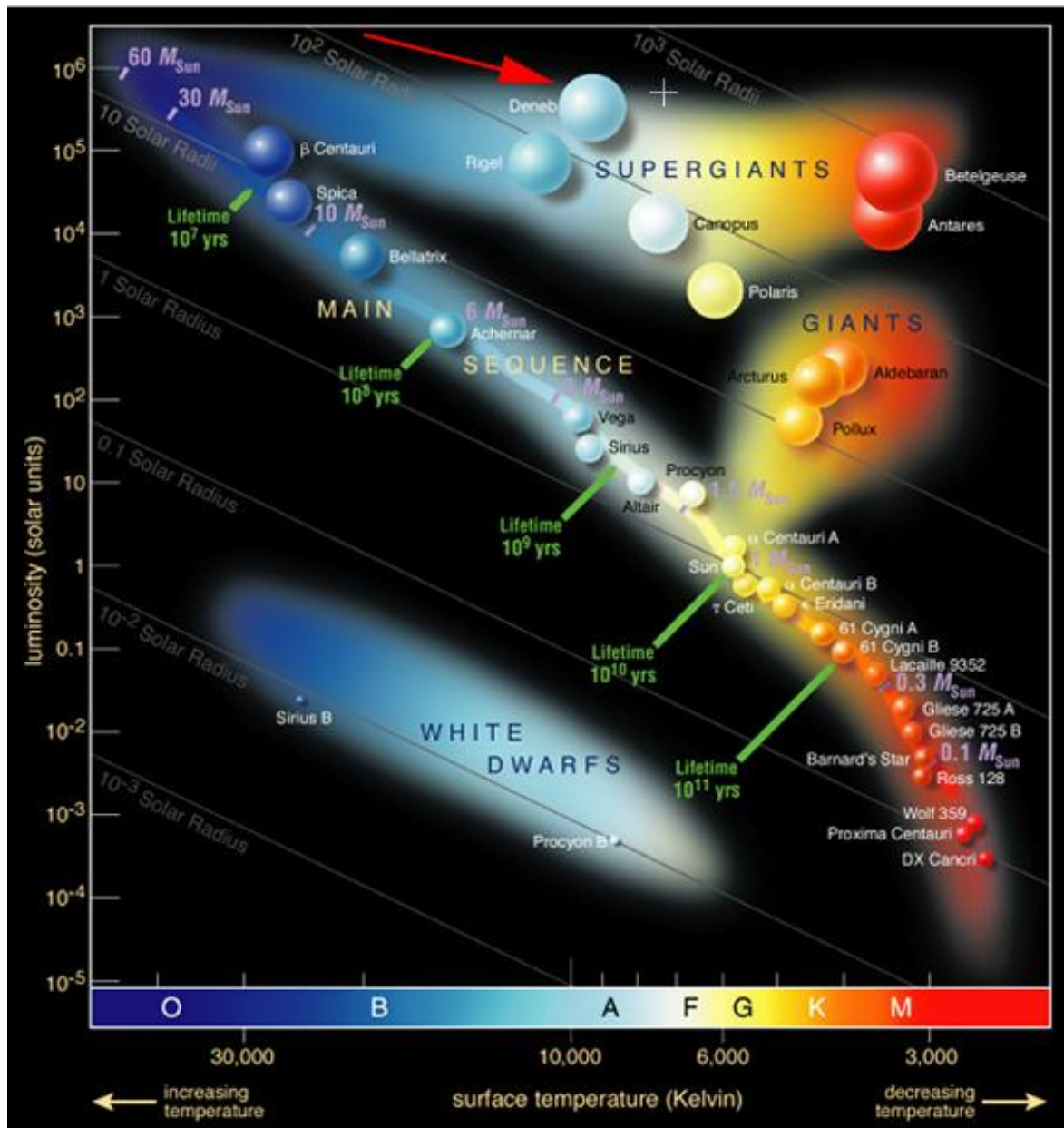


Abbildung 8 - Hertzsprung-Russell-Diagramm

[https://en.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung-Russell\\_diagram#/media/File:Hertzsprung-Russel\\_StarData.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung-Russell_diagram#/media/File:Hertzsprung-Russel_StarData.png)

Zugriff: 18.01.18

# 4 Doppler-Effekt

## 4.1 Der relativistische Dopplereffekt

Der Doppler-Effekt lässt sich in mehrere Arten unterteilen. Zum einen gibt es den akustischen, zum anderen der optischen bzw. relativistischen Doppler-Effekt. Letzterer ist für unsere Arbeit von Bedeutung, weshalb der akustische Dopplereffekt außer Acht gelassen werden kann.

Dieser befasst sich mit dem Sender-Empfänger Prinzip bei einer Lichtwelle. Sofern sich beide nicht bewegen, bleibt die Wellenlänge des Lichts von Sender zu Empfänger genau gleich. Bewegen sie sich aber nun voneinander weg, wird die Frequenz der Welle kleiner und die Wellenlänge größer. Das verursacht eine Rotverschiebung im Spektrum. Bei Annäherung der Lichtquelle und des Empfängers, entsteht wiederum eine Blauverschiebung.

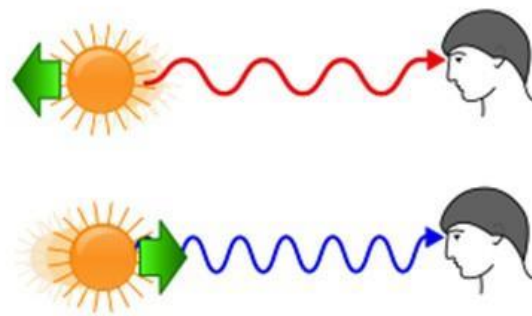


Abbildung 9 - grafische Darstellung des optischen Dopplereffektes

Material Michael Winkhaus „Akustischer und optischer

Die obige Abbildung veranschaulicht den optischen Effekt bei Annäherung oder Entfernung von der Lichtquelle. Sichtbar ist die Streckung und Stauchung der Lichtwellen bei Entfernung (Rotverschiebung) oder Annäherung (Blauverschiebung) des Senders.

Berechnen lassen sich diese mit folgenden Formeln:

$$\text{Rotverschiebung: } f_E = f_s * \sqrt{\frac{1-v/c}{1+v/c}}$$

$$\text{Blauverschiebung: } f_E = f_s * \sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}}$$

$$\text{Relativgeschwindigkeit: } v = \pm \frac{\Delta\lambda}{\lambda_s} * c$$

$f_E$  Bezeichnet hier die bereits verschobene vom Empfänger gemessene Frequenz und  $f_s$  die von der Quelle abgestrahlte unverschobene Frequenz.  $c$  steht bekanntermaßen für die Lichtgeschwindigkeit, wobei  $v$  die Relativgeschwindigkeit ist, mit der sich die Quelle an den Beobachter annähert oder wegbewegt.  $\Delta\lambda$  bezeichnet die Differenz zwischen der unverschobenen sogenannten Ruhewellenlänge  $\lambda_s$  und der gemessenen Wellenlänge.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> Materialien Michael Winkhaus „Akustischer und optischer Dopplereffekt



## 5 LBV-Sterne

Leuchtkräftige-Blaue-Veränderliche Sterne gehören aufgrund ihrer ausgeprägten, veränderlichen Leuchtkraft zur Leuchtkraftklasse der Hyperriesen und mit einer Oberflächentemperatur von ca. 30000K bis 50000K zur Spektralklasse O. Sie besitzen eine Masse, die 50 bis 150 Sonnenmassen entspricht und befinden sich nur ungefähr 25000 Jahre in der LBV-Phase, da der Kernbrennstoff zu schnell fusioniert wird, um länger in diesem Stadium zu verweilen. In diesem Sternstadium verkörpern sie durch ihre millionenfach größere Leuchtkraft als die Sonne die hellsten Sterne des Universums. Bis jetzt sind wenige LBV-Sterne bekannt (davon nur sechs in der Milchstraße), da sie die am seltensten vorkommende Klasse von Sternen sind. Die bekanntesten Sterne dieser Art, die in unserer Milchstraße beherbergt sind, heißen Eta Carinae und P Cygni.

Diese Sterne sind von einer Gaswolke umgeben, welche durch stark strahlungsdruckgetriebene Sternwinde erzeugt wird. Die Sternwinde besitzen eine Geschwindigkeit von 100 bis 500 km/s und entstehen aufgrund des instabilen, stationären Gleichgewichtszustands. Für gewöhnlich existiert bei Sternen ein hydrostatisches Gleichgewicht, bei dem der Druck, der vom Inneren des Sterns ausgeht, durch die Anziehungskraft der Materie ausgeglichen wird. Bei LBV-Sternen allerdings baut sich über einen längeren Zeitraum von innen ein immer größer werdender Druck auf, der letztlich durch Ausstoß von großen Teilen der Sternhülle entladen wird.

Dieser Reaktionsmechanismus nennt sich Kappa-Mechanismus. Dichteschwankungen des Gases in der Sternatmosphäre hindern das Gas um den Stern nach außen zu gelangen, weshalb die Gravitation es zurück nach Innen zieht. Aufgrund der darauffolgenden Verdichtung der Atmosphäre wird die im Stern freigesetzte Strahlung aufgestaut, da sie nicht durch das Gas hindurch kommen kann. Der erzeugte Strahlungsdruck sorgt für die Ausdehnung und Auskühlung des Gases in der Atmosphäre, die wiederum als Eruption wahrgenommen wird.

Was die Störungen des hydrostatischen Gleichgewichts hervorruft, ist nicht genau erforscht, jedoch lässt sich in der Theorie sagen, dass äußere Einflüsse bezogen auf Rotation und das Magnetfeld des LBVs die Grundlage hierfür darstellen.

Die Eruptionen führen zu unregelmäßigem Pulsieren des Sterns und erzeugen die starken Winde, die minimale Temperaturänderungen herbeiführen können. Die niedrigste Temperatur, die der Stern bei einem solchen Ausbruch erreichen kann, liegt bei 8 000K. Die Sternwinde führen zu einem erheblichen Massenverlust von  $10^6$ – $10^3$  Sonnenmassen pro Jahr. Der starke Massenverlust verhindert zusätzlich die Entwicklung zum roten Riesen.

Das wahrgenommene Pulsieren des Sterns kann allerdings auch durch Dichteschwankungen in der Sternatmosphäre hervorgerufen werden. Insofern diese sich verdichtet, kann die Strahlung nicht entweichen und wird stattdessen absorbiert, wobei beachtet werden muss, dass die Sternhülle und ihre Winde mit immer größer werdender Entfernung abkühlen. Folglich wird die Strahlung mit größerer Wellenlänge emittiert, was die Helligkeitsveränderung veranlasst.

Die Pulsationen sind in geringem Maße bereits im Zeitraum von Tagen bis zu Monaten sichtbar. Nach Jahren bis hin zu Jahrzehnten können Helligkeitsvariationen von 1 bis 2 Größenklassen auftreten. Diese umfassen allerdings erst nach mindestens einem Jahrhundert mehr als 2 Größenklassen.

Die weitere Entwicklung der Sterne hängt von der Restmasse zum Endzeitpunktes des Stadiums ab. Statt einer Verwandlung zum roten Riesen, entsteht entweder ein Wolf-Rayet-Stern, der wiederum in einer Supernova endet, oder es folgt direkt die Explosion des Sterns. Ein Stern im Wolf-Rayet-Stadium besteht nur noch aus seinem freigelegten Kern und hat weiterhin eine Masse von 10 bis 265 Sonnenmassen.

Im weiteren Verlauf des Sternlebens, dem sogenannten Tod des Sterns, ist aufgrund der wenigen Vertreter der LBV-Sterne nicht gänzlich festzulegen, ob sich eine Kernkollaps-Supernova, eine Paarinstabilitätssupernova oder eine Hypernova entwickelt. Diese unterscheiden sich im Hinblick auf ihren Ablauf, ihre Explosionskraft und Helligkeitsabstrahlung. Die Hypernova kann als eine der hellsten Supernovae bezeichnet werden.<sup>12131415</sup>



Abbildung 10 – Fotografie von Deneb

© Copyright 2011 F. Espenak, <http://www.astropixels.com/> Zugriff: 23.05.2018

---

<sup>12</sup> <http://www.abenteuer-universum.de/sterne/riese.html> Zugriff: 30.01.18

<sup>13</sup> [http://www.ita.uni-heidelberg.de/publications/theses/weis99\\_abs\\_g.html](http://www.ita.uni-heidelberg.de/publications/theses/weis99_abs_g.html) Zugriff: 23.05.2018

<sup>14</sup> <https://www.br.de/mediathek/video/alpha-centauri-was-ist-ein-wolf-rayet-stern-av:584f8f563b46790011a457b4> Zugriff: 23.05.2018

<sup>15</sup> [http://www.andromedagalaxie.de/html/sterne\\_veraenderliche\\_eruptive.htm](http://www.andromedagalaxie.de/html/sterne_veraenderliche_eruptive.htm) Zugriff: 23.05.2018

# 6 Theoretische Grundlagen zu Deneb ( $\alpha$ Cygni)

## 6.1 Allgemeines zu Deneb

Deneb ist als blauer Überriese der hellste Stern ( $\alpha$  Cygni) im Sternbild Schwan. Er befindet sich ca. 1600-3200 Lichtjahre entfernt von der Erde und bildet zusammen mit den Sternen Wega und Altair das Sommerdreieck. Allerdings ist der Abstand zur Erde nicht genau festzulegen, da die Entfernung sehr groß ist und die Messungen durch seine starken Sternwinde verkompliziert werden.

Deneb ist ein Stern der Leuchtkraftklasse Ia, Spektralklasse A2 und somit etwa  $8400\text{K} \pm 75\text{K}$  heiß. Seine scheinbare Helligkeit beträgt 1,25 mag (1. Größenklasse) und seine absolute Helligkeit  $-8,49 \text{ mag} \pm 0,18 \text{ mag}$ , wobei die Helligkeitswerte ungefähr zwischen dem 170- bis 200000-fachen der Sonnenhelligkeit liegen. Dadurch ist er der 19.-hellste Stern an unserem Nachthimmel und der mächtigste bekannte A-Stern. Zudem ist er der entfernteste Stern seiner Größenklasse und strahlt ein weiß-bläuliches Licht ab.

Die Rektaszension ist  $20^{\text{h}} 41^{\text{m}} 25,91514^{\text{s}}$  und die Deklination  $+45^{\circ} 16' 49,2197''$ . Außerdem beträgt seine Radialgeschwindigkeit  $-4,5 \text{ km/s}$ .

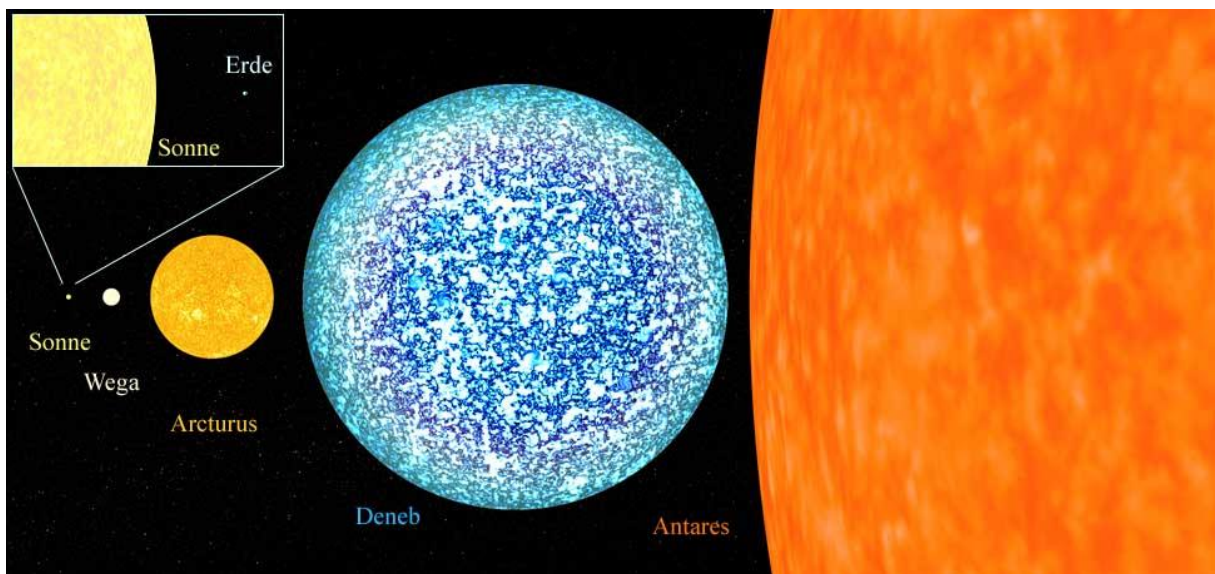


Abbildung 11 – Deneb im Vergleich

<http://www.nikomi.net/deutsch/astronomie/starsizes-d.htm> Zugriff: 19.11.17

Sein Radius umfasst ungefähr das 200- bis 220-fache der Sonne, während seine Masse schätzungsweise dem 18- bis 25-fachen der Sonnenmasse entspricht. Abbildung 11 zeigt den Stern Deneb im Vergleich zur Sonne (links) und zu Wega, welcher zwar von der Erde aus gesehen wesentlich heller strahlt, sich allerdings auch näher an unserer Erde befindet (ca. 25 Lichtjahre Entfernung). Anhand dieser Grafik lässt sich zeigen, dass er, würde er sich innerhalb unseres Sonnensystems befinden, darüber hinausragen würde.



