Carl-Fuhlrott-Gymnasium

Jung-Stilling-Weg 45, 42349 Wuppertal

Nordrhein-Westfalen

Abgabedatum: 07.04.2017

Ermittlung der Zusammensetzung und Elektronentemperatur des Orionnebels – Spektroskopie eines Emissionsnebels

Besondere Lernleistung im Fach Physik / Astronomie

Axel Könekamp

Resedastraße 42

42369 Wuppertal

09.08.1999

axel.koenekamp@gmail.com

Jahrgangsstufe 12 / Q2, Jahr 2017

Projektbetreuer: Bernd Koch

1 Einleitung

Die Astronomie ist die älteste Wissenschaft der Menschheit und ist bereits im alten Mesopotamien bekannt. Auch die alten Griechen befassten sich bereits mit der Vermessung der Sterne, um die Zeit zu bestimmen.

So habe auch ich mich schon immer für die Astronomie und die Faszination des Weltraums begeistert. Durch den Erwerb eines eigenen Teleskops vor einigen Jahren konkretisierte sich dieses Interesse.

Nun gibt es an meiner Schule für Schüler der Qualifikationsstufe I das Angebot an einem Projektkurs teilzunehmen. Das Carl-Fuhlrott-Gymnasium bietet mit seinem Schülerlabor für Astronomie die einmalige Möglichkeit mit professioneller Ausrüstung den Sternenhimmel zu beobachten und untersuchen zu können.

Durch die Konkretisierung der Vorstellung den Weltraum einmal selbst zu untersuchen, habe ich mich auch immer mehr für die Astrophysik hinter dem sonst so mysteriösem Universum begeistert.

So habe ich mich entschlossen, nach Absprache mit meinem Betreuungslehrer Bernd Koch, den Orionnebel zu untersuchen. Dabei habe ich den Fokus vor allem darauf gelegt, seine Zusammensetzung und Elektronentemperatur zu ermitteln.

Das Thema Spektroskopie haben wir bereits in Leistungskurs Physik in der Schule behandelt und damit waren Grundlagen zum Thema bereits gelegt. Um den Orionnebel auf seine Zusammensetzung zu untersuchen, muss man diesen spektroskopieren.

Das bedeutet, man bedient sich der Eigenschaft des Welle-Teilchen-Dualismus des Lichts und das daraus resultierende Phänomen der Interferenz am Spalt. Dieses Phänomen wird nun genutzt, um das Licht in seine Spektralfarben „aufzuspalten“. Anhand eines solchen Spektrums kann man Rückschlüsse auf die atomspezifischen Farben und daraus resultierend wiederum Rückschlüsse auf die Zusammensetzung und Dichte des Orionnebels ziehen.

Mit Hilfe der Teleskope des Schülerlabors Astronomie des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums konnte ich zusammen mit einem ebenfalls von der Schule zur Verfügung gestellten Spektrographen den Orionnebel spektroskopieren.

Von meiner Arbeit erhofft habe ich mir zum einen einmal selbstständig an einem längerfristigen Projekt eigenständig zu arbeiten, andererseits aber auch ein für mich sehr interessantes Thema eigenständig zu erforschen

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 2
Inhaltsverzeichnis 3
2 Kurzfassung 5
3 Theorie 6
3.1 Orionnebel 6
3.1.1 Emissionsnebel 6
3.1.2 Sternenentstehung im Orionnebel 7
3.2 Trapez 8
4 Deep-Sky-Fotographie 9
4.1 Gerätebeschreibung 9
4.1.1 Teleskop 9
4.1.2 Fotoapparat 9
4.2 Aufnahmen 10
4.3 Bearbeitung 11
4.3.1 Stacking mit Deep Sky Stacker 11
4.3.2 Nachbearbeitung in Photoshop 12
4.4 Ergebnis 15
5 Spektroskopie 16
5.1 Theorie 16
5.1.1 Spektroskopie 16
5.1.2 Elektronentemperatur 18
5.2 Aufbau I: Spektroskopie mit dem DADOS-Spaltspektrograph 19
5.2.1 Gerätschaften 19
5.2.2 Experimenteller Aufbau 22
5.2.3 Durchführung 24
5.2.4 Bearbeitung 26
5.2.5 Auswertung der Elektronentemperatur 30

5.3 Fehleranalyse 34
5.3.1 Ungenauigkeiten der Aufnahmen 34
5.3.2 Extinktion 35
5.3.3 Quanteneffizienzkurve 35
5.3.4 Schlussfolgerung 36
5.4 Aufbau II: Hochauflösende Echelle Spektroskopie 37
5.4.1 Gerätschaften 37
5.4.2 Experimenteller Aufbau 39
5.4.3 Durchführung 41
5.4.4 Bearbeitung 43
5.4.5 Auswertung der Elektronentemperatur 49
6 Ergebnisse 51
6.1 Zusammensetzung 55
6.1.1 Verbotene Übergänge 55
6.2 Elektronentemperatur 55
6.2.1 DADOS-Spaltspektrograph mit 200Linien/mm Gitter 55
6.2.2 BACHES Echelle Spektrograph 56
6.3 Vergleich der Spektren 57
7 Danksagung 58
8 Literaturverzeichnis 59
8.1 Verwendete Software 59
9 Quellenverzeichnis 60
10 Abbildungsverzeichnis 61

2 Kurzfassung

Zum Ziel meiner Besonderen Lernleistung habe ich mir die Erforschung des Orionnebels oder auch Messier-Objekt 42 gemacht. Als Schüler des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums habe ich die Möglichkeit im Schülerlabor Astronomie auf dem Dach des Gebäudes zu arbeiten. Zusammen mit meinem Projektbetreuer habe ich mir Gedanken über meine Möglichkeiten gemacht und bin auf das Ergebnis gekommen, dass ich den Orionnebel spektroskopieren möchte und dadurch Rückschlüsse auf seine Zusammensetzung und Elektronentemperatur zu ziehen.

Mit einem Spektrographen befestigt an einem Teleskop des Schülerlabors, konnte ich an einem klaren Abend das Spektrum des Orionnebels aufnehmen. Nach weiterer Recherche und eigenständige Einarbeitung in das Thema, konnte ich das Spektrum dann weiter auswerten.

Durch eine Kalibrierung mit einem bereits bekannten Spektrum konnte ich die Zusammensetzung des Nebels analysieren.

Außerdem konnte ich durch ein bereits bekanntes und erstmals von Grigor Gurzadyan angewandtes Verfahren die Elektronentemperatur und die Dichte des Nebels errechnen, indem man spezifische Intensitäten der Stickstofflinien in Relation setzt.

Mein Ergebnis besagt, dass der Orionnebel hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium besteht, aber auch Spuren von mehrschaligen Atomen enthält. Außerdem habe ich eine Elektronentemperatur von ca. 12000K errechnet und habe diese zuletzt noch mit einer Arbeit von Jessica Anne Harris verglichen.

In einem zweiten Versuch habe ich dann mit dem neuen CDK 20“ Teleskop auf der Schülersternenwarte ebenfalls den Orionnebel spektroskopiert und so mein erstes Ergebnis verbessert.

3 Theorie

3.1 Orionnebel

Der Orionnebel ist mit einer Winkelausdehnung von ca. einem Grad und einer scheinbaren Helligkeit von 3,7 mag bereits mit bloßem Auge sichtbar. Unterhalb des Gürtels des Orion erkennt man ein „Wölkchen“[1], das man in der Geschichte des Orionnebels für verschiedenste Objekte hielt. Man vermutet, dass arabische Astronomen den Orionnebel bereits schon vor hunderten von Jahren beobachteten und ihn daher auch einen Namen gaben. Sie nannten ihn „Na’ir al Saif“ (Der Helle im Schwert), dieser Name könnte jedoch auch den im Süden gelegenen Stern Iota Orionis bezeichnen. Von einem europäischem Astronomen erstmals ca. 1610 entdeckt und dokumentiert von Nicolas-Claude Fabri de Peiresc (*1580 in Belgentier †1637 in Aix-en-Provence). Durch die Beobachtung des Orionnebels von Charles Messier am 4. März 1769 und die darauf folgende Aufnahme in seinen Messier-Katalog entstand die Bezeichnungen M42. Für die Astronomie hat der Orionnebel schon immer eine große Rolle gespielt. Er ist das erste Objekt, an dem man eine astronomische Fotografie vornehmen konnte. Damit zeigt das erste Astrofoto der Geschichte den Orionnebel. Bis 2007 nahm man noch die Vermutung an, dass der Orionnebel 1.500 Lichtjahre entfernt ist. Heute weiß man, durch eine exakte parallaktische Entfernungsmessung mit dem „Very Long Baseline Array“, dass der Orionnebel nur etwa 1.350 Lichtjahre entfernt ist.

Abbildung 1 Zeigt die erste, von Andrew Ainslie Common angefertigte, Astrofotografie im Jahre 1883

3.1.1 Emissionsnebel

Als Emissionsnebel (aus dem Lateinischen von „emittere“ = aussenden / herauslassen) bezeichnet man die Nebel in der Astronomie, die selbst Licht aussenden. Das Gegenteil wäre der Reflexionsnebel, der lediglich eintreffendes Licht reflektiert. Dieses Emittieren des Nebels entsteht durch die im Inneren des Nebels befindlichen Sterne. Im Falle des Orionnebels sind das die später noch genauer beschriebenen Sterne des Trapezes im Zentrum des Orionnebels. Diese Sterne strahlen Ionisationsstrahlung aus, welche das Gas (hauptsächlich Wasserstoff) des Orionnebels ionisiert und die Wasserstoffatome sich wieder rekombinieren lassen. Dieser Prozess setzt dann überschüssige Energie in Form von Photonen frei, welche

[1] https://de.wikipedia.org/wiki/Orionnebel

dann ca. 1.350 Jahre später die Erde erreichen und wir so den Orionnebel in seinen Farben sehen.

3.1.2 Sternenentstehung im Orionnebel

Ein Nebel ist, um es zu vereinfachen, nicht mehr, als eine Anhäufung von kleinen Teilchen und Partikeln. Nun wirkt eine Kraft zwischen all diesen Teilchen, die Gravitation. Dadurch ziehen sich nun immer mehr und mehr Teilchen zusammen auf einen Punkt, dabei bringen diese einen Impuls mit sich, der diese kleine Kugel zum Rotieren bringt.

$$F_G = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Die Stärke der Gravitation ist abhängig von der Masse der sich jeweils anziehenden Objekte.

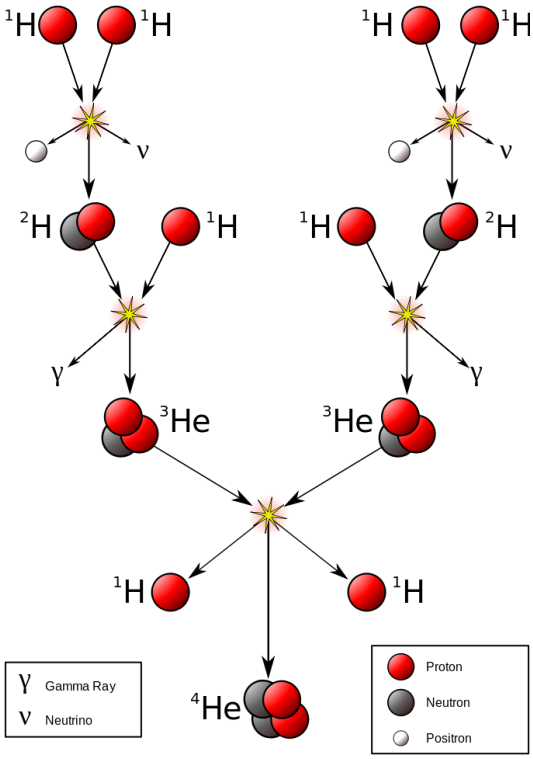

Abbildung 2 Zeigt die stellare Kernfusion von Wasserstoff (H) bis zum Helium (HE)

Wenn die Staubkugel jetzt immer mehr Teilchen anzieht und sich die Masse dieser Kugel erhöht, zieht diese Kugel immer mehr Teilchen und Partikel an. Es entsteht eine riesige Kugel aus Staub und Materie. Wenn nun eine Dichte von *fünftausend Wasserstoffmolekülen pro Kubikzentimeter* [2]vorhanden ist, dann setzt die Kernfusion eines Sterns ein und ein neuer Stern ist geboren. Im Inneren des Sterns werden nun Wasserstoffatome durch den enormen Druck im inneren des Sterns und die daraus resultierende Temperatur fusioniert. Das bedeutet zwei Wasserstoffatome werden fusionieren. Dies resultiert aus der Massendifferenz der Wasserstoffatome und der Heliumatome. Laut Einstein'scher spezieller Relativitätstheorie gilt laut der Äquivalenz von Masse und Energie:

$$E = m * c^2$$

Die Lichtgeschwindigkeit, bezeichnet mit „c", bleibt immer gleich und ist eine Naturkonstante. Daher muss, wenn die Addition der Massen von vier Wasserstoffatomen geringer als die eines

[2] http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/news/2014/kritische-dichte-fuer-die-sternentstehung/

Heliumatoms ist, in Energie ausgestrahlt werden. Daraus folgt die abgestrahlte Energie der Sonne. Im Falle der Sonne beträgt sich der Massenverlust jährlich auf ca. $1{,}3 * 10^{17} Kg$.

3.2 Trapez

Stern	**Spektralklasse**	**Sichtbare Helligkeit**	**Sternsystemtyp**
θ^1 Orionis A (V 1016 Ori)	B1	6,7 mag	Doppelstern
θ^1 Orionis B (BM Ori)	B0	8,0 mag	Vierfachstern
θ^1 Orionis C	O6	5,1 mag	Doppelstern (Hellster Stern im Trapez)
θ^1 Orionis D	B0,5	6,7 mag	Doppelstern

Das Trapez ist die Bezeichnung der Astronomie für die vier hellsten und auch für die Ionisierung des Orionnebels hauptsächlich zuständigen Sterne. Bestehend aus vier Sternen die, wie auch der Name schon nahe legt, in einem Trapez angeordnet sind. Die Sterne im Zentrum des Orionnebels sind circa 300.000 Jahre alt und haben eine mittlere Entfernung von circa 1.350 Lichtjahren zur Erde. Untereinander sind die Sterne circa 20 Lichtjahre voneinander entfernt. Erstmals von Nicolas Claude Fabri de Peiresc entdeckt wurden zunächst nur drei Sterne im Trapez. Fälschlicher Weise wurde dies durch den Astronomen Galileo Galilei im 17. Jahrhundert und durch Christiaan Huygens ebenfalls im 17. Jahrhundert auch noch bestätigt, dass das Trapez nur aus 3 Sternen besteht. Diese falsche Beobachtung entstand dadurch, da die Sterne θ^1 Orionis A und θ^1 Orionis D so nahe beieinander liegen und diese durch die damaligen noch benutzten Fernrohre nicht differenziert werden konnten. Durch diese falsche Beobachtung galt bis ins 19. Jahrhundert Christiaan Huygens als der Beobachter des Trapezes. Jedoch entdeckte Abbe Jean Picard bereits einen vierten Stern im Inneren des Orionnebels, seine Entdeckung wurde zur seiner Zeit jedoch nicht anerkannt. Heute gilt er als der Entdecker des Trapezes im Orionnebel.

4 Deep-Sky-Fotographie

4.1 Gerätebeschreibung

4.1.1 Teleskop

4.1.1.1 Pentax 75-Refraktor

Der Pentax Refraktor ist an allen der sieben Stationen des Schülerlabors am Carl-Fuhlrott-Gymnasium vertreten. Durch die Verwendung von drei hochauflösenden Linsen ist der Pentax-Refraktor unschlagbar in der Preiskategorie und für die Astrofotografie optimal geeignet. Verwendet wurde der Pentax-Refraktor, um ein hochauflösendes Astrofoto des Orionnebels anzufertigen.

4.1.2 Fotoapparat

4.1.2.1 Canon DSLR Kamera

Abbildung 3 Aufnahme des Hantelnebels ohne Astromodifikation

Abbildung 4 Aufnahme des Hantelnebel mit Astromodifikation

Abbildung 5 Canon EOS 450 D

Die Spiegelreflexkamera Canon Eos 450D ist eine moderne DSLR-Kamera und wird in dem Schülerlabor Astronomie am CFG mehrfach vertreten. Sie ist optimal für hochauflösende Fotografien und tolle Farb-Bilder und kann zudem auch noch vielseitig in der Astronomie verwendet werden. Bei meiner Arbeit habe ich die DSLR Kamera verwendet, um ein hochauflösendes Farbbild des Orionnebels aufzunehmen. Die DSLR ist in diesem Fall modifiziert. Bei dieser Modifikation handelt es sich um einen Filter der zwischen dem Sensor und dem Objektiv eingefügt wird. Dieser Filter

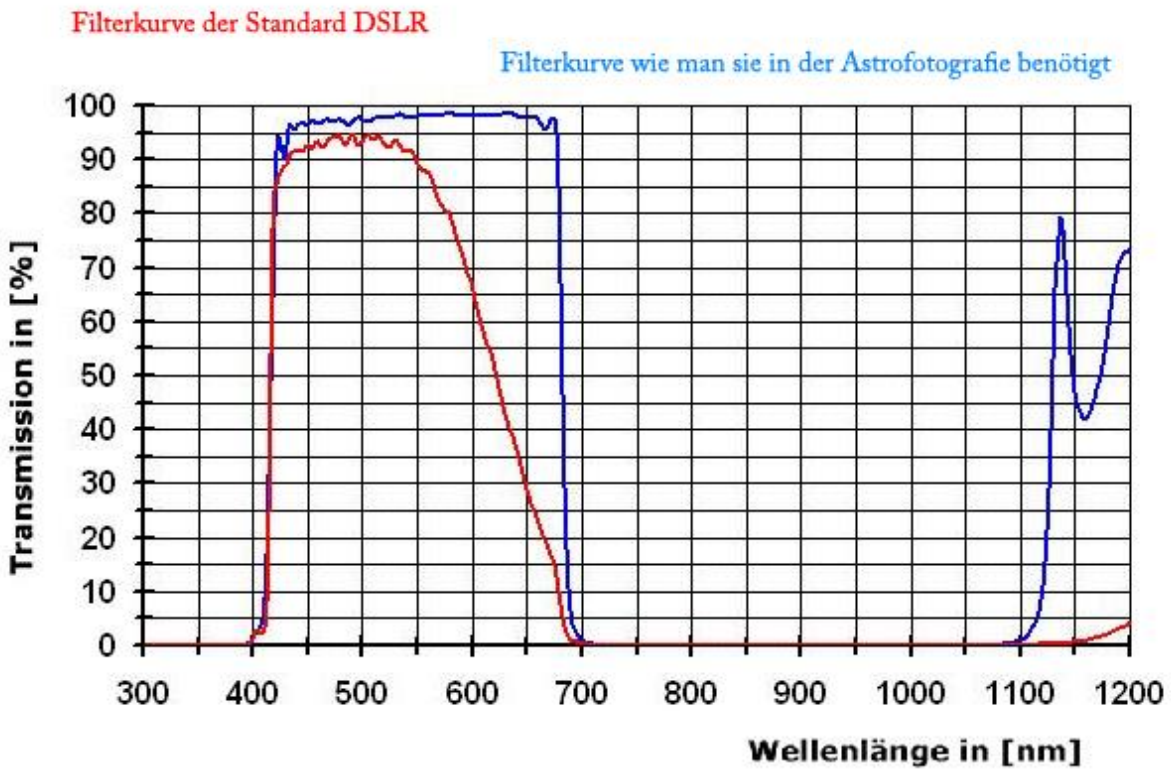

Abbildung 6 Empfindlichkeitskurve einer DSLR Kamera mit Astromodifikation (blau) und ohne Astromodifikation (rot)

verstärkt die Kamera in der Fähigkeit das Licht der Hα-Linie aufzunehmen. Da der Orionnebel vermutlich wie die meisten Nebel auch hauptsächlich aus Wasserstoff besteht, ist diese Modifikation von großem Vorteil. Abbildung 5 zeigt nun die Empfindlichkeit der DSLR-Kamera. In Rot die einer nicht modifizierten Kamera und in Blau die einer modifizierten Kamera für die Astrofotografie. Man sieht deutlich wie der Bereich um 600-700 nm einen höheren Transmissionswert hat, als bei einer nicht modifizierten. Und genau dieser Bereich entspricht dem größten Bereich in dem ein Emissionsnebel strahlt. Also ist die Modifikation sehr geeignet für eine Fotografie des Orionnebels.

4.2 Aufnahmen

Aufgenommen habe ich den Orionnebel mit der Canon Eos 450D DLSR-Kamera, angebracht an dem Pentax 75mm Refraktor mit einem 0,8x-Reducer. Um das Stadtlicht und damit vor allem das Licht von Quecksilber- und Natriumdampflampen heraus zu filtern, habe ich einen IDAS PLS-P2-Filter verwendet. Dieser absorbiert Licht in Wellenlängen der Stadtlichter. Insgesamt habe ich 38 mal 25 Sekunden belichtet, um die Sterne im Inneren des Orionnebels

nicht überbelichtet darzustellen. Des Weiteren habe ich zehn Aufnahmen á zehn Sekunden gemacht.

Abbildung 7 Einzelaufnahme; 10Sekunden

Abbildung 8 Einzelaufnahme; 25Sekunden

4.3 Bearbeitung

4.3.1 Stacking mit Deep Sky Stacker

Bei dem Verfahren des Stacken von Bilder („stacken“ Englisch- stapeln) stapelt man mehrere Bilder mit demselben Ausschnitt übereinander und mittelt zu jedem Pixel einen Mittelwert. Dies hilft dabei, mehr Details und Schärfe zu bekommen. Besonders hilfreich bei Deep-Sky-Fotographie, da man hier versucht sehr lichtschwache Objekte zu fotografieren. Der zweite und viel wichtigere Vorteil ist, dass man das Kamerarauschen durch Mitteln verringert. Somit kann man in weiterer Nachbearbeitung die Details sichtbarer machen. Um die Bilder des Orionnebels zu stacken, habe ich die Software Deep-Sky-Stacker verwendet, da sie sehr benutzerfreundlich ist und gute Ergebnisse liefert.

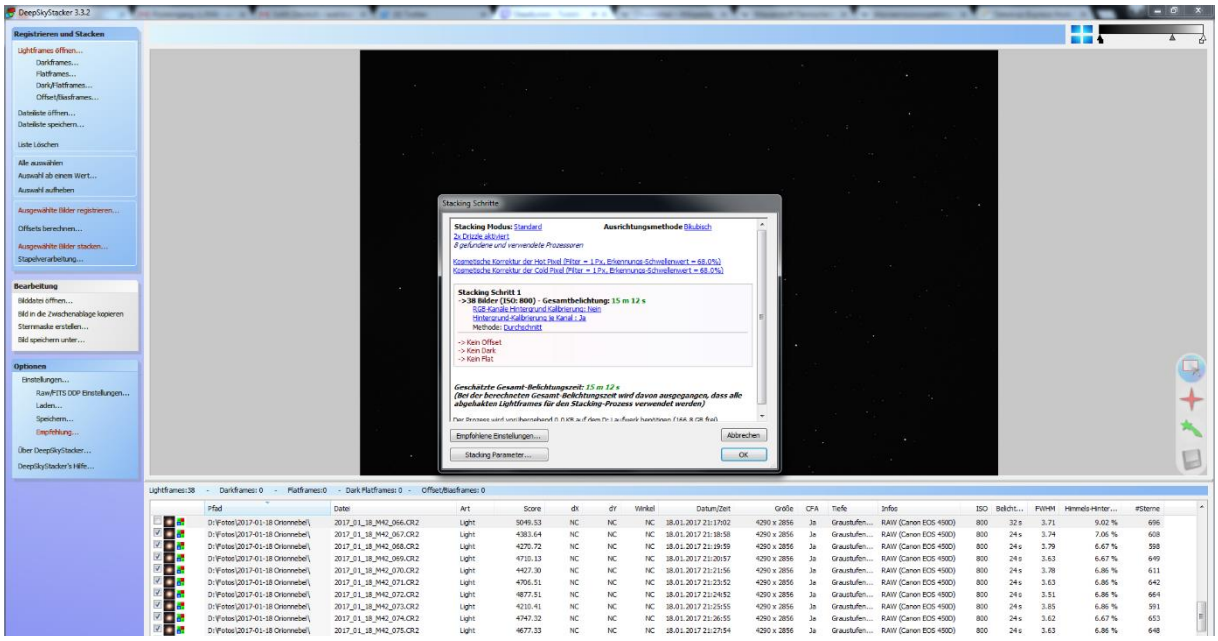

Abbildung 9 Stackingparameter innerhalb Deep-Sky-Stacker; 38 Lights; 0Darks; 0Flats; 0Bias

Abbildung 10 10 Aufnahmen á 10Sekunden gestackt

Abbildung 11 38 Aufnahmen á 25 gestackt

4.3.2 Nachbearbeitung in Photoshop

Nachdem ich alle 48 Aufnahmen gestackt hatte, habe ich mich mit dem wichtigsten Schritt in der Deep-Sky-Fotographie beschäftigt, der Nachbearbeitung. Diese habe ich vollständig in Photoshop CS3 vorgenommen. Zuerst habe ich das Histogramm des Bildes optimiert, um damit mehr Helligkeit für dunklere Partien in den äußeren Bereichen des Nebels besser darstellen zu können. Dies geschieht in Photoshop mit der Tastenkombination Strg + L.

