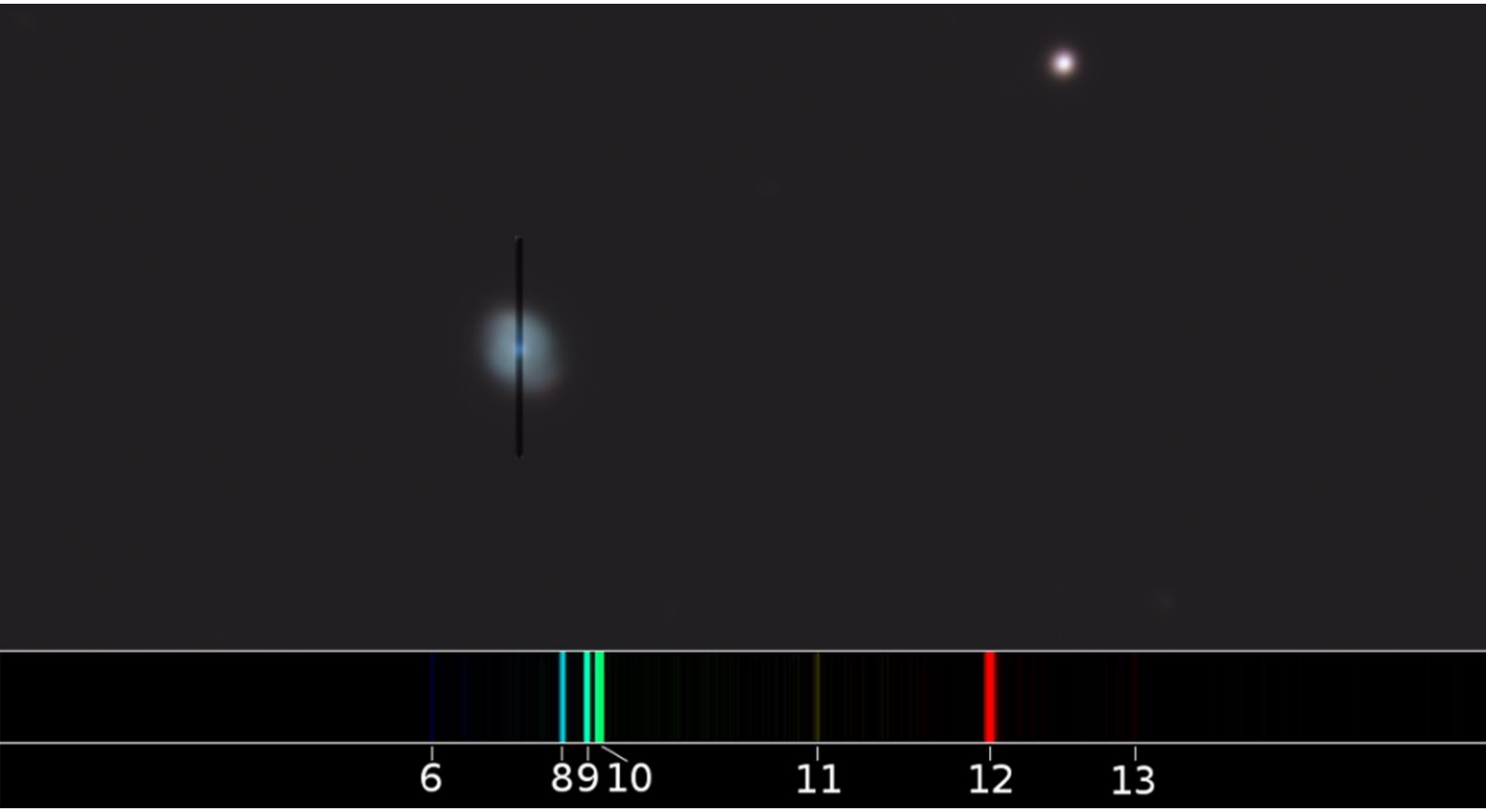
- Spektroskopie des Planetarischen Nebels -