Wie bereits erwähnt ist Deneb ein Blauer Überriese. Sein Zwergstadium, welches die Phase des Wasserstoffverbrennens beschreibt, beendete er als Stern der Spektralklasse B vor etwa 40000 Jahren. Er gehört zu den Leuchtkräftigen Blauen Veränderlichen (LBV) oder auch Alpha-Cygni-Veränderlichen Sternen, dessen Namensgeber er ist. In unserer Galaxie ist er einer der hellsten und am besten erforschten LBV-Sterne.

Anhand dieser Information ist davon auszugehen, dass er sich bereits in ein paar Millionen Jahren zum Wolf-Rayet-Stern oder einer Supernova entwickelt.<sup>161718</sup>

## 6.2 P-Cygni-Profil

### 6.2.1 Entstehung

Typisch für einen LBV-Stern wie Deneb ist das P-Cygni-Profil seiner Spektrallinien, welches wir bei der H-alpha-Linie zeitabhängig untersucht haben. Es handelt sich hierbei, um ein Profil, das aus der Existenz des Sternwindes resultiert.

Das P-Cygni-Profil setzt sich aus einem verbreiterten, unverschobenen Emissionsanteil und einem blauverschobenen Absorptionsanteil zusammen.

Das Sender-Empfänger-Prinzip des relativistischen Dopplereffekts kommt hier erneut auf. Derjenige Teil des Sternwindes, welcher sich im Moment des Beobachtens auf den Empfänger hinbewegt, erzeugt die Blauverschiebung. Jener Teil, der sich wegbewegt, erwirkt eine Rotverschiebung. Präzisieren lässt sich dies anhand der Abbildung 12. Der „schwarze“ Bereich des Sternwindes, der sich auf den Betrachter hinbewegt, erzeugt eine blauverschobene Absorption. An dieser Stelle wird das Licht durch die umliegende Hülle absorbiert, daraufhin remittiert und der blauverschobene Bereich entsteht. Da der Sternwind von innen nach außen eine wachsende Geschwindigkeit besitzt, bewegt sich der „weiße“ Bereich am schnellsten auf den Betrachter zu ( $v_m$ ). Der mittlere Teil dieses Bereiches weist allerdings keine Geschwindigkeit auf, da er sich in einem Winkel von  $90^\circ$  zum Betrachter befindet. Der hintere Teil des „weißen“ Bereiches liegt im dem Betrachter abgewandten Bereich und veranlasst die gegenteilige Wirkung im Spektrum, nämlich einen „Übergang“ zur Rotverschiebung und Emission. Dieser Teil entfernt sich dementsprechend am schnellsten vom Betrachter ( $-v_m$ ). Der „graue“ Bereich gehört zum abgewandten und sich wegbewegenden Bereich des Sternwindes, wobei dieser eine Emission veranlasst ebenso wie die zugehörige Rotverschiebung.

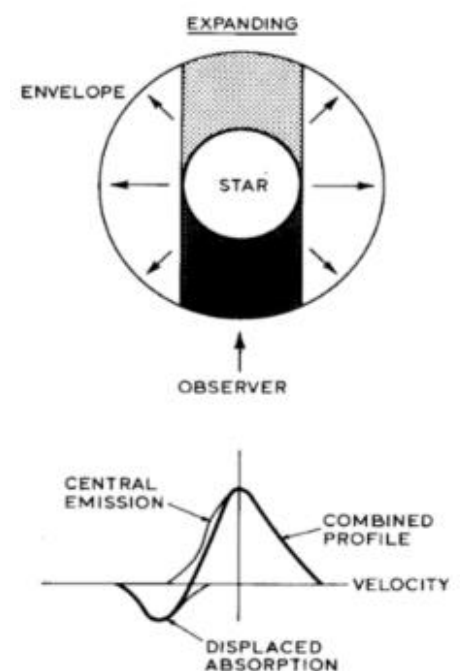


Abbildung 12 – Veranschaulichung der Profilbildung

Spektrum, Nr. 50, 1/2016; ISSN 2363-5894, © Fachgruppe Spektroskopie in der VdS e.V.

<sup>16</sup> <https://www.fh-muenster.de/ciw/downloads/personal/juestel/juestel/Deneb.pdf> Zugriff: 09.11.17

<sup>17</sup> <http://simbad.harvard.edu/simbad/sim-ref?querymethod=bib&simbo=on&submit=submit+bibcode&bibcode=2002yCat.2237....0D> Zugriff: 23.05.18

<sup>18</sup> Quantitative spectroscopy of Deneb F. Schiller and N. Przybilla, A&A 479, 849–858 (2008), DOI:10.1051/0004-6361:20078590, ©ESO 2008

Die kleinere Frequenz erzeugt eine höhere Wellenlänge. Da sich dieser Bereich allerdings auf der abgewandten Seite befindet, ist die Geschwindigkeit negativ:

:  $-V_{\infty}$ . Folglich ist die Geschwindigkeit auf den Bereich  $\pm V_m$  festgelegt.<sup>19</sup>

## 6.2.2 Auswertung

Um nun die Endgeschwindigkeit des Sternwindes berechnen zu können, benötigt man die Dopplerformel für die Relativgeschwindigkeit.

Relativ-/Endgeschwindigkeit:  $v = \pm \frac{\Delta\lambda}{\lambda_s} * c$

An dieser Stelle reicht es aus, die Differenz zwischen der Wellenlänge des minimalen Absorptionswertes und der Wellenlänge des maximalen Emissionswertes zu bilden. Diese Differenz beschreibt  $\Delta\lambda$  (Differenz der roten Linien, siehe Abb. 13). Im nächsten Schritt wird diese durch die Ruhewellenlänge  $\lambda_s$  von  $H\alpha = 6562,852\text{\AA}$  dividiert und daraufhin mit dem Wert der Lichtgeschwindigkeit  $c$  multipliziert. Der errechnete Wert (in km/s) beschreibt nun die Endgeschwindigkeit des Sternwindes.

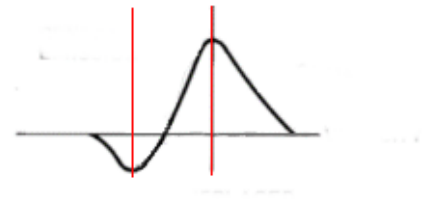


Abbildung 13 – Darstellung des Intervalls  $\Delta\lambda$ , (Bild durch Autoren bearbeitet)

Dieses Verfahren ermöglicht allerdings nur eine grobe Näherung der Originalwerte. Der Peak Versatz (Peak-Peak-Differenz) des Emissions- und Absorptionsteils des Spektrums wird nur relativ als Differenz abgelesen und kann deswegen nicht als genauer Wert bezeichnet werden. Aus diesem Grund muss keine heliozentrische Korrektur vorgenommen werden.<sup>2021</sup>

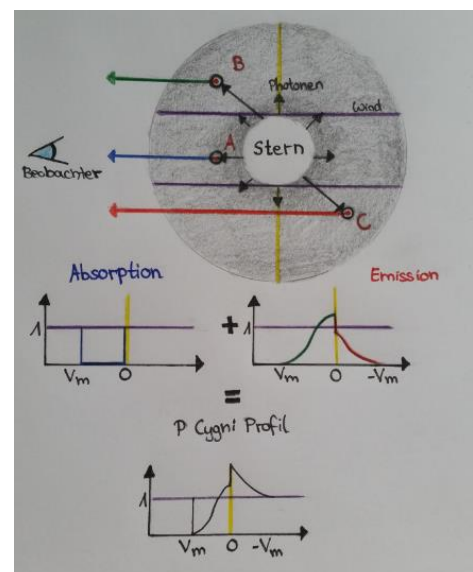


Abbildung 14 – zeichnerische Darstellung der Entstehung des P-Cygni-Profiles

<sup>19</sup> <http://www.usm.lmu.de/people/saglia/praktikum/winde/node20.html> Zugriff: 29.03.18

<sup>20</sup> <http://www.usm.lmu.de/people/saglia/praktikum/winde/node21.html#SECTION00042000000000000000> Zugriff: 29.03.18

<sup>21</sup> Analyse und Interpretation astronomischer Spektren; Richard Walker; Version 9.1, 12/2013

## 7 Technisches Equipment

In den folgenden Abschnitten sollen die grundlegenden Beobachtungsgeräte und Beobachtungsmethoden dargestellt werden.



Abbildung 15 – (Bild Autoren)

### 7.1 Teleskop (CDK 20)

Graphischer Aufbau

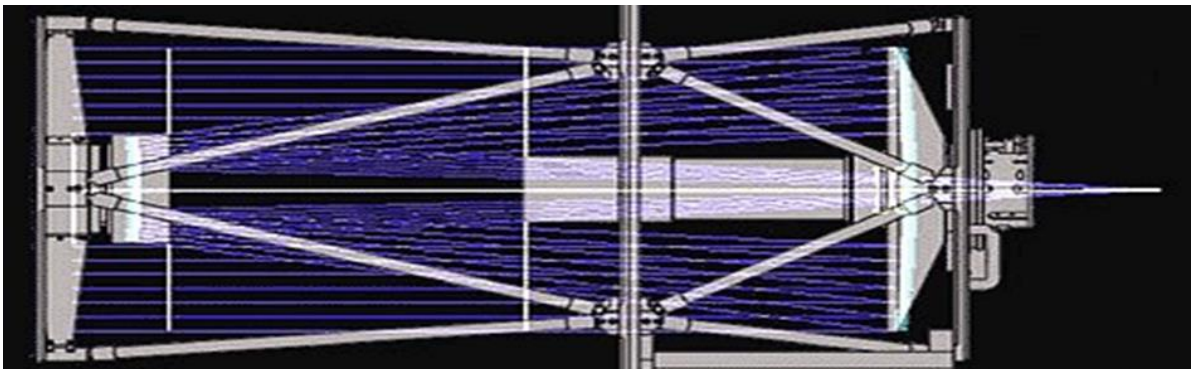


Abbildung 16 - Grafische Darstellung der Spiegelung des einfallenden Lichtes im CDK

[http://www.baader-planetarium.de/planewave/bild/optical\\_layout\\_gross.gif](http://www.baader-planetarium.de/planewave/bild/optical_layout_gross.gif) Zugriff: 29.03.18

Das verwendete Teleskop (siehe Abb. 15) ist ein CDK 20. CDK steht dabei für Corrected Dall-Kirkham. Es handelt sich also um eine veränderte Variante des Cassegrain Reflektors. Dieser wurde 1672 von Laurent Cassegrain erfunden. Der Aufbau nach Cassegrain sieht einen parabolischen Hauptspiegel und einen hyperbolischen Fangspiegel vor, wohingegen im CDK ein ellipsoider Haupt- und ein sphärischer Fangspiegel vorliegen. Das CDK verfügt darüber hinaus über einen zweilinsigen Feldkorrektor. Bei beiden Varianten fällt Licht in das Teleskop ein und wird vom Hauptspiegel auf den Fangspiegel reflektiert (siehe Abb. 16). Dieser bündelt die Strahlen auf den Brennpunkt. Im sekundären Brennpunkt wird der BACHES Echelle Spektrograf angesetzt.<sup>222324252627</sup>

Der Hersteller Planewave hat seine CDK-Baureihe dahingehend angepasst, dass, anders als bei anderen Teleskopen mit Spiegeloptiken, keine außeraxialen Abbildungsfehler, wie zum Beispiel Astigmatismus (Brechungsfehler) auftreten. Auch die bei anderen Teleskopen, bei Entfernung der Sterne zur optischen Achse, auftretende Bildfeldkrümmung, hält sich beim CDK in Grenzen. Mehr dazu in 7.1.3. Der Hersteller garantiert ein über 42 mm von Astigmatismus und Koma (Unschärfe) freies Bildfeld, in dem alle Sterne gleich scharf auf einer Ebene abgebildet werden. Das CDK 20 verfügt über eine auskorrigierte Fokalebene und ist somit an modernere Kamerachips angepasst. Dafür sorgt ein 90 mm Feldkorrektor, welcher in Nähe des Brennpunktes verbaut wurde.<sup>28</sup>

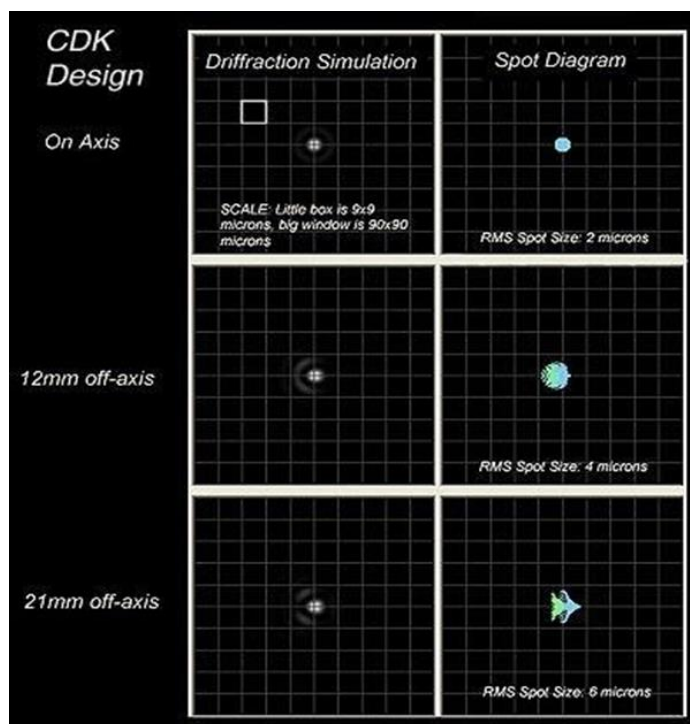


Abbildung 17 - Spotdiagramm bei Entfernung der Lichtquelle zur optischen Achse

<http://www.baader-planetarium.de/planewave/bild/opticalperformance.jpg> Zugriff: 29.03.18

<sup>22</sup> [http://www.baader-planetarium.de/planewave/planewave\\_htm/cdk-opt-design.htm](http://www.baader-planetarium.de/planewave/planewave_htm/cdk-opt-design.htm) Zugriff: 29.03.18

<sup>23</sup> <http://www.ceravolo.com/CDK.html> Zugriff: 29.03.18

<sup>24</sup> <http://www.hubbleoptics.com/cdk.html> Zugriff: 29.03.18

<sup>25</sup> [http://www.ceravolo.com/CDK\\_tech\\_talk.html](http://www.ceravolo.com/CDK_tech_talk.html) Zugriff: 29.03.18

<sup>26</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Cassegrain-Teleskop> Zugriff: 29.03.18

<sup>27</sup> <http://www.jahrhundertkomet.de/know-how/astronomie/teleskope.php> Zugriff: 29.03.18

<sup>28</sup> [http://www.baader-planetarium.de/planewave/planewave\\_htm/cdk-opt-design.htm](http://www.baader-planetarium.de/planewave/planewave_htm/cdk-opt-design.htm) Zugriff: 29.03.18



Dass die bereits genannten Aberrationen die Bildqualität beim CDK 20 nicht nennenswert negativ beeinflussen, wird durch ein Spotdiagramm (Gesamtheit der Strahldurchstoßpunkte in einer Bildebene, die einen Eindruck von der durch Aberrationen erzeugten geometrisch-optischen Zerstreuungsfigur vermittelt). Die Flächendichte der als Spots bezeichneten Durchstoßpunkte ist ein sehr grobes Maß für die Helligkeitsverteilung in der Bildebene“ <sup>29</sup> bewiesen. Die linke Spalte im ersten Diagramm stellt eine Beugungsbild-Simulation für eine 20" CDK Optik dar. Die rechte Spalte zeigt das daraus berechnete Spotdiagramm. Außeraxial bei 12 mm Abstand 4- und bei 21 mm Abstand von der optischen Achse [...] 6 Mikrometer (RMS). Die Abbildungsqualität der Optik ist nur noch von den Seeing Bedingungen und der Qualität der Nachführung abhängig. [...] Die Simulation bezieht sich auf eine plane Bildfeldebene, die ja der Oberfläche eines CCD Chips entspricht.“ <sup>3031</sup>