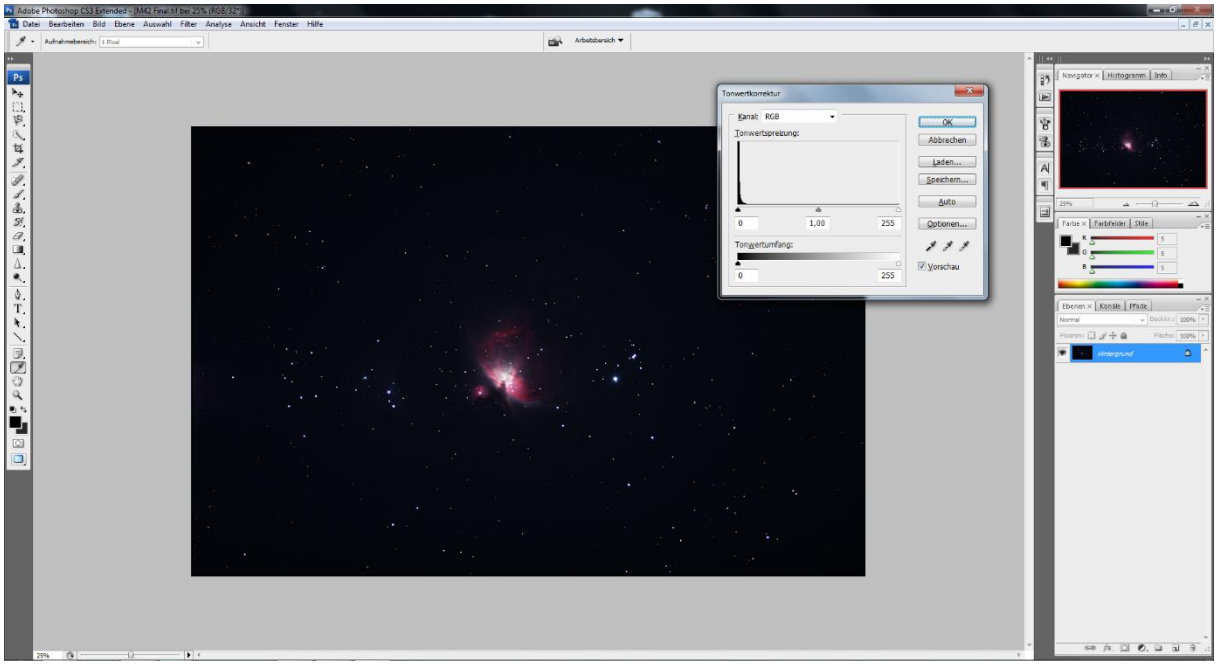

Abbildung 12 Histogramm-Einstellungen innerhalb Photoshop CS3

Der zweite Schritt in Photoshop war es, in das überbelichtete Zentrum des Nebels wieder Struktur einzufügen. Dazu habe ich zuvor bereits Aufnahmen mit geringer Belichtungszeit gestackt, in denen man die Trapez-Strukturen erkennt, jedoch kaum Nebelstrukturen. Die Idee ist jetzt, dass man die dunkleren Trapez-Strukturen aus dem kürzer belichteten Bild in die des

länger belichteten hineinfügt. Dazu habe ich das Werkzeug „Maske“ innerhalb Photoshops verwendet. Dafür öffnet man beide Bilder in Photoshop und legt beide Bilder in ein Bild zusammen, in dem man eines der beiden Bilder mit Strg + A, Strg + C kopiert und es in das

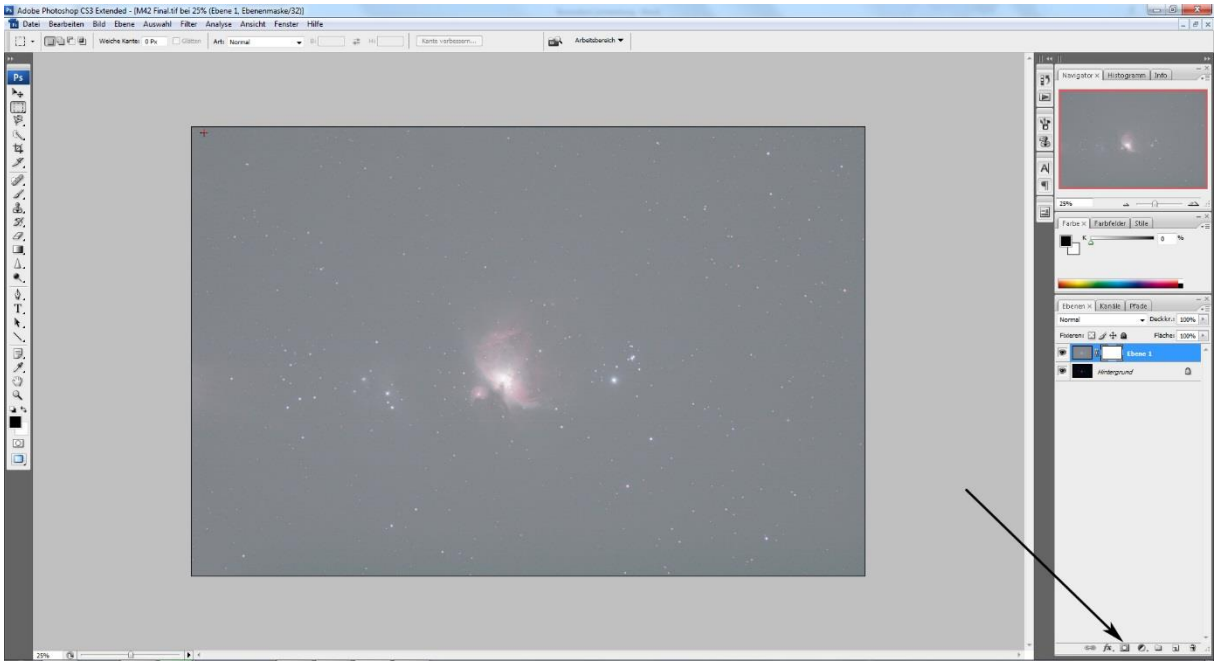

Abbildung 13 Erstellung einer Maske in Photoshop CS3

andere Bild mit Strg + V einfügt. Wenn dies geschehen ist, wird mit einem Klick auf das Maskensymbol eine Maske erzeugt. Daraufhin entsteht eine Maske in dem Bild mit der kürzeren Belichtungszeit.

Daraufhin wird die Hintergrundebene aktiviert (blau hinterlegt) und durch STRG + A wird das angezeigte Bild ausgewählt und mit Strg + C kopiert. Fortfolgend klickt man mit gedrückter

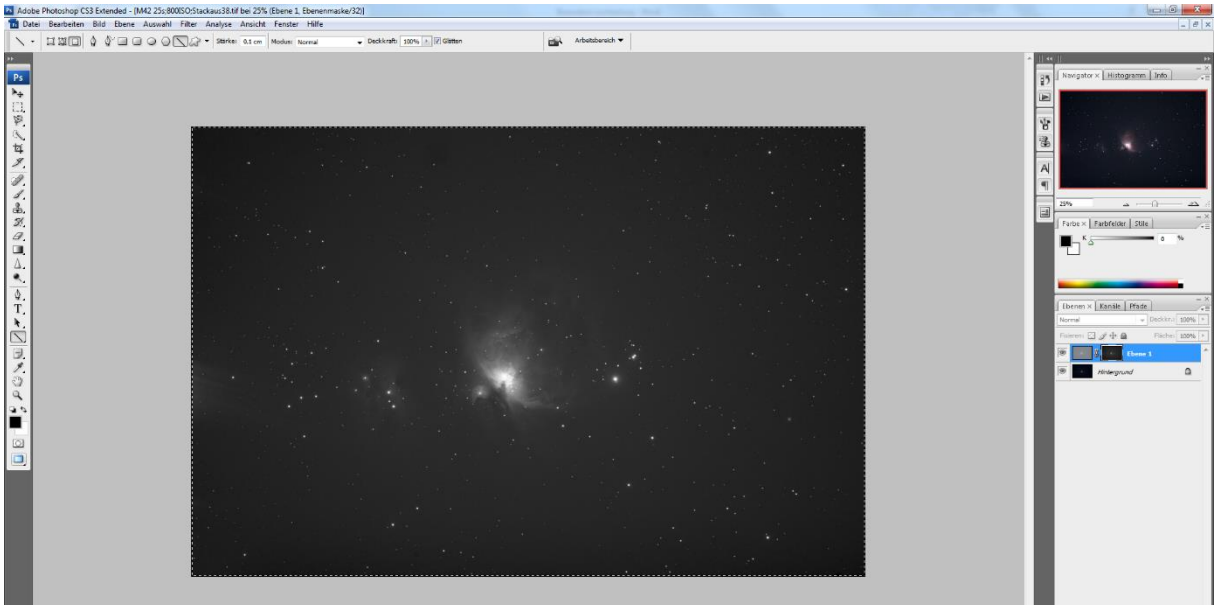

Abbildung 14 Kopieren des Hintergrunds in die Maskenebene in Photoshop CS3

ALT-Taste in die Maskenbox und mit Strg + V wird das Bild aus der Zwischenablage in die Box eingefügt.

Bevor ich nun die Maske auch anwenden konnte, musste ich die Bilder ausrichten. Da die Montierungen der Teleskope zwar schon sehr hochwertig sind, jedoch nicht perfekt, ich zudem kein Autoguiding verwendet habe, kann es dazu führen, dass nach ca. einer Stunde Belichtungszeit die Bilder jetzt nicht mehr perfekt übereinander liegen. Dafür musste ich die Bilder per Hand perfekt übereinander legen. Dazu habe ich mir einige markante Sterne herausgesucht und an all diesen die Bilder bis auf einen Pixel genau übereinander ausgerichtet. Als nächstes erstellte ich eine Live-Vorschau durch den Unterpunkt Fenster ->

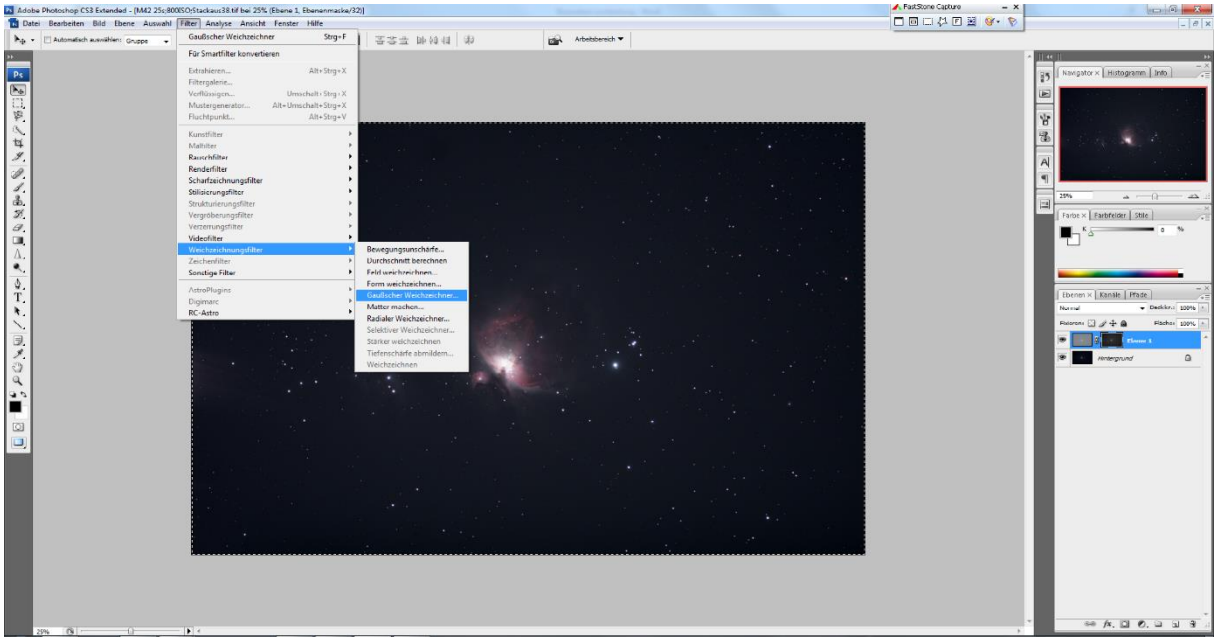

Abbildung 15 Anwendung des Gaußschen Weichzeichner Filter in Photoshop CS3

Anordnen -> Neues Fenster für […]. Und zuletzt wendet man auf die Maske, mit ALT + klick in die Maske, den „Gaußschen Weichzeichnungsfilter“ an. Am Ende sind nun deutlich mehr Strukturen innerhalb des Trapezes zu erkennen.

4.4 Ergebnis

Abbildung 16 Finales Bild: Gesamtbelichtungszeit 1050s mit Pentax 75, 0.8x Reducer und IDAS PLS-P2-Filter. Nachbearbeitung in Deep-Sky-Stacker und Photoshop CS3

5 Spektroskopie

5.1 Theorie

5.1.1 Spektroskopie

1866 nahm der Schwede Anders Jonas Ångström eine Reihe von Wellenlängen, die das Wasserstoffatom aussendet, auf. Daher benutzt man heute auch oft in der Astronomie die Längeneinheit Ångström ($1Å = 1 * 10^{-10} m$) um Wellenlängen anzugeben. Der berühmte Schweizer Mathematiker Johann Jakob Balmer entwickelte aus der Reihe der Aufnahmen von Ångström durch geschicktes Umformen eine einfache Formel, um die Wellenlängen des Wasserstoffatoms zu bestimmen. Er berechnete die Wellenlängen des Wasserstoffatoms mit der Differenz der Kehrwerte der Quadrate ganzer Zahlen, welche später auch als Rydberg-Konstante bekannt wurde. Diese Serie von Differenzen ist heute bekannt als Balmerserie.

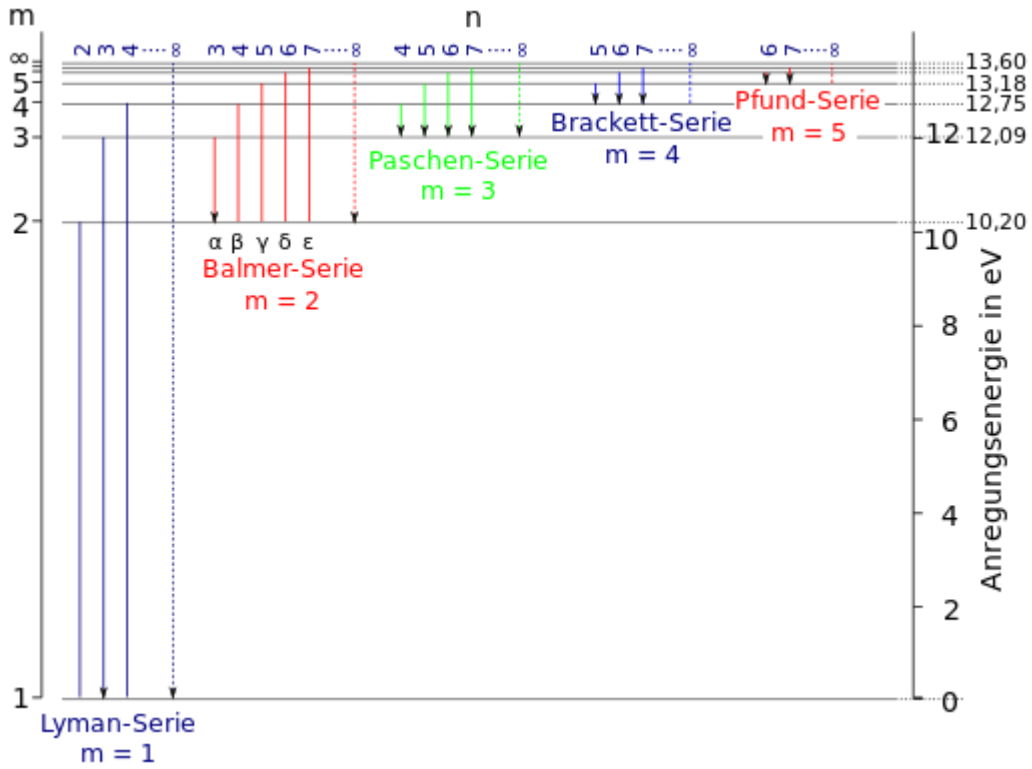

Abbildung 17 Balmer-Serie (rot) bezeichnet die Übergänge von Elektronen zurück auf die zweite Schale und ist die einzige im sichtbaren Bereich

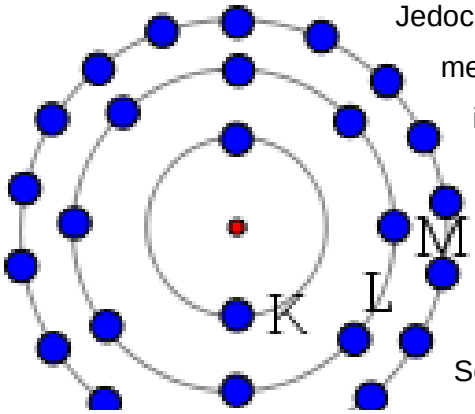

Abbildung 18 Schalenmodell des Atoms

Jedoch war weder Ångström, noch Balmer der Grund für diese merksame Serie bekannt. Erst die Postulate von Niels Bohr im 20. Jahrhundert und damit der Beginn der Quantentheorie lieferten eine Antwort. Er vermutete zuerst, dass die Elektronen im Atom bestimmte Umlaufbahnen haben, mit verschiedenen Energiestufen. Daraus entwickelte er das heute in der Schule sehr beliebte Bohr'sche Atommodell. Mit dieser Idee schuf Niels Bohr die Grundlage der modernen

Atomphysik und Quantenphysik. Jedoch waren die Postulate Bohrs nicht ganz korrekt, denn nach der Heisenbergsche Unschärferelation haben Elektronen im Atom keine Umlaufbahnen, sondern nur Auftretenswahrscheinlichkeiten um den Atomkern.

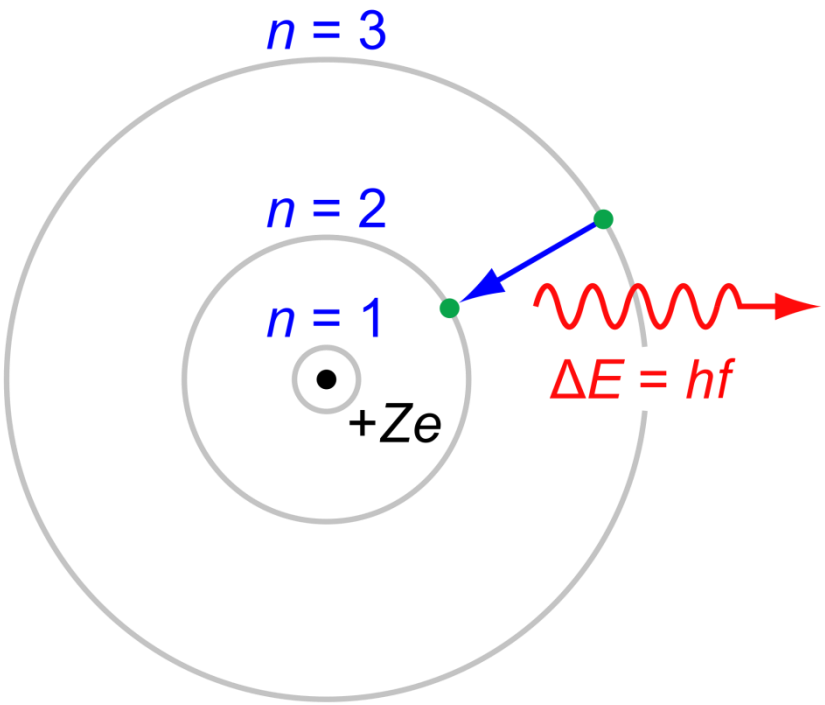

Abbildung 19 Bohrsche Atommodell

Die Farben des Lichtes sind durch die Definition des Planck'schen Wirkungsquantum zu erklären. Nach Planck und später auch bestätigt durch Albert Einstein im Photoeffekt gilt:

$$E = h * f$$

h ist das Planck'sche Wirkungsquantum und f die Frequenz des Lichtes ist. Das Planck'sche Wirkungsquantum ist eine der drei fundamentalen Naturkonstanten. Wenn nun also die Energiedifferenz nicht immer gleich ist, muss auch die Frequenz variieren, da diese in linearer Abhängigkeit zur Energiedifferenz steht. Wenn ein Elektron von höheren Energiestufe auf eine niedrigere Energiestufe fällt, wird Energie frei. Wenn diese Energie relativ groß ist, hat das Photon, welches meist der Energielieferant ist, eine hohe Frequenz und damit eine kleine Wellenlänge. Wenn die Energie relativ klein ist, hat das Photon eine kleine Frequenz und somit eine große Wellenlänge. Das ein Teilchen eine Wellenlänge hat, entstand aus der Entwicklung der Quantentheorie, insbesondere durch Albert Einstein und den Photoeffekt. So konnte man dem Photon Eigenschaften eines Teilchens zuweisen, wie z.B. Masse, Impuls, aber auch Eigenschaften einer Welle zuweisen, wie z.B. Wellenlänge. Bei der Spektroskopie macht man sich den Effekt zu Nutze, dass ein Elektron, welches von einem höheren Energieniveau auf eine niedrigeres herabfällt, ein Photon mit einer ganz spezifischen Wellenlänge aussendet. Das bedeutet, man kann mit der Bestimmung der Wellenlänge bestimmen aus welchem Atom das Photon stammt. Und somit kann man die Zusammensetzung eines Nebels, z.B. des Orionnebels, bestimmen, wenn man die Wellenlänge der Photonen wüsste, die der Orionnebel aussendet. In der Atomspektroskopie „zerlegt" man nun die überlagerten Photonen, indem man sich des Phänomens der Beugung

am Gitter behilft. Dabei haben die Photonen mit verschiedenen Wellenlängen verschiedene Beugungswinkel und können somit horizontal nebeneinander angeordnet werden.

5.1.2 Elektronentemperatur

Um die Elektronentemperatur, welche im Prinzip die Quantifizierung der kinetischen Energie der freien Elektronen innerhalb des Nebels ist, eines Gases zu errechnen, geht man von der Modellvorstellung des idealen Gases aus. Dabei stellt man sich vor, dass die Elektronen innerhalb des Nebels-Systems nur elastische Stöße ausüben und eben keine unelastischen. Diese Vorstellung beschreibt zwar nicht die reale Situation, ist jedoch eine sehr gute Näherung, da sich innerhalb des Nebels die Ionisations- und Rekombinationsprozesse im Gleichgewicht befinden. Durch diese Vorstellung gelten alle idealen Gasgesetze auch für den untersuchten Nebel und damit auch

$$E_e = \frac{3}{2} k_B T_e$$

Wobei

E_e die Elektronenenergie in eV

k_B die Boltzmann-Konstante

T_e die Elektronentemperatur ist

Um nun die Elektronentemperatur und damit auch gleichzeitig die Elektronenenergie aus einem Nebelspektrum zu bestimmen, habe ich die so genannte NII Methode verwendet. Diese errechnet die Elektronentemperatur aus den Wahrscheinlichkeiten der Übergänge der Elektronen im Stickstoffatom. Ausführliche Herleitung und Beschreibung nach „Grigor Gurzadyan - The Physics and Dynamics of Planetary Nebulae“[3]. Errechnung der Elektronentemperatur mithilfe der N II Methode (nach dem armenischen Astronomen Grigor Gurzadyan [1922-2014]). Wobei nach den Grundgleichungen gilt

$$T_e = \frac{25.000}{\ln(\frac{R}{9{,}85})}$$

Mit $$R = \frac{I(6548)+I(6584)}{I(5755)}$$

[3] Grigor Gurzadyan - The Physics and Dynamics of Planetary Nebulae - 1997 S. 122 ff.