- Katzenaugennebel NGC6543 -



Projektkurs Astronomie 2015/2016

Carl-Fuhlrott-Gymnasium

Kursleitung: Bernd Koch

Leitung Sternwarte: Michael Winkhaus

Abgabe: 01.06.2016

Immanuel Gehlmann

immanuel@tismar.de

Jonathan Hilberg

jonathanh99@web.de

- Spektroskopie des Planetarischen Nebels -

- Katzenaugennebel NGC6543 -

Eine Projektarbeit von Jonathan Hilberg und Immanuel Gehlmann

Projektkurs Astronomie 2015/2016

Carl-Fuhlrott-Gymnasium

Kursleitung: Bernd Koch

Leitung Sternwarte: Michael Winkhaus

Abgabe: 01.06.2016

Inhalt

1 Einführung in das Thema 4

2 Was sind Planetarische Nebel? 5

2.1 Generelle Informationen 5

2.2 Geschichte des Planetarischen Nebels NGC 6543 8

3 Grundlagen 10

3.1 Aufbau des Lichtes 10

3.2 Verbotene Übergänge 12

3.3 Licht zur Identifikation von Elementen 14

3.4 DADOS Spektrograph 15

3.5 Blaze-Gitter: Aufteilung des Lichts in einzelne Wellenlängen 17

4 Astrofotografie 21

4.1 Bearbeitung der Bilder 21

4.2 Ergebnis im Vergleich mit anderen Bildern 23

5 Technik 25

5.1 Das Schülerlabor 25

5.2 Unser Aufbau 27

6 Auswertung der Spektren (Abschnitte der Wellenlängenkalibrierung) 28

6.1 Hotpixelentfernung 28

6.2 „Stacking“ der Spektren 29

6.3 Subtraktion des Himmelshintergrundes 30

6.4 Zwischenergebnis der Spektrenauswertung 32

6.5 Wellenlängenkalibration 32

7 Erster Teil des Experiments – Identifikation der Elemente 37

7.1 Relevante Elemente 37

7.2 Vergleich mit der Referenzarbeit 39

7.3 Beurteilung der Ergebnisse 40

8 Zweiter Teil des Experiments – Bestimmung der Elektronentemperatur 43

8.1 Verfahren 43

8.2 Auswertung 44

8.3 Ermittlung des temperaturbestimmten Bereiches 46

8.4 Nachführung des Aufnahmeausschnitts 49

8.5 Beurteilung des gemessenen Werts anhand der Intensität der Schichten 51

9 Fehlerbetrachtung 53

10 Zusammenfassung 54
11 Resümee – Ausblick 56
12 Danksagung 57
13 Abschlusserklärung 58

Quellenverzeichnis 59
Abbildungsverzeichnis 61
Genutzte Software 63

1. Einführung in das Thema

Das Universum begeistert die Menschen schon seit hunderten von Jahren. Auch wenn die Darstellungsweise sich immer wieder geändert hat, bleibt dieser unvorstellbar große Raum immer faszinierend. Da die meisten Menschen jedoch nicht die Möglichkeit besitzen, sich tiefergehend mit dem Universum und den Objekten zu befassen, sind ihnen nur die Sterne und Planeten bekannt. Allerdings kann man mit guten Teleskopen noch durchaus mehr im Universum entdecken als sich am bloßen Nachthimmel vermuten lässt. Während man sich mit bekannten Planeten und Sternen befassen kann, um an ihnen genaue Untersuchungen durchzuführen, können lichtstarke Teleskope deutlich weiter in das Universum hineinblicken. So ist es möglich, Planeten anderer Sonnensysteme oder auch andere Galaxien zu fotografieren und zu untersuchen. Auch die eher unbekannten Nebel des Universums kann man auf diesem Wege betrachten. Zu den bekannteren Nebeln zählt der Orion Nebel. Er ist ein Ort der Sternentstehung. Die Planetarischen Nebel resultieren aus dem Tod eines Sterns. Dies gilt auch für den von uns untersuchten Nebel, den Katzenaugennebel NGC 6543.

Als unser Lehrer Herr Michael Winkhaus unserem Physikkurs in der 10. Klassenstufe den Projektkurs Astronomie vorstellte, hat uns die Vorstellung, einen Einblick in das Universum zu bekommen, so fasziniert, dass die Entscheidung, den Projektkurs zu wählen, keine Frage für uns war.

Während der Anfangszeit im Projektkurs veranstaltete der Physik-Leistungskurs unserer Stufe unter der Leitung von Herrn Michael Winkhaus einen Kurs zur Einführung in die Spektroskopie. Dort erfuhren wir, wie sich das Licht spaltet und wie es sich dadurch analysieren lässt.

Von allen Himmelsobjekten faszinierten uns die galaktischen Nebel am meisten. Daher haben wir uns entschieden, unsere Projektarbeit über einen Planetarischen Nebel zu schreiben. Unsere Wahl fiel auf den Katzenaugennebel, da dieser zu diesem Zeitpunkt in einer günstigen Position stand.

Zum einen ist es unser Ziel, mit Hilfe der Aufnahme von Spektren die chemische Zusammensetzung des Nebels zu bestimmen. Wir wollen auf Basis der Elemente im Nebel zeigen, wie sich der Stern zum Weißen Zwerg entwickelt hat. Des Weiteren wollen wir anhand der Spektren die Elektronentemperatur im Nebel ermitteln.

2. Was sind Planetarische Nebel?

2.1 Generelle Informationen

Abbildung 1: Planetarischer Nebel NGC6543 [1]

Planetarische Nebel gehören zu der Gattung der Deep-Sky-Objekte, da sie oft viele hundert Lichtjahre entfernt sind und dadurch nicht mehr in unserem Sonnensystem liegen. Dadurch sind Planetarische Nebel mit dem bloßen Auge nicht zu erkennen und selbst mit hochwertigen Teleskopen muss man nötiges Fingerspitzen-gefühl aufweisen. Die schlechte Sichtbarkeit ist auch der Grund dafür, dass die Planetarischen Nebel erst im 1800 Jahrhundert entdeckt wurden.

Bei Planetarischem Nebel handelt es sich keinesfalls um Planeten, obwohl der Entdecker sie danach benannt hat. Der Entdecker sah große Ähnlichkeiten zwischen den neuen Objekten und Planeten in Farbe und Form. In Wirklichkeit ist es eine von einem „sterbenden“ Stern abgestoßene Hülle. Für das genauere Verständnis beschreiben wir kurz das ganze „Leben“ eines Sterns und fangen nicht erst bei dessen Ende an. Ein Stern entsteht in interstellaren Gas-/Staubwolken. Diese Wolken bestehen sowohl aus einzelnen Atomen als auch aus Molekülen, da die Wolken eine geringe Temperatur besitzen. Die Dichte im Raum beträgt etwa 100 Teilchen pro cm³ [3]. Wenn diese Wolke nun instabil wird, zieht sich die Materie gegenseitig durch die Schwerkraft an. Der Grund für die Instabilität kann dabei eine Supernova-Explosion oder auch ein fehlender Gasdruck der Wolke sein [3]. Dadurch verdichtet sich die Wolke an einer oder auch mehreren Stellen immer weiter, sodass ein Protostern entsteht. Der Protostern hat immer noch eine Temperatur um den Nullpunkt, da die Temperatur durch naheliegende Teilchen in die noch umliegende Wolke entweicht. Dennoch besitzt er nun eine immer weiter wachsende Dichte von ungefähr 10-100 Milliarden Teilchen pro cm^3 [4].

Abbildung 2: Orion Nebel : Staub-/Gasnebel : Entstehungsort von Sternen [2]

Die Teilchen, die nun auf den Stern fallen, führen dem Stern immer mehr Energie in Form von Wärme zu. Der Grund dafür ist, dass dem Teilchen zunächst durch die anziehende Gravitation kinetische Energie zugeführt wird, wodurch es sich auf den Stern zubewegt. Wenn die Teilchen dann auf den dichteren Stern treffen, werden sie abgebremst und übertragen ihre kinetische Energie auf den Stern in Form von Wärme. Resultierend besitzt der Protostern bei einer Dichte von 100 Milliarden Teilchen pro cm³ eine so hohe Energie, dass die Wasserstoffmoleküle zu einzelnen Atomen gespalten werden und der Fusionsprozess von Wasserstoff zu Helium beginnt [4]. Der Strahlungsdruck durch die Wasserstofffusion des Protostern sorgt nun dafür, dass sich der Nebel jetzt nicht mehr weiter verdichtet, sondern nur noch wächst. Der Protostern wächst daraufhin um ein Vielfaches seiner Größe.