### 7.1.1 Technische Daten

Die technischen Daten des Teleskops sind der Internetseite der Fa. Baader Planetarium einzusehen, sie wurden unverändert übernommen. <sup>3233</sup>

|                    |  |
|--------------------|--|
| Öffnung            | 20" (0.51m)  |
| Brennweite         | 3.454 mm   |
| Bildfeldgröße      | 52 mm  |
| Öffnungsverhältnis | f/6.8  |
| Obstruktion        | 39%  |
| Back Focus         | 218 mm hinter der Tubusabschlussplatte,<br>142 mm hinter der Fokussiereinheit              |
| Gewicht            | 64 kg  |
| Tubuslänge         | 1151 mm  |
| Obere Zelle        | Gitterrohrtube aus Kohlefaser  |
| Untere Zelle       | Gitterrohrtube aus Kohlefaser,<br>Hauptspiegel lichtgeschützt durch<br>Kohlefaserabdeckung |

Weitere Daten zu den Spiegeln:

| Daten              | Hauptspiegel         | Fangspiegel          |
|--------------------|----------------------|----------------------|
| Durchmesser        | 520 mm               | 190,5 mm             |
| Öffnungsverhältnis | f/3                  |                      |
| Material           | Austemperierte Pyrex | Austemperierte Pyrex |
| Form               | Elliptisch           | Sphärisch            |

<sup>29</sup> <http://www.spektrum.de/lexikon/optik/spotdiagramm/3183> Zugriff: 27.05.17

<sup>30</sup> [http://www.baader-planetarium.de/planewave/planewave\\_html/cdk-opt-design.htm](http://www.baader-planetarium.de/planewave/planewave_html/cdk-opt-design.htm) Zugriff: 29.03.18

<sup>31</sup> <http://www.jahrhundertkomet.de/know-how/astronomie/teleskope.php> Zugriff: 29.03.18

<sup>32</sup> [http://www.baader-planetarium.de/planewave/planewave\\_html/cdk-20.htm](http://www.baader-planetarium.de/planewave/planewave_html/cdk-20.htm) Zugriff: 29.03.18

<sup>33</sup> [http://www.baader-planetarium.de/planewave/planewave\\_html/preise+downloads.htm](http://www.baader-planetarium.de/planewave/planewave_html/preise+downloads.htm) Zugriff: 29.03.18



Weitere technische Details (gekürzte Fassung):

|                  |   |
|------------------|---|
| Tubus            | Gitterrohrtube aus Kohlefaser (Minimierung thermischer Probleme und Fokusdrift)   |
| Montage          | [...] temperaturstabilisierte Schwalbenschwanzaufnahme. Dadurch wird erreicht, dass sich das Aluminium der Teleskopmontage mit der Temperatur ausdehnen oder zusammenziehen kann, ohne dass sich diese mechanischen Lageänderungen auf den Kohlefasertubus übertragen [...] |
| Fokussierung     | Schwerer und - über fünf Führungen - absolut spielfreier Okularauszug mit 90 mm freiem Innendurchmesser. Der Fokusweg beträgt 25.4 mm. [...]  |
| Spiegelbelüftung | 3 Lüfter sorgen für eine schnelle Austemperierung des Hauptspiegels. Sie werden über einen Schalter am Tubus ein, bzw. ausgeschaltet. [...]   |

## 7.2 Montierung

Bei der Montierung handelt es sich um die GM 4000 HPS II von 10 Micron. HPS steht für **H**igh **P**recision and **S**peed. Sie reicht aus, um sehr schnellen Satelliten zu folgen. Hohe Positioniergenauigkeit (besser als 20“) und Nachführgenauigkeit ist etwa eine Bogensekunde bei 15 min Belichtungszeit. Die Montierung verliert also nie die Orientierung, auch wenn die Achsen manuell verstellt werden. Sowohl nach einem Stromausfall, als auch im Remote-Betrieb hat man die Sicherheit, dass das Alignement nicht verloren geht <sup>34</sup>.

Die technischen Daten sind auf der Internetseite der Firma zu finden, die Wichtigsten werden hier unten in der Tabelle aufgeführt: <sup>3536</sup>

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| Instrumentenlast max. Tragkraft | 150 kg  |
| Arbeits-Temperaturbereich       | - 15° C bis + 35° C   |
| Pointierungsgenauigkeit         | < 20" mit internem 25-Sterne Software Mapping – max.100 Sterne; zusätzlich Model Maker Software für automatisches Alignement nutzbar. |

<sup>34</sup> [https://www.teleskop-express.de/shop/product\\_info.php/info/p4794\\_10Micron-GM-4000-HPS-GoTo-Sternwartenmontierung-Achsenkreuz.html](https://www.teleskop-express.de/shop/product_info.php/info/p4794_10Micron-GM-4000-HPS-GoTo-Sternwartenmontierung-Achsenkreuz.html) Zugriff: 01.05.18

<sup>35</sup> <http://10micron.de/products/gm-4000-hps/gm-4000-hps-montierung-1454010/> Zugriff: 29.03.18

<sup>36</sup> <http://10micron.de/> Zugriff: 29.03.18

|                  |   |
|------------------|---|
| Datenbasis       | <p>Sterne:<br/>über allgemeine Namen, Bayer, Flamsteed, Bright Star Katalog, SAO, HIP, HD, PPM, ADS, GCVS. Deep-sky: M, NGC, IC, PGC, UGC bis zu mv=16.</p> <p>Sonnensystem:<br/>Sonne, Mond, Planeten, Asteroiden, Kometen, künstliche Satelliten. Äquatoriale und altazimutale Koordinaten. Anwenderdefinierte Objekte. [...]</p> |
| Keypad Steuerung | [...] fünf Info-Zeilen für Koordinaten, Objektinformationen und Symbole zum Status der Montierung sowie aktiver externer Verbindungen und Geräte. Alle Funktionen der Montierung können über das Keypas gesteuert werden, ganz ohne PC  |
| PC Steuerung     | <p>Fernsteuerbar über RS-232, Ethernet, proprietären 10Micron ASCOM Treiber, LX200-kompatibles Protokoll.</p> <p>Firmwareupdates und Bahndaten von Kometen, Asteroiden und künstlichen Satelliten [...] Virtuelles PC-Keypad über RS-232 oder Ethernet. Eingebautes WiFi [...]</p>  |

## 7.3 Die Aufnahmekamera für den BACHES

Es werden im Prozess der Aufnahme zwei Kameras benutzt:

- Als Guiding Kamera wird die Celestron Skyris 274M verwendet. "M" ist die Abkürzung für Monochrom, es handelt sich also um ein Schwarz-Weiß Kamera. Die großflächige Kamera und ein großer Sensor sind von Vorteil einen Stern nach dem Anfahren sicher zu finden <sup>37</sup>.
- Die für die Aufnahmen benutzte CCD Kamera ist eine SBIG STF 8300 M (ebenfalls Monochrom) mit einem 2x2 Binning (Binning: versteht man ein Verfahren in dem, durch das gemeinsame Auslesen benachbarter Pixel (in diesem Fall 2x2 also 4 Pixel), das Signal-Rauschverhältnis (SNR) erhöht wird.<sup>38</sup>

<sup>37</sup> [https://www.baader-planetarium.com/de/downloads/dl/file/id/312/product/0/baches\\_echelle\\_spektrograf\\_tutorial\\_76\\_seiten.pdf](https://www.baader-planetarium.com/de/downloads/dl/file/id/312/product/0/baches_echelle_spektrograf_tutorial_76_seiten.pdf) Zugriff: 01.05.18

<sup>38</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Binning> Zugriff: 29.03.18

|                        |   |
|------------------------|---|
| Chip                   | Full Frame Transfer Kodak KAF 8300 Chip mit Anti Blooming Funktion und Mikrolinsentechnik |
| Chip Größe             | 17.96 x 13.52 mm  |
| Anzahl der Pixel       | 3.326 x 2504 Pixel (8.3 M)  |
| Größe                  | 18 x 13.5 mm, diagonal 22.5 mm  |
| Gewicht                | 0.8 kg  |
| Pixelgröße             | 5.4 µm x 5.4 µm   |
| Quanteneffektivität    | bei 540nm - 54% (monochrome Version)  |
| Dunkelstrom            | 0.002e-/Pixel/Sek. bei - 10 Grad Celsius  |
| AD Konverter           | 16 Bit Auflösung  |
| Spannungsversorgung    | 12V/3A max.   |
| Kühlung                | Maximal 40°C unter Umgebungstemperatur  |
| Temperatur Regulierung | +/- 0.1°C   |
| Mögliches Binning      | 2 x 2 (10.8 µm) über 3 x 3 (16.2 µm) bis zu 15 x 15 ist möglich                           |
| Full Frame Download    | <1s   |

Die Kamera verfügt über einen mechanischen Verschluss zur Dunkelbildaufnahme.

## 7.4 Der BACHES Echelle Spektrograf

Bei dem verwendeten Spektrografen handelt es sich um den Baches (**B**asic **E**chelle **S**pectrograph) der Firma Baader Planetarium. Der Name des Spektrografen leitet sich aus der Ähnlichkeit des zum Brechen des Lichtes verwendeten Gitters zu einer Leiter her (französisch echelle = Leiter). Der Spektrograf wurde von Wissenschaftlern der ESO (Europäische Südsternwarte) und dem Baader Planetarium entwickelt. <sup>4142</sup> Mit ihm kann man ein komplettes optisches Spektrum in sehr hoher spektraler Auflösung erhalten, was besonders wichtig bei der Beobachtung von Phänomenen ist, die nur kurze Zeit auftreten (z.B. solare Flares).

<sup>39</sup> <http://www.sbig.de/stf-8300/stf-8300.htm> Zugriff: 29.03.18

<sup>40</sup> <http://www.sbig.de/stf-8300/stf-8300-techdat.pdf> Zugriff: 29.03.18

<sup>41</sup> <http://www.baader-planetarium.de/baches/> Zugriff: 29.03.18

<sup>42</sup> <https://www.eso.org/public/germany/> Zugriff: 29.03.18

### 7.4.1 Funktionsweise

*"Das Echelle-Gitter ist ein Reflexionsgitter, an dessen eingeritzten Furchen das Licht geometrisch reflektiert wird. Da die Furchenbreite vergleichbar mit der Wellenlänge ist, tritt Beugung ein. Jede Furchen wirkt wie ein Einzelspalt, der die Spaltbeugung in die geometrische Reflexionsrichtung lenkt."*

<sup>43</sup>

Nachdem das Licht am Gitter gebrochen wurde (siehe Abb. 18), überlagern sich die Ordnungen allerdings noch. Mithilfe eines dispersiven Elementes (optisches Gitter oder Prisma) werden die Ordnungen aufgeweitet (siehe Abb. 19).<sup>44</sup>

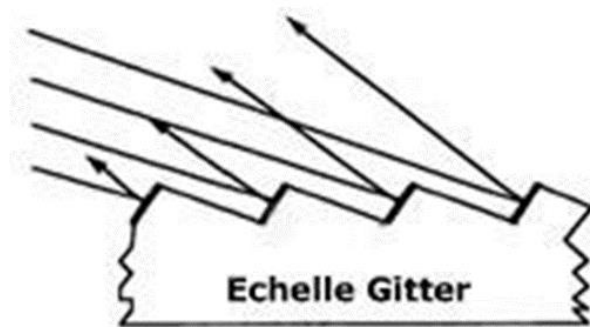


Abbildung 18 – Modell Gitterspektrograf

[http://www.baader-planetarium.de/baches/bilder/echelle\\_gitter.jpg](http://www.baader-planetarium.de/baches/bilder/echelle_gitter.jpg)  
Zugriff: 29.03.18

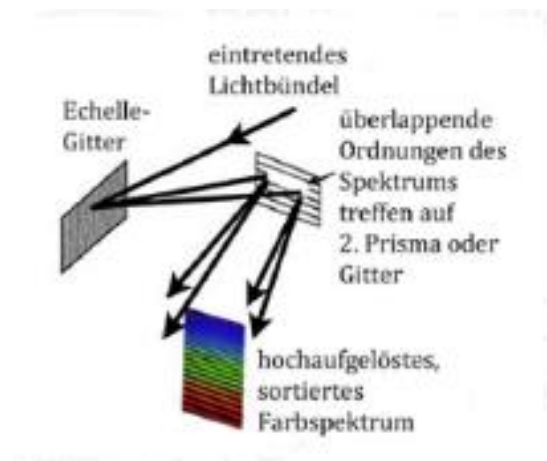


Abbildung 19 - Funktionsweise Echelle-Spektrograf  
<http://www.batches.eu> Zugriff: 29.03.18

### 7.4.2 Technische Daten <sup>45</sup>

|   |  |
|---|--|
| Mittleres spektrales Auflösungsvermögen | R=18000 Optimierter, durchgehender Spektralbereich: 392nm-800nm (abhängig von Sensorgröße) |
| Spaltgröße                              | einstellbar:<br>25 µm und 50 µm, jew. 125 µm lang  |
| Gewicht                                 | 1350g (ohne Kamera)  |
| Optimale Sensorgröße                    | ca. 10x15mm, 9 µm Pixel  |
| Öffnungsverhältnis des Kollimators      | f/10   |

<sup>43</sup> Zitat: <http://www.baader-planetarium.de/baches/#funktion> Zugriff: 29.03.18

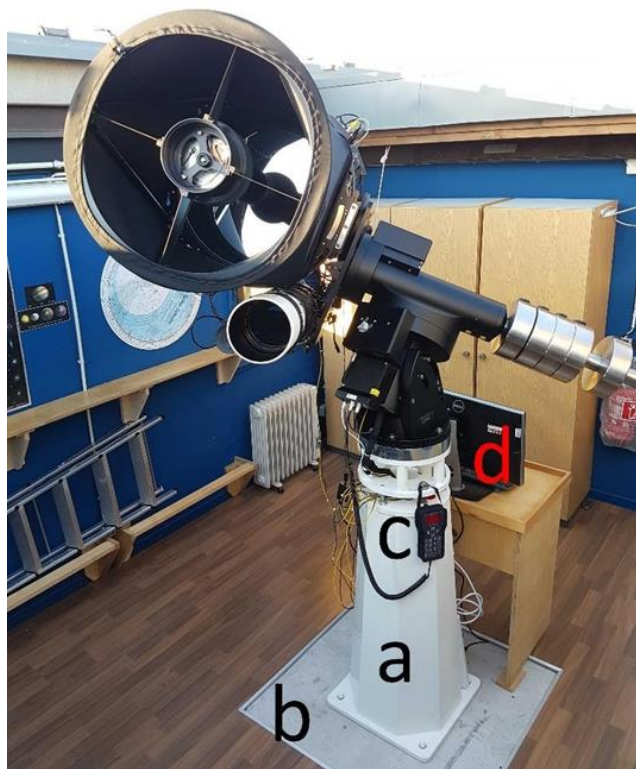
<sup>44</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Diffraktives\\_optisches\\_Element](https://de.wikipedia.org/wiki/Diffraktives_optisches_Element) Zugriff: 29.03.18

<sup>45</sup> <http://www.baader-planetarium.de/baches/> Zugriff: 29.03.18

## 8 Der experimentelle Aufbau

Nachdem die einzelnen Elemente, die zur Aufnahme verwendet werden, bereits erklärt wurden, wird in diesem Abschnitt der gesamte Aufbau noch einmal mit Bildern dargestellt.

Für das Experiment wird das größte Teleskop an der Sternwarte des CFG verwendet. Das CDK 20 ist auf einer Montierung von 10Micron (GM 4000 HPS II) fixiert, diese wiederum auf einem eigens zu diesem Zweck gegossenen Betonsockel, um auch minimales Wackeln durch Schritte oder Ähnlichem zu vermeiden.



*In Abbildung 20 ist der gesamte Aufbau mit dem Teleskop bei geöffnetem Dach,*

*(a) GM 4000 Montierung*

*(b) Betonplatte*

*(c) 10Micron Handsteuerung*

*(d) zur Steuerung verwendete PC*

*Alle in Kapitel 8 verwendeten Bilder außer Abb. 23 sind von den Autoren aufgenommen*



Abbildung 22 - Blick auf das CDK-20



Abbildung 21 -  
RCU mit Referenzlampen



Abbildung 23 – Keypad zur Steuerung <sup>46</sup>

Die RCU (Remote Calibration Unit) beinhaltet zwei Lampen (Thorium-Argon- und Halogenlampe), die über eine Glasfaserleitung mit dem Spektrografen verbunden werden. Sie wird zur Aufnahme von Referenzspektren benötigt.