5.2 Aufbau I: Spektroskopie mit dem DADOS-Spaltspektrograph

5.2.1 Gerätschaften

5.2.1.1 Celestron Edge HD 11“

Technische Daten des Celestron Edge HD 11“	
Öffnung	280mm
Brennweite	2800mm
Öffnungsverhältnis	f/10
Maximale sinnvolle Vergrößerung	661-fach
Grenzgröße	14m7
Auflösung	0,41 Bogensekunden
Tubuslänge	609mm
Gewicht	12,7 Kg

Abbildung 20 Celestron Edge HD 11" auf dem Dach des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums

Um den Orionnebel aufzunehmen, benutzte ich das Celestron Edge HD 11“. Dieses ist auf 6 Stationen des Schülerlabors Astronomie am CFG vertreten. Alles ermöglicht und geleitet von dem Physik-Leistungs-Kurs Lehrer Michael Winkhaus. Das Teleskop eignet sich sehr für die Astrofotografie. Es ist vielseitig einsetzbar, egal ob man den Mond fotografieren will oder einen der Planeten. Außerdem ist die Deep-Sky Fotografie sehr einfach zu machen. Durch die große Öffnung tritt viel Licht ein und durch relativ kurze Belichtungszeiten entstehen scharfe Bilder. Das montierte Suchfernrohr hilft bei der Orientierung am Nachthimmel. Bei den Aufnahmen des Orionnebels behalf ich mir eines so genannten Reducers, der die Brennweite verkürzt und somit man eine kleinere Vergrößerung erhält, welche notwendig war um den relativ großen Orionnebel ganz abzubilden. Durch die Goto-Montierung auf dem Dach des CFG war die manuelle Suche des Orionnebels nicht notwendig, diese erkennt nach einem Adjustieren des Teleskops zur Achse des Planeten, wo es sich befindet, und man kann bequem Objekte am Nachthimmel anfahren.

5.2.1.2 Dados-Spalt-Spektrograph

Abbildung 21 Dados-Spektrograph

Der Dados Spektrograf besteht aus zwei Würfeln, welche ihm auch seinen Namen verleihen (Spanisch: Los dados – Die Würfel). Der erste von beiden, mit welchem er an das Teleskop angeschlossen ist, beinhaltet einen Spiegel und ein Spaltplättchen. Das Spaltplättchen besteht aus drei verschiedenen Spalten, von denen der erste 25µm, der zweite 35µm und der dritte 50µm breit sind. Wenn das Licht durch das Okular in den Spektrografen einfällt, wird es durch den Spiegel auf den Spalt umgelenkt und von dort in den zweiten Würfel. So kann man das zu beobachtende Objekt mit Hilfe einer Videokamera, welche über einen zusätzlichen Port die Möglichkeit hat auf den Spalt zu blicken, immer an der richtigen Stelle halten. Das Licht, welches schließlich durch die drei Spalte durchgelassen wurde, trifft dann im zweiten Würfel auf das Gitter. Verwendet wird nur ein Blazegitter von dreien. Das ungenaueste hat 200 Linien pro Millimeter, das nächst genauere 900 Linien / Millimeter und das genaueste 1200 Linien / Millimeter. In diesem Fall wurde das 200 Linien / Millimeter Gitter verwendet, damit das gesamte Spektrum auf ein einzelnes Bild passt. Dann, wenn das Licht durch das Gitter gelaufen ist, fällt das Spektrum auf die Kamera und kann aufgenommen werden.

5.2.1.3 SBIG CCD Kamera

Abbildung 22 SBIG STF-8300M CCD Kamera

Bei der SBIG STF-8300M CCD Kamera handelt es sich um eine Schwarz-Weiß CCD-Kamera, mit eingebauter eigener Kühlung. Dank ihrer Kühlung von bis zu 40 Grad Celsius unter der Umgebungstemperatur, gelingt es das Hintergrundrauschen mit ihr sehr stark zu begrenzen. Außerdem besitzt die Kamera die Möglichkeit, extrem kurze Belichtungszeiten zu benutzen, um so schon geringste Helligkeits-veränderungen zu beobachten. Dadurch kann man theoretisch sogar Exoplaneten nachweisen. Durch den großen CCD-Chip der Kamera eignet sie sich hervorragend auch für Weitbildaufnahmen und kam somit gelegen für

den Orionnebel. Die Kamera besitzt zudem die Funktion, einen automatischen Dark Frame zu erstellen, wodurch grobe Hotpixel bereits vor den Aufnahmen entfernt werden konnten. Eine geeignete Kamera um professionelle Bilder zu erstellen. Verwendet wurde diese Kamera bei beiden Aufnahmen der Spektren, sowohl mit dem DADOS-Spektrographen, als auch mit dem BACHES Echelle Spektrographen.

5.2.1.4 DMK 41 Videokamera

Abbildung 23 DMK 42 Videokamera

Zum Beobachten des Spektrografen Spaltes und das erfolgreiche Nachführen wurde die DMK41 verwendet. Bei ihr handelt es sich um eine Schwarz-Weiß Videokamera, welche es erlaubt, ein Live-Bild des Spektrografen Spaltes zu beobachten. So kann man das Teleskop mit Spektrografen präzise ausrichten und nachführen. Mit einer Auflösung von 1280 x 960 Pixeln bietet die Kamera genug Auflösung für detailreiche Aufnahmen des Orionnebels und ist dank ihrer schnellen Übertragungsrate geeignet für Live-Bild Aufnahmen. Und genau dafür wurde sie benutzt. Ich benutzte die Live-Aufnahme, um zu schauen, ob das Video verrutscht ist, oder ob eventuell eine Wolke vor dem Orionnebel herzieht, um am Ende nur die besten Aufnahmen zu verwenden. Außerdem habe ich eine Vergleichsaufnahme vom Stern Rigel angefertigt, um diese später zur Intensitäts-Kalibrierung zu verwenden. Diese ist jedoch nicht so gut geworden. Dadurch, dass das Wetter den Fangspiegel des C11 immer wieder beschlagen ließ, mussten wir leider eine Vergleichsaufnahme aus der Literatur verwenden.

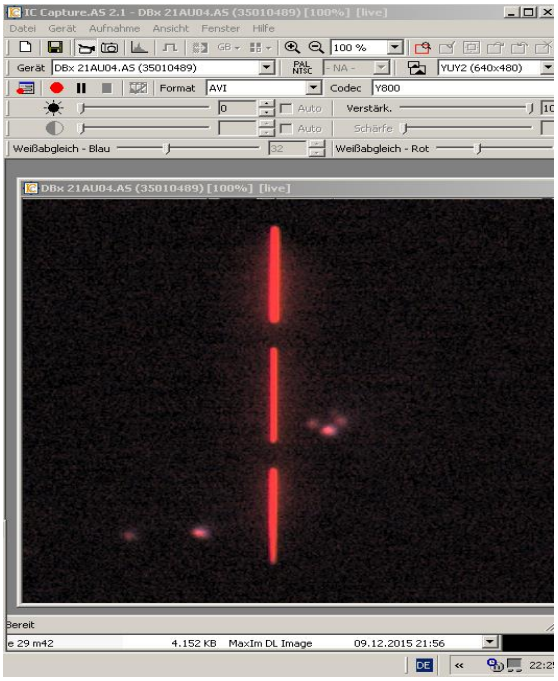

Abbildung 24 Beobachtung des Spektrographen Spalts durch die DMK 41 Videokamera in IC Capture; Dabei ist der oberste Spalt 50µm briet, der mitllere 25µm und der unterste 35 µm; verwendet wird nur der 25µm Spalt

5.2.2 Experimenteller Aufbau

Abbildung 25 Dados-Spektrograph mit montierter SBIG STF-8300M CCD Kamera

Um die gewünschten Bilder vom Orionnebel erhalten zu können, war es notwendig bis tief in die Nacht des 09.12.2015 Aufnahmen vom Nebel zu machen. Dabei schloss ich an das, auf der Sternenwarte des CFGs aufgebaute Celestron 11 Edge HD anstelle eines Okulars erst den Dados Spektrografen an und an diesen schließlich die SBIG STF-8300M CCD-Kamera (im 2x2 Binning betrieben), so dass ich das Spektrum direkt aufnehmen konnte. Außerdem war vor dem Spektrografen noch ein 0.8x Reducer angebracht, um es mir zu ermöglichen, ein Bild von einem so großflächigen Objekt zu schießen. Des Weiteren war an einem kleinen Nebenausgang des Dados die DMK41 angebracht, damit ich mithilfe eines Live-Bildes sehen konnte, ob ich den Nebel. überhaupt richtig im Visier hatte, um ein Spektrum erzeugen zu können. Dafür musste das Ziel auf einem der drei sichtbaren Spalte liegen. Vorne am Teleskop war außerdem eine Neon/Xenon-Referenz-lampe befestigt, um auch ein Bild eines Referenz-spektrums zu haben, dessen Zusammensetzung man bereits kennt. Jede der beiden Kameras war an einem dort aufgebauten Laptop angeschlossen, über den ich die Aufnahmen gesteuert und überwacht hatte.

Abbildung 26 Fertige Aufbau auf dem Dach des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums bei untergehender Sonne

5.2.3 Durchführung

Um die Bilder erzeugen zu können, musste nach Aufbauen aller Instrumente zuerst einmal der Orionnebel angefahren werden. Nachdem dieser manuell angesteuert war, fuhr das Teleskop

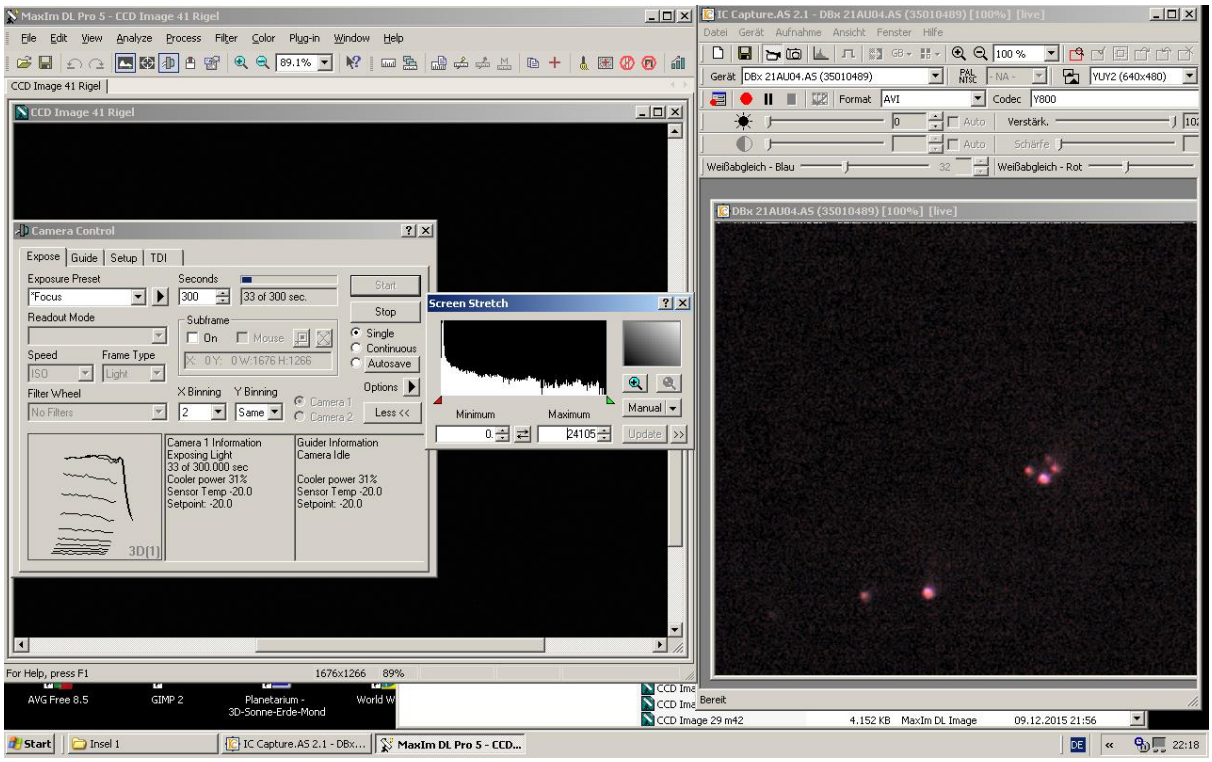

Abbildung 27 Live-Bild des Spektrographen Spalt (rechts) und Aufnahmefenster in MaximDL (links)

diesem selber nach. Die beiden Kameras, welche ich verwendete, steuerte ich mit den Programmen „DMK - IC Capture.AS 2.0“ und „MaxIm DL 5.24“. Die DMK41 mit „IC Capture“ und die SBIG mit „MaxIm DL“. Alles in allem war es eine klare und mondlose Nacht, ohne viel Wind. Also eigentlich optimale Bedingungen, wäre da nicht eine sehr hohe Luftfeuchtigkeit gewesen, welche dafür sorgte, dass die Korrektionsplatte schnell beschlug. Ich hielt diese dann mit einem Fön trocken. Nachdem der Aufbau geglückt war und ich den Orionnebel angefahren hatte, war es Zeit, die Aufnahmen zu machen. Vor mir benutzte eine weitere Gruppe das Teleskop zur Spektroskopie, wodurch ich Erfahrungen gesammelt hatte für unsere Aufnahmen später an dem Abend. Als erstes habe ich kurze Aufnahmen (im Sekunden Bereich) der Neon/Xenon Referenzlampe gemacht, um später anhand dieser bekannten Wellenlängen mein Spektrum zu kalibrieren, im genaueren die Wellenlängenkalibrierung. Danach tätigte ich einige Dark Frame Aufnahmen in der nahen Umgebung des Orionnebels, um diese später von dem eigentlichen Spektrum zu subtrahieren. Dies entfernt das Hintergrundrauschen und Lichteinflüsse der Menschen. Dabei belichtete ich insgesamt 5mal eine Minute lang den dunklen Himmel. Danach kamen die eigentlichen Aufnahmen. Ich belichtete den Orionnebel insgesamt 10mal fünf Minuten lang. Am Ende stellte sich heraus, dass drei bis vier dieser Aufnahmen leider unbrauchbar waren, da ich durch den Wind einige

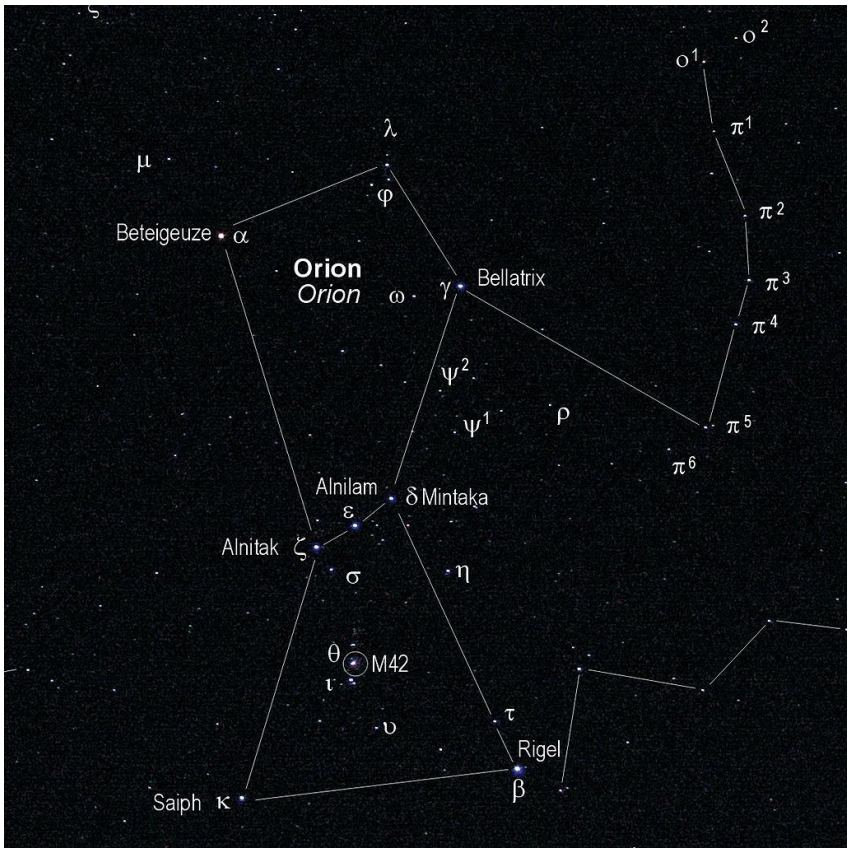

Abbildung 28 Sternbild des Orion; unterhalb des Gürtel des Orion ist der Orionnebel zu finden

male nicht den Nebel, sondern das Trapez spektroskopierte. Und zuletzt habe ich den nahegelegenen Stern Rigel spektroskopiert, um nachher an dem bereits bekannten Spektrum Rigels mein Spektrum des Orionnebels zu kalibrieren. Dabei habe ich weitere fünf Aufnahmen á einer Minuten aufgenommen. Wie sich später herausstellte, waren diese jedoch auch unbrauchbar, da der Spiegel des C11 so beschlagen war, durch die hohe Luftfeuchtigkeit an dem Abend, dass die Aufnahmen zu schwach waren, um brauchbar zu sein.

5.2.4 Bearbeitung

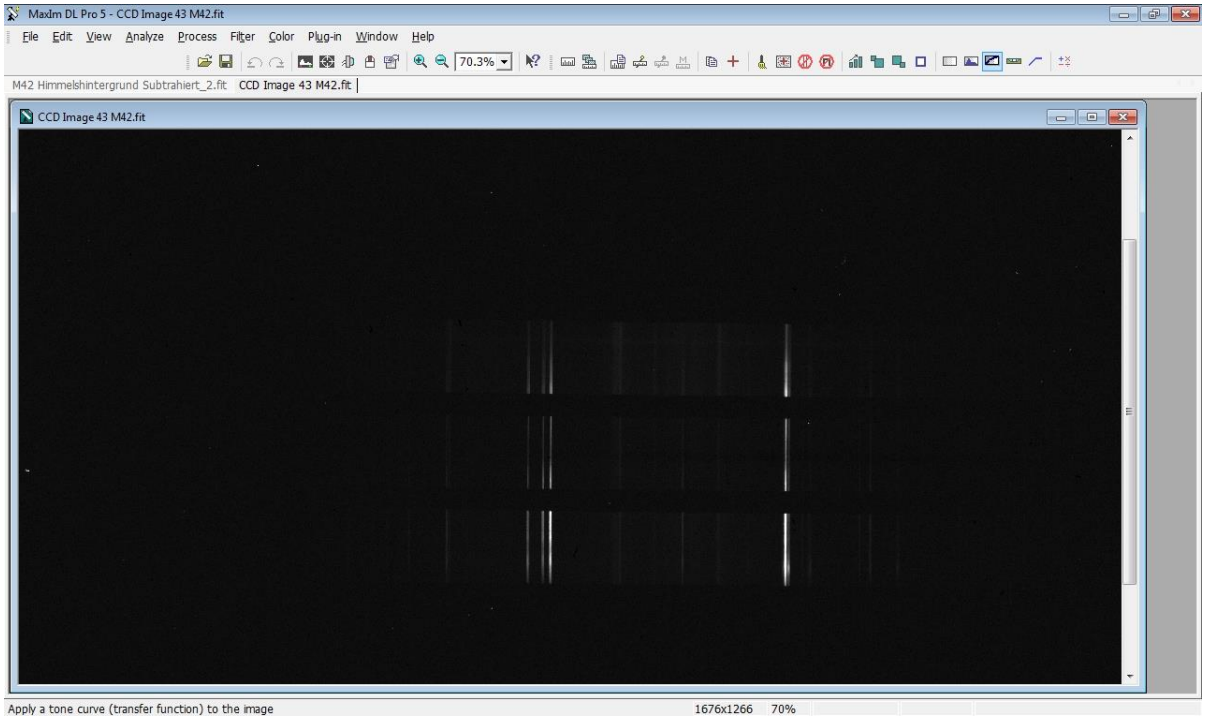

Abbildung 29 Roh-Bild in MaximDL

Aus den besten Aufnahmen entstand das Rohspektrum. Als erstes mussten die das Spektrum verunreinigenden, sogenannten, Hotpixel beseitigt werden und das Spektrum horizontal gedreht werden, so dass es exakt horizontal liegt. Denn obwohl ein Auto-Darkframe bei allen Aufnahmen subtrahiert wurde, blieben einige „heiße“ Pixel zurück, welche durch kosmische

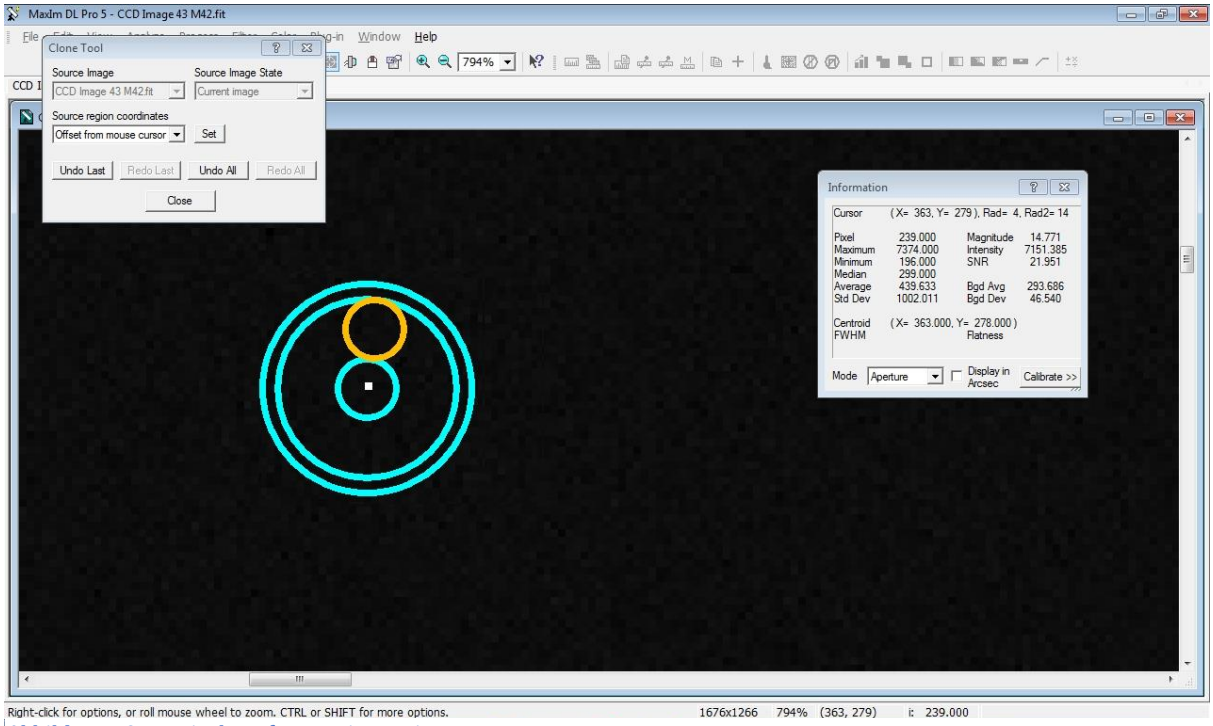

Abbildung 30 Hotpixel-Entfernung in MaximDL

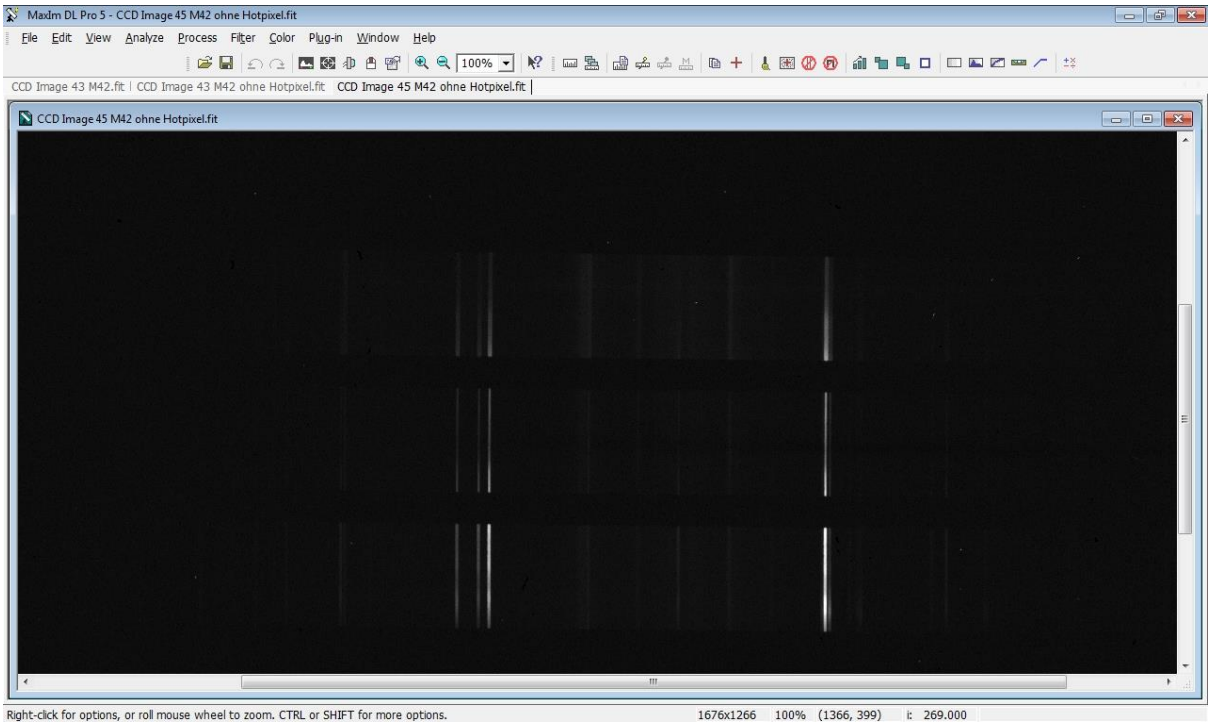

Abbildung 31 Rohspektrum nach Entfernen der Hotpixel

Strahlung verursacht wurden und dem Spektrum nicht förderlich sind. Um sie zu entfernen und das Spektrum zu drehen nutzte ich das Programm MaximDL. Dafür verwendete ich das Clone Tool innerhalb von MaximDL. Dabei wählt man ein winziges Gebiet direkt über dem Hotpixel an, kopiert dieses und ersetzt dann den Hotpixel durch dieses. Es ist deutlich sichtbar, dass im mittleren der drei Spektren keine Hotpixel mehr erkennbar sind. Danach legte ich alle