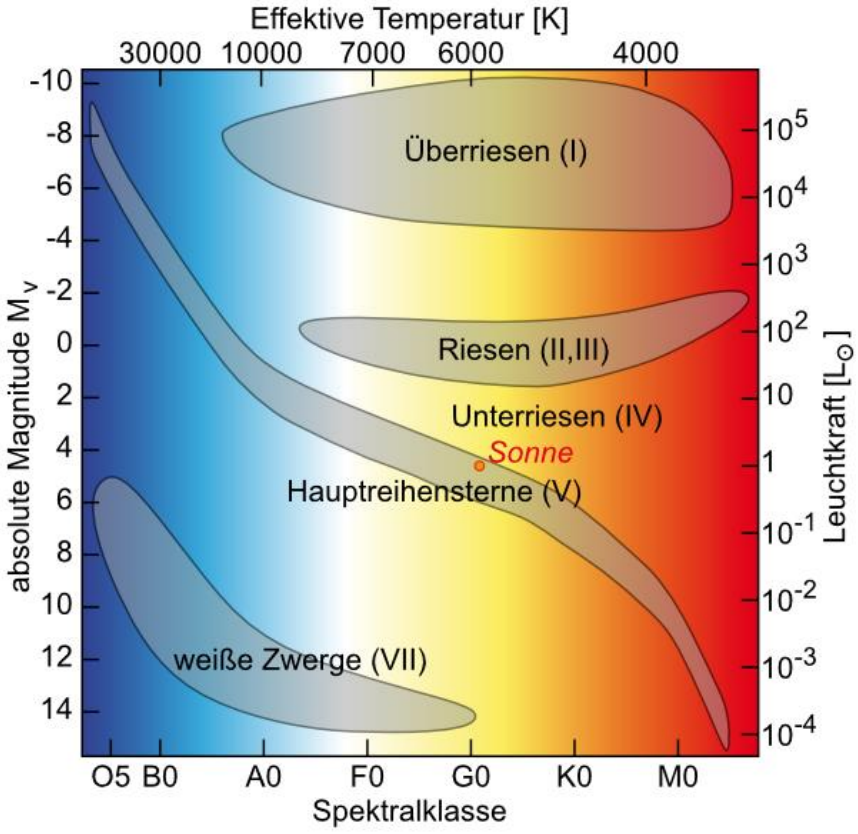


Abbildung 3: Hertzsprung-Russell-Diagramm [5]

Der „ausgewachsene“ Stern befindet sich nun auf der Hauptreihe des Herzsprung-Russell-Diagramms. Dieses Diagramm stellt die Leuchtintensität von Sternen in Abhängigkeit zu deren Temperatur da. Dabei enthält die Temperatur das Intensitätsmaximum des Spektrums nach der Theorie des Planck´schen Strahlungsgesetzes. Auf der Hauptreihe besitzt der Stern eine stationäre Phase, weil der Strahlungsdruck, der von dem fusionierenden Wasserstoff erzeugt wird, mit der nach innen wirkenden Gravitation übereinstimmt. Dadurch gleichen sich beide Kräfte aus. Diese Phase hält so lange an, wie Wasserstoff im Inneren des Sterns verbrannt wird.

Da die Sterne aus rund 70% Wasserstoff bestehen [6], kann diese Phase mehrere Milliarden Jahre andauern. In dieser Zeit strahlt der Stern hochenergetische Strahlung ab. Diese Strahlung reißt Teilchen der äußeren Schichten des Sterns aus dem Einflussbereich heraus [7]. Auf diese Weise entsteht der sogenannte Sternenwind, den wir auch bei der Sonne finden. Der Sonnenwind ist dabei die Ursache für die Polarlichter, da der Sonnenwind von dem Magnetfeld der Erde zu den Polen transportiert wird und der Wind dort die Teilchen der Atmosphäre zum Leuchten anregt.

Der folgende Endzustand bei einem ausgeschöpften Wasserstoffvorrat im Sterneninneren ist je nach Masse des Sterns unterschiedlich. Bei Sternen mit Massen, die vergleichbar mit der Sonnenmasse sind, bläht sich der Stern am Ende seiner Entwicklung zum Roten Riesen auf. Die äußeren Atmosphärenschichten sind nur schwach an den Stern gebunden. Schon leichte Sternenwinde im Bereich von 20 km/s reichen aus, um die äußere Hülle, manchmal in mehreren Schüben, abzustoßen. Im Zentrum bleibt ein langsam abkühlender Weißer Zwerg zurück. Die einige tausend Jahre alte, sichtbare abgestoßene Hülle nennt man einen sogenannten Planetarischen Nebel. Man stellt sich das im Detail wie folgt vor [6]:

Die Entwicklung beginnt mit dem Stillstand der Wasserstofffusion, da diese den Wasserstoffvorrat des Sterneninneren verbraucht hat. Durch die fehlende Wasserstofffusion sinkt nun der Strahlungsdruck rapide ab. Der Stern fällt durch die Wirkung der Gravitation in sich zusammen, weil die entgegenwirkende Kraft des Strahlungsdrucks fehlt. Da aber in der Schale noch Wasserstoff enthalten ist [8], fängt diese nun an zu fusionieren. Durch das Zusammenfallen des Sterneninneren besitzt der Kern nun eine deutlich höhere Dichte. Dadurch ist genug Energie zur Verfügung, um die Fusion von Helium zu Kohlenstoff beginnen zu lassen. Diese Reaktion hat eine immense Energieausstrahlung. Als Ergebnis steigt die Temperatur auf bis zu 100 Millionen Kelvin [8] und der Strahlungsdruck steigt wieder stark an. Dadurch wird die äußere Schicht des Sterns wegen dem starken Druck weggestoßen, sodass sie sich als eine Hülle außerhalb des Einflussbereiches des Sterns von ihm wegbewegt. Auf diese Weise ist ein Planetarischer Nebel entstanden. Die andere Möglichkeit ist, dass der Planetarische Nebel durch die mangelnde Gravitation des Roten Riesen entsteht. Ein Roter Riese bläht sich durch das Schalenbrennen um ein Vielfaches seiner Ursprungsgröße auf [10]. Bei einer vielfachen Größe und gleicher Masse wirkt eine deutlich geringere Gravitation auf die äußeren Schichten. Hinzu kommt noch, dass sich die äußere Schicht stark abkühlt, weil sie deutlich weiter von dem Sterninneren entfernt ist. Die Teilchen dieser Schicht können sich dadurch wieder zu Atomen zusammenfügen. Eine

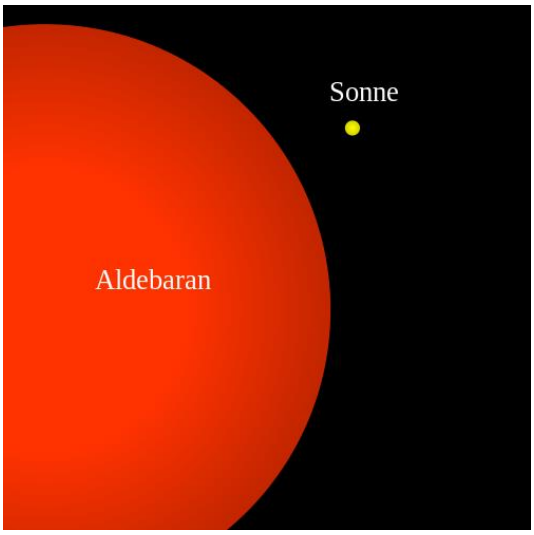


Abbildung 4: Vergleich zwischen der Sonne und einem Roten Riesen mit 2,5facher Sonnenmasse [9]

Art Wolke entsteht [7], die viel leichter durch den Sternenwind abtransportiert werden kann. Der Sternenwind transportiert den Nebel zwar nicht so schnell und in einzelnen Schüben ab, aber dennoch entsteht auch ein Planetarischer Nebel.