<sup>46</sup> [http://10micron.de/products/zubehoer/allgemeines\\_zubehoer/10micron-professionelle-4-zeilen-stand-alone-handsteuerung/](http://10micron.de/products/zubehoer/allgemeines_zubehoer/10micron-professionelle-4-zeilen-stand-alone-handsteuerung/) Zugriff: 01.05.18



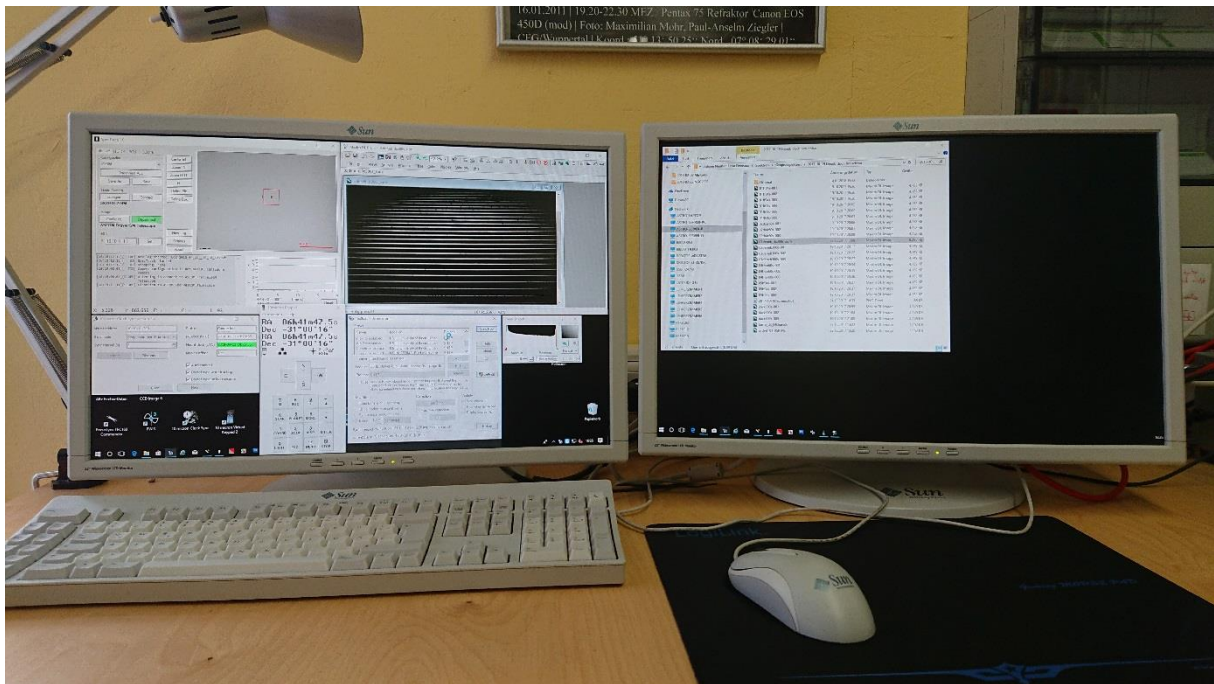


Abbildung 24 – Steuerungscomputer

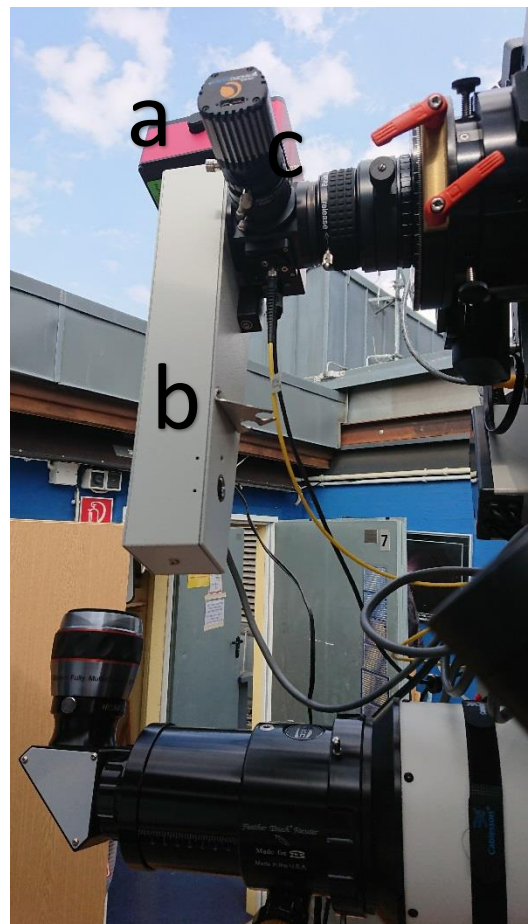
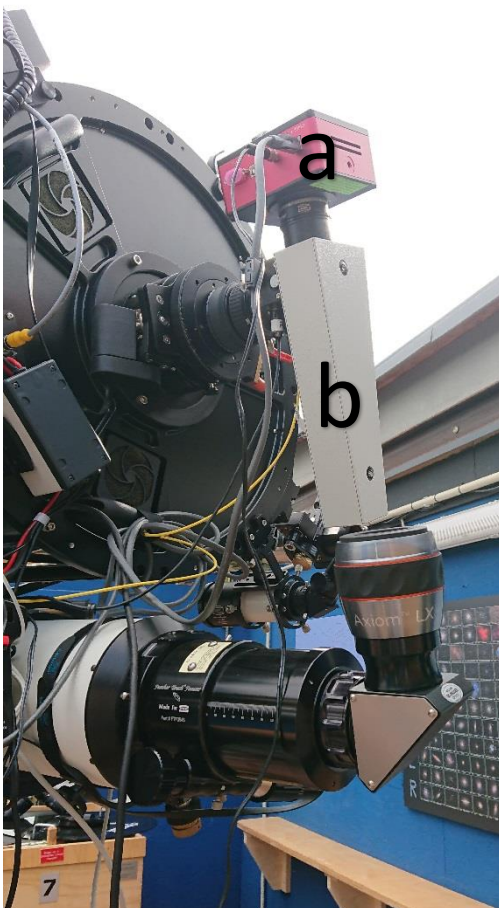


Abbildung 25, 26 – Aufbau der Technik auf der Rückseite des Teleskops, bestehend aus:  
 (a) CCD Kamera STF-8300M  
 (b) Baches Echelle Spektrograf  
 (c) Skyris 274M

## 9 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung unserer Forschungsarbeit stellt in erster Linie die Spektrenaufnahme von Deneb und die weitere Auswertung der aufgenommenen Spektren dar. Die zu treffenden Vorbereitungen, welche den Aufbau des technischen Equipments miteinbeziehen, gehören an dieser Stelle auch dazu.

Im weiteren Verlauf sollen die Spektren nach Aufbereitung ausgewertet werden. Dies geschieht in Hinblick auf die Verschiebung des P-Cygni-Profiles und die Berechnung der Geschwindigkeit des Sternwindes. Zum vereinfachten Vergleich sollen die Spektren zudem nebeneinander verglichen werden, um mögliche Auskünfte und Vorhersagen über die Veränderung in längeren Zeiträumen treffen zu können.

Des Weiteren können unsere Ergebnisse im Anschluss mit solchen von anderen Astronomen verglichen werden.

## 10 Aufnahme der Spektren

### 10.1 Vorbereitungen

Das CDK 20 ist in einer Rolldachhütte untergebracht, um es vor äußerlichen Einflüssen zu schützen. Nach Öffnen des Daches und der Sicherstellung der Stromversorgung kann das Teleskop in Betrieb genommen werden. Anschließend wird es aus der Parkposition auf das Beobachtungsobjekt gerichtet. Dem Teleskop werden einige Minuten zur Anpassung an die Außentemperatur gegeben, um beste Messergebnisse zu erzielen. Erst danach wird erst die genauere Einstellung über den Computer vorgenommen.



### 10.1.1 ClockSync

Hierzu wird das Programm Dimension 4 gestartet, welches sich mit einem Zeit-Server verbindet und somit die Computer Zeit in einem festgelegten Zeitintervall synchronisiert. Des Weiteren wird durch 10Micron ClockSync (blau) die Montierung des Teleskops mit der Computerzeit synchronisiert. Die exakte Zeitangabe ist für die punktgenaue Ausrichtung des Teleskops mithilfe der Winkelenncoder wichtig. Alle Spektralaufnahmen müssen die korrekte Uhrzeit enthalten. Danach werden die verschiedenen Programme eingerichtet.

*Alle in Kapitel 9 (Abb. 27-29) verwendeten Screenshots sind von den Autoren erstellt.*

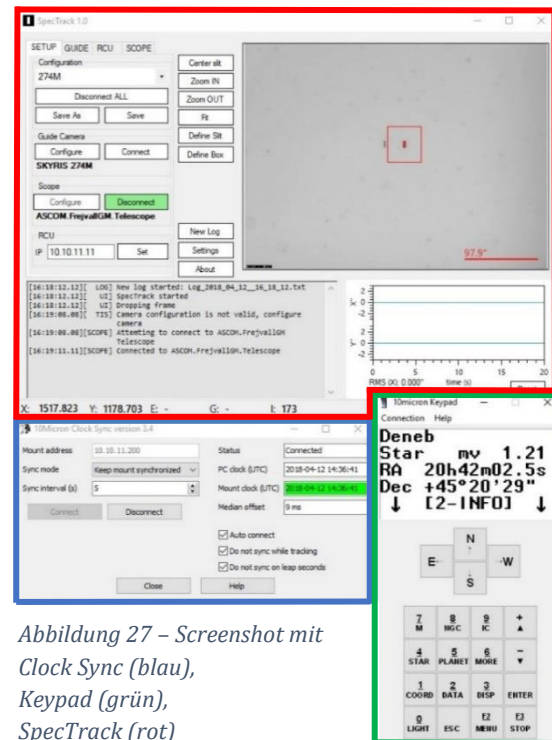


Abbildung 27 – Screenshot mit Clock Sync (blau), Keypad (grün), SpecTrack (rot)

### 10.1.2 Keypad

Zunächst wird auf einem der beiden Bildschirme (siehe Abb. 24) das 10Micron Keypad (grün) geöffnet, um die Nachführgeschwindigkeit des Teleskops zu verändern. Die Montierung muss das CDK 20 so bewegen, dass es die Erddrehung ausgleicht und der Stern im Fokus bleibt. Deshalb wird eine siderische (auf Sterne bezogene) Nachführgeschwindigkeit ausgewählt.

### 10.1.3 SpecTrack

Als Nächstes wird SpecTrack (rot) in Betrieb genommen. Dieses Programm muss mit dem Teleskop, der Guiding Cam (Skyris 274M) und der RCU (**R**emote **C**alibration **U**nit) verbunden werden. Durch die Guiding Software SpecTrack wird die Nachführung auf einen Stern oder eine Referenzlampe im Spalt selbstständig und sehr einfach ermöglicht. Nachdem alle Geräte angemeldet sind, wird das Programm auf die Spaltposition eingestellt. Dafür wird im Fenster RCU die Flatfield (Halogen) Lampe angeschaltet und das Livebild aktiviert, was dann auf der rechten Seite der Abb. 27 sichtbar wird. Das von der Guiding Kamera aufgenommene Bild zeigt das Licht der Flatfield Lampe und die zwei Spalten (25  $\mu\text{m}$  und 50  $\mu\text{m}$ ) des Baches, wobei ausschließlich mit dem 25  $\mu\text{m}$  – Spalt gearbeitet wird. Außerdem ist ein schmales rotes Rechteck zu sehen, das den Spalt definiert. Die selbstständige Nachführung funktioniert jedoch nur innerhalb des festgelegten größeren roten Rechtecks.

## 10.2 Anfahren des Zielsterns

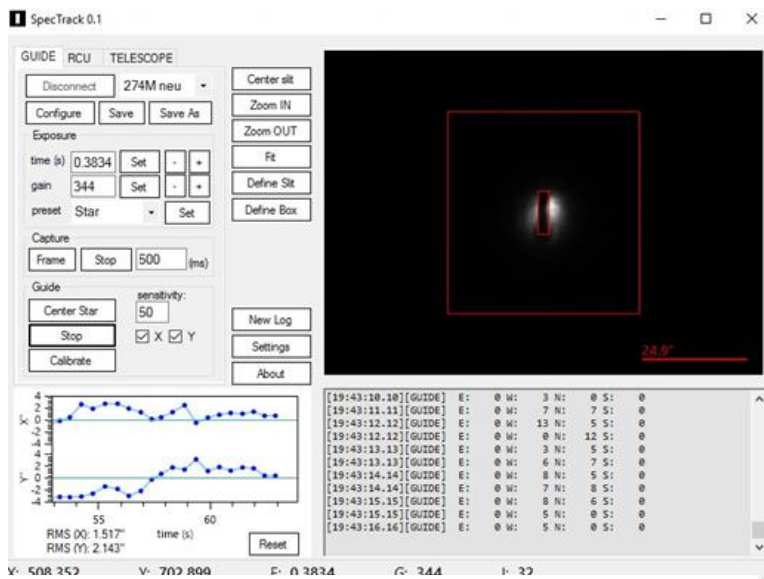


Abbildung 28 - Screenshot SpecTrack beim Nachführen des Objekts

Nun muss das Teleskop auf den Zielstern „ $\alpha$  Cygni“ ausgerichtet werden. Dafür wird das 10Micron Keypad verwendet. Da es sich um einen veränderlichen Stern handelt, muss er aus dem GCVS (General Catalog of Variable Stars) ausgewählt werden.

Unter diesem Menüpunkt lässt sich „ $\alpha$  Cygni“ auswählen. Nach Bestätigung der Eingabe schwenkt das CDK 20 Teleskop automatisch zum Zielstern.

Wenn das Teleskop den Stern anvisiert hat, ist er in SpecTrack (siehe Abb. 28) unter dem Reiter „Guide“ zu sehen. Nun muss der Lichtfleck (sofern das noch nötig ist), mit dem 10Micron Keypad, in das rote Quadrat manövriert werden, wobei die Schwenkgeschwindigkeit zu beachten ist (diese muss äußerst gering sein ca.  $15''/s$ ). Für die Belichtungszeit (Exposure  $\rightarrow$  Time) sollte ungefähr eine halbe Sekunde ausgewählt werden. Danach kann man über die Funktion „calibrate“ das Programm kalibrieren. Falls sich der Stern durch die Prohebewegungen des Programms, während des Kalibriervorgangs, außerhalb des roten Quadrates befinden sollte, muss er wieder manuell in dieses gesteuert werden. Dann kann durch anwählen der Schaltfläche „Guide“ die Nachführung aktiviert werden. Das Programm führt das Objekt daraufhin automatisch auf den Spektrografenspalt. Der Wert für „Sensitivity“ sollte ungefähr 50 betragen. Bei zu hohen Werten reagiert SpecTrack zu empfindlich auf jede durch Seeing bedingte Schwankung des Sterns. Die Kurven in dem Grafikfenster sollten jetzt um Null schwanken.

## 10.3 Aufnahme der Spektren

Zuerst wird Maxim DL 5 Pro (siehe Abb. 29) geöffnet, hier erscheint später das Bild des Spektrums (grün) (in diesem Fall mit einem Sternspektrum). Über ein Histogramm (blau) kann man sich die Helligkeitswerte anzeigen lassen, um zu kontrollieren, ob eine Überbelichtung auftritt.