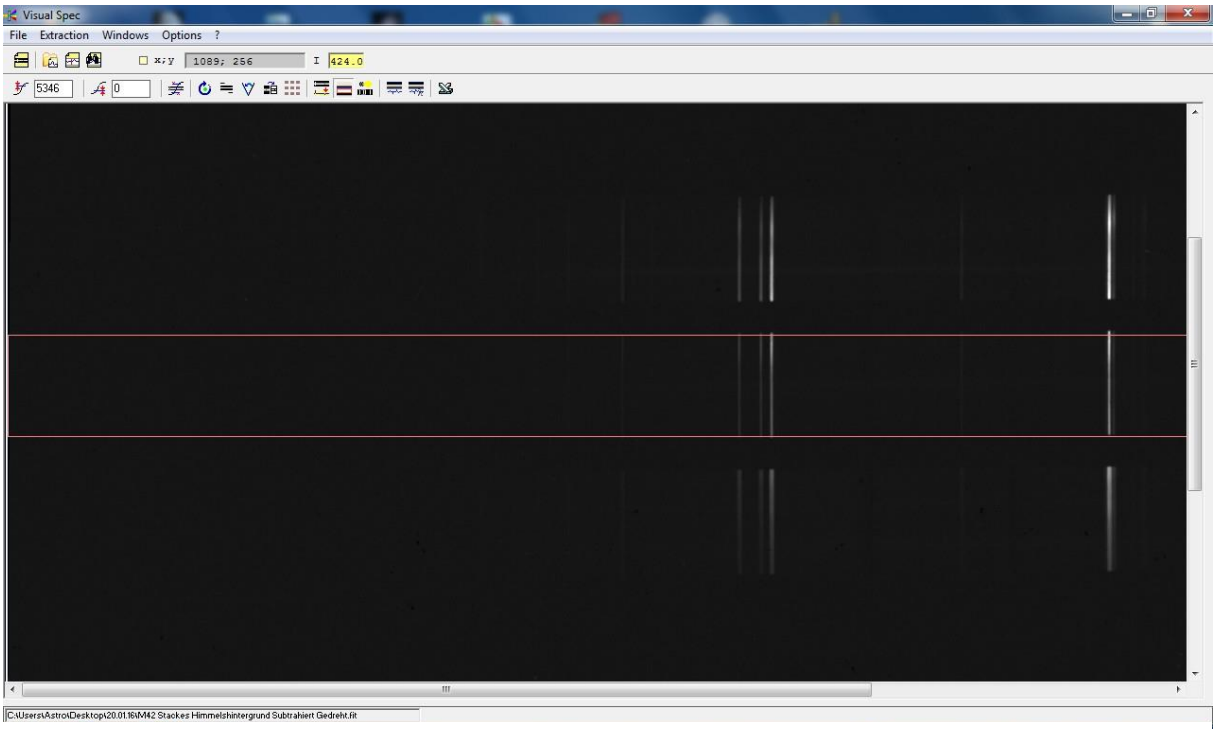

Abbildung 32 Genaue horizontale Ausrichtung des Spektrums

Spektren, bei denen ich die Hotpixel beseitigt hatte, mit Hilfe des Programms "FITSWORK" übereinander um ein genaueres Bild zu erhalten. Im Anschluss subtrahierte ich noch das aufgenommene Spektrum des Himmelshintergrundes vom gestackten M42 Spektrum, um die durch ihn verursachten Verunreinigungen meiner Aufnahme zu entfernen. Bei ihm wurde natürlich vorher dasselbe Verfahren hinsichtlich der Hotpixels angewandt. Das Ergebnis ließ sich sehen. Anschließend wurde dasselbe Prozedere anhand des, von der Referenzlampe

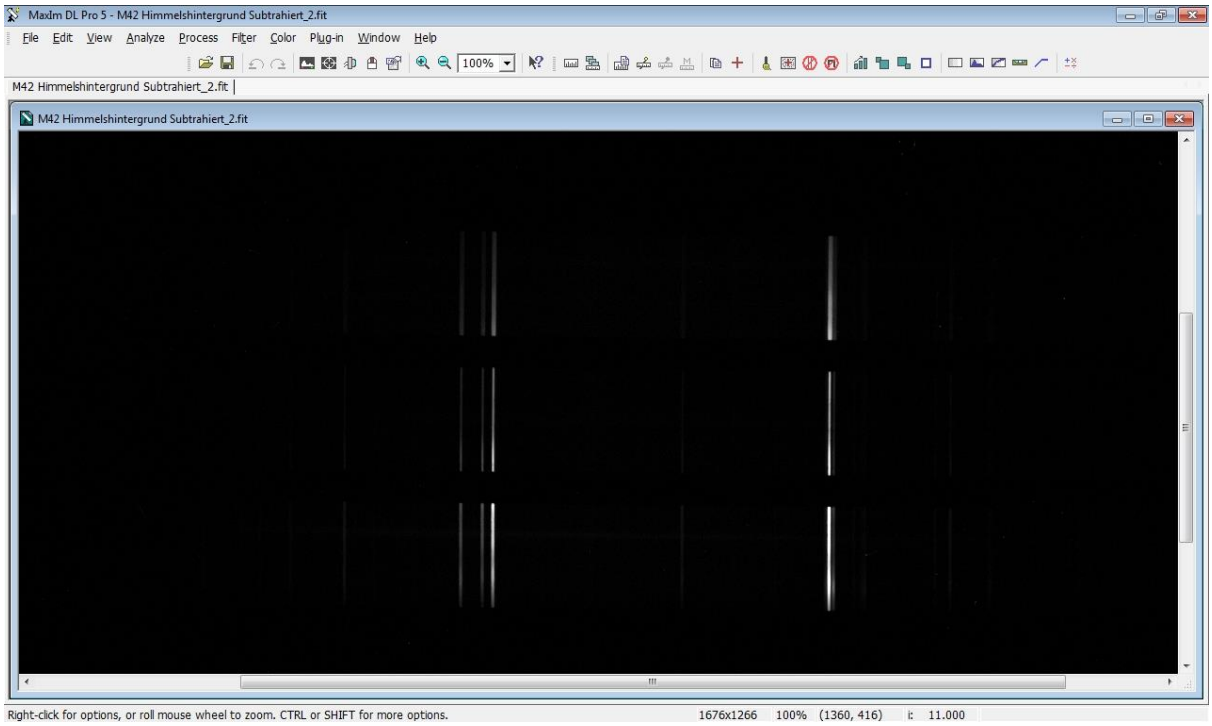

Abbildung 33 Fertiges Spektrum; Hotpixel entfernt und Himmelshintergrund subtrahiert

aufgenommenen Spektrums durchgeführt. Danach ging es an die Übertragung des Spektrums von M42 in einen Graphen. Dessen Y-Achse stellte die Intensität bei einer bestimmten Wellenlänge (X-Achse) dar. Dafür wurde das Programm "Visual Spec" genutzt. Dabei musste als erstes eine Wellenlängenkalibrierung vorgenommen werden. Dafür lud ich neben dem Spektrum von M42 auch das Spektrum der Referenzlampe in Visual Spec. Denn von diesem Spektrum wusste ich bereits bestimmte Wellenlängen aus einem bereits fertig kalibrierten Spektrum. Also setzte ich an mehreren markanten Punkten im Spektrum der Referenzlampe Markierungen, welche ich mit den entsprechenden Wellenlängen versah und ließ so eine möglichst präzise X-Achse erstellen. Das Ergebnis sah gut aus, keiner der Kalibrierungspunkte lag über einer Abweichung von 0,2 Å. Diese Genauigkeit hat mir gereicht. Außerdem verrät mir die Abbildung 35, dass meine Intensitäts-Messschritte bei ca. 4 Å liegen, dies wird bei der weiteren Auswertung noch ein Problem darstellen. Mit dem fertigen Spektrum konnte ich nun weiter arbeiten und dieses auswerten.

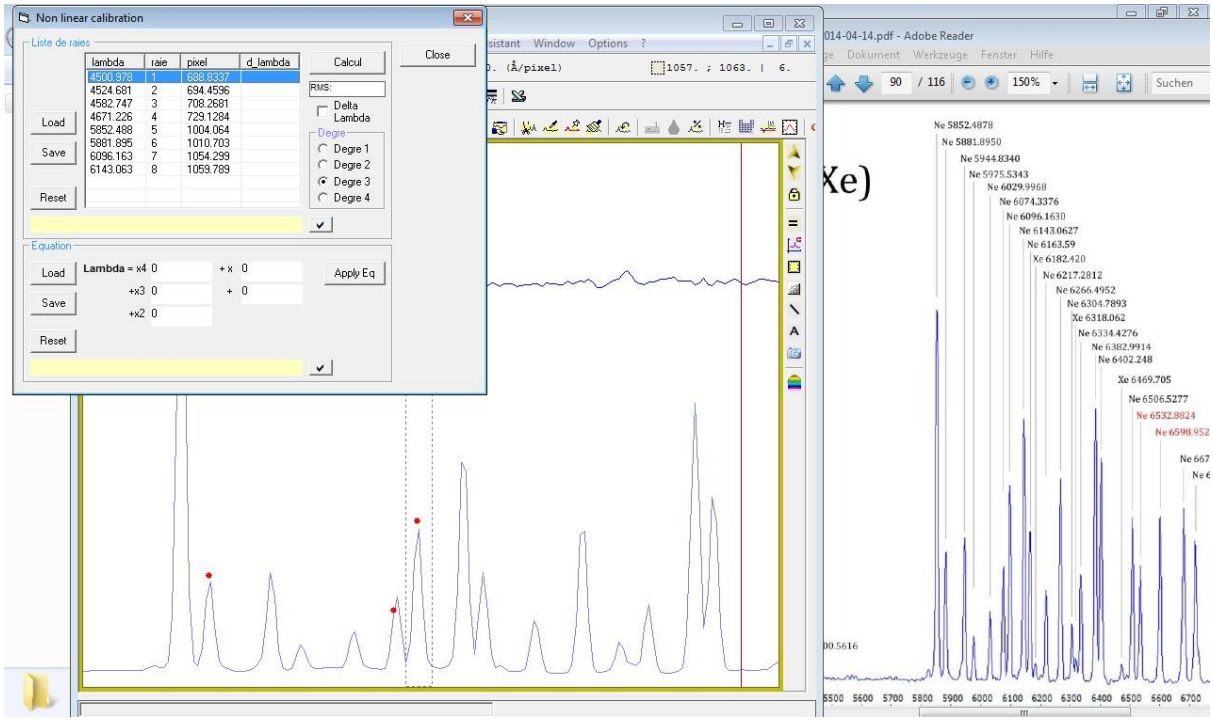

Abbildung 34 Wellenlängenkalibrierung in Visual Spec mit Referenzspektrum einer Energiesparlampe

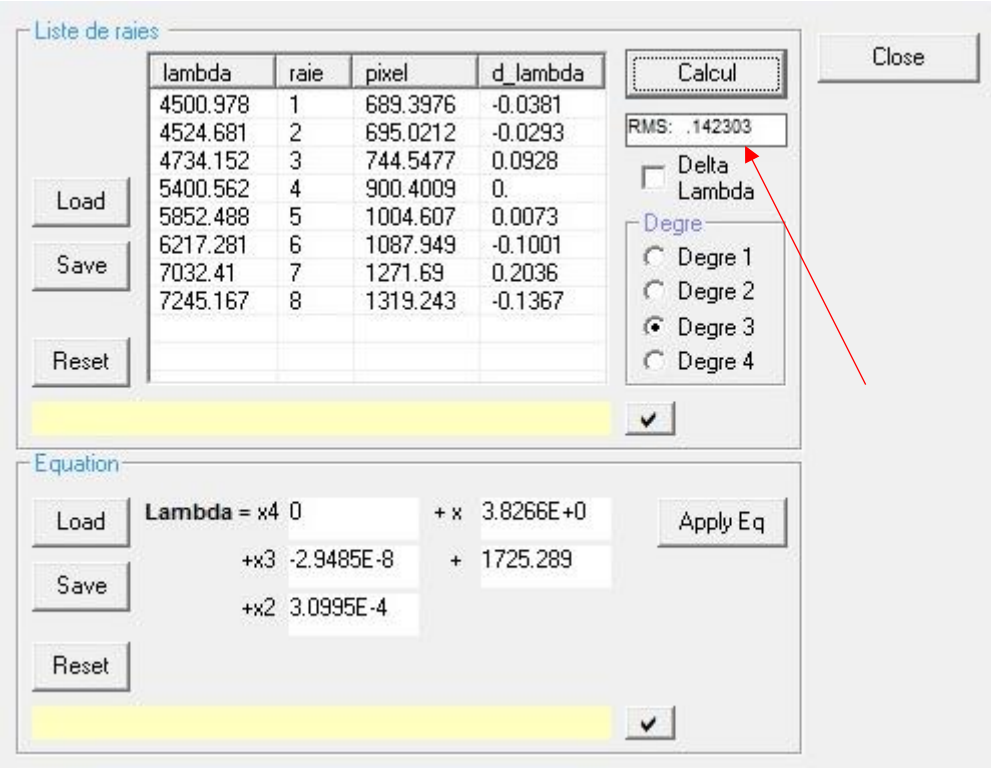

Abbildung 35 Ungenauigkeiten der Kalibrierung; quadratischer Mittelwert beträgt 0.1242303 Å

5.2.5 Auswertung der Elektronentemperatur

Zur Errechnung der Elektronentemperatur musste ich die Intensitäten der Stickstofflinien bei drei Wellenlängen im sichtbaren Bereich bestimmen. Dafür habe ich das Spektrum mit VisualSpec geöffnet und konnte mit diesem Programm die Intensität bestimmen. Dabei legt das Programm eine Kurve durch den ausgewählten Bereich und bildet das Integral unter dieser Kurve.

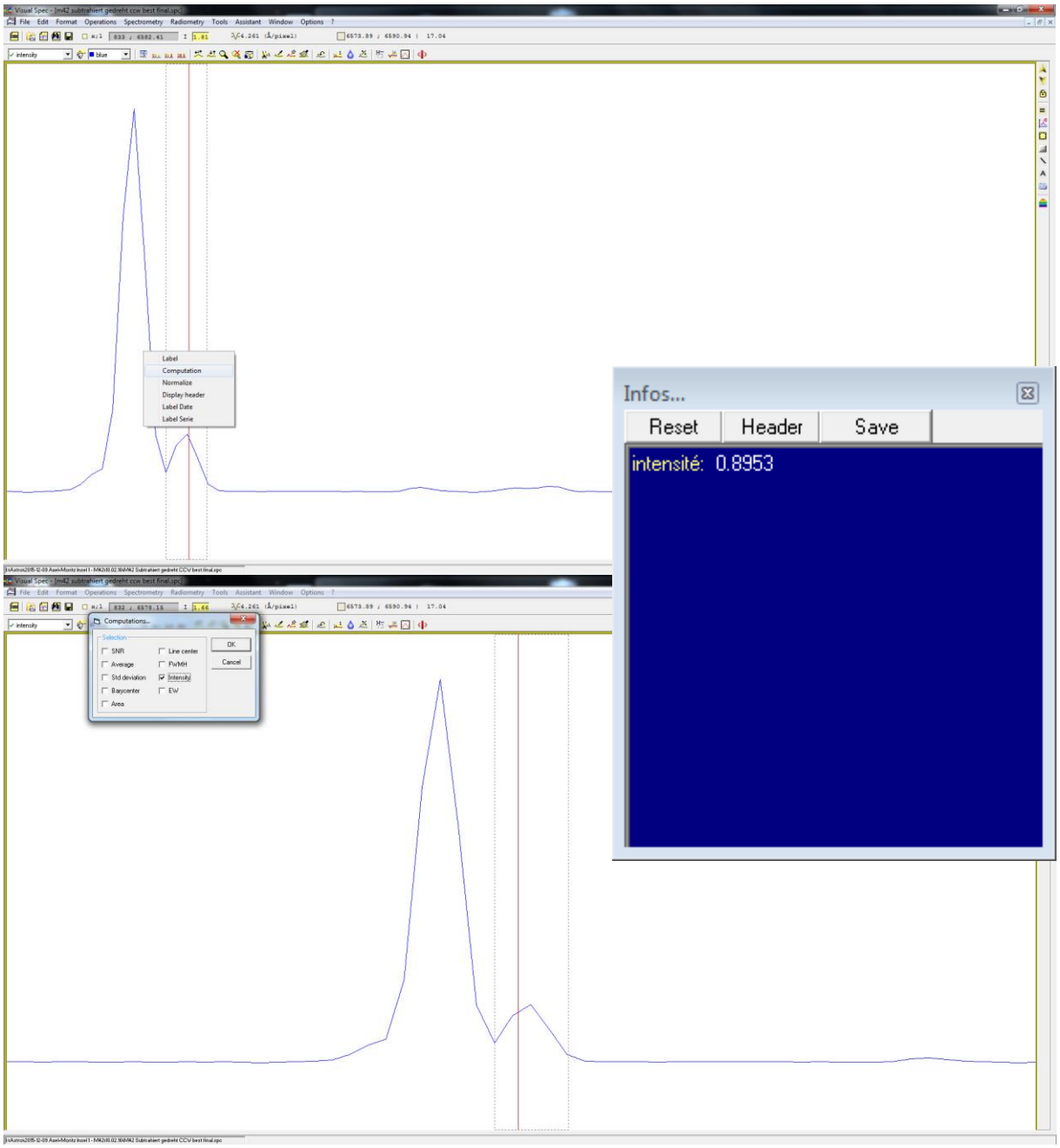

Abbildung 36 Intensitäten Bestimmung in Visual Spec

Aus dem fertig bearbeiteten Spektrum konnte ich schließlich die Elektronentemperatur im Orionnebel errechnen. Dabei ergaben sich folgende Werte für die Intensitäten der NII Linien.

Messung	I[NII] 5755	I[NII] 6548	I[NII] 6584	*R*	T_e
12	2,184	29,696	97,706	58,334	14055K
13	1,645	29,104	98,422	77.523	12117K
14	1,586	28,658	97,133	79.313	11985K
15	1,654	29,859	100,804	78.998	12007K
16	1,582	28,445	98,881	80.484	11901K
17	1,782	29,857	100,316	73.048	12477K
18	1,498	28,870	96,293	83.553	11693K
19	1,611	29,100	99,365	79.742	11954K
20	1,578	30,075	97,567	80.888	11873K
21	1,521	29,467	95,243	81.992	11797K
22	1,499	29,467	101,543	87.398	11452K
23	1,580	30,298	100,578	82.832	11740K

Abbildung 37 Tabelle mit den Messwerten der Intensitäten bei λ=5755Å, 6548Å, 6584Å; R ist ein Hilfswert (siehe 5.1.2) und T_e ist die Elektronentemperatur

Um das Spektrum des Dados-Spektrographen auszuwerten, musste ich zuvor noch das Auflösungsvermögen künstlich vergrößern. Denn das Spektrum ist nur auf ca. 4 Å genau und genau so breit ist der NII Peak, das heißt ich konnte die Intensität gar nicht richtig messen. Deshalb die künstliche Unterteilung in kleinere Schritte auf ca. 0.1 Å. Dieses Verfahren ist nötig, da der Dados keine höhere Auflösung hergibt. Mit den Werten für *R* war es dann möglich, die Elektronentemperatur auszurechnen. Die Bestimmung eines Mittelwertes und einer daraus resultierenden Standardabweichung hat den Grund, dass die Grenzen der NII Linien rein subjektiv gewählt sind und ich dadurch grobe Fehler vermeiden kann.

Mittelwert Berechnung

$$\bar{T}_e = \frac{1}{\mathrm{n}}\sum_{i=1}^{\mathrm{n}} T_{e_i} = 12087{,}3\ K$$

Standardabweichung

$$\sigma_{T_e} = \sqrt{\frac{\sum {T_e}^2 - \frac{1}{\mathrm{n}}(\sum T_e)^2}{\mathrm{n}-1}} = 672{,}6\ K$$

Ergebnis T_e

$$T_e = 12087 \pm 673K$$

Im letzten Schritt habe ich dann meine Ergebnisse mit denen von Jessica Anne Harris verglichen, welche in ihrer Masterarbeit die Spektroskopie und damit die Errechnung der

Elektronentemperatur thematisiert. Dabei ist es wichtig, möglichst Werte zu vergleichen, die ungefähr im gleichen Gebiet wie meine Ergebnisse lagen. Dafür ist es wichtig zu wissen, wie der Spalt des Spektrographen gegenüber des Nebels lag.

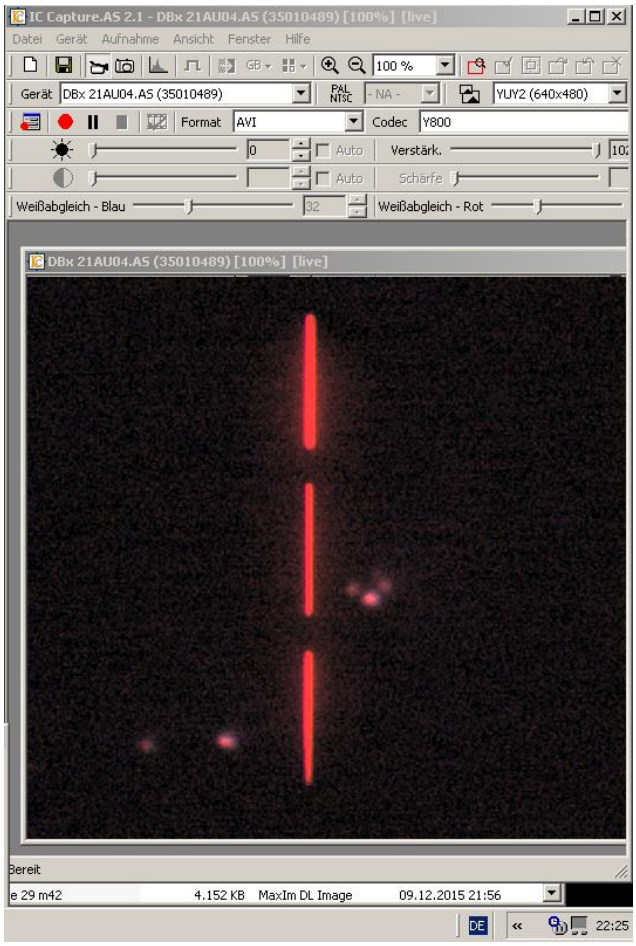

Abbildung 38 Position des Spaltes im Orionnebel; rechts des mittleren Spaltes liegt das Trapez

Die genaue Position ist mir bekannt und somit kann ich diese nun mit der Vergleichsarbeit vergleichen. Dabei ergibt sich, dass die Ergebnisse von 9mid, 10mid und 11mid am nächsten der Position meiner Aufnahmen lagen und ich diese somit zum Vergleich heranziehe.