Am Ende seiner Entwicklung liegt der Stern als Weißer Zwerg vor, der seine Schale als Planetarischen Nebel abgestoßen hat. Dieser kühlt immer weiter ab, da er keine aktive Energiequelle besitzt, sondern seine Energie nur noch aus der Gravitationskraft seiner Masse zieht. Trotzdem strahlt er immer noch Energie ab, die der Grund für einen sichtbaren Planetarischen Nebel ist. Der Nebel wird von der Strahlung des Zentralsterns angeregt und dadurch zum Leuchten gebracht [11].

2.2 Geschichte des Planetarischen Nebels NGC 6543

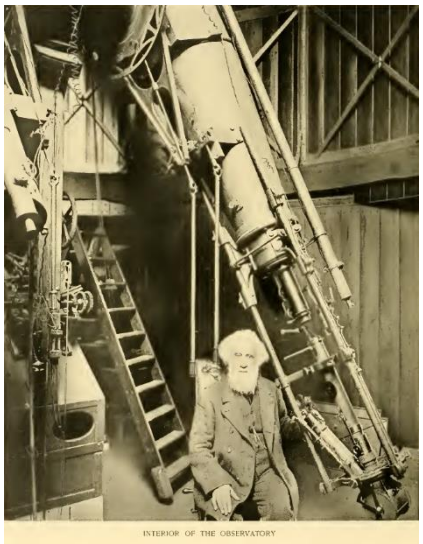


Abbildung 5: William Huggins an seinem Teleskop [14]

Bei unserem Planetarischen Nebel, der auch Katzenaugennebel genannt wird, handelt es sich um das Paradebeispiel unter den Nebeln. Der NGC 6543 Nebel ist der erste entdeckte und untersuchte Planetarische Nebel. Er wurde am 15. Februar 1786 von Wilhelm Herschel entdeckt [12]. Von seinem Entdecker haben die Planetarischen Nebel auch ihren Namen. Die entdeckten Objekte erinnerten Herschel durch ihre Farbgebung an Planeten wie Uranus. Dadurch ist der irreführende entstanden, obwohl es sich bei den Planetarischen Nebeln keinesfalls um Planeten handelt, sondern um „sterbende“ Sterne, die ihre äußere Hülle abstoßen. Wilhelm Herschel führte an dem Nebel aber keine Spektralanalyse durch, weil dieses Verfahren erst circa im Jahr 1859 von Robert Bunsen und Gustav Kirchhoff erfunden wurde [13]. Erst im Jahr 1864 wurde der Planetarische Nebel von dem Amateurastronom William Huggins mit der Spektralanalyse untersucht [12].

Dadurch konnte Huggins die Zusammensetzung des Nebels ermitteln, indem er die aufgenommenen Spektren mit den Spektralanalysen von Atomen und Molekülen verglich. Er stellte fest, dass die von ihm beobachteten Nebel und Sterne Elemente besitzen, wie sie auf der Sonne und der Erde zu finden sind [15]. Auf diese Weise entdeckte er beispielsweise einen hohen Wasserstoffanteil (H) (Abb.: 6). Als er dann aber plötzlich Emissionslinien entdeckte, die auf der Erde kein zugehöriges Element besitzen, war er der Meinung ein neues Element entdeckt zu haben, dass er Nebulium taufte. Die von ihm für das Nebulium zugeordneten Emissionslinien bezeichnete er mit N im Spektrum (Abb.: 6). Zu dieser Zeit

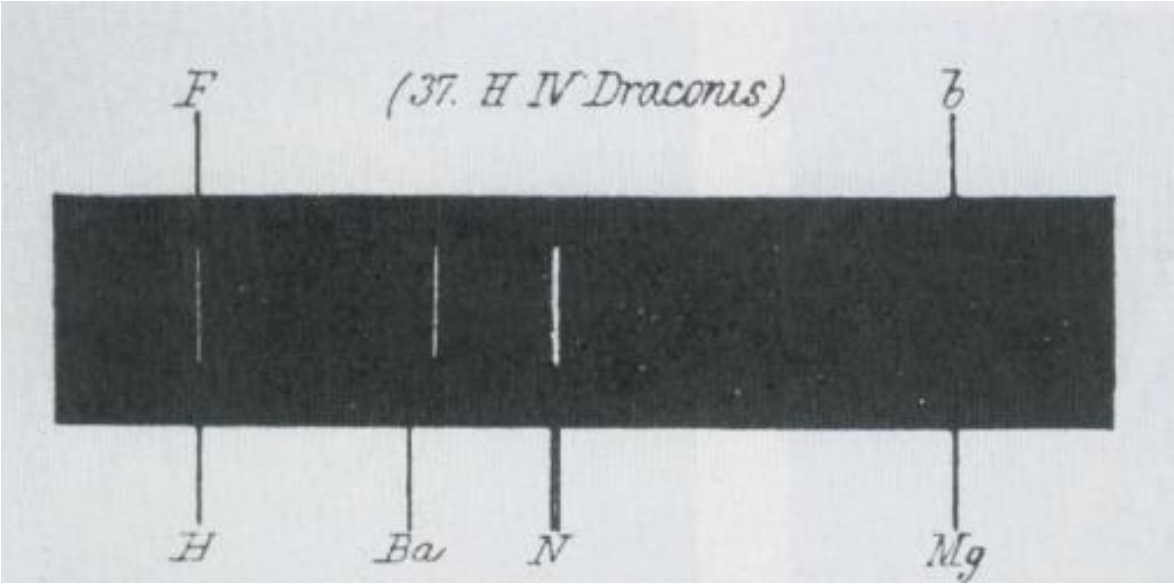


Abbildung 6: Erstes Spektrum von NGC6543 von William Huggins [16]

beachtete er aber die verschiedenen Umstände zwischen Erde und Weltraum nicht. Dadurch stellte sich heraus, dass es sich bei dem neu entdeckten Element nur um Emissionslinien von doppelt ionisierten Sauerstoff handelt, es sich also um eine O[III] Linie handelt, die wir auch in unserem Spektrum entdeckt haben und behandeln werden [17], [18]. Der Grund dafür ist, dass die Elemente in dem Nebel eine besonders geringe Dichte besitzen, die es den Elektronen ermöglicht, von auf der Erde nicht möglichen Energieniveaus zu springen. Dadurch stoßen die Elemente auf der Erde unbekannte Emissionslinien aus. Diese Linien werden auch Verbotene Linien genannt. Mit dieser Entdeckung konnten die rätselhaften Emissionslinien erklärt werden. Die Verbotenen Linien sind in dem Planetarischen Nebel NGC 6543 oft vertreten. Vor allem die Verbotenen Sauerstofflinien spielen eine große Rolle in der Zusammensetzung des Nebels, wodurch das Verständnis der Verbotenen Linien essentiell für die weitere Auswirkung ist. Die Verbotenen Linien werden später in Kapitel 3.2 weiter ausgeführt.