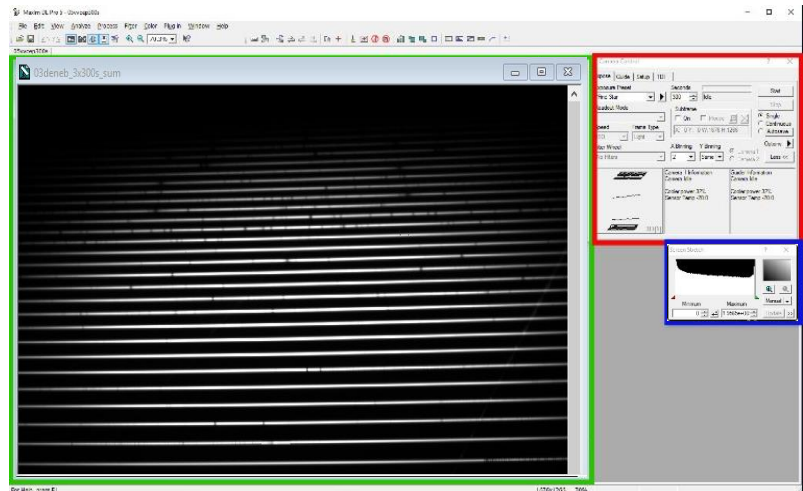


Abbildung 29 - Screenshot Maxim DL 5 Pro

Außerdem wird die „Camera Control“ (Rot) geöffnet. In diesem Programm können die Einstellungen bezüglich der Belichtungszeit festgelegt und das Spektrum aufgenommen werden. Nachdem alle Parameter angepasst wurden wird das Spektrum aufgenommen. Danach werden Dark-Frames und Flatfield-Spektren als Referenzspektren erzeugt. In SpecTrack gelangt man über den Reiter „RCU“ in das Fenster, in dem, als erste Referenzlichtquelle, die Flatfield Lampe ausgewählt wird. Je nach Bedarf sind verschiedene Einstellungen in der „Camera Control“ möglich. Diese betreffen Einzel- sowie Serienaufnahmen, Belichtungszeit, Anzahl der Bilder (bei Serien), das Binning, aber auch wann die Kamera Dark-Frames (Dunkelbilder) aufnehmen soll, welche von den darauffolgenden Bildern subtrahiert werden, um kamerabedingte Fehler zu vermeiden.

Für Serienaufnahmen von einem Objekt (oder einer Referenzlampe) wird ein gemitteltes Dunkelbild erstellt, welches von der Kamera für die folgenden Aufnahmen benutzt wird. Bei Einzelaufnahmen wird vor jeder Aufnahme ein Darkframe erstellt. Einzelaufnahmen werden in Maxim DL angezeigt und müssen manuell benannt und gespeichert werden; bei Serienaufnahmen geschieht dies nach Einstellung automatisch.

Die eben erwähnten Flatfield Spektren werden aus zwei verschiedenen Gründen aufgenommen. Erstens damit die für die Auswertung benutzte Software die Ordnungen des Spektrums erkennen kann und zweitens um zum Beispiel Staub in oder auf der Kamera zu erkennen. Wenn letzteres überprüft wird, muss beachtet werden, dass die Sättigung also 65536 ADU nicht überschritten wird. Mithilfe des Thorium-Argon Spektrums können später bekannte Spektrallinien zur Kalibrierung benutzt werden.

Der Ablauf für die Erstellung der Spektren ist wie folgt:

Es werden erst Flatfield Spektren, dann Thorium-Argon Spektren und zuletzt Sternspektren aufgenommen (für  $\alpha$  Cygni mit einer Belichtungszeit von 300s oder 120s). Zuletzt werden noch einmal Referenzspektren aufgenommen, allerdings zuerst ein Thorium-Argon- und danach ein Flatfield-Spektrum.

Datentabelle der Spektren:

| Name                  | Datum      | Beginn der Aufnahme (UT) | Aufnahmemitte (UT)  | Belichtungszeit |
|-----------------------|------------|--------------------------|---------------------|-----------------|
| 2014-06-22T22_47_24UT | 22.06.2014 | 2014-06-22T22:46:24      | 2014-06-22T22:47:24 | 120s            |
| 2014-09-08T19_35_42UT | 08.09.2014 | 2014-09-08T19:29:25      | 2014-09-08T19:35:42 | 480s            |
| 2015-08-02T22_34_15UT | 02.08.2015 | 2015-08-02T22:26:39      | 2015-08-02T22:34:15 | 900s            |
| 2016-08-06T21_34_46UT | 06.08.2016 | 2016-08-06T21:26:58      | 2016-08-06T21:34:46 | 900s            |
| 2016-08-15T20_37_22UT | 15.08.2016 | 2016-08-15T20:20:47      | 2016-08-15T20:37:22 | 660s            |
| 2016-08-15T20_37_22UT | 15.08.2016 | 2016-08-15T20:20:47      | 2016-08-15T20:37:22 | 660s            |
| 2016-09-12T22_19_11UT | 12.09.2016 | 2016-09-12T22:13:49      | 2016-09-12T22:19:11 | 600s            |
| 2017-05-26T23_24_24UT | 26.05.2017 | 2017-05-26T23:16:51      | 2017-05-26T23:24:24 | 900s            |
| 2017-06-10T21_58_30UT | 10.06.2017 | 2017-06-10T21:53:29      | 2017-06-10T21:58:30 | 600s            |
| 2017-08-16T21_12_47UT | 16.08.2017 | 2017-08-16T21:05:14      | 2017-08-16T21:12:47 | 900s            |
| 2017-08-19T21_39_15UT | 19.08.2017 | 2017-08-19T21:31:43      | 2017-08-19T21:39:15 | 900s            |
| 2017-10-15T17_50_10UT | 15.10.2017 | 2017-10-15T17:42:38      | 2017-10-15T17:50:10 | 900s            |
| 2017-10-19T18_20_21UT | 19.10.2017 | 2017-10-19T18:12:50      | 2017-10-19T18:20:21 | 900s            |

## 11 Kalibrierung der Spektren von Deneb

Die Kalibrierung der Sternspektren unterteilt sich in mehrere Schritte, die in zwei Betriebssystemen durchgeführt werden müssen. Zunächst werden jegliche Spektren im Programm *Maxim DL* unter *Windows* auf die weitere Kalibrierung vorbereitet, welche daraufhin mit dem von der ESO entwickelten Programm *MIDAS* in *Linux* ausgeführt wird.

### 11.1 Vorbereitung der Spektren in *Maxim DL*

Die bereits aufgenommenen Spektren müssen, bevor diese zur Kalibrierung verwendet werden können, zunächst vorbereitet werden. Die Referenzspektren der Thorium-Argon und der Flatfield Lampe werden gemittelt und gefiltert, wodurch ein neues Spektrum ohne gesättigte Pixel entsteht. Die entstandenen Spektren werden nun mit speziellen Bezeichnungen gespeichert, damit sie im Verlauf der weiteren Kalibrierung in *MIDAS* erkannt werden können.

An dieser Stelle muss zudem auf zu hohe Belichtungszeiten geachtet werden, durch welche das dann überbelichtete Spektrum unbrauchbar würde. Um dies zu vermeiden, kann durch ein sogenanntes Histogramm die Helligkeitsverteilung im Spektrum beachtet werden, an der eine Überbelichtung sichtbar ist. Ebenso sollte das Deneb-Spektrum auf seine Helligkeit überprüft werden, denn diese beschreibt das zu untersuchende Material. Im Gegensatz zu den Referenzspektren, muss an dieser Stelle ein Summenbild erstellt werden.

Bevor dieser Schritt getan werden kann, muss vorerst noch ein Dunkelbildabzug erstellt werden. Die aufgenommenen Dunkelbilder werden summiert und in *Maxim DL* als *Masterdark* für die Spektren gespeichert. Nachdem der Abzug gemacht wurde, können die Sternspektren addiert werden. Dass die Deneb-Spektren nicht gemittelt werden hat seinen Ursprung darin, dass es bei

der Aufnahme zu Verschiebungen kommen kann und ein Median-Filter eine Verfälschung der Ergebnisse herbeiführen würde. Das entstandene Summenbild kann trotzdem noch störende Pixel enthalten. Aus diesem Grund muss die H-alpha Linie auf fehlerhafte Stellen untersucht werden. Ist etwas auffällig, wird überprüft, ob es sich um störende Pixel handelt. Falls ja, kann es daraufhin nachbearbeitet werden ohne die Aufnahme zu verfälschen.

## 11.2 Kalibrierung mit MIDAS<sup>47</sup>

Zur Kalibrierung stehen uns nur Computer mit dem Betriebssystem Windows zu Verfügung, allerdings kann *MIDAS* nur in Linux genutzt werden. Folglich wird in Windows eine Oracle VirtualBox geöffnet, durch welche Linux in Windows emuliert wird. Um Daten in beiden Betriebssystemen öffnen zu können, müssen diese in einen Ordner kopiert werden, auf den beide zugreifen können.

Im weiteren Verlauf kann Linux und somit *MIDAS* in Betrieb genommen werden. Zunächst müssen die Referenzspektren kalibriert werden, damit dessen Werte als Grundlage für die Kalibrierung des Deneb Spektrums dienen können. Dies erfolgt in mehreren Etappen.

Das *MIDAS* Terminal wird durch verschiedene Befehle gesteuert.

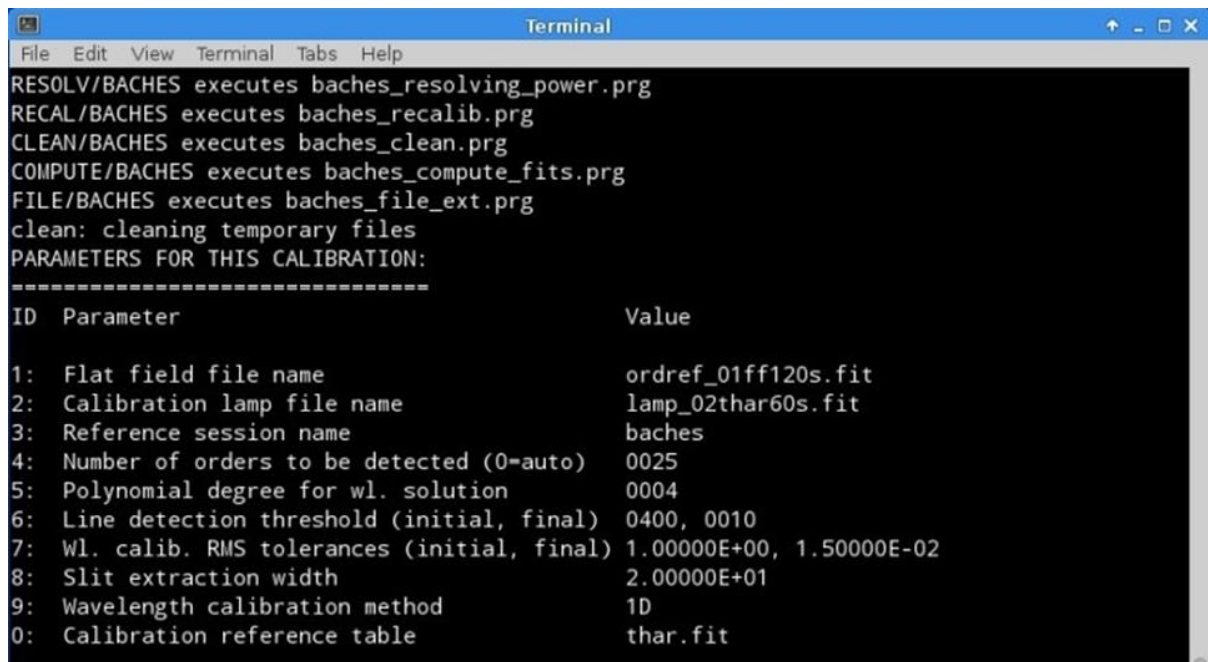
**Y** für Bestätigung

**0/1/2/3/4/5/6/7/8/9** für angegebene Schritte

Bevor nun die Kalibrierung beginnen kann, müssen einige Parametereinstellungen vorgenommen werden.

---

<sup>47</sup> <https://www.baader-planetarium.com/de/mibas-midas-iraf-baader-astronomy-suite.html>  
Zugriff: 23.05.2018

A screenshot of a terminal window titled "Terminal" with a menu bar (File, Edit, View, Terminal, Tabs, Help). The terminal displays the following text:

```
RESOLV/BACHES executes baches_resolving_power.prg
RECAL/BACHES executes baches_recalib.prg
CLEAN/BACHES executes baches_clean.prg
COMPUTE/BACHES executes baches_compute_fits.prg
FILE/BACHES executes baches_file_ext.prg
clean: cleaning temporary files
PARAMETERS FOR THIS CALIBRATION:
=====
ID  Parameter                                     Value
1:  Flat field file name                       ordref_01ff120s.fit
2:  Calibration lamp file name                 lamp_02thar60s.fit
3:  Reference session name                     baches
4:  Number of orders to be detected (0=auto)   0025
5:  Polynomial degree for wl. solution         0004
6:  Line detection threshold (initial, final) 0400, 0010
7:  Wl. calib. RMS tolerances (initial, final) 1.00000E+00, 1.50000E-02
8:  Slit extraction width                     2.00000E+01
9:  Wavelength calibration method              1D
0:  Calibration reference table                thar.fit
```

Abbildung 30 – MIDAS Terminal

Für uns wichtigen Einstellungen, die geändert werden müssen:

- 1** Name des Flatfield Spektrums
- 2** Name des Thorium-Argon Spektrums
- 4** Name der zu erkennenden Ordnungen (kann je nach Qualität des Spektrums angepasst werden; mind. 20 Ordnungen)
- 6** Threshold Wert; Genauigkeit der Linienerkennung im Spektrum wird festgelegt (variiert je nach Qualität des Spektrums)



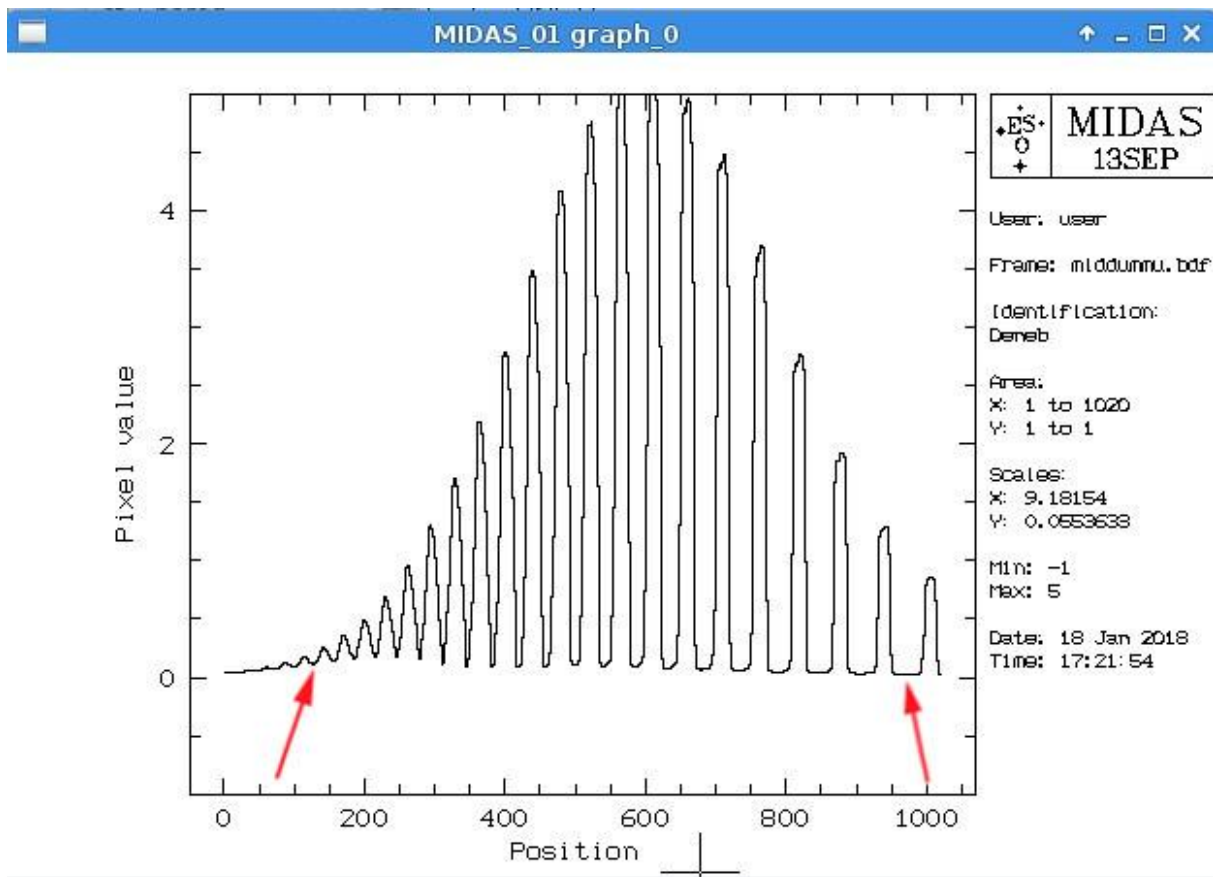


Abbildung 31 - Intensitätsscan

Während der Kalibrierung sollten jegliche Fenster geöffnet bleiben, da eine Schließung zu sofortiger Fehlermeldung und Abbruch des Kalibrierungsvorgangs führt.