Daraus ergibt sich eine Relative Abweichung

$$\frac{\Delta T_e}{T_e} = 14\%$$

Table 4.3. Electron Temperatures and Densities*

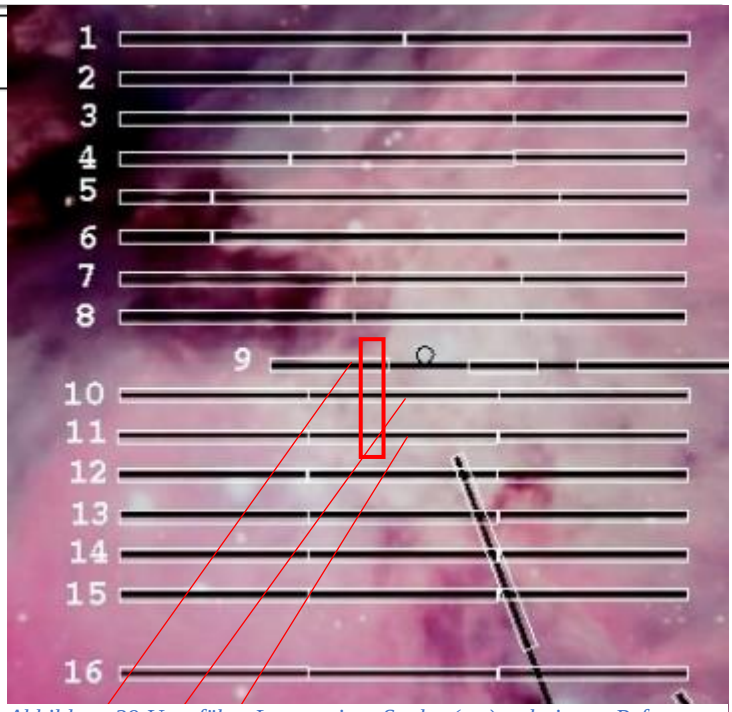

Abbildung 39 Ungefähre Lage meines Spaltes(rot) relativ zur Referenzarbeit (schwarz)

Sample Name	T_e [N II]			
1east	8116			
1west	9650			
2east	10690			
2mid	9290			
2west	8690			
3east	10400			
3mid	9270			
3west	8600			
4east	9260			
4mid	9480			
4west	9060			
5east	8960			
5mid	9240			
5west	8030			
6east	10340			
6mid	9710			
6west	8830	8420	850	2510
7east	7900	8430	1740	—
7mid	10060	8340	2630	4040
7west	9340	8200	1330	2790
8east	8140	—	1190	—
8mid	10180	8650	3350	3290
8west	8400	8700	1610	9830
9east	9200	9260	1650	4660
9mid	10050	8240	5440	3460
9west	8950	7750	550	1310
10east	8940	8050	1580	900
10mid	11390	8500	5820	4250
10west	9190	8000	1550	5000
11east	9360	8820	1740	2080
11mid	10210	8080	3800	7490
11west	8350	7750	1130	10690

Abbildung 40 Originalauszug aus Jessica Anne Harris - SPECTROSCOPY OF THE EXTENDED ORION NEBULA (rot gekennzeichnet sind die relevanten Messdaten

4

5.3 Fehleranalyse

5.3.1 Ungenauigkeiten der Aufnahmen

Durch die Aufnahme meiner Messung nahe der Trapezsterne, die für die Ionisierung und dadurch auch das Leuchten des Emissionsnebel verantwortlichen Sterne im Alter von wenigen

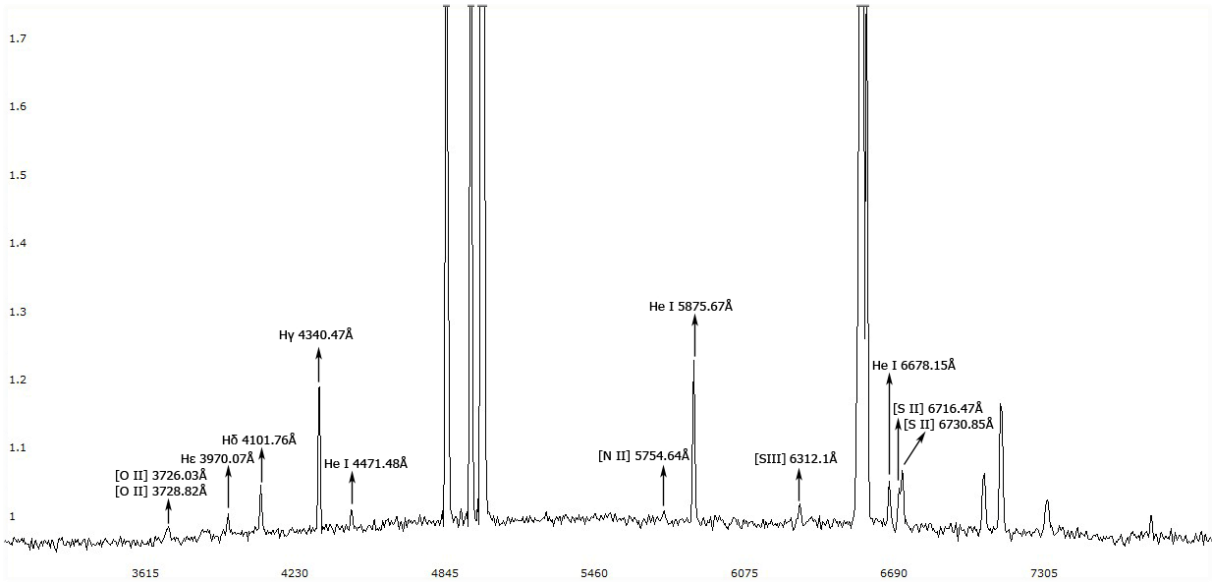

Abbildung 41 [NII] Linie sehr schwach ausgeprägt; genauere Aufnahmen führen zu mehr Genauigjeit

Tausend bis eine Millionen Jahre liegen, ergab sich eine relativ zur näheren Umgebung höhere Elektronentemperatur. Vergleichbare Ergebnisse lieferte die Literatur ebenfalls. Dazu kommt, dass alle meine spektroskopischen Aufnahmen mit einem 200 Linien / mm Gitter gemacht wurden. Dieses hat nun Vor- aber auch Nachteile. Zum einen bietet das Gitter eine Gesamtaufnahme des Spektrums, man kann den gesamten sichtbaren Bereich in nur einem Bild aufnehmen und dies erspart ein kompliziertes Bearbeiten der Bilder. Zum anderen jedoch sind dadurch die Aufnahmen nicht so scharf, wie z.B. bei einem 1200 Linien / mm Gitter. Dadurch können Abweichungen entstehen, die am Ende eventuell fatal sein können. Abbildung 41 zeigt das fertige Spektrum und man sieht deutlich, dass an einigen Stellen, wie z.B. [N II] 5754,65 Å, das kleinste unscharfe Abweichungen eine große Abweichung bei der Messung der Werte verursachen kann. Nun ist es auch noch so, dass der oben genannte Wert für unsere Messungen relevant ist und daher ist es umso ärgerlicher, wenn dieser ungenau ist. Und man sieht, dass der Wert wirklich ein kleiner Peak nur ist, der vom Hintergrundrauschen kaum zu erkennen ist. Deswegen ist es hier hilfreich ein möglichst scharfes Spektrum vorliegen zu haben, um für den [N II] Wert ein möglichst exaktes Ergebnis zu bekommen.

[4] Jessica Anne Harris - SPECTROSCOPY OF THE EXTENDED ORION NEBULA – 2010 – S. 122

5.3.2 Extinktion

Himmel sehr klar, mondlose Nacht, wenig Wind, aber sehr nass!! Korrektionsplatte

nach wenigen Minuten beschlagen. Fön eingesetzt.

Das Zitat ist aus dem Protokoll der Nacht in der ich die Aufnahmen gemacht habe. Die Extinktion beschreibt ursprünglich die Abschwächung von Licht durch die Erdatmosphäre, oder auch durch interstellare Materie. Zum Beispiel wenn das Licht durch einen weiteren Nebel fliegen würde, würde es abgeschwächt und nur ein Teil des Lichtes käme zur Erde. Außerdem hat die Erde eine Atmosphäre von ca. 100km, wo Photonen aus dem interstellaren Raum, also auch vom Orionnebel, abgelenkt werden oder diese ganz einfach mit Teilchen reagieren. Deshalb werden die besten Aufnahmen auch im Erdorbit gemacht. Das bekannteste hier ist das Hubble-Weltraumteleskop der Raumfahrt-Organisationen NASA und ESA. Außerdem war in der Nacht der Aufnahmen, der Orionnebel so gelegen, dass er über der Müllverbrennungsanlage der Stadt Wuppertal zu sehen war. So hatte ich immer wieder Nebel oder Rauchschwaden im Bild, was zur Minderung der Qualität beigetragen hat.

5.3.3 Quanteneffizienzkurve

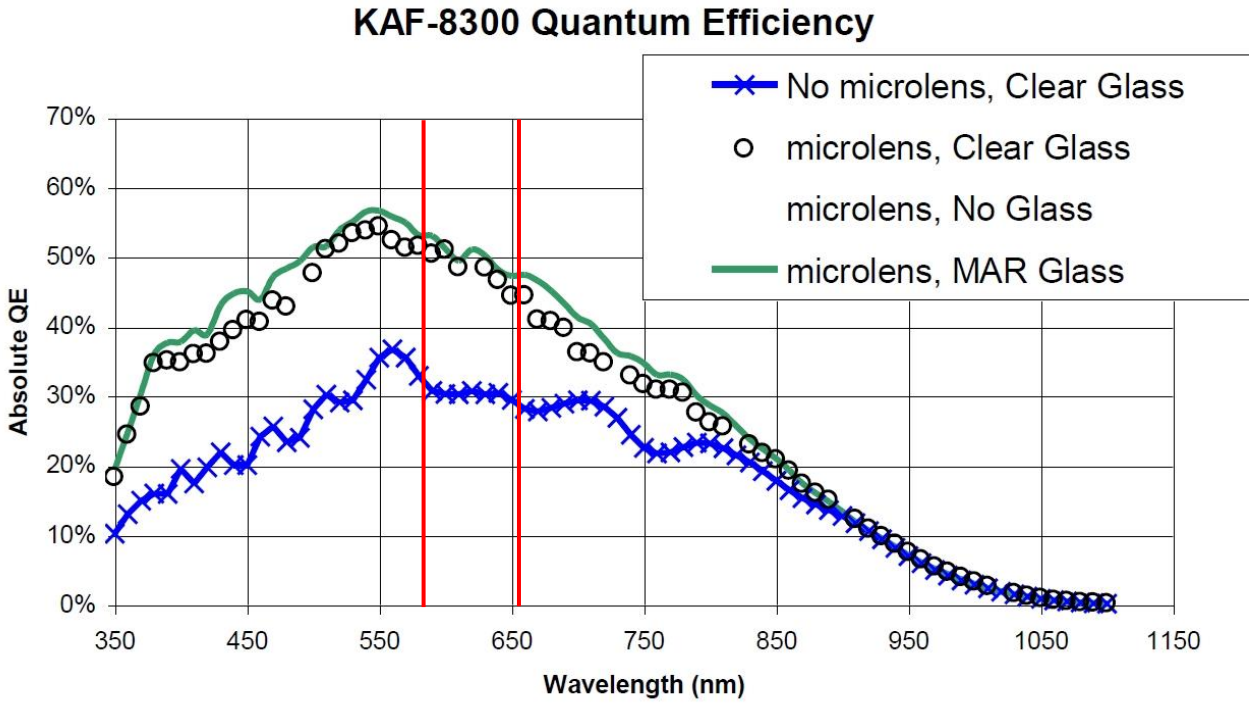

Abbildung 42 Quanteneffizienzkurve der SBIG KAF-8300 CCD Kamera (in Rot die relevanten Wellenlängen)

Die oben aufgeführte Grafik zeigt die Quanteneffizienzkurve der in meinem Spektrum verwendeten CCD-Kamera SBIG STF-8300M. Diese zeigt auf der X-Achse die Wellenlänge des Lichts (in nm) und auf der Y-Achse zeigt sie die absolute Quanteneffizienz abhängig von der Wellenlänge. Die Quanteneffizienz beschreibt die Wahrscheinlichkeit mit der ein Photon

ein Elektron aus dem Ladungsträger herausschlägt. Man sieht eindeutig, dass das Maximum der Kurve bei ca. 550nm liegt. Hier hat die Kamera ihre höchste Empfindlichkeit. Um nun eine optimale Auswertung vorzunehmen, müsste man diese Kurve durch die des Spektrums dividieren und dann ein Verhältnis der einzelnen gemessenen Punkte aufstellen und berücksichtigen, um am Ende ein perfektes Ergebnis zu bekommen. In meiner Arbeit habe ich diesen Schritt vernachlässigt, da die Kamera bei den relevanten Wellenlängen nur einen Empfindlichkeitsunterschied von ca. 5% hat und somit erstmal vernachlässigt werden kann.

5.3.4 Schlussfolgerung

Obwohl viele Fehlerquellen bestehen und nicht berücksichtig wurden, möchte ich kurz darauf eingehen, warum dies nicht getan wurde. Zum einen ist die Einberechnung der Extinktion nur dann wichtig, wenn Absolut-Intensitäten betrachtet werden. Da ich aber alle gemessenen Intensitäten immer in Relation setze, spielt die Extinktion, also die Abschwächung des Lichts durch interstellare Materie und die Erdatmosphäre, keine große Rolle. Ebenfalls wurde die Quanteneffizienzkurve der Kamera nicht mit einbezogen. Jedoch wenn man diese genauer betrachtet, sieht man, dass diese im Bereich von 450 – 650 nm, also dem Bereich der für die Auswertung besonders wichtig war, sich nicht viel verändert und so keine größere Abweichung herbeiführen kann.

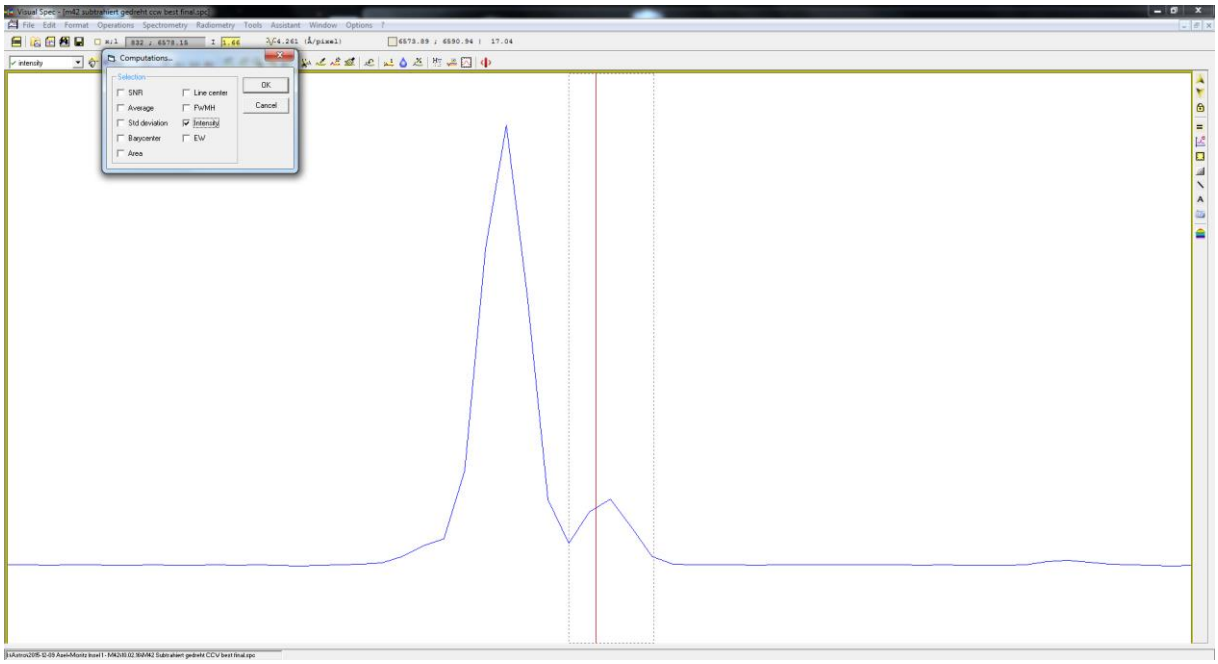

Abbildung 43 Ausschnitt aus dem Spektrum; großer Peak ist die Halpha Linie; links und rechts liegen die [NII] Linien

Somit ist die größte Fehlerquelle für die Abweichung die Ungenauigkeit der Aufnahmen. Und dies ist auch erkennbar. Denn wenn man sich das Spektrum und genauer den Bereich um 650 nm anschaut, welcher zwei der drei relevanten NII Linien beinhaltet, sieht man, dass die NII Linien fast schon mit der sehr ausgeprägten Hα Linie verschmolzen sind. Dies ist ein Problem, denn nun kann man nur noch sehr schwer die Intensitäten dieser Linien genau bestimmen.

Also schlussfolgere ich daraus, dass eine genauere Aufnahme den größten Fehler vermeiden kann.

5.4 Aufbau II: Hochauflösende Echelle Spektroskopie

Da die größten Fehler der Auswertung der Elektronentemperatur bei der Genauigkeit der Spektren entstehen, habe ich in einem zweiten Versuch mit neuem experimentellem Aufbau hochauflösende Spektren angefertigt.

5.4.1 Gerätschaften

5.4.1.1 Planewave CDK 20“ Teleskop

Technische Daten des CDK 20“	
Öffnung	20“ (ca. 51cm)
Brennweite	3.454 mm
Bildfeldgröße	52mm
Öffnungsverhältnis	f / 6.8
Tubuslänge	1151mm
Gewicht	64kg

Abbildung 44 Planewave CDK 20" Teleskop montiert auf einer 10Micron GM 4000 HPS II GoTo-Montierung an Station 7 des Schülerlabors des Carl-Fuhlrott-Gymnasims

Das neue CDK 20“ Teleskop des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums, geliefert und aufgebaut Ende September 2016 von der Firma Baader Planetarium, bietet mit seinem knapp 50cm Hauptspiegel die Möglichkeit noch weiter in die Tiefen des Universums zu blicken, als mit dem zuvor beschriebenem Celestron Edge HD 11“ Teleskop. Das Teleskop ist moniert auf einer 10Micron GM4000HPS-Montierung. Durch diese Kombination erreicht der Aufbau eine Nachführgenauigkeit von knapp einer Bogensekunde und ist somit optimal geeignet für empfindliche Spektren mit dem hochauflösenden BACHES Echelle Spektrograph.

5.4.1.2 Baches Echelle Spektrograph

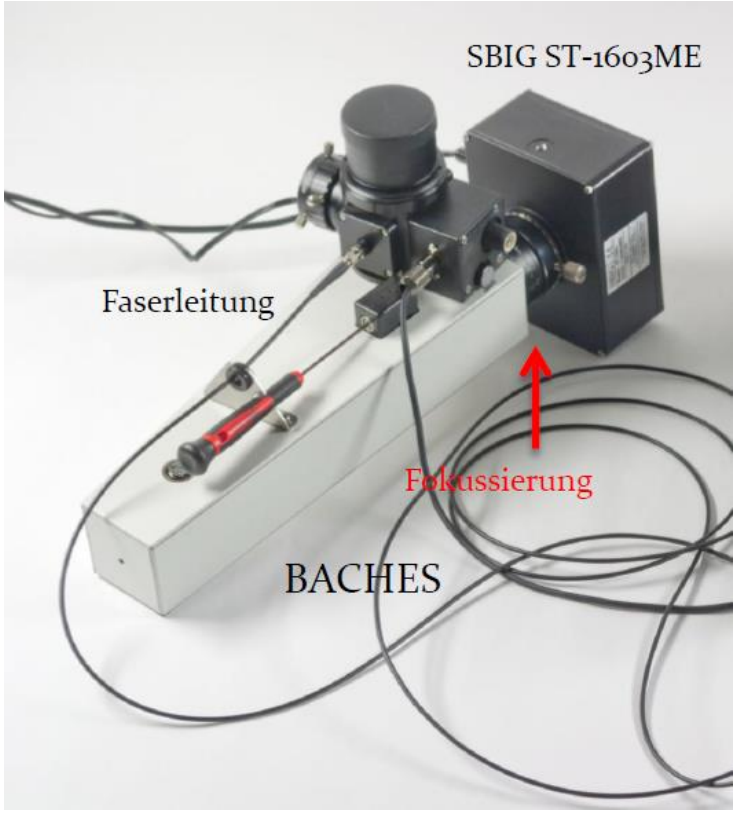

Abbildung 45 BACHES Echelle Spektrograph mit SBIG ST-1603ME Kamera

Mittleres spektrales Auflösungsvermögen	R=18000
Optimierter, durchgehender Spektralbereich	392nm-800nm
Spaltgröße einstellbar	25 µm und 50 µm, jeweils 125 µm lang
Gewicht	1350g

Der BACHES (Basic Echelle Spektrograph) Spektrograph ist ein professioneller und hochauflösender Spektrograph für Amateurastronomie. Er funktioniert nach dem Prinzip der Echelle-Gitter Spektroskopie und ist somit optimal für hochauflösende Spektren geeignet.

5.4.1.3 SBIG CCD Kamera

Bei der SBIG STF-8300M CCD Kamera handelt es sich um eine Schwarz-Weiß CCD-Kamera, mit eingebauter eigener Kühlung. Dank ihrer Kühlung von bis zu 40 Grad Celsius unter der Umgebungstemperatur, gelingt es das Hintergrundrauschen mit ihr sehr stark zu begrenzen. Außerdem besitzt die Kamera die Möglichkeit extrem kurze Belichtungszeiten zu benutzen, um so schon geringste Helligkeits-veränderungen zu beobachten. Dadurch kann man theoretisch sogar Exoplaneten nachweisen. Durch den großen CCD-Chip der Kamera eignet sie sich hervorragend auch für Weitbildaufnahmen und kam somit gelegen für den Orionnebel. Die Kamera besitzt zu dem die Funktion, einen automatischen Dark Frame zu erstellen, wodurch grobe Hotpixel bereits vor den Aufnahmen entfernt werden konnten. Eine geeignete Kamera um professionelle Bilder zu erstellen. Verwendet wurde diese Kamera bei beiden Aufnahmen der Spektren, sowohl mit dem DADOS-Spektrographen, als auch mit dem BACHES Echelle Spektrographen.

Abbildung 46 SBIG STF-8300M CCD Kamera

5.4.2 Experimenteller Aufbau

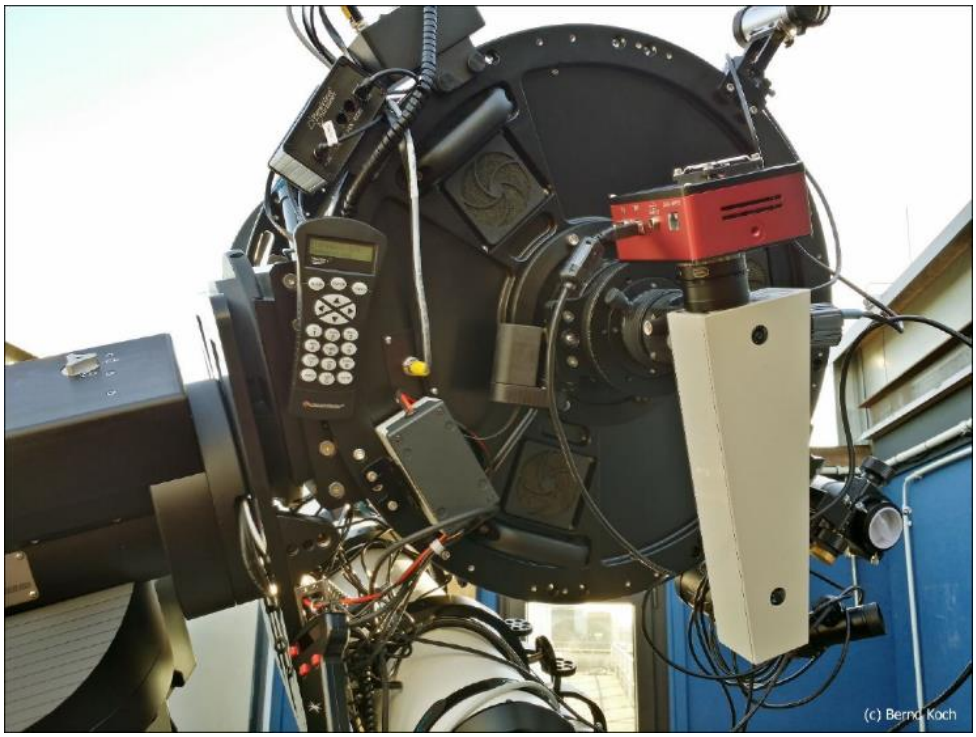

Abbildung 47 BACHES Spektrograph mit SBIG STF-8300M CCD Kamera montier am CDK 20" Teleskop

An dem CDK 20 Teleskop, welches auf einer 10Micron GM4000HPS Montierung befestigt ist, wurde der Spektrograph befestigt und an dem Spektrographen die SBIG CCD Kamera, die zur Aufnahme der Spektren verwendet wurde. Um Referenz- und Kalibrierungsspektren aufzunehmen, die für die Qualität und auch die spätere Auswertung essentiell sind, wurde eine so genannte RCU (Remote Control Unit) verwendet. Diese kann durch einen Kippschalter die Referenzlampen hinzuschalten oder ausschalten und führt über ein Glasfaser-kabel direkt in den Spektrographen. Alle Gerätschaften wurden im Kontrollraum der Station 7 angesteuert und überwacht. Zum einen die Teleskopsteuerung, um den Orionnebel anzufahren. Zum anderen ein Live-Fenster des Spaltes, damit auch die Steuerung der RCU. Zuletzt wurde MaximDL verwendet, um die Kamera anzusteuern und Bilder aufzunehmen.