3 Grundlagen

3.1 Aufbau des Lichts

Das Licht, wie wir es im normalen Alltag kennen, ist in Wirklichkeit ein hoch komplexes Gebiet. Im Verlaufe der Physikwissenschaft ist die Theorie des Lichts mehrere Male überworfen und überarbeitet worden. Die erste Theorie wurde von dem, schon für seine vorherigen Errungenschaften, bekannten Physiker Isaac Newton (1642-1727) aufgestellt [19]. In dieser Theorie wird das Licht als einzelnes Teilchen dargestellt, das ähnliche Eigenschaften hat wie ein Elektron. Dadurch besitzt es einen Impuls und eine Masse.

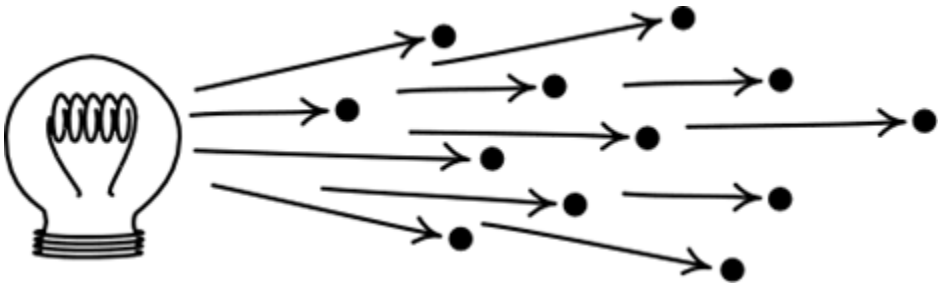


Abbildung 7: Photonen als Teilchen, die von einer Glühbirne ausgesendet werden [19]

Diese Theorie konnte die Fachwelt aber nicht überzeugen. Der Hauptgrund dafür war der Widerspruch des Interferenzexperiments. Bei diesem Experiment wird Licht auf einen Doppelspalt gestrahlt und dahinter auf einem Schirm aufgefangen. Auf dem Schirm bildet sich ein Interferenzmuster, welches Auslöschungen der Helligkeit und Überlagerungen der Helligkeit enthält. Da dieser Effekt nur bei wellenartigen Objekten auftritt, wie zum Beispiel bei dem Schall, widerspricht das Experiment der Ansicht von Newton.

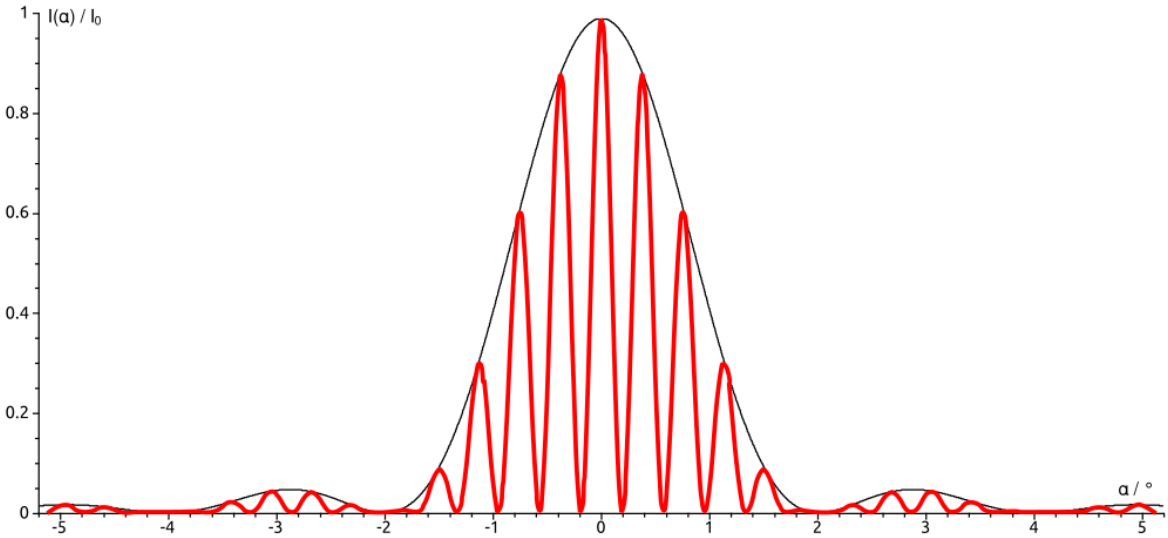


Abbildung 8: Interferenzmuster von einem Doppelspalt [20]

Deswegen verbreitete sich die Wellentheorie von Huygens (1629-1695), weil diese auf das Interferenzexperiment gestützt ist [19]. In dieser Ansicht wird das Licht als Welle gesehen, sodass es Eigenschaften wie eine Wellenlänge und eine Frequenz besitzt.

Durch diese Theorie konnte man zunächst die Ergebnisse des Interferenzexperiments erklären, wodurch die Wissenschaft auch von dieser Theorie über lange Zeit überzeugt war, dennoch entstand durch neue Experimentiermethoden zunehmend Widerspruch. Mit der neuen Technik konnte das Interferenzexperiment, welches die Wellenvorstellung hervorgerufen hat, auf eine genauere Art und Weise durchgeführt werden. Das alte Interferenzexperiment in Form eines Doppelspaltes hat nur für die Wellentheorie gesprochen, da interferenztypische Auslöschungen entstanden sind, die es bei Teilchen nicht gibt. Als der Versuch aber mit einer CCD Kamera als Schirm hinter dem Doppelspalt durchgeführt wurde, gab es immer noch eine konstruktive und eine dekonstruktive Interferenz, aber es hat sich noch ein zusätzlicher Effekt zu erkennen gegeben. Das Licht hat sich in Form von auf den Schirm treffende „Teilchen“ auf dem Schirm angeordnet. In Abbildung 9 sind aufgenommene Bilder des Sensors der CCD Kamera mit verschiedenen Belichtungszeiten dargestellt.

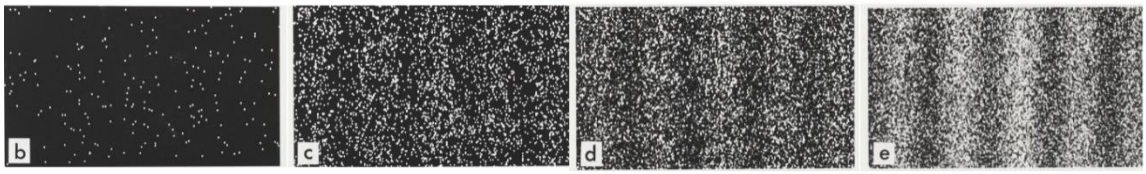


Abbildung 9: Interferenzversuch mit einer CCD-Kamera als Nachweis des Lichtes als Welle/Teilchen Objekt [21]

Man kann genau erkennen, wie das Licht als einzelnes Teilchen auf den Schirm trifft und dadurch den Sensor anregt. Bei einer sehr kurzen Belichtungszeit (Abbildung 8b) scheint die Anordnung noch zufällig zu verlaufen. Jedoch sieht man deutlich, dass je länger die Belichtungszeit wird, desto mehr wird ein Interferenzmuster sichtbar, in dem sich die einzelnen Teilchen anordnen. Dabei ist es in der Anordnung, wie wir es aus dem alten Interferenzversuch kennen.