Abbildung 31 zeigt die durch einen Intensitätsscan hervorgegangene Helligkeitsverteilung des Spektrums, bei der nun zwei Grenzen markiert werden müssen. Diese Aktion dient der Erkennung der Ordnungen, denn hierbei wird der zu scannende Bereich vom UV- bis zum Infraroten festgelegt.

Als nächstes erscheint ein Fenster, in dem das Flatfield Spektrum mit den erkannten Ordnungen angezeigt wird. Insofern die Anzahl der erkannten Ordnungen mit der Anfangseinstellung übereinstimmt und ausreichend viele Linien erkannt wurden, kann fortgefahren werden. Ob dies der Fall ist, kann man an den nun durchnummerierten Ordnungen erkennen. Die Anzahl der Linien wird ebenso im Fenster angezeigt.

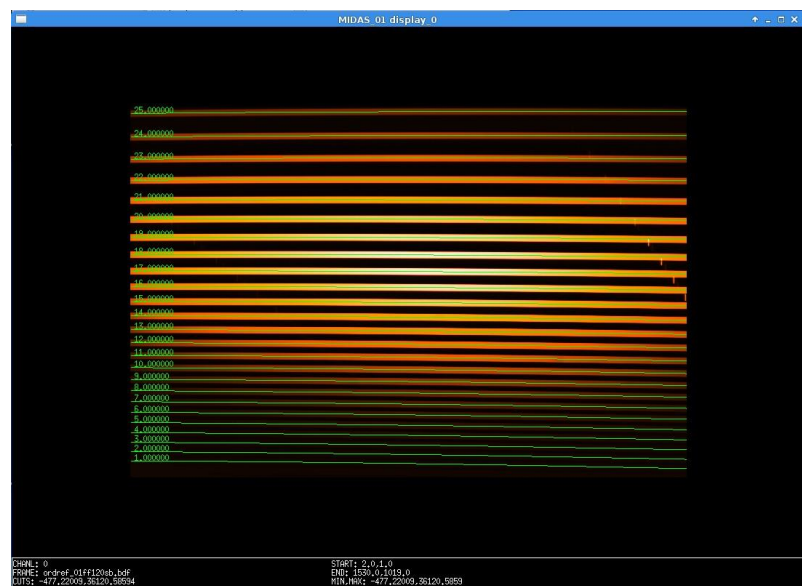


Abbildung 32 – Linienerkennung am Flatfield Spektrum

Zum Fortfahren muss die Ordnungserkennung bestätigt werden, damit die angesammelten Daten auf das Thorium-Argon Spektrum angewandt werden können.

Daraufhin öffnet sich ein weiteres Fenster mit der Anzeige des Thorium-Argon Spektrums, das horizontal gespiegelt wurde. Per Maus-klick werden nun vier Linien (2 Linienpaare) angewählt, um die Linienidentifikation zu bestimmen. Um diese für das Programm zu identifizieren, werden dessen Wellenlängen in Å (Angström) und die absolute Liniennummer der ersten angewählten Linie angegeben (siehe Abb. 33).

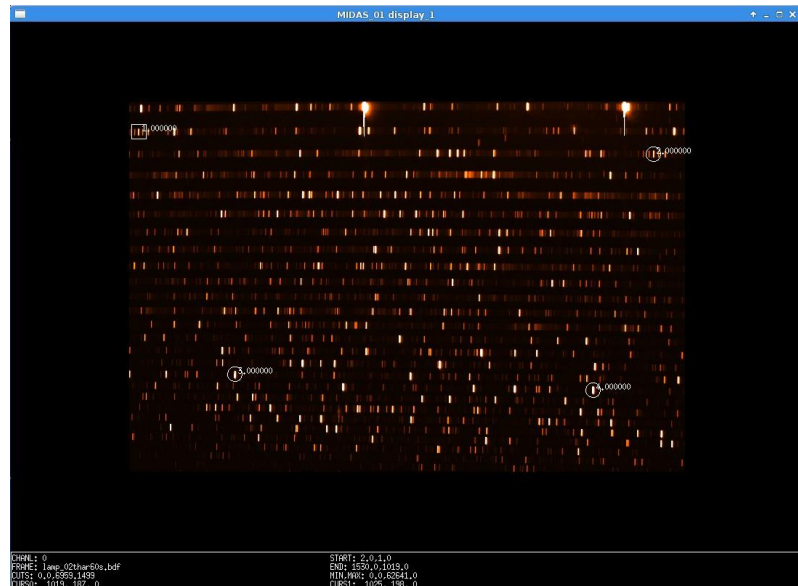


Abbildung 33 – Auswahl der Linienpaare am Thorium-Argon Spektrum

Die erste Linie befindet sich in der 33. Ordnung und hat eine Wellenlänge von 6662.268Å, wobei die zweite Linie in der 48. Ordnung zu finden ist und eine Wellenlänge von 4609.6Å besitzt. Aufgrund der Überlagerung im Spektrum reichen diese beiden Angaben zur Identifikation aus.

- Enter the absolute order number of the first line you selected. (33)
- Enter the wavelength of the first line pair. (6662.268)
- Enter the wavelength of the second line pair. (4609.600)

COMPUTE DISPERSION COEFFICIENTS

INPUT TABLE : line.tbl  
POLYNOMIAL DEGREE : 4

| SEQ.NO | SPECTRAL ORDER | NO.LINES | WL START | WL END  | STD. DEV. ANGSTROM |
|--------|----------------|----------|----------|---------|--------------------|
| 1      | 56             | 8        | 3925.11  | 4053.33 | 0.00039            |
| 2      | 55             | 13       | 3996.94  | 4127.06 | 0.00059            |
| 3      | 54             | 12       | 4071.14  | 4203.47 | 0.00074            |
| 4      | 53             | 9        | 4147.83  | 4282.71 | 0.00079            |
| 5      | 52             | 14       | 4227.40  | 4365.01 | 0.00091            |
| 6      | 51             | 16       | 4310.15  | 4450.55 | 0.00090            |
| 7      | 50             | 15       | 4396.24  | 4539.50 | 0.00086            |
| 8      | 49             | 13       | 4485.84  | 4632.05 | 0.00081            |
| 9      | 48             | 13       | 4579.18  | 4728.50 | 0.00092            |
| 10     | 47             | 14       | 4676.51  | 4828.97 | 0.00057            |
| 11     | 46             | 15       | 4778.07  | 4933.84 | 0.00034            |
| 12     | 45             | 14       | 4884.17  | 5043.38 | 0.00081            |
| 13     | 44             | 12       | 4995.05  | 5157.89 | 0.00081            |
| 14     | 43             | 13       | 5111.12  | 5277.72 | 0.00048            |
| 15     | 42             | 16       | 5232.68  | 5403.25 | 0.00087            |
| 16     | 41             | 14       | 5360.20  | 5534.88 | 0.00080            |
| 17     | 40             | 16       | 5494.08  | 5673.14 | 0.00050            |
| 18     | 39             | 13       | 5634.83  | 5818.44 | 0.00064            |
| 19     | 38             | 17       | 5782.98  | 5971.43 | 0.00073            |
| 20     | 37             | 20       | 5939.13  | 6132.62 | 0.00084            |
| 21     | 36             | 17       | 6103.95  | 6302.77 | 0.00053            |
| 22     | 35             | 13       | 6278.15  | 6482.62 | 0.00089            |
| 23     | 34             | 14       | 6462.63  | 6673.09 | 0.00084            |
| 24     | 33             | 10       | 6658.27  | 6875.08 | 0.00054            |
| 25     | 32             | 14       | 6866.11  | 7089.68 | 0.00085            |

MEAN RMS: 0.00072

\*\* TOTAL NUMBER OF LINES : 345 \*\*

Process tables are saved  
File bachesLINE.tbl written to disk> bachesLINE.fits  
Total 1 files written with 0.25 Mbytes  
File bachesORDE.tbl written to disk> bachesORDE.fits  
Total 1 files written with 0.39 Mbytes

Abbildung 34 – Datentabelle der erkannten Ordnungen

Nach erneuter Bestätigung erscheint eine Anzeige der Ordnungen mit der jeweiligen (erkannten) Linienanzahl. Interessant ist für uns hier nur die 34. Ordnung, in der sich die H $\alpha$ -Linie befindet (roter Kasten). Erkannt werden sollten mindestens 14 Linien und die mittlere Genauigkeit der Kalibrierung (RMS-Wert, roter Pfeil) sollte nicht weniger als 0.01Å betragen, denn andernfalls entstünde eine zu große Verfälschung der Ergebnisse, die zur Geschwindigkeitsberechnung des Sternwindes benötigt werden (siehe Abb. 34).

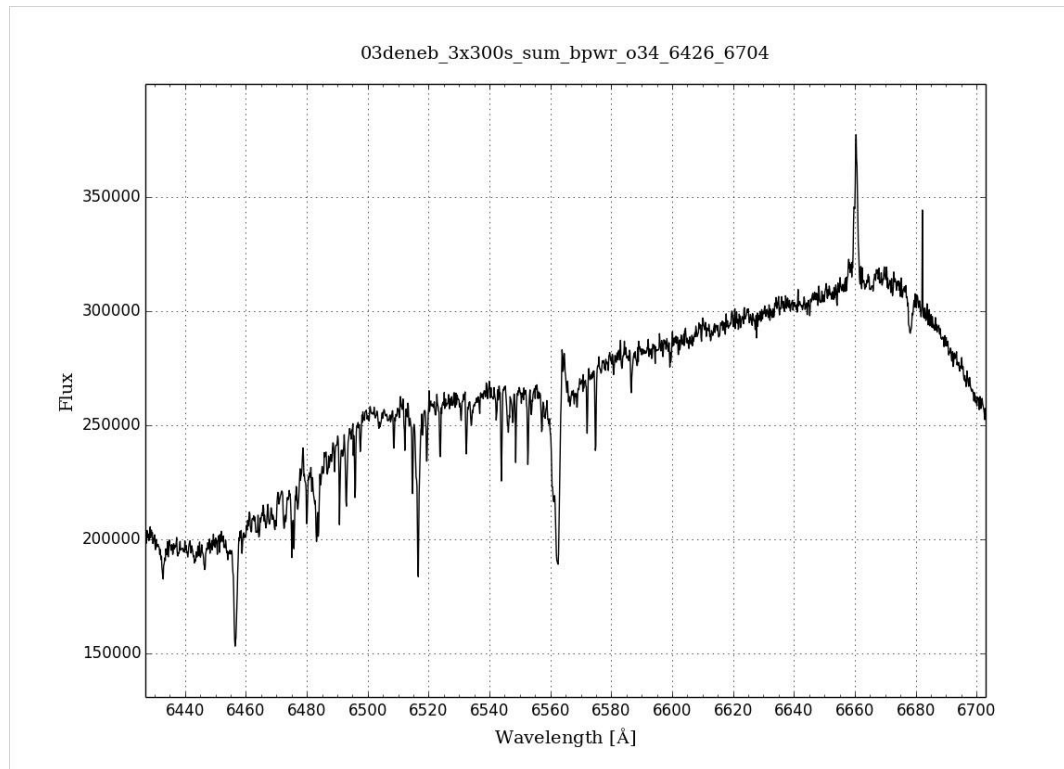
Um letztendlich das Sternspektrum zu kalibrieren muss dieses nur noch in das Programm geladen werden, sodass die zuvor gesammelten Daten über das Thorium-Argon Spektrum auf das Sternspektrum übertragen werden können.



## 11.3 Normierung der Spektren

Zur weiteren Auswertung der Spektren, reichen die erzeugten sogenannten „Plots“, welche man durch die Kalibrierung erhält, nicht aus. Diese Graphen beschreiben die Intensitätsverteilung der Ordnungen.

*Plot der 34. Ordnung*



*Abbildung 35 – Intensitätsverteilung*

An dieser Stelle ist wieder lediglich die 34. Ordnung und somit die H $\alpha$ -Linie von Interesse, doch um diese vergleichbar zu machen, müssen die „Plots“ zuerst normiert werden.

Vor der Normierung wird der Graph zunächst noch zugeschnitten, denn zum Vergleich des P-Cygni-Profiles wird nur ein kleiner Ausschnitt der 34. Ordnung benötigt. Zudem wird das Ergebnis damit genauer und übersichtlicher.

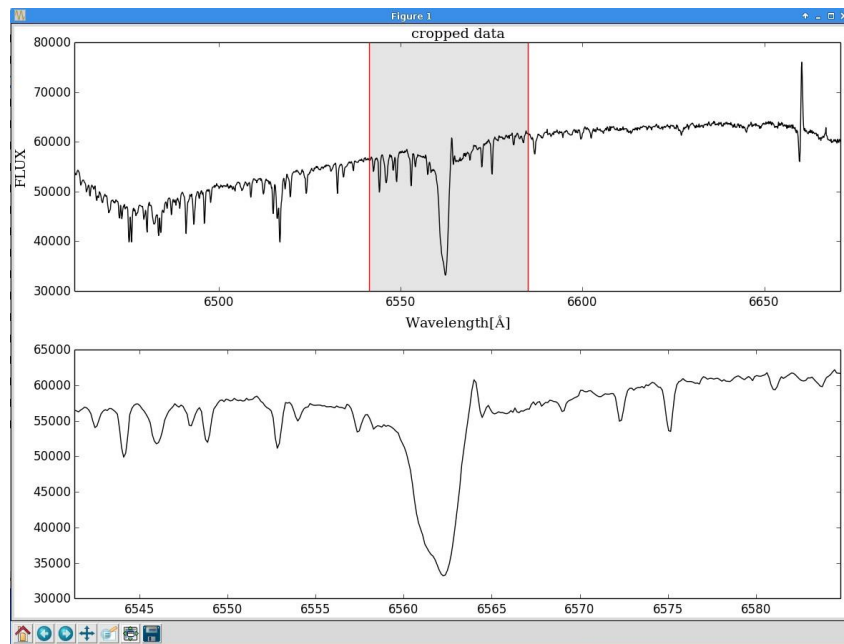


Abbildung 36 – zuschneiden der 34. Ordnung

Das Verfahren der Normierung erzeugt ein Standardniveau des Strahlungsflusses (Flux), das sich auf „1“ befindet. Durch die Normierung wird das Pseudokontinuum des Spektrums entfernt und ein international vergleichbares Ergebnis erzeugt.

Auch hierbei kann das Programm *MIDAS* weiterverwendet werden. Das Normieren erfolgt durch die Abschätzung eines Kontinuums des Spektrums, wobei durch die Glättung des Pseudokontinuums ein gerader Verlauf entstehen kann.

Alle weiteren Berechnungen und Auswertungen werden nun am normierten Spektrum vorgenommen, sodass auch diese zum Vergleich zur Verfügung stehen.

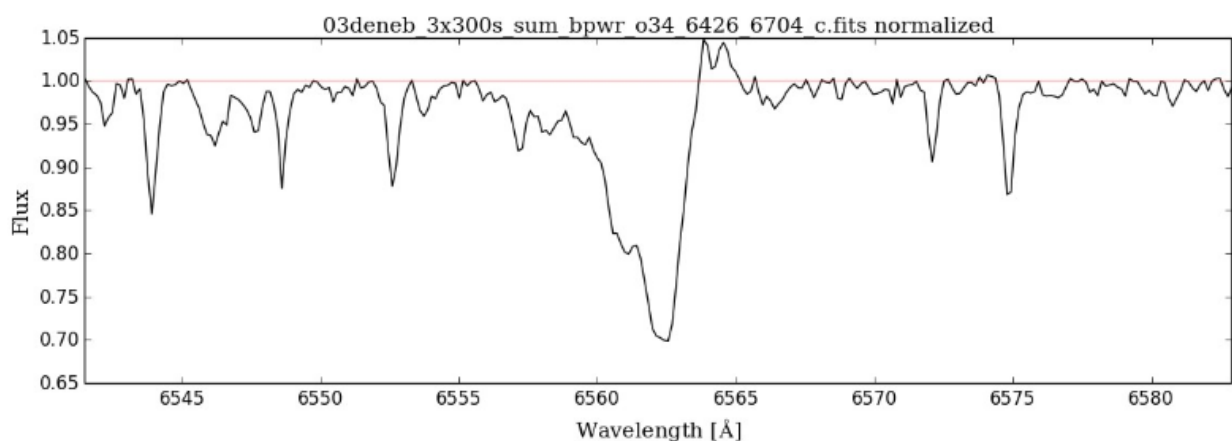


Abbildung 37 – normiertes Deneb-Spektrum

Wie in Abbildung 37 sichtbar, besitzt das Spektrum nun einen geglätteten Verlauf und jegliche Absorptionslinien ausgenommen der  $H\alpha$ -Linie befinden sich unter Flux=1 (blassrote Linie).