Abbildung 48 Remote Calibration Unit kurz RCU mit einer Thorium-Argon Referenzlampe und einer Halogen-Flatfield Lampe

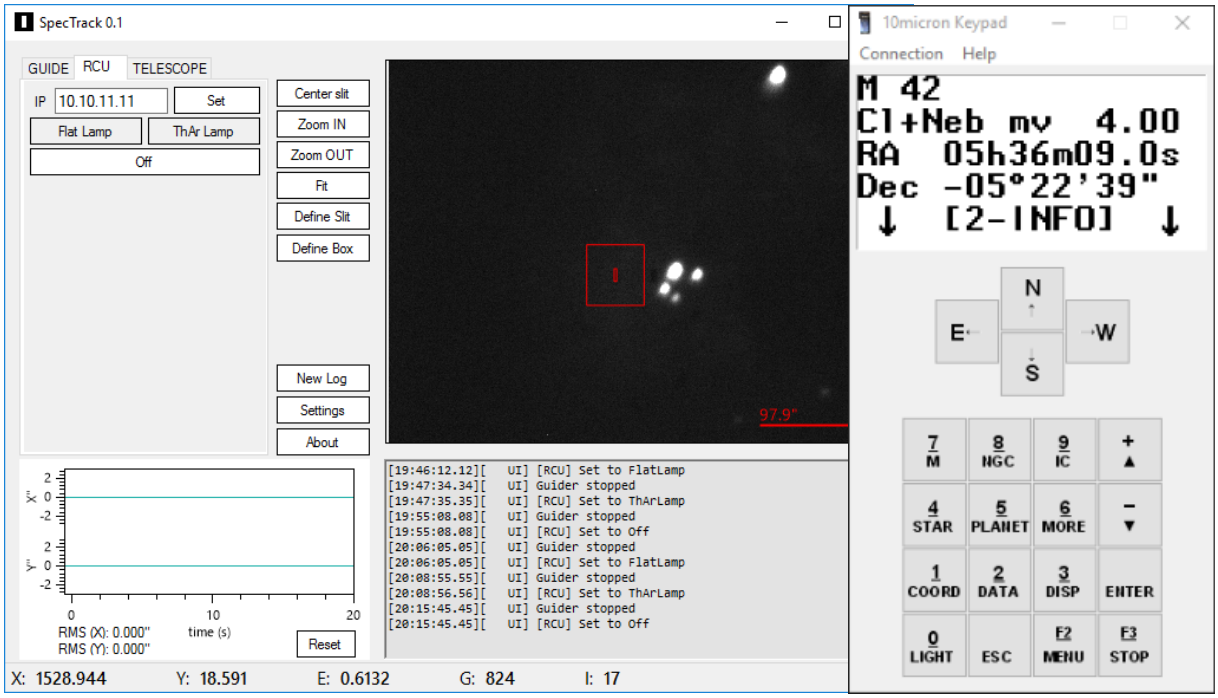

Abbildung 49 Steuerung der RCU mit SpecTrack und Steuerkonsole für die Montierung des Teleskops

5.4.3 Durchführung

Durch die Modernisierung der Station 7 Ende 2016 war die Durchführung der Aufnahmen sehr einfach und unkompliziert und konnten alle über einen einzigen Computer erfasst werden. Aufgenommen wurden am Ende drei verschiedene Bilder. Zum einen das Rohspektrum des Orionnebels selbst. Dann das Thorium-Argon-Referenzspektren der RCU Unit und zuletzt wurden so genannte Flat-Field-Bilder aufgenommen, um die verschiedenen Belichtungsintensitäten zum Rand hin zu kompensieren und potentielle Staubpartikel herauszufiltern.

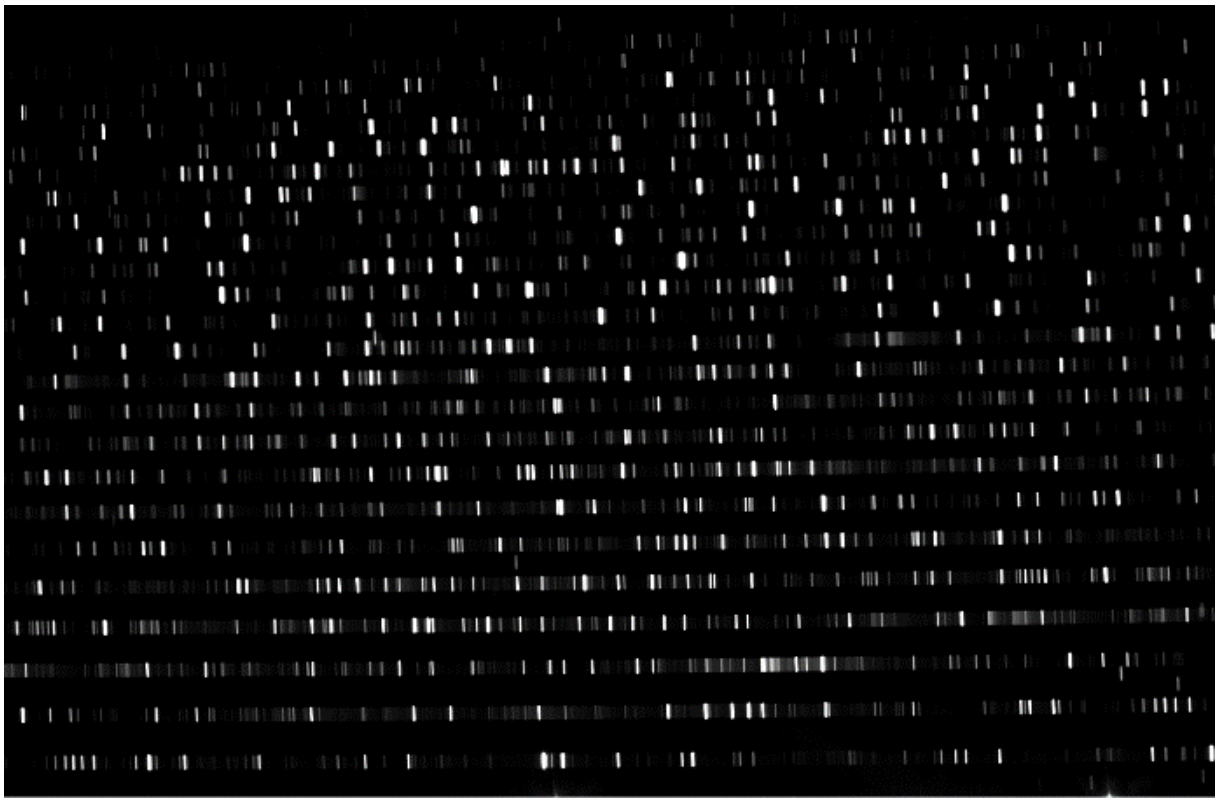

Abbildung 50 Spektrum der Thorium-Argon Lampe; 60 Sekunden Belichtungszeit

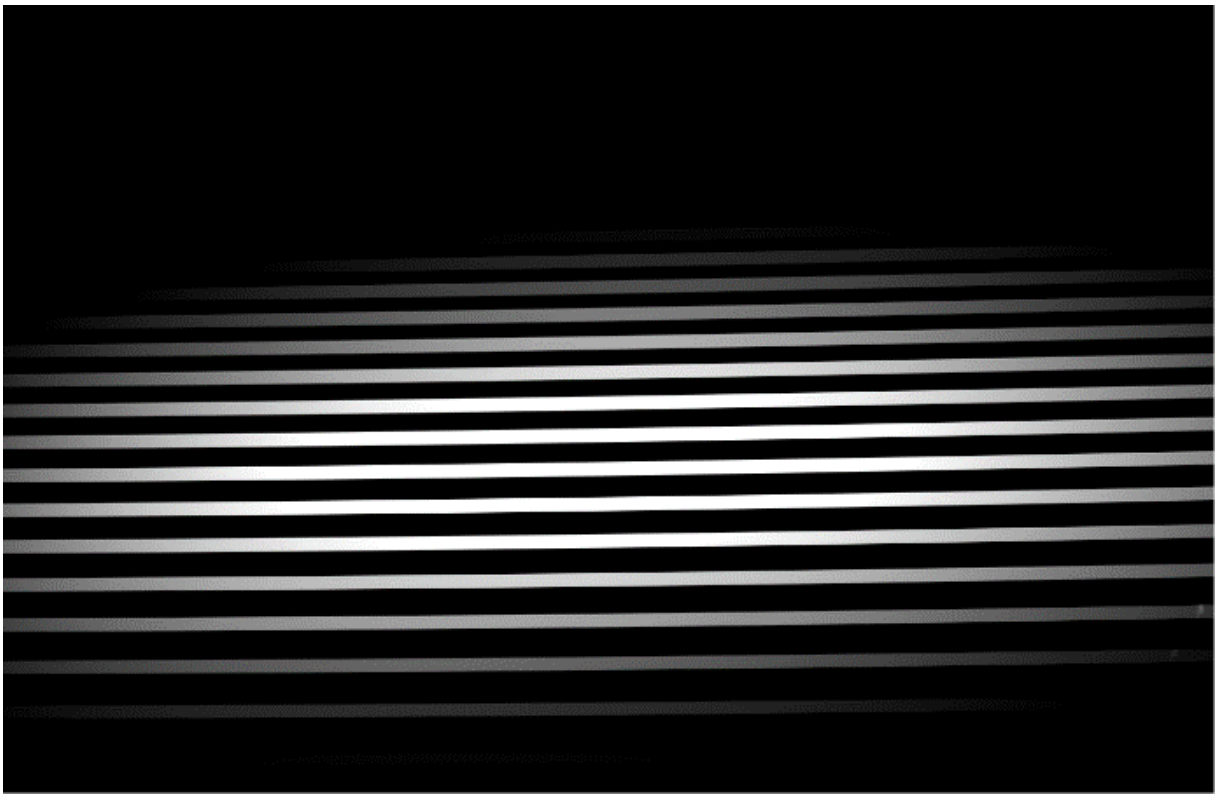

Abbildung 51 Spektrum der Flat-Field Lampe; 4Sekunden Belichtungszeit

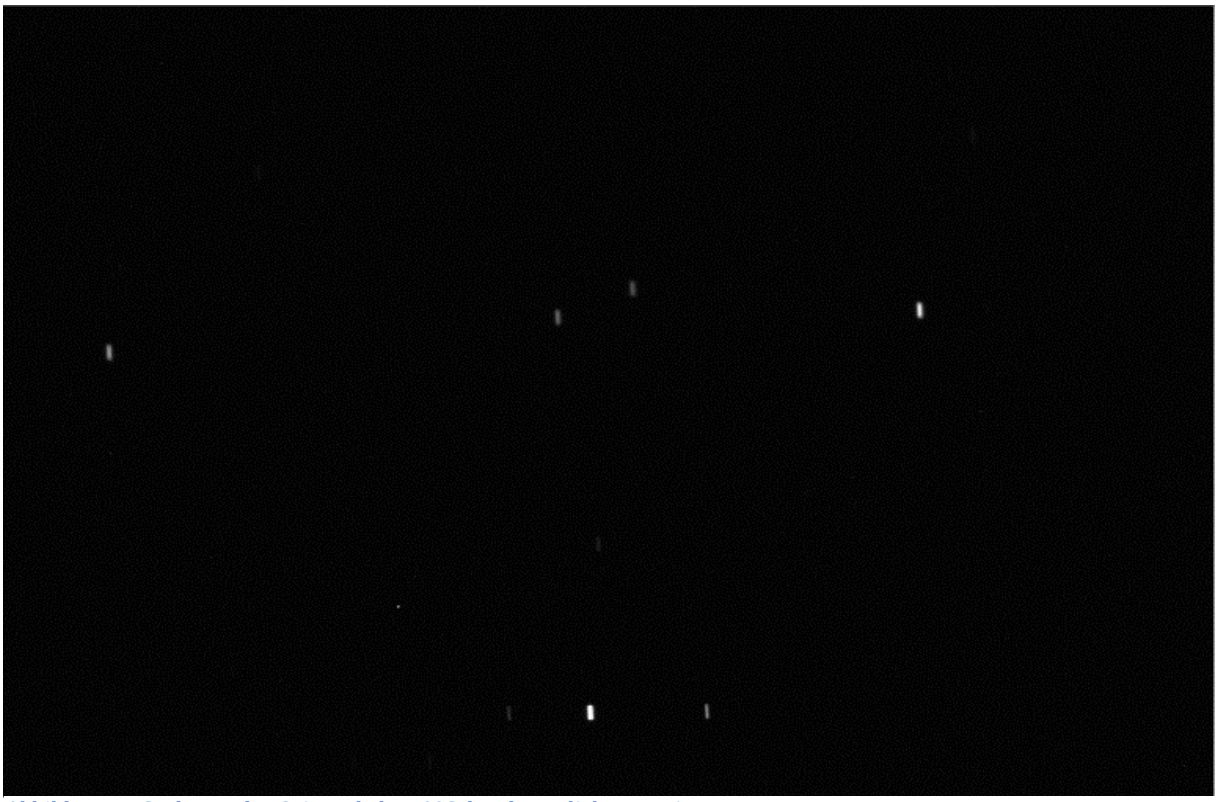

Abbildung 52 Spektrum des Orionnebels; 300Sekunden Belichtungszeit

5.4.4 Bearbeitung

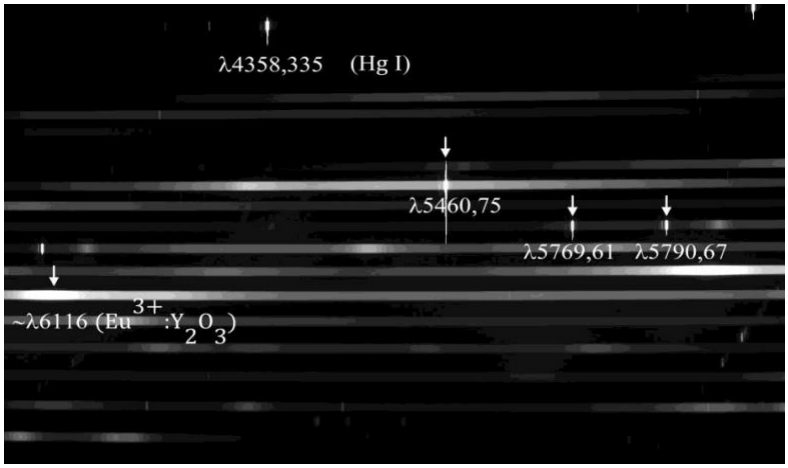

Abbildung 53 Spektrum der bereits zuvor verwendeten Energiesparlampe (unbrauchbar zur Kalibrierung des BACHES)

Um die Spektren des BACHES Echelle Spektrographen zu bearbeiten und zu kalibrieren, habe ich ein von der ESO entwickeltes Analyse-Programm namens ESO-MIDAS benutzt. Dieses ist somit in der Lage Echelle Spektren zu kalibrieren und zu bearbeiten. Dieses benötigt zuerst ein Referenzspektrum mit bekannten Linien, welche es aus einer Internet-Datenbank bekommt. Dabei könnte man die Energiesparlampe verwenden, die ich bereits bei der Kalibrierung der DADOS-Spektren verwendete. Jedoch wird dies problematisch, da die Linien der Energiesparlampe im Spektrum des BACHES viel zu ungenau sind. ESO-Midas benötigt zur optimalen Auswertung mehrere hundert scharfe Linien pro Ordnung. Somit ist die Energiesparlampe zur Kalibrierung unbrauchbar. Deshalb habe ich zur Kalibrierung das Spektrum einer Thorium/Argon Lampe verwendet, welches hunderte scharfe Linien pro Ordnung im BACHES Spektrum hat. Damit Midas im späteren Verlauf alle Spektren übereinanderlegen kann und bestimmte Parameter übernehmen kann, müssen alle Bilder denselben Ausschnitt zeigen. Dazu habe ich alle Bilder

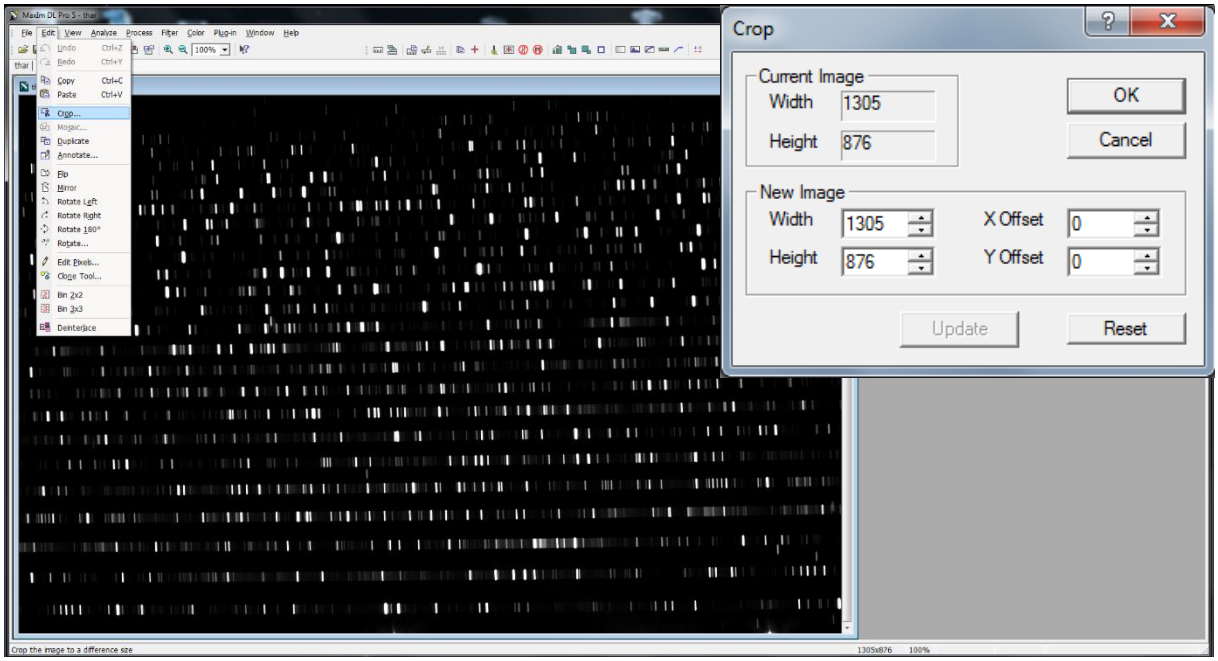

Abbildung 54 Crop-Prozess in MaximDL

in MaximDL gecropt und dann einfach die Größe auf alle Bilder übernommen. Damit haben alle Bilder im Endeffekt dieselbe Größe und ESO-Midas kann diese nun auswerten. Ein

weiteres Problem, dass bei der Bearbeitung meiner Spektren entstand, war die Tatsache, dass alle Bilder gedreht waren. Es war ein Fehler, der mit dem bloßen Auge kaum erkennbar war, jedoch dazu führte, dass Midas das Spektrum nicht mehr erkannt hat. Dazu mussten alle Bilder also korrigiert werden, damit die Bearbeitung problemlos fortgeführt werden konnte. Dies hat natürlich Auswirkungen auf die Qualität des Spektrums am Ende. Der Grund für die Drehung der Bilder war anscheinend eine Drehung der Kamera am Spektrographen, durch Ablegen auf einem Tisch. Da MIDAS nur auf Linux basierten Betriebssystemen funktioniert, musste ich es über eine virtuelle Box laufen lassen, also eine Art Emulator. Damit ich auch von der virtuellen Box auf alle Dateien zugreifen konnte, mussten zuerst alle verwendbaren Datensätze auf einen gemeinsamen Ordner kopiert werden. Dazu wurde ein gemeinsamer Ordner innerhalb der virtuellen Box angelegt, welcher mit „Shared“ bezeichnet wurde. Nach dem Kopieren aller Daten, konnte ich innerhalb des Linux Betriebssystems MIDAS ausführen, indem ich innerhalb des Arbeitsordners eine Konsole öffnete und den Befehl **inmidas** eingab. Daraufhin lief in der Konsole MIDAS. Nun konnte die Bearbeitung beginnen. Zum Start der Kalibrierung wurde der Befehl

midas > set/cont baches

eingegeben. Daraufhin konnte ich nun innerhalb des Ordners eine Kalibrierung des Referenzspektrums durchführen. Mit dem Befehl

Midas > calib/baches ff.fit thar.fit 20 20 20 0 0.5 100

Dabei ist ff.fit die FlatField-Bilddatei; thar.fit die Thorium-Argon-Bilddatei; 20 steh für die gewünschte Anzahl an Ordnungen, die das Programm erkennen soll; 20 und 20 stehen für die zu erkennenden Größen der Ordnungen (vertikal); 0 steht für die Erkennung genau in der Mitte der einzelnen Ordnungen; 0.5 und 100 sind nun Parameter, welche die Qualität des Spektrum beeinflussen und sind experimentell zu optimieren.

wurden dem Programm die benötigten Bilder gegeben. Zum einen das Referenzspektrum zur Wellenlängenkalibrierung der Thorium/Argon Lampe und zum anderen das Flatfield-Bild zur

Erkennung der Ordnungen. Darauf öffnet das Programm ein Fenster, in dem man nun die linke und rechte Scangrenze festlegen soll.

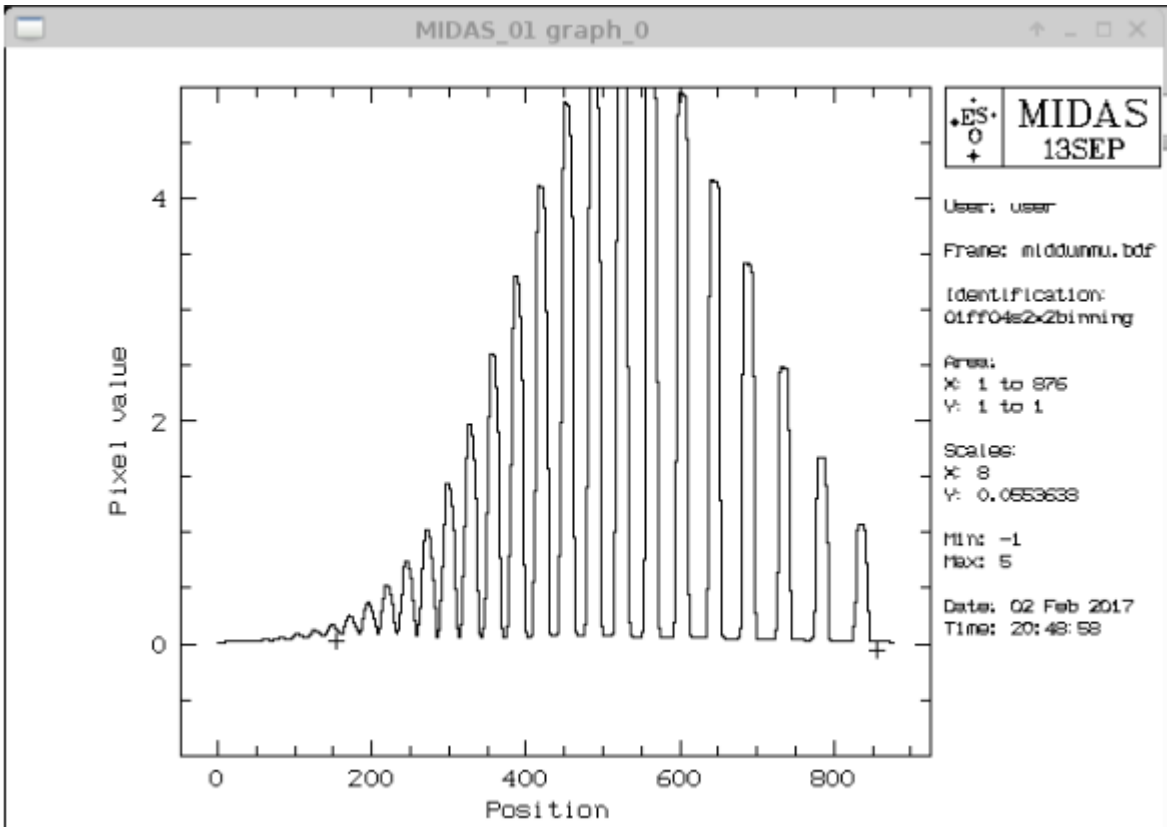

Abbildung 55 Auswahl der Scangrenzen in Midas

Dann zeigt MIDAS noch einmal alle erkannten Ordnungen, im meinem Fall 20 Stück. Wie erwünscht.