Dieses neue Experiment enthält zwar immer noch den Vorgang der Interferenz des Lichts, dennoch war es eine große Entdeckung für die Theorie des Lichts. Nun standen die Physiker vor einem Problem, da in einem Experiment Beweise für Welleneigenschaften und zugleich Teilcheneigenschaften erbracht wurden. Obwohl diese Eigenschaften miteinander widersprüchlich sind, haben die Physiker mit dem Welle-Teilchen-Dualismus beide Theorien vereint und haben das Photon als Lichtteilchen eingeführt. Das Photon besitzt sowohl Eigenschaften von Wellen als auch von Teilchen.

Jetzt wissen wir, dass ein Photon ein Quantenobjekt ist und mit welchen Eigenschaften das für Licht stehende Photon versehen ist. Die Entstehung ist aber bisher unbekannt. Deswegen wollen wir dies weiter untersuchen. Das Photon wird von Atomen ausgesendet, in denen Elektronen von unterschiedlichen Energieniveaus springen. Dieser Vorgang ist auf

der rechten Seite der Abbildung 10 zu sehen, da dort ein Elektron aus einer höheren energetischen Schicht in eine niedrigere Schicht fällt und dabei ein Photon ausstrahlt.

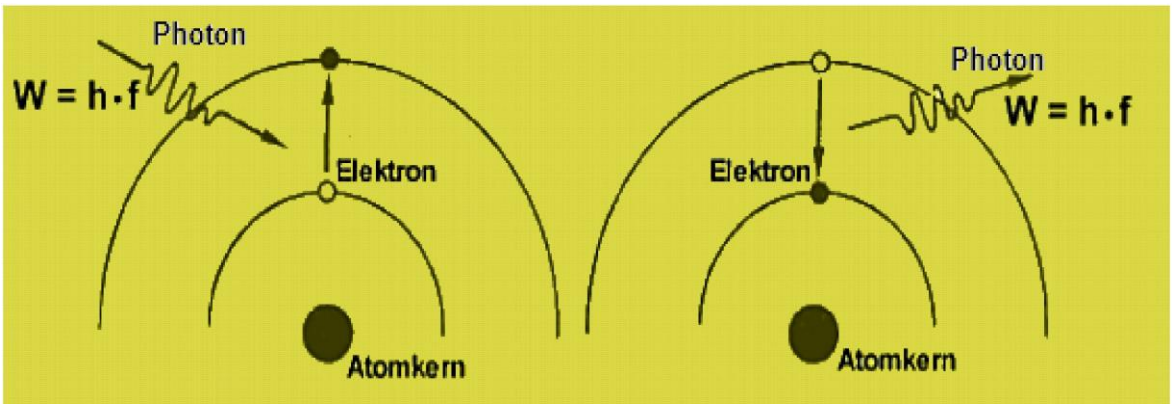


Abbildung 10: Entstehung von Photonen [22]

Jedes Atom hat vorgegebene Energieniveaus, auf die die zugehörigen Elektronen befördert werden können. Um das Elektron von dem Standardenergieniveau auf ein höheres Energieniveau zu befördern, ist Energie notwendig, die durch das Zusammenstoßen von Atomen erzeugt wird. Damit wird auch ein Zusammenhang mit der Temperatur klar, da sich die Atome bei einer höheren Temperatur mehr bewegen. Das höhere Energieniveau wird angeregter Zustand genannt. Wenn dieses Elektron nun von außen beeinflusst wird, springt es wieder in ein niedrigeres Energieniveau zurück. Dabei sendet es ein Photon aus, welches eine festgelegte Wellenlänge besitzt, die von der Größe der Energieniveaudifferenz abhängig ist. Die Energieniveaus entsprechen der Vorstellungen von verschiedenen Schalen. Je mehr Energie dem Elektron nun zugeführt wird, desto höher ist das Energieniveau, in das es springt. Die Energieniveaus sind für jedes Atom unterschiedlich und charakterisieren es. Aus diesem Grund kann durch die ausgestrahlten Wellenlängen auf das Atom zurückgeschlossen werden, welches diese ausgesendet hat. Die Anregung von außen ist zum Beispiel ein anderes Photon, was dann stimulierte Emission genannt wird [23]. Das Zurückspringen kann aber auch zufällig erfolgen, wobei es sich dann um eine spontane Emission handelt [24].

3.2 Verbotene Übergänge

Bei unserem Planetarischen Nebel handelt es sich um eines der ersten Objekte, die anhand eines Spektrums untersucht wurden. Dabei kann man das Spektrum des Planetarischen Nebels mit Spektren von im Labor aufgenommenen Elementen vergleichen. Auf diese Weise wurde die Zusammensetzung des Nebels NGC 6543 von dem Physiker William Huggins erstmals ermittelt. Das einzige Problem dabei war, dass die Bedingung im galaktischen Raum, wie zum Beispiel die Teilchendichte des Planetarischen Nebels, im Labor zu dieser Zeit nicht einwandfrei nachgestellt werden konnten. Huggins entdeckte dadurch in dem Spektrum von NGC 6543 Linien, zu denen es keine passenden

Elementspektren aus dem Labor gab. Durch diese Entdeckung führte Huggins zunächst (wie in Kapitel 2.2 erwähnt) das neue Element Nebulium ein.

Es stellte sich aber durch neuere Technik schnell heraus, dass die unbekannten Linien nicht von einem bisher unbekannten Element stammten, sondern nur von extrem seltenen Übergängen erzeugt werden, welche auf der Erde praktisch nicht zustande kommen. Deswegen werden diese Übergänge auch als „Verboten“ bezeichnet. Diese Verbotenen Übergänge entstehen nur bei einer extrem geringen Teilchendichte von 10^8/cm³ [25], die nur in extrem dünnen galaktischen Gasen auftritt. Der Grund dafür ist ein besonderer Energieniveausprung. Im Genaueren handelt es sich dabei um die Energiedifferenz zwischen dem angeregte Energieniveau, auf dem sich das Elektron befindet und dem energetischen Grundzustand.

Wenn das Elektron nun nur durch einen Verbotenen Übergang wieder zurück in den energetischen Grundzustand fallen kann, liegt es zunächst in einem metastabilen Zustand vor.