# 12 Auswertung der Sternspektren

Die nächsten Schritte werden im Programm *BassProject* durchgeführt. Hier werden alle Spektren erneut zugeschnitten. Der neue Bereich befindet sich zwischen 6541,7Å und 6583,0Å.

Zur weiteren Berechnung wird die Ruhewellenlänge der H $\alpha$ -Linie im Anschluss auf 0, also im Verlauf der X-Achse auf X=0 gesetzt (siehe Abb. 38, 39: roter Pfeil). Dies dient dazu, dass die Ausschläge und Absorptionslinien im P-Cygni-Profil festgelegt werden können und daraufhin einer Wellenlänge zugeordnet werden, durch welche sowohl die Rot- als auch Blauverschiebung errechnet werden können.

Im Anschluss werden nun noch die Spektrenausschnitte nebeneinander angeordnet, um eine gute Ausgangsposition für einen Vergleich zu schaffen.

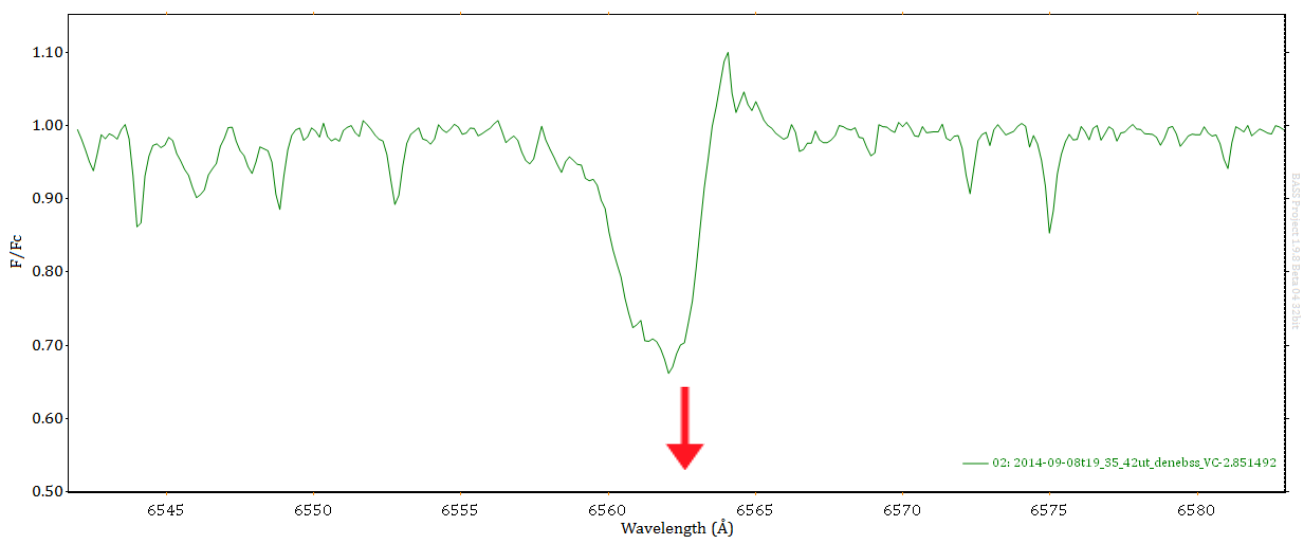


Abbildung 38 – Spektrum mit Wellenlängenbeschriftung

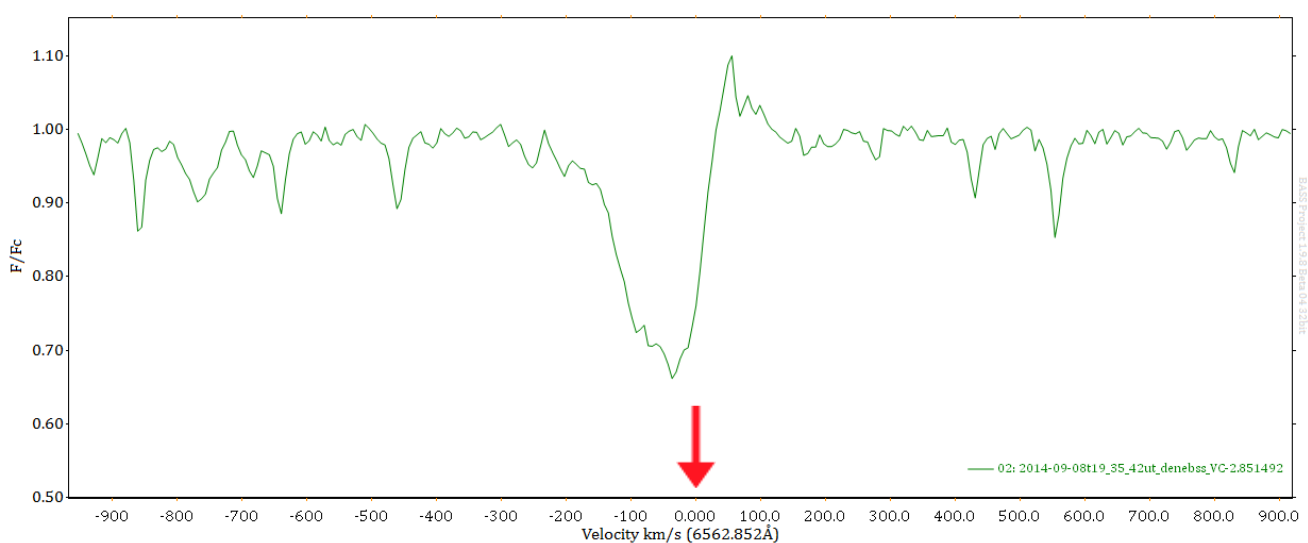
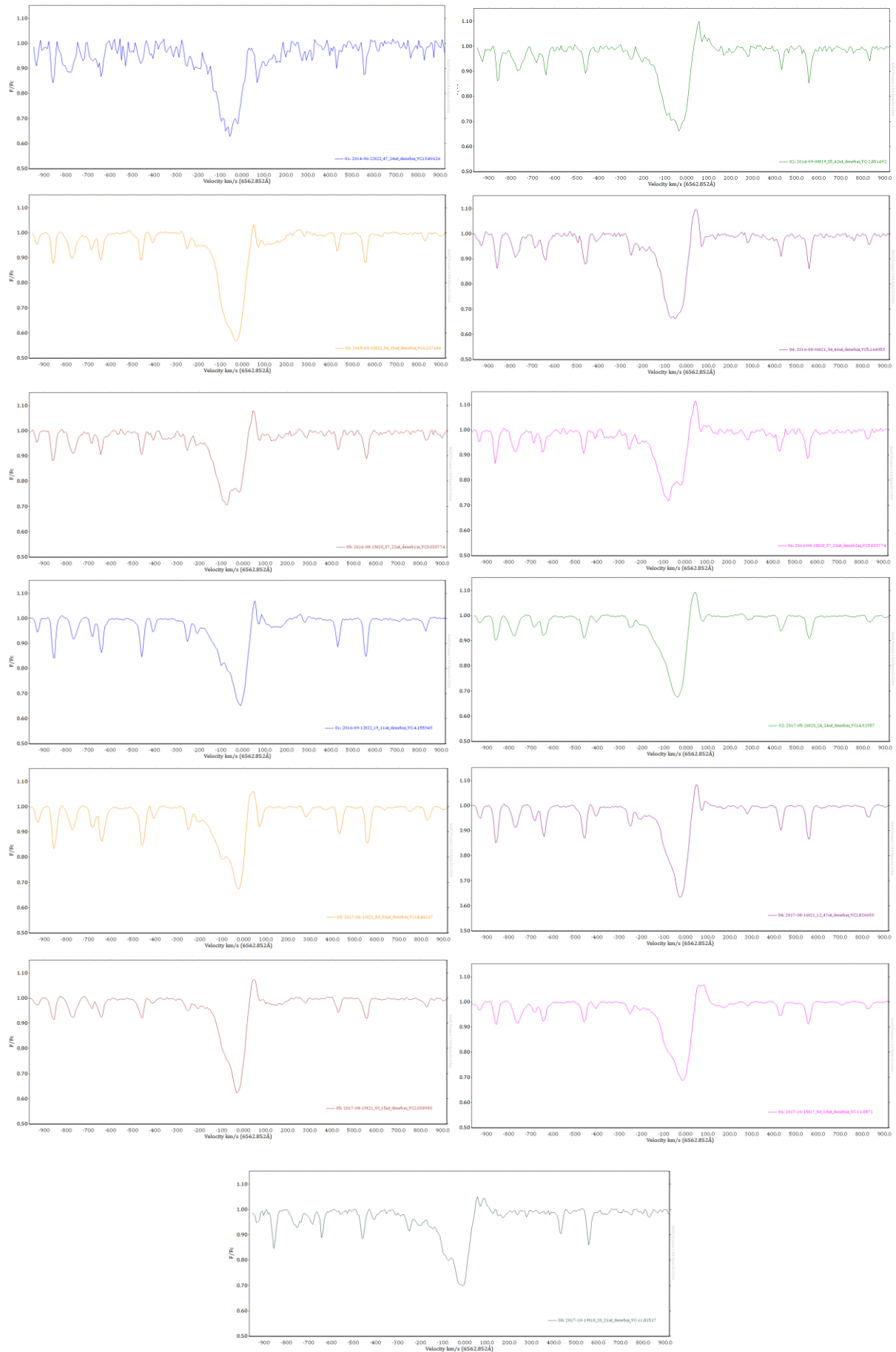


Abbildung 39 – Spektrum mit der Ruhewellenlänge von H $\alpha$  auf X=0

## 12.1 Deneb Spektren im Zeitraum 22.06.2014 - 19.10.2017



## 12.1.1 Datentabelle und Erläuterung

Zusätzlich wurden alle errechneten Werte in einer Datentabelle festgehalten:

| Datum      | Beginn der Aufnahme (UT) | Aufnahmemitte (UT) | Belichtungszeit | VR (km/s) |
|------------|--------------------------|--------------------|-----------------|-----------|
| 22.06.2014 | 22:46:24                 | 22:47:24           | 120s            | 87,31     |
| 08.09.2014 | 19:29:25                 | 19:35:42           | 480s            | 92,34     |
| 02.08.2015 | 22:26:39                 | 22:34:15           | 900s            | 79,54     |
| 06.08.2016 | 21:26:58                 | 21:34:46           | 900s            | 95,08     |
| 15.08.2016 | 20:20:47                 | 20:37:22           | 660s            | 115,65    |
| 15.08.2016 | 20:20:47                 | 20:37:22           | 660s            | 125,25    |
| 12.09.2016 | 22:13:49                 | 22:19:11           | 600s            | 64,91     |
| 26.05.2017 | 23:16:51                 | 23:24:24           | 900s            | 79,08     |
| 10.06.2017 | 21:53:29                 | 21:58:30           | 600s            | 67,20     |
| 16.08.2017 | 21:05:14                 | 21:12:47           | 900s            | 70,40     |
| 19.08.2017 | 21:31:43                 | 21:39:15           | 900s            | 77,71     |
| 15.10.2017 | 17:42:38                 | 17:50:10           | 900s            | 73,60     |
| 19.10.2017 | 18:12:50                 | 18:20:21           | 900s            | 65,37     |

Die Ergebnisse unserer Berechnungen sind rechts als VR-Wert (Geschwindigkeit des Sternwinds) eingetragen. Dieser steht für die Relativgeschwindigkeit der Expansion und liegt bei allen Werten zwischen 64,91km/s und 125,25km/s. Die Werte ergeben sich aus der Berechnung der Endgeschwindigkeit mit der Formel  $v = \pm \frac{\Delta\lambda}{\lambda_s} * c$ , wobei  $\Delta\lambda = \lambda_{Rot} - \lambda_{Blau}$  als Emissionspeak-Absorptionspeak-Differenz.

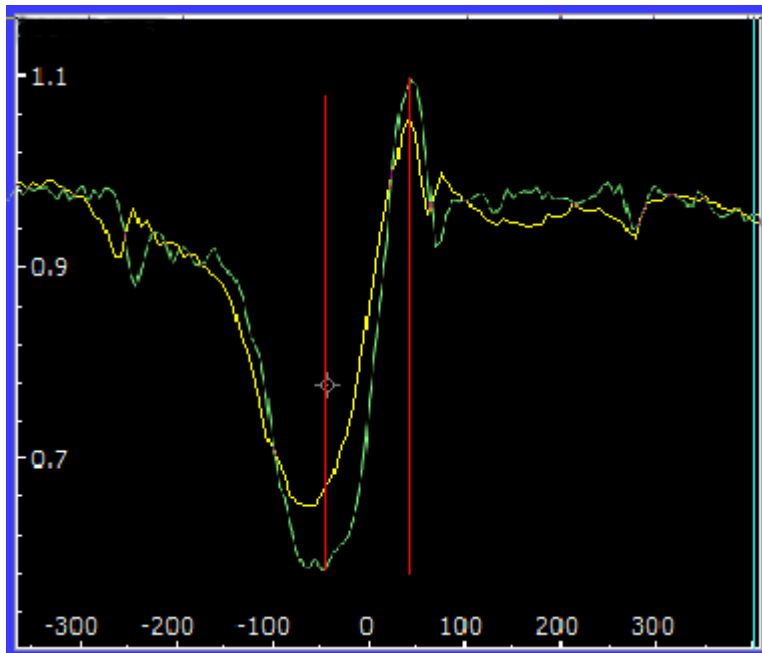


Abbildung 40 – Spektrenüberlagerung

Spektrum, Nr. 50, 1/2016; ISSN 2363-5894,

© Fachgruppe Spektroskopie in der VdS e.V.

Unsere Werte fügen sich weitestgehend in jene Ergebnisse anderer Astronomen ein, was durch Abb. 40 veranschaulicht wird.

Hier wurde eines unserer Sternspektren vom 06.08.2016 (grün) mit einem Spektrum von Siegfried Hold vom 25.08.2014 (gelb) überlagert, um einerseits die Messwertgenauigkeit zu überprüfen, sowie die geringe Variation des Sternwindes bei Langzeitbeobachtung zu veranschaulichen. Wie durch die roten Linien dargestellt, wird hier die Peak-Peak-Differenz gemessen, welche sich bei beiden Spektren nur in geringem Maß unterscheidet.

## 12.2 Variationen im P-Cygni-Profil

Trotz der großen Ähnlichkeit, die alle P-Cygni-Profile unserer Messungen aufweisen, sind auch Ausschläge vorhanden, die sich voneinander abheben. Diese sind einerseits an den Überlagerungen der Spektren, andererseits durch die unterschiedlichen Werte der Sternwindgeschwindigkeitsmessungen zu erkennen. Der Sternwind ist trotz seiner beinahe konstanten Geschwindigkeit veränderlich und es können in unregelmäßigen Abständen „High-velocity absorption“-Ereignis (HVA) eintreten. Diese beschreiben große Massenausbrüche, wodurch der Sternwind verdichtet wird und anhand der Veränderung im Spektrum deutlich wird, dass der Wind rotiert. Die Verdichtung nimmt mit zunehmender Zeit wieder ab und das P-Cygni-Profil nimmt die gewohnte Form an.<sup>48</sup>

Im Zeitraum vom 15.08.2016 bis zum 12.09.2016 scheint sich in unseren Spektren ein solches Ereignis zu finden. Da allerdings nur zwei Spektren aus diesem Zeitraum vorhanden sind, können lediglich Spekulationen getätigt werden.

Die starke Variation des Profils im blauverschobenen Bereich weist deutlich auf einen Massenausbruch hin. Auch bei weiteren Vergleichen der Spektren kann die zusätzlich zu absorbierende Materie als „Verklumpungen“ im Sternwind erfasst werden.