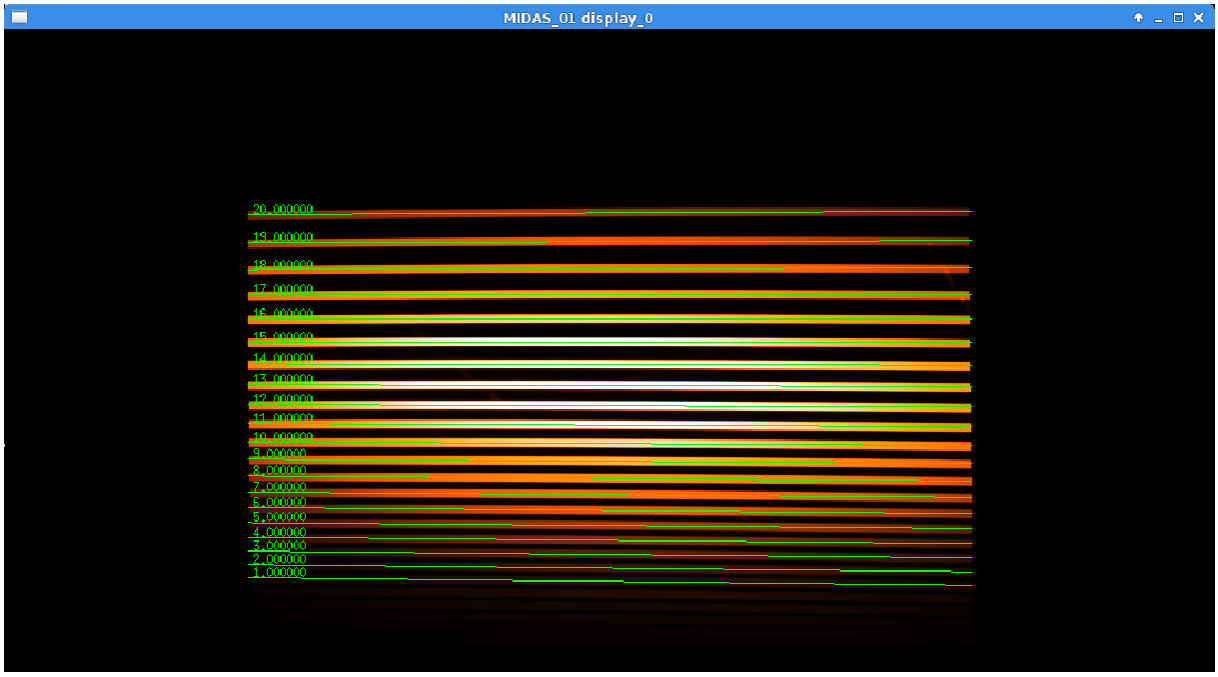

Abbildung 56 Midas erkennt 20 Ordnungen, wie erwünscht

Um das Referenzspektrum nun zu kalibrieren, müssen zwei Wellenlängenpaare in äußeren Ordnungen. Durch die Echelle-Spektroskopie kommen am Rand gelegene Linien in einer zweiten Ordnung wieder. Diese zwei Wellenlängenpaare werden durch einfaches Klicken mit der Maus ausgewählt. Mit einem Klick auf die rechte Maustaste wird die Auswahl bestätigt. Daraufhin erkennt das Programm alle Linien des Spektrums und gibt diese als Grafik aus.

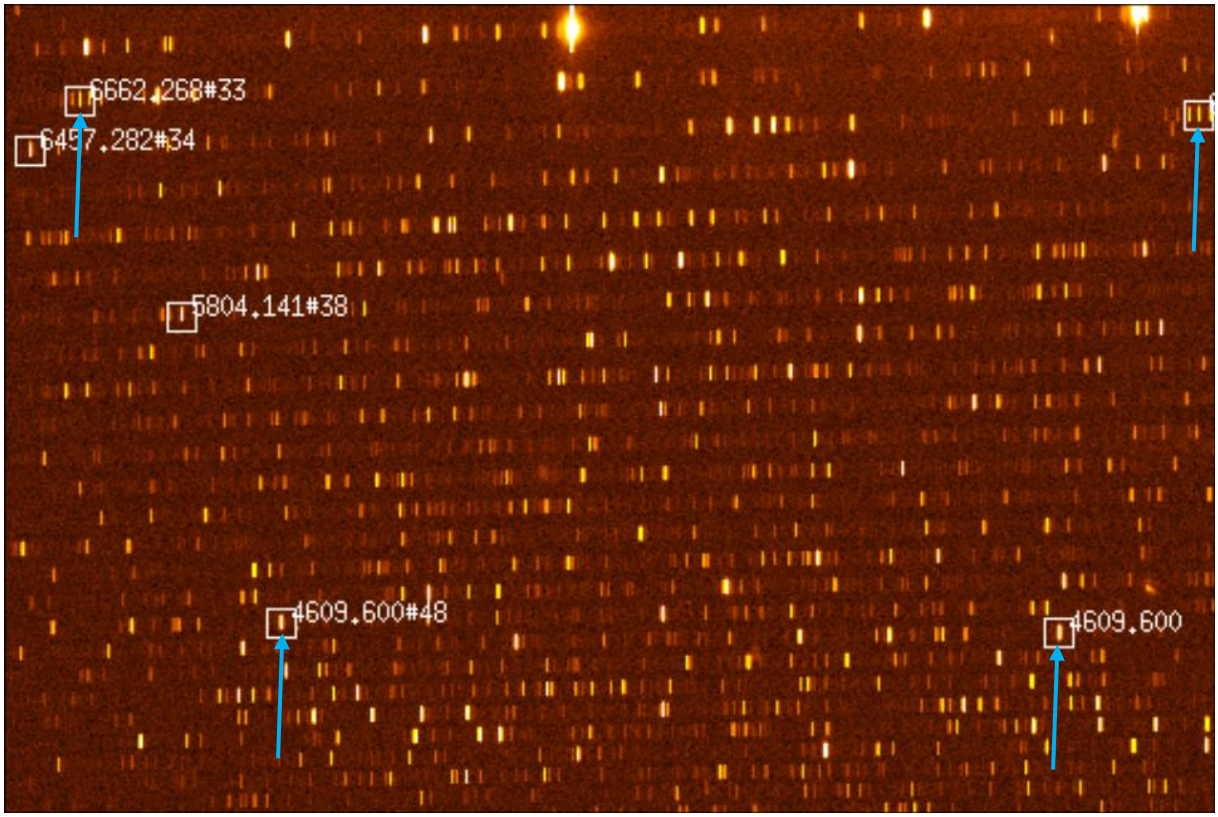

Abbildung 57 Auswahl von Referenzlinien im Thorium-Argon Spektrum

Als nächstes zeigt das Programm das Ergebnis der Kalibrierung. Also das spektrale Auflöse-vermögen. Dieses liegt in meinem Fall etwas niedrig, was auf das schon angesprochene Problem der gedrehten Bilder zurückzuführen ist. Der Hersteller gibt ein Auflösungsvermögen von R=18000 an. Jedoch wird das Auflösungsvermögen mit immer größerer Wellenlänge besser. Dies ist wichtig, denn Linien, welche besonders wichtig für die spätere Auswertung sind, liegen um den Bereich von 6.500 Å. Jedoch sollte man immer im Hinterkopf behalten, auf welchem Niveau man nun kritisiert. Zum Vergleich der vorher verwendete DADOS-Spektrograph hat mit dem verwendeten 200Linien/mm Gitter ein Auflöse vermögen von R=543

```
Terminal - user@localhost:~/Desktop/a
File  Edit  View  Terminal  Tabs  Help
-------------------------------
INPUT TABLE : line.tbl
POLYNOMIAL DEGREE :   4
SEQ.NO  SPECTRAL  NO.LINES  WL START    WL END  STD. DEV.
         ORDER                                  ANGSTROEM
------  --------  --------  --------    ------  ---------
     1        52        13   4226.92   4364.63    0.00313 *FROM 2D SOLUTION*
     2        51        19   4309.68   4450.13    0.00599 *FROM 2D SOLUTION*
     3        50        19   4395.76   4539.05    0.00522 *FROM 2D SOLUTION*
     4        49        13   4485.36   4631.59    0.00440 *FROM 2D SOLUTION*
     5        48        19   4578.70   4727.99    0.00436 *FROM 2D SOLUTION*
     6        47        23   4676.02   4828.49    0.00372 *FROM 2D SOLUTION*
     7        46        22   4777.56   4933.35    0.00466 *FROM 2D SOLUTION*
     8        45        17   4883.62   5042.87    0.00358 *FROM 2D SOLUTION*
     9        44        20   4994.50   5157.37    0.00517 *FROM 2D SOLUTION*
    10        43        27   5110.54   5277.18    0.00470 *FROM 2D SOLUTION*
    11        42        23   5232.10   5402.69    0.00401 *FROM 2D SOLUTION*
    12        41        26   5359.59   5534.32    0.00510 *FROM 2D SOLUTION*
    13        40        26   5493.46   5672.53    0.00330 *FROM 2D SOLUTION*
    14        39        29   5634.18   5817.81    0.00448 *FROM 2D SOLUTION*
    15        38        33   5782.30   5970.74    0.00386 *FROM 2D SOLUTION*
    16        37        41   5938.42   6131.92    0.00433 *FROM 2D SOLUTION*
    17        36        32   6103.20   6302.05    0.00444 *FROM 2D SOLUTION*
    18        35        25   6277.39   6481.90    0.00585 *FROM 2D SOLUTION*
    19        34        26   6461.81   6672.31    0.00558 *FROM 2D SOLUTION*
    20        33        18   6657.40   6874.25    0.00550 *FROM 2D SOLUTION*
-------------------------------------------------------------
                                      MEAN RMS:   0.00457
** TOTAL NUMBER OF LINES :     471 **
*************************  Verification  ***********************************

1) Minimum number of selections per order : 6
   If the number of selections in any order (column NO.LINES above)
   is less or equal than the minimum, this order should be checked.

2) Percentage of identifications among the half brighter lines : 56 %
   This percentage must be as high as possible (above 50%). Low values
   indicate an uncertain calibration.
```

Abbildung 58 quadratischen Mittelwert des Fehlers beträgt nur 0.00457 Ångström

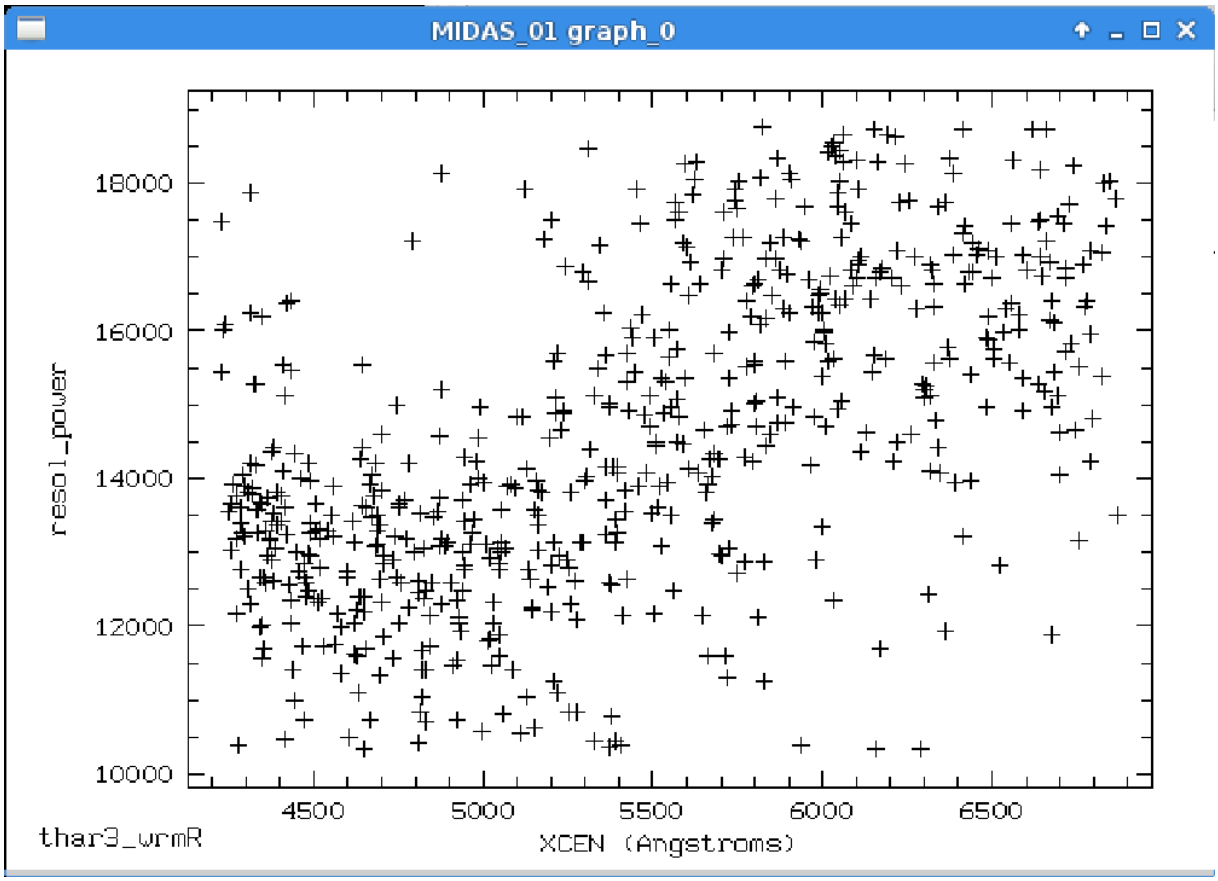

Abbildung 59 Spektrales Auflösungsvermögen in Abhängigkeit der Wellenlänge

Als nächstes wird nun das eigentliche Spektrum kalibriert und dies mit nur einem einzigen Befehl

Midas > pipeline/baches m42.fit

Dadurch wird das gesamt Spektrum wellenlängenkalibriert und sowohl als PDF, als auch als PNG ausgegeben. Außerdem werden, um das Spektralprofil später noch einmal darzustellen als fit-Datei ausgegeben. Damit ist die Bearbeitung abgeschlossen.

5.4.5 Auswertung der Elektronentemperatur

Nach demselben Prinzip, wie bereits in Kapitel 5.2.5 erklärt

	I (6584)	I (6548)	I (5755)		R
1	65.272	20.321	0.691		123.868
2	64.634	20.321	0.691		122.945
3	64.634	20.169	0.726		116.808
4	65.055	20.169	0.726		117.388
5	64.491	20.157	0.6398		132.469
6	64.634	20.157	0.6		141.318
7	64.815	20.157	0.6		142
8	65.055	20.157	0.691		124.033
9	64.816	20.157	0.691		122.971
10	64.491	20.185	0.691		122.541
Ø	64.790	20.195	0.67286667		126.59

Abbildung 60 Wertetabelle der Intensitäten der [NII] Linien im BACHES Spektrum

Errechnung eines Mittelwertes

$$\bar{T}_e = \frac{1}{\mathrm{n}}\sum_{i=1}^{\mathrm{n}} T_{e_i} = 8896K$$

Standardabweichung

$$\sigma_{T_e} = \sqrt{\frac{\sum {T_e}^2 - \frac{1}{\mathrm{n}}(\sum T_e)^2}{\mathrm{n}-1}} = 435{,}88\ K$$

Ergebnis

$$T_e = 8896 \pm 436K$$

Das Ergebnis habe ich wiederum mit der Vergleichsarbeit[5] abgeglichen, dieses Mal jedoch in einer anderen Region des Orionnebels.

[5] Jessica Anne Harris - SPECTROSCOPY OF THE EXTENDED ORION NEBULA – 2010 – S. 122

Daraus ergibt sich dann mit dem Vergleich zur Vergleichsarbeit eine relative Abweichung

$$\frac{\Delta T_e}{T_e} = 3\%$$

Table 4.3. Electron Temperatures and Densities*

Sample Name	T_e [N II]			
1east	8116			
1west	9650			
2east	10690			
2mid	9290			
2west	8690			
3east	10400			
3mid	9270			
3west	8600			
4east	9260			
4mid	9480			
4west	9060			
5east	8960			
5mid	9240			
5west	8030			
6east	10340			
6mid	9710			
6west	8830	8420	850	2510
7east	7900	8430	1740	—
7mid	10060	8340	2630	4040
7west	9340	8200	1330	2790
8east	8140	—	1190	—
8mid	10180	8650	3350	3290
8west	8400	8700	1610	9830
9east	9200	9260	1650	4660
9mid	10050	8240	5440	3460
9west	8950	7750	550	1310
10east	8940	8050	1580	900
10mid	11390	8500	5820	4250
10west	9190	8000	1550	5000
11east	9360	8820	1740	2080
11mid	10210	8080	3800	7490
11west	8350	7750	1130	10690

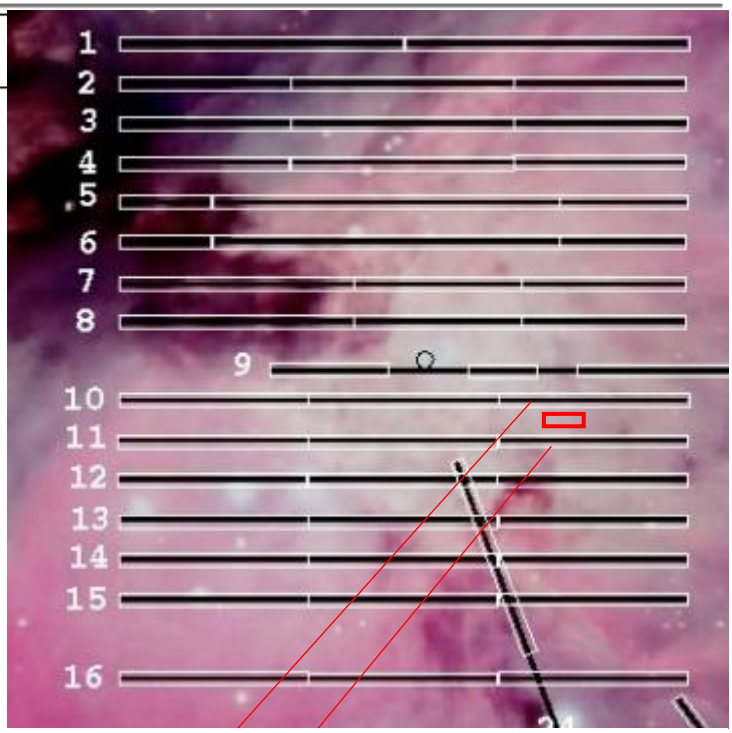

Abbildung 61 Relative Lage des Spaltes meiner Aufnahmen (rot) zur Vergleichsarbeit (schwarz)

Abbildung 62 Originalauszug aus Jessica Anne Harris - SPECTROSCOPY OF THE EXTENDED ORION NEBULA (rot gekennzeichnet sind die relevanten Messdaten)

6 Ergebnisse

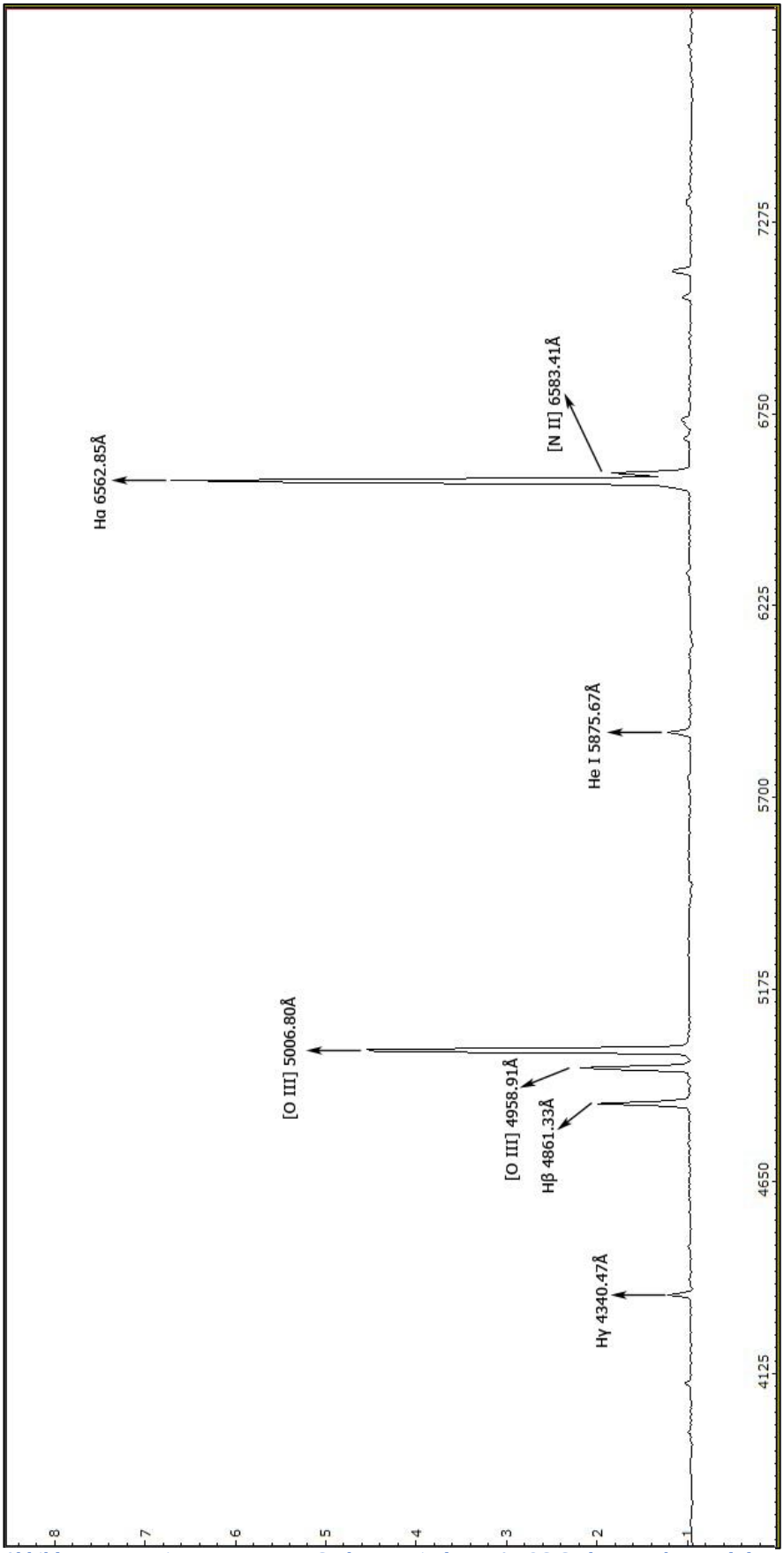

Abbildung 63 Fertig ausgewertetes Spektrum mit dem DADOS-Spektrographen und dem 200Linien/mm Gitter