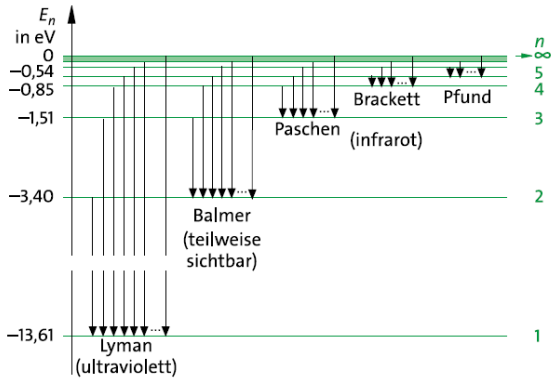


Abbildung 11: "Erlaubte" Übergänge von Wasserstoff [28]

Dadurch wird für das Zurückfallen in den Grundzustand deutlich mehr Zeit benötigt, die sich bei Helium auf bis zu 8000s steigern kann [26]. In dieser Zeit stoßen jedoch Teilchen in einem dichtereichen Gebiet viele Male aneinander und geben dadurch ihre Energie nicht in Form von Licht, sondern von Stößen ab [27]. Ist nun aber die Bedingung einer extrem geringen Teilchendichte gegeben, findet der Verbotene Übergang wie gewohnt statt.

Die Verbotenen Linien wurden im Jahr 1927 von Ira S. Bowen entdeckt, wodurch die Theorie über das neue Element Nebulium wieder aufgelöst wurde, da es nun eine deutlich stichhaltigere Lösung gab. Diese Erkenntnis erhöhte das Aussagevermögen von Spektren deutlich, da man nun auch die Verbotenen Linien im Zusammenhang deuten kann.

In unserer Arbeit haben wir die Verbotenen Linien mit eckigen Klammern um das Elementsymbol gekennzeichnet, zum Beispiel [OIII].

3.3 Licht zur Identifikation von Elementen

Nun wissen wir, dass jedes angeregte Atom für sich charakteristische Wellenlängen aussendet. Dieser Vorgang wird aber von allen Atomen durchgeführt, sodass die einzelnen Wellenlängen miteinander „verschmelzen“ und das für uns bekannte weiße Licht ergeben. Um also das Licht nach den Atomen untersuchen zu können, von denen es ausgesendet wurde, müssen wir das Licht wieder in seine einzelnen Wellenlängen spalten. Die Auftrennung der Wellenlängen erzeugt ein Spektrum, welches essentiell für die Untersuchung von Himmelobjekten ist. Für die Spaltung gibt es heutzutage verschiedene Möglichkeiten. Zunächst gibt es ein Prisma, bei dem es sich um einen Glaskörper handelt, der verschiedene Wellenlängen unterschiedlich stark bricht. Diese Methode gibt es schon länger, da sie simpel und praktikabel ist, dennoch hat sie den Nachteil, dass man große Prismen braucht, um ein ordentliches Spektrum aufzunehmen, die dadurch viel Platz benötigen.

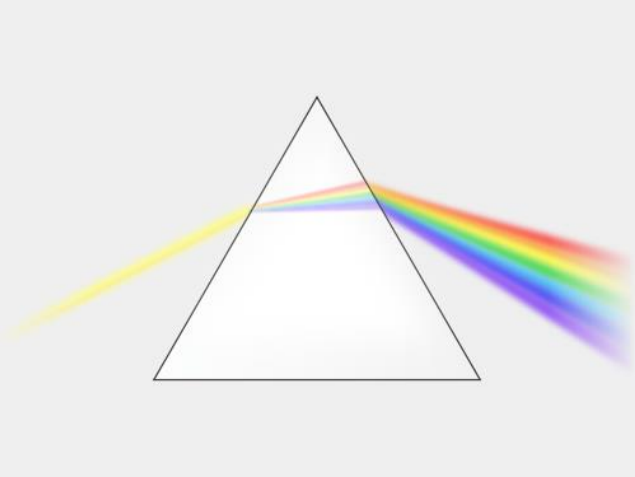


Abbildung 12: Brechung des Lichtes am Prisma [29]

Wir benutzen für unsere Aufnahmen den Gitter-DADOS-Spektrographen, welcher das Licht in verschiedenen Winkeln reflektiert. Der DADOS Spektrograph spielt in unsere Arbeit eine bedeutende Rolle.

3.4 DADOS Spektrograph

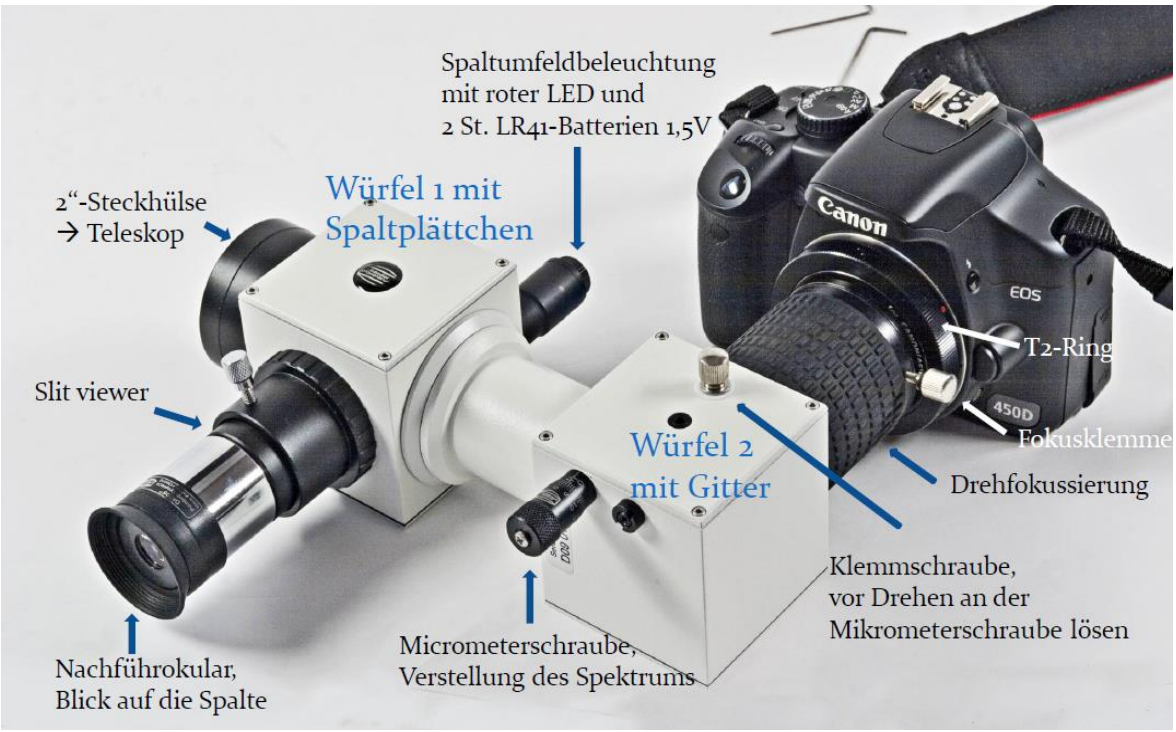


Abbildung 13: Erklärung des DADOS Spektrographen (die hier gezeigte Kamera Canon 450D haben wir nicht benutzt) [30]

Der DADOS Spektrograph dient zur Aufnahme von Spektren an Teleskopen. Er kann mit der 2"-Steckhülse in jeder beliebigen Position an das Teleskop angebracht werden. In dem ersten Würfel befindet sich das Spaltplättchen. Durch dieses wird das Spektrum schließlich in die typische Linienform gebracht. Des Weiteren befindet sich an dem Würfel der Slit viewer. Durch ihn kann mithilfe eines Okulars oder in unserem Fall einer Videokamera mit Live-Übertragung der Spalt beobachtet werden. Dies erleichtert das Nachführen erheblich, da man dadurch die Position des Objekts auf dem Spalt beobachten kann. Um zu erkennen, wo sich der Spalt überhaupt befindet, gibt es eine Beleuchtungsvorrichtung.