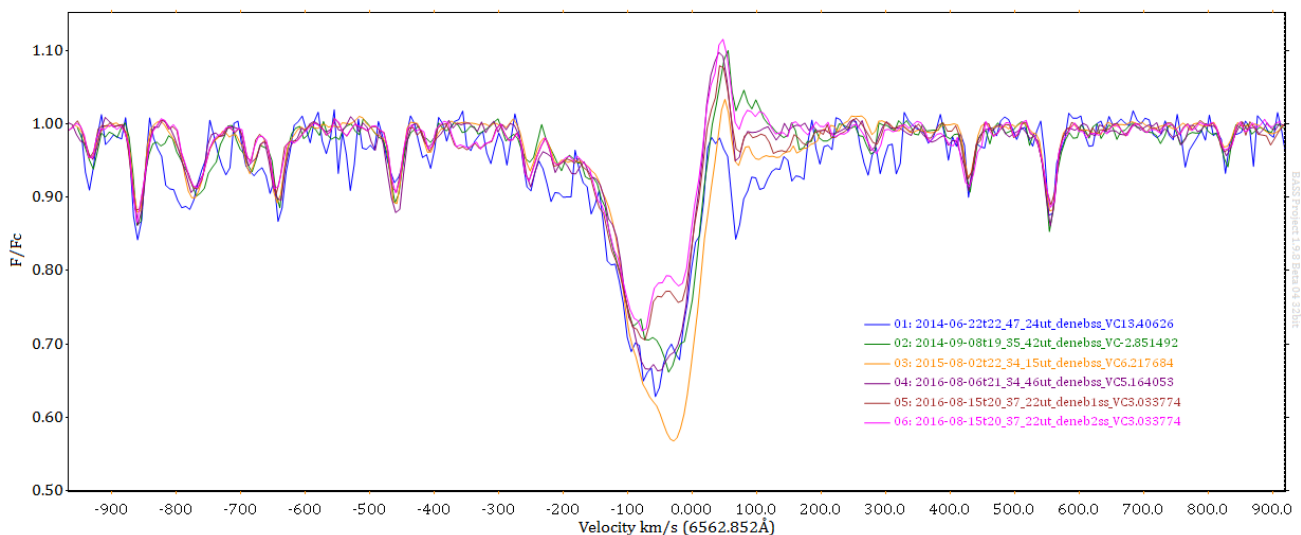


Abbildung 41 – Spektren von 2014-2016

Anhand der Überlagerungen unserer Ergebnisse lässt sich in Abbildung 41 feststellen, dass zwischen 2014 und 2016 einige Massenausbrüche stattgefunden haben. Diese können sich zeigen durch zusätzliche Absorptionseinsenkungen. Besonders die Aufnahmen vom 22.06.2014 (Zusammenstellung der Aufnahmen: 1. Aufnahme, blau) zeigt starke Unterschiede bezüglich der Absorptions- und Emissionslinien, welche ebenfalls auf ein HVA-Ereignis hinweisen.

Abbildung 42 zeigt die Spektren von September 2016 bis Oktober 2017. In diesem Zeitraum scheinen zwar vereinzelt Massenausbrüche erfolgt zu sein, jedoch in geringerem Maße als in den vorangegangenen Jahren. Das Profil um H $\alpha$  bleibt konstant, lediglich die hier blau und grün dargestellten Spektren vom 12.09.2016 und 19.10.2017 weisen vereinzelte Variationen im Absorptionsbereich auf.

<sup>48</sup> Spektrum, Nr. 50, 1/2016; ISSN 2363-5894, © Fachgruppe Spektroskopie in der VdS e.V.



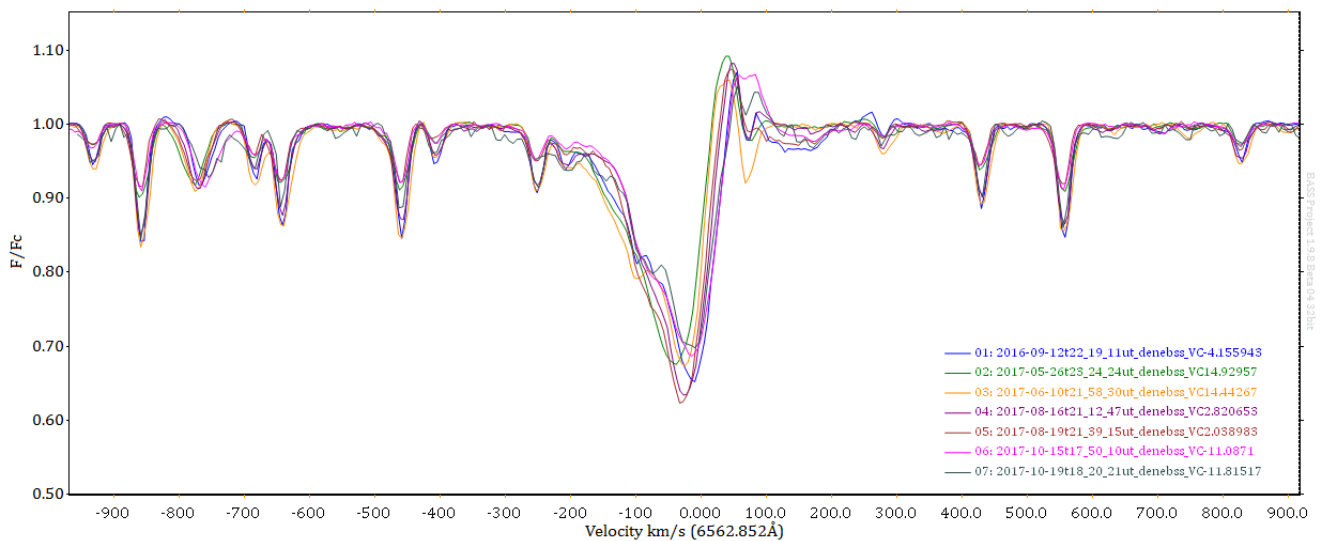


Abbildung 42 – Spektren von 2016-2017

## 12.3 Vergleich mit anderen Langzeitbeobachtungen

Die obigen Zusammenstellungen mehrerer Spektren wurden aus weiteren Langzeitbeobachtungen Denebs entnommen. Die Bilder 2212 bis 2235 (siehe Abb. 43) veranschaulichen ein starkes HVA-Ereignis im Jahr 2001. Alle weiteren Spektren sind zum Großteil ebenso wie unsere ähnlich zueinander. Auch die Beobachtungen Siegfried Holds (Abb. 44) weisen jenes HVA Ereignis Denebs von 2014 auf. Somit fügen sich unsere Messwerte in die Ergebnisse anderer Astronomen ein und können mit diesen verglichen werden. Die Ergebnisse, welche von uns durch unsere Forschungsarbeit erzielt wurden, können somit als Erfolg angesehen werden.



Abbildung 43 – Spektren von 2001 (HVA-Ereignis)

<http://www.univie.ac.at/brite-constellation/wp-content/uploads/2016/02/BRITE-Amateurs-Cygnus.pdf> Zugriff: 17.05.2018

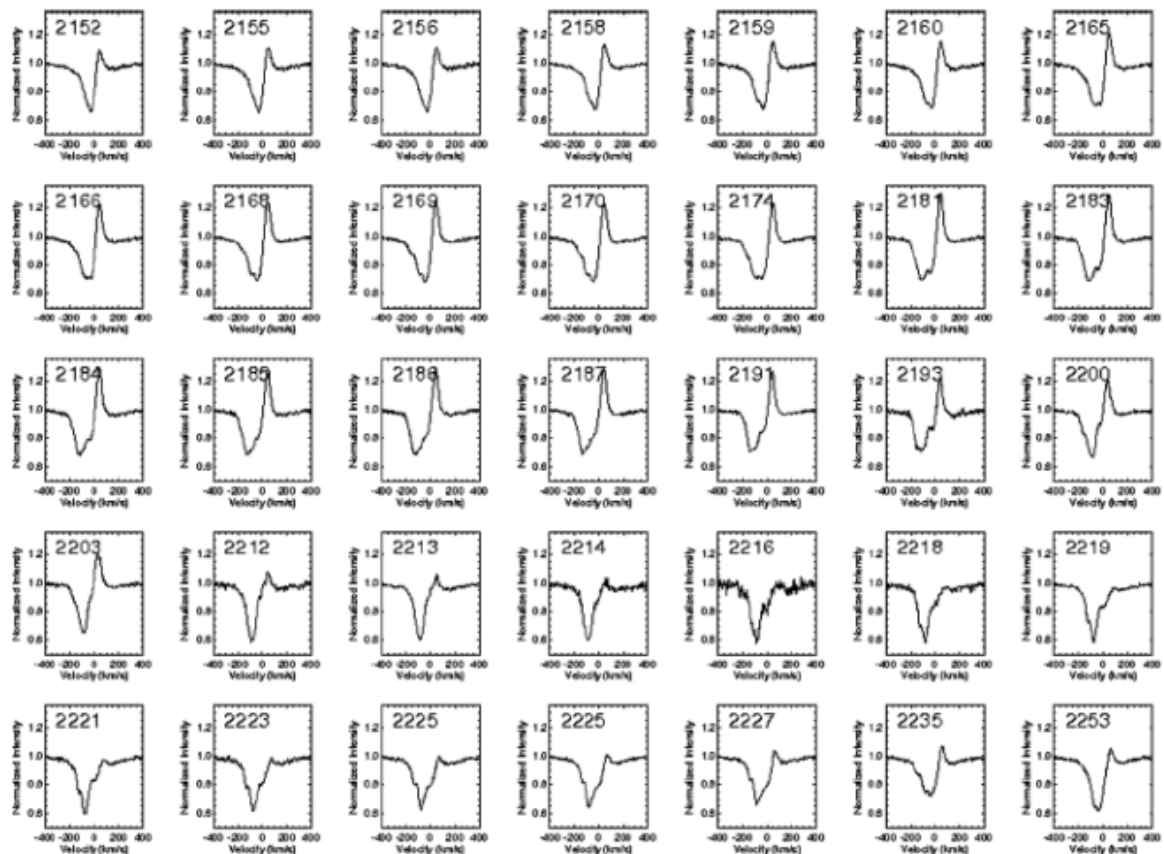


Abbildung 44 – Spektren von Siegfried Hold im Zeitraum vom 25.08.2014 - 30.12.2014

Spektrum, Nr. 50, 1/2016; ISSN 2363-5894, © Fachgruppe Spektroskopie in der VdS e.V.

# 13 Fehlerdiskussion

Trotz jeglicher Vorsichtsmaßnahmen und Genauigkeit in den verschiedenen Arbeitsschritten, können Ungenauigkeiten in den Aufnahmen oder Ergebnissen unserer Arbeit auftreten. Im Folgenden sind einige Fehlerquellen angeführt.

## 1. Entfernung des Sterns

Da sich Deneb in einen Abstand von mehreren tausend Lichtjahren zur Erde befindet, wird das Licht auf seinem Weg von Staubwolken oder anderen Einflüssen gestört (interstellare Materie) und kann somit verändert bei uns ankommen.

## 2. Seeing, Störlicht, Transparenz

Die drei Hauptfaktoren, welche dann noch einen Einfluss darstellen können, sind die Luftunruhe, auch *Seeing* genannt, die Lichtverschmutzung bzw. das *Störlicht* und zudem die Klarheit oder auch *Transparenz*. Alle drei Faktoren sind nicht beeinflussbar und müssen bei der Arbeit toleriert werden.

## 3. Wetterverhältnisse

Die Aufnahmen müssen nun einmal draußen gemacht werden, wobei das technische Equipment (Teleskop, Spektrograf), ausgenommen der kontrolliert gekühlte CCD Chip der Kamera, nicht vor Wettereinflüssen geschützt wird. Die mögliche Veränderung, auch wenn diese nur im Mikrometerbereich stattfindet, hat Auswirkungen auf die Aufnahmen, doch auch diese sind gering.

## 4. Unterschiedliche Technik

Da auch wir unsere Ergebnisse mit denen anderer Astronomen vergleichen wollen, ist es denkbar ungünstig, dass jeder anderes Equipment benutzt. Zwar ähneln sich diese in ihrer Bauweise, jedoch sind niemals exakt die gleichen Bedingungen gegeben.

## 5. Auswertungsungenauigkeiten

Da jegliche Etappen der Auswertung unterschiedlich erarbeitet werden, können Abweichungen entstehen. Besonders der Kalibrierungsvorgang, bei dem kleinste Veränderungen der Parameter ein verändertes Ergebnis hervorrufen und ebenso der Normierungsvorgang, welcher durch die individuelle Bearbeitung Unterschiede erzeugt, sind potentielle Fehlerquellen. Auf instrumentelle Einflüsse muss jedoch nicht mehr geachtet werden, da unsere Ergebnisse sich lediglich auf die H $\alpha$ -Linie des normierten Spektrums und nicht auf das Pseudokontinuum beziehen.

## 5.1 Normierungsfehler

Zur Veranschaulichung der Fehler, die durch die Normierung entstehen können, sieht man hier in Abbildung 39 die zwei Graphen einer zweimal durchgeführten Normierung eines Spektrums.

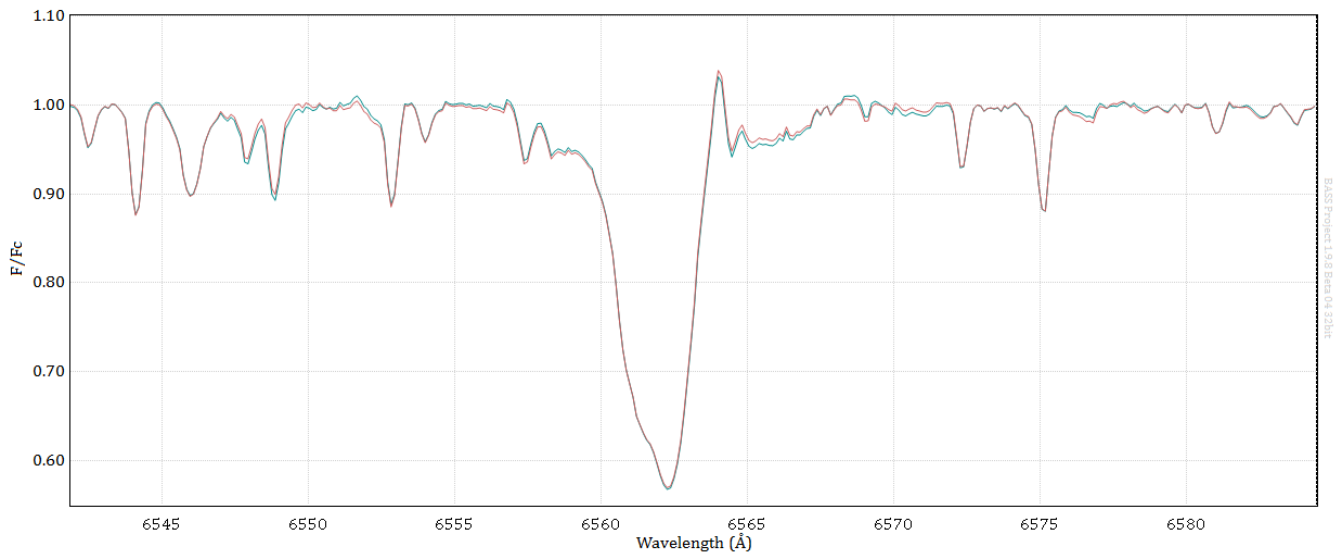


Abbildung 39 – Ergebnis einer zweimal durchgeführten Normierung

Zwar gehören beide zur gleichen Aufnahme, sind aber durch den Normierungsvorgang unterschiedlich verändert worden, was die Messergebnisse beeinflusst.

Da keine weiteren Alternativen vorhanden sind und jedes Spektrum seinen eigenen individuellen Verlauf besitzt, können solche Fehler nicht eliminiert werden. Es steht uns leider kein optimiertes Verfahren zur Verfügung, durch welches diese Abweichungen ausgemerzt werden könnten.

## 14 Danksagung

Bedanken wollen wir uns zunächst bei Herrn Michael Winkhaus, welcher durch sein jahrelanges Engagement die Sternwarte, an der wir arbeiten durften, aufgebaut hat. In diesem Zusammenhang danken wir natürlich auch allen, die dies durch finanzielle und anderweitige Unterstützung möglich gemacht haben. Ohne diese Voraussetzungen wäre die Möglichkeit des Forschens nicht vorhanden gewesen und somit hätte unsere Forschungsarbeit nicht entstehen können.

Am Wichtigsten jedoch ist der Dank an unserem Kursleiter Bernd Koch. Er lehrte uns alle relevanten Grundlagen, stand uns in jeder Phase der Entwicklung unseres Projektes bei und wurde nie müde unsere Fragen zu jeder Zeit zu beantworten.

Ohne seine Unterstützung hätte diese Projektarbeit nicht auf diese Weise zustande kommen können.

# 15 Abschlusserklärung

Hiermit versichern wir, dass wir diese Arbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die von uns angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Projektarbeit, die im Wortlaut oder dem Inhalt aus anderen Werken entnommen wurden, in jedem einzelnen Fall mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht haben.

Wir sind damit einverstanden, dass die von uns verfasste Verschriftlichung der (schulinternen) Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Juliane Neußer

Leon Deveaux

Wuppertal, den 30.05.2018

Wuppertal, den 30.05.2018

Für eventuelle Rückfragen zu unserer Arbeit stehen wir ihnen gerne unter den E-Mail-Adressen zur Verfügung.