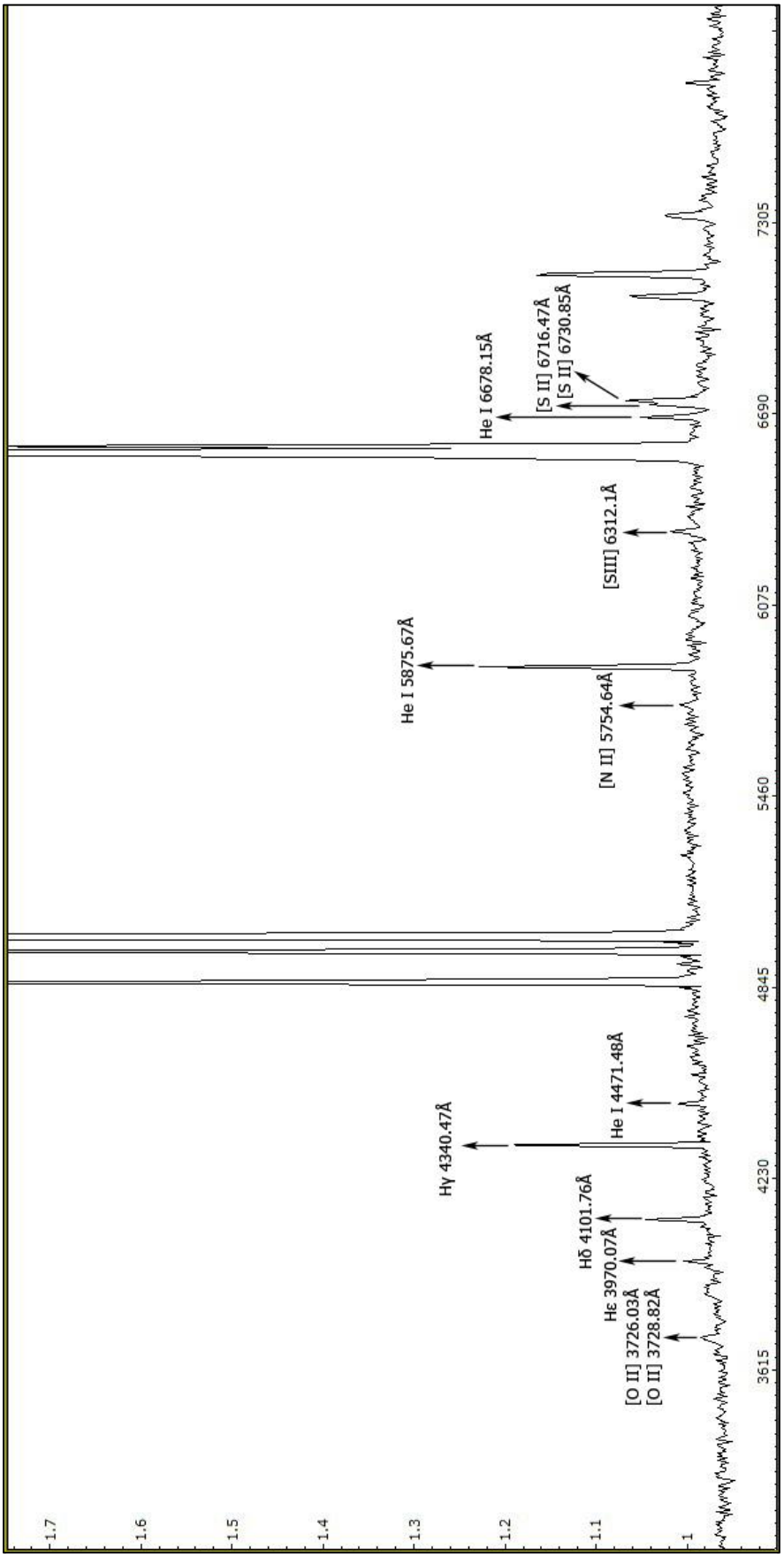

Abbildung 64 Fertig ausgewertetes Spektrum mit dem DADOS-Spektrographen und dem 200Linien/mm Gitter (Herangezoomt)

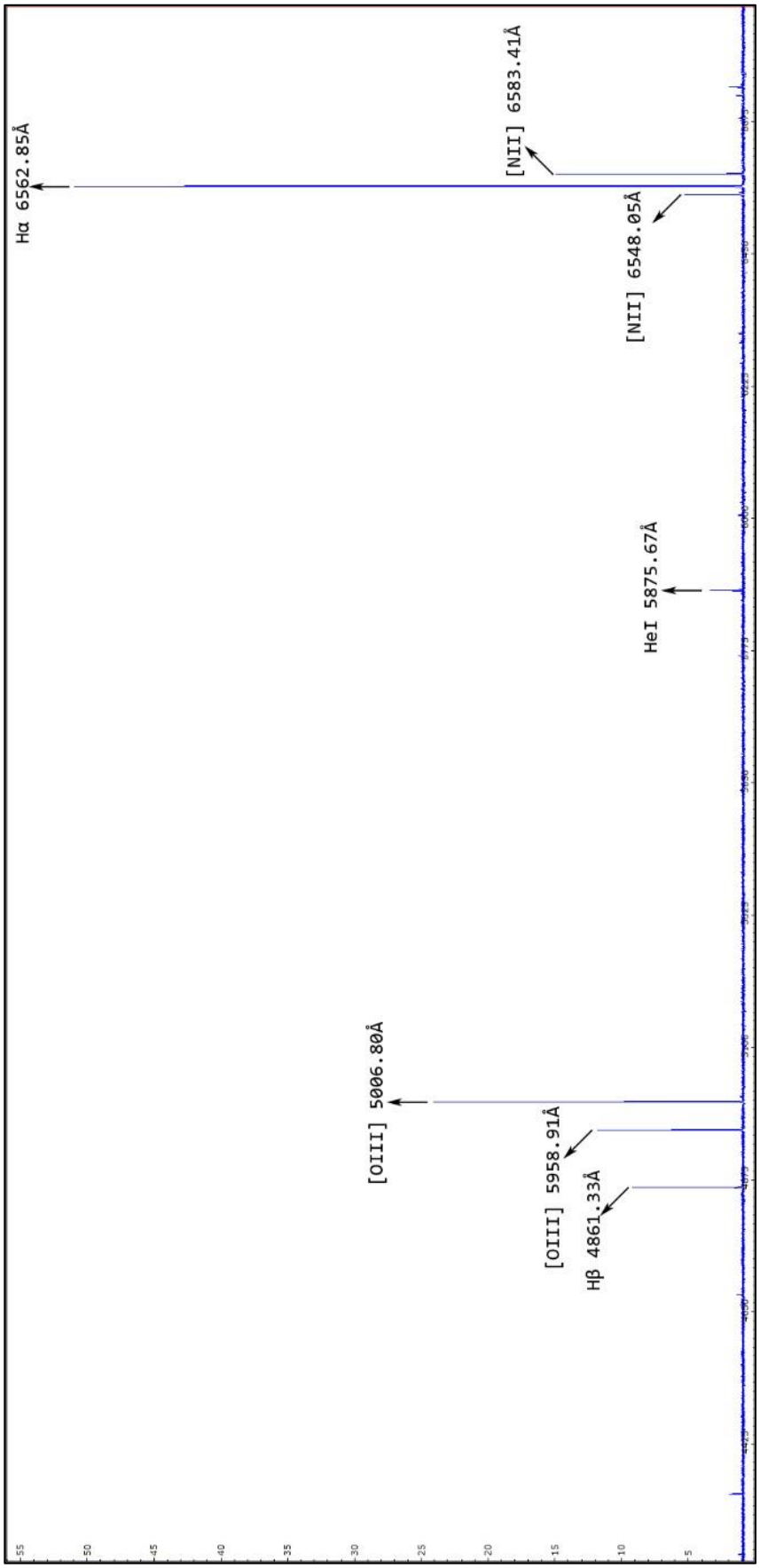

Abbildung 65 Fertig ausgewertetes Spektrum mit dem BACHES Echelle Spektrographen

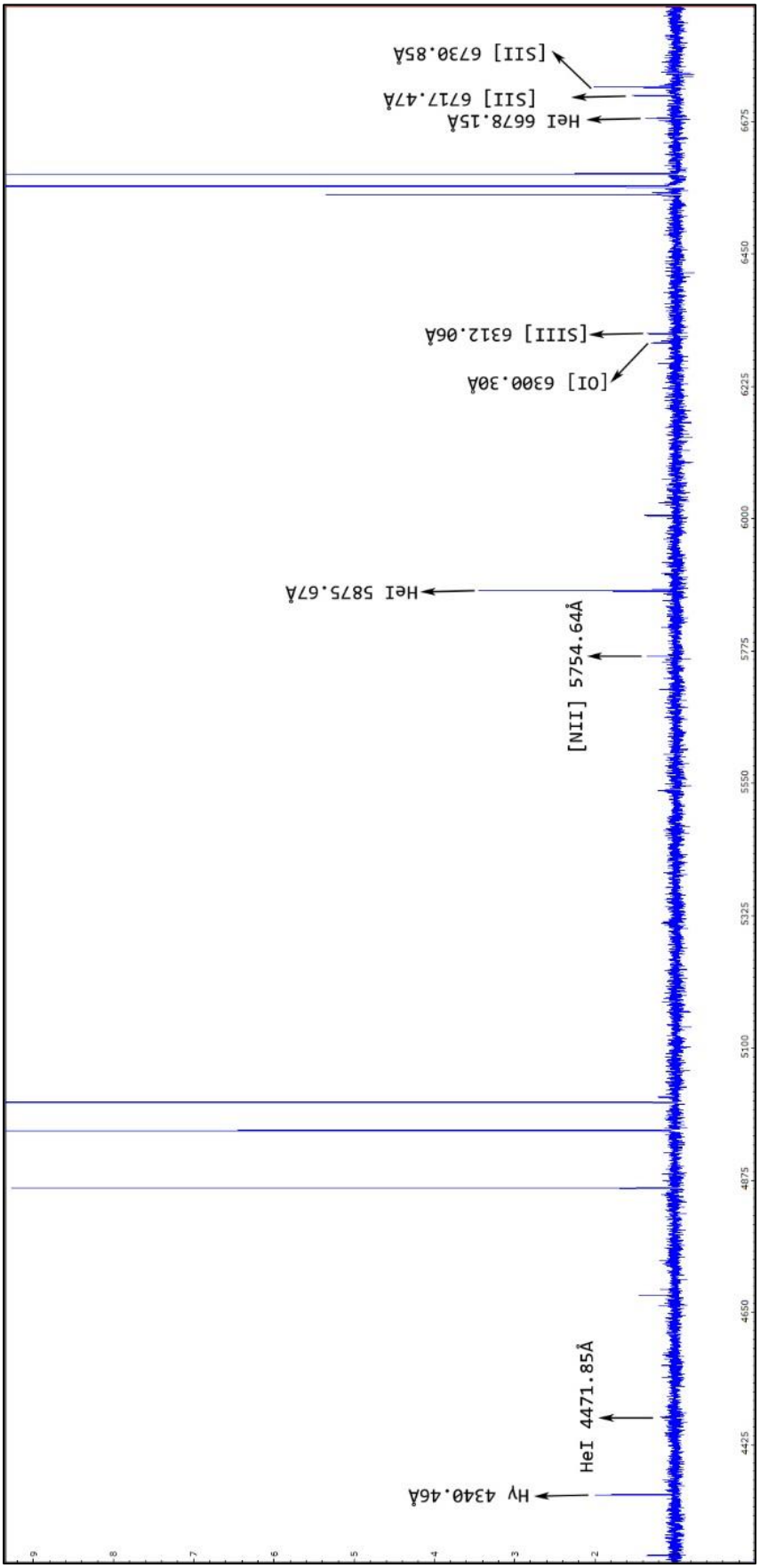

Abbildung 66 Fertig ausgewertetes Spektrum mit dem BACHES Echelle Spektrographen (Herangezoomt)

6.1 Zusammensetzung

Aus der Auswertung der Spektren kann ich zusammenfassend sagen, dass der Orionnebel zum größten Teil aus Wasserstoff, Helium, Sauerstoff. Stickstoff und Schwefelspuren besteht.

6.1.1 Verbotene Übergänge

Manche Elemente sind in der Beschriftung der Spektren in eckigen Klammern dotiert. Diese sind so genannte verbotene Übergänge, oder auch verbotene Elemente. Sie existieren in so einer Form nicht auf der Erde und konnten am Anfang der Spektroskopie auch nicht identifiziert werden. Lange Zeit hielt man es für ein neues, noch unentdecktes Element, das so genannte „Nebulium“. Erst Ira Sprague Bowen konnte 1927 diese verbotenen Linien im Spektrum erklären. Es sind mehrfach ionisierte Atome, die nur in sehr verdünnten Gasen auftreten und somit auf einem höheren Energieniveau existieren können. Dies tritt nur auf, bei einer Dichte von unter 10^8 Teilchen/cm³.

6.2 Elektronentemperatur

6.2.1 DADOS-Spaltspektrograph mit 200Linien/mm Gitter

Mittelwert

$$\bar{T}_e = \frac{1}{\mathrm{n}}\sum_{i=1}^{\mathrm{n}} T_{e_i} = 12087{,}3\ K$$

Standardabweichung

$$\sigma_{T_e} = \sqrt{\frac{\sum {T_e}^2 - \frac{1}{\mathrm{n}}(\sum T_e)^2}{\mathrm{n}-1}} = 672{,}6\ K$$

Ergebnis

$$T_e = 12087 \pm 673K$$

Daraus ergibt sich dann mit dem Vergleich zur Vergleichsarbeit eine relative Abweichung

$$\frac{\Delta T_e}{T_e} = 14\%$$

6.2.2 BACHES Echelle Spektrograph

Mittelwert

$$\bar{T}_e = \frac{1}{\mathrm{n}} \sum_{i=1}^{\mathrm{n}} T_{e_i} = 8896K$$

Standardabweichung

$$\sigma_{T_e} = \sqrt{\frac{\sum {T_e}^2 - \frac{1}{\mathrm{n}} (\sum T_e)^2}{\mathrm{n} - 1}} = 435{,}88\ K$$

Ergebnis

$$T_e = 8896 \pm 436K$$

Daraus ergibt sich dann mit dem Vergleich zur Vergleichsarbeit eine relative Abweichung

$$\frac{\Delta T_e}{T_e} = 3\%$$

6.3 Vergleich der Spektren

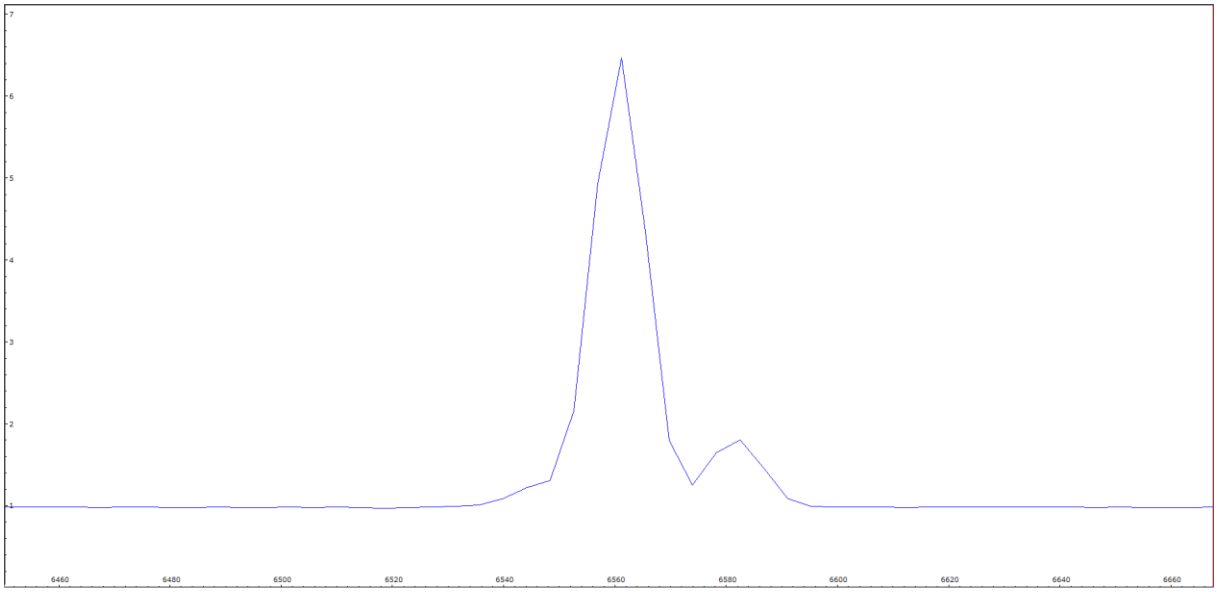

Abbildung 67 Ausschnitt aus dem DADOS-Spektrum (646-666 nm)

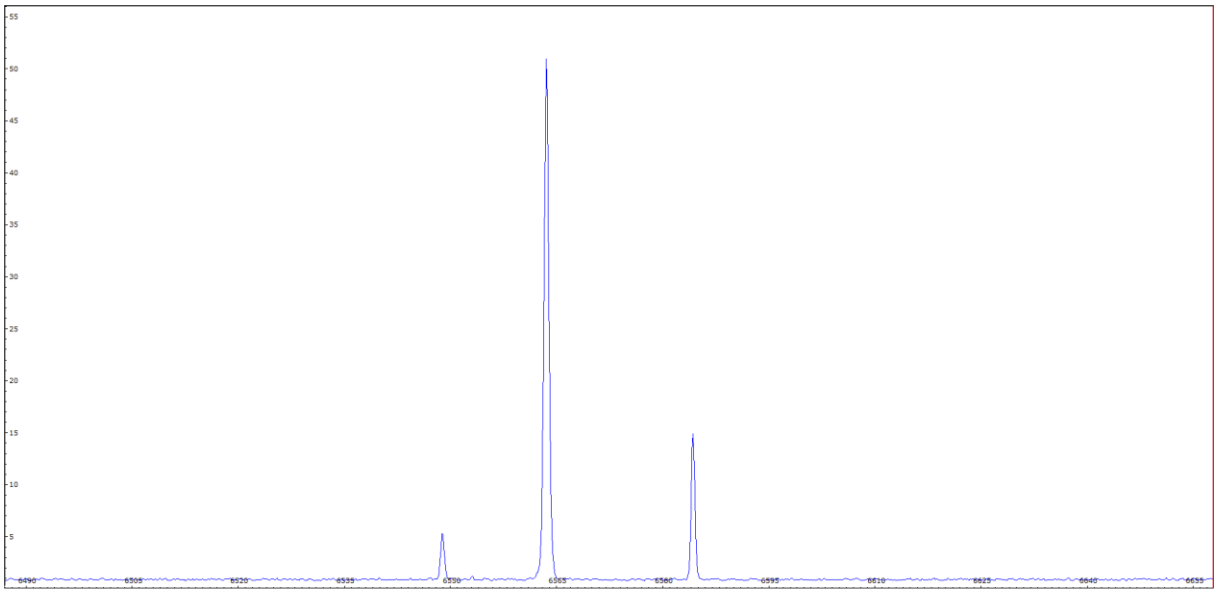

Abbildung 68 Ausschnitt aus dem BACHES-Spektrum (649-665 nm)

Beide zeigen ungefähr denselben Ausschnitt von ca. 645 – 665 nm. Oben der Dados-Spektrograph mit 200Linien/mm-Gitter und unten der BACHES Echelle Spektrograph. Während bei dem Dados-Spektrum die Hα-Linie mit den beiden [NII]-Linien verschmilzt sind sie bei dem BACHES-Spektrum sauber getrennt und klar unterscheidbar. Dadurch ergibt sich eine klare Verbesserung des Ergebnisses.

7 Danksagung

Zuletzt möchte ich mich bedanke, bei allen die das Projekt unterstützt oder überhaupt erst möglich gemacht haben. Als erstes möchte ich meinen ganz besonderen Dank an Herrn Bernd Koch aussprechen, welcher mich seit Beginn der Q1 und Wahl des Projektkurses Astronomie unterstützt und ausgebildet hat. Nicht nur, dass er zu Beginn des Projektkurses mich in die Methoden der Spektroskopie und Astro-Fotographie eingeführt hat, er hat auch nie eine Frage unbeantwortet gelassen und mich bis zum Ende unterstützt. Als zweites möchte ich zudem Herrn Michael Winkhaus danken. Nur durch sein Engagement und intensive Beschäftigung mit dem Thema ist es heute möglich an der Schülersternenwarte des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums Astronomie auf einem sehr hohen Level zu betreiben.

8 Literaturverzeichnis

1. Richard Walker: Praktische Aspekte der Astrospektroskopie, Version 2.0 02 /2014

2. Erik Wischnevski-Astronomie in Theorie und Praxis, 6. Auflage

3. Koch, Bernd - Kalibrierung von Sternspektren

4. Peter Stinner: Spektroskopie an galaktischen Gasnebeln, 2010

5. Bernd Koch: Tutorial-DADOS-V35D, 2014-04-14

6. Jessica Anne Harris - SPECTROSCOPY OF THE EXTENDED ORION NEBULA, May 2010

7. Grigor Gurzadyan - The Physics and Dynamics of Planetary Nebulae - 1997

8.1 Verwendete Software

1) DMK - IC Capture.AS 2.0

2) MaxIm DL 5.24

3) Visual Spec

4) Photoshop CS3

5) Fitswork

6) FS-Capture

7) SpecTrack (Vorversion)

9 Quellenverzeichnis

1) http://www.astrofreunde-franken.de/m42.html, 15.01.2017, Stefan Westphal, Orionnebel

2) https://de.wikipedia.org/wiki/Orionnebel, 15.01.2017, Wikipedia®, Orionnebel

3) http://www.bela1996.de/astronomy/orion-vars.html, 15.01.2017, Béla Hassforther, Trapez (Astronomie)

4) https://de.wikipedia.org/wiki/Trapez_(Astronomie), 15.01.2017, Wikipedia®, Trapez Astronomie)

5) http://www.epsilon-lyrae.de/Doppelsterne/Trapez/ThetaOrionis.html, 15.01.2017, J.S.Schlimmer, Trapez (Astronomie)

6) https://de.wikipedia.org/wiki/Erdatmosph%C3%A4re, 15.01.2017, Wikipedia®, Erdatmosphäre

7) http://www.spiegel.de/wissenschaft/weltall/orionnebel-tiefer-blick-in-den-hexenkes-selder-sterne-a-394847.html, 15.01.2017, Spiegel Online, Orionnebel

8) http://www.linkfang.de/wiki/Trapez_(Astronomie), 15.01.2017, © Linkfang.de 2016, Trapez (Astronomie)

9) http://www.astrosurf.com/buil/us/mission2/mission2.htm, 15.01.2017, André Rondi - Thierry Maciaszek - Christian Buil, Spektroskopie

10) https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%85ngstr%C3%B6m_(Einheit), 15.01.2017, Wikipedia®, Ångström

11) http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html

10 Abbildungsverzeichnis

Alle nicht aufgeführten Abbildungen sind vom Autor selbst angefertigt.

1) https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9f/Orion-Nebula_A_A_Common.jpg

2) https://de.wikipedia.org/wiki/Kernfusion#/media/File:FusionintheSun.svg

3) Koch, Bernd, Astrofotografie mit der EOS 450D, in:
http://www.astrofoto.de/Kurse/Astrofotografie mit der EOS 450D (Grundkurs).pdf, S. 2

4) Koch, Bernd, Astrofotografie mit der EOS 450D, in:
http://www.astrofoto.de/Kurse/Astrofotografie mit der EOS 450D (Grundkurs).pdf, S. 2

5)http://www.canon.de/About_Us/Press_Centre/Product_Information/cameras_accessories/EOS_450D.aspx

6)http://www.baader-planetarium.de/sektion/s45/bilder/vergleich_350d_baader_acf_gross.jpg

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

19) https://de.wikipedia.org/wiki/Bohrsches_Atommodell#/media/File:Bohr-atom-PAR.svg

21) http://www.teleskop-express.de/shop/Bilder/shop/Baader/dados/dados-spektrograph.jpg

22) http://www.astroshop.de/kameras/sbig-kamera-stf-8300m/p,47233

23) http://nimax-img.de/Produktbilder/zoom/11772_1/The-Imaging-Source-DMK-41AU02-AS-Schwarz-Weis-Kamera-USB.jpg

28) https://de.wikipedia.org/wiki/Orion_(Sternbild)#/media/File:Sternbild_Orion.jpg

39) Jessica Anne Harris - SPECTROSCOPY OF THE EXTENDED ORION NEBULA S.32

40) Jessica Anne Harris - SPECTROSCOPY OF THE EXTENDED ORION NEBULA S.122

42) http://www.sbig.de/stf-8300/stf-8300.htm

44) Bernd Koch, BACHES First Light am CFG Wuppertal

45) Bernd Koch, Projekte_zur_Sternspektroskopie_2017

46) http://www.astroshop.de/kameras/sbig-kamera-stf-8300m/p,47233

47) Bernd Koch, BACHES First Light am CFG Wuppertal

48) Bernd Koch, Projekte_zur_Sternspektroskopie_2017

61) Jessica Anne Harris - SPECTROSCOPY OF THE EXTENDED ORION NEBULA S.32

62) Jessica Anne Harris - SPECTROSCOPY OF THE EXTENDED ORION NEBULA S.122