Im zweiten Würfel befindet sich das Spektralgitter. Es spaltet das Licht in seine Bestandteile und spiegelt es durch zum Objektiv. Das Gitter steht auf einer rotierfähigen Platte, die sich mit einer Mikrometerschraube drehen lässt. Damit kann eingestellt werden, welchen Teil des Spektrums die Kamera aufnehmen soll. Damit der Ausschnitt sich während der Aufnahmen nicht verändert, kann man es durch eine Klemmschraube fixieren. Um eine Kamera zu installieren, ist an dem zweiten Würfel ein Objektiv angebracht. Durch Drehen kann an diesem der Fokus eingestellt werden. Um die Canon EOS 450D zu benutzen, muss zusätzlich ein T2-Ring angebracht werden. Da wir statt der Canon Kamera die SBIG STF-8300M benutzt haben, benötigten wir keine Adapterringe. (Abb.: 13 + 14)

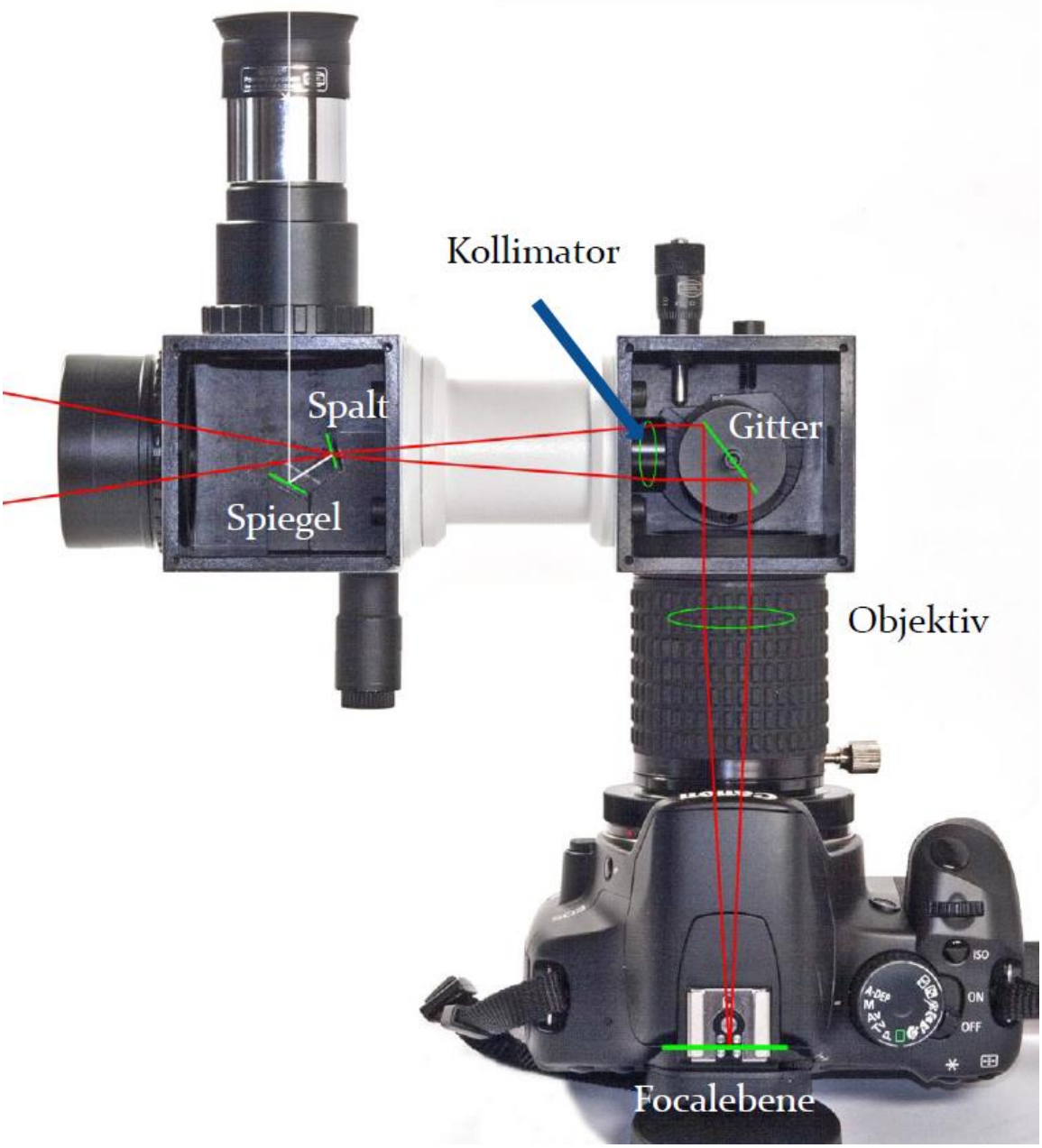


*Abbildung 14: DADOS Spektrograph von oben mit geöffneten Würfeln (*die hier gezeigte Kamera *Canon 450D* haben wir nicht benutzt) [30]

3.5 Blaze-Gitter: Aufteilung des Lichts in einzelne Wellenlängen

Der DADOS Spektrograph dient uns zur Aufteilung des Lichts in die verschiedenen einzelnen Wellenlängen, die wir zur weiteren Untersuchung des Planetarischen Nebels benötigen. Dieser „Aufteilungs"-Vorgang wird auch Beugung am Gitter genannt. Dafür gibt es viele verschiedene Möglichkeiten. Zum einen gibt es ein Transmissionsgitter, aber auch ein Reflexionsgitter oder ein Blaze-Reflexionsgitter. Jeder dieser Gittertypen besitzt seine eigenen Vorteile und Nachteile.

Grundlegend sind alle Gitter dafür zuständig, einen Wegunterschied zwischen den einzelnen Lichtwellen zu schaffen, damit diese miteinander konstruktiv interferieren. Konstruktiv interferieren bedeutet, dass der Wegunterschied zwischen zwei Wellen eine Wellenlänge beträgt und sie sich dadurch miteinander addieren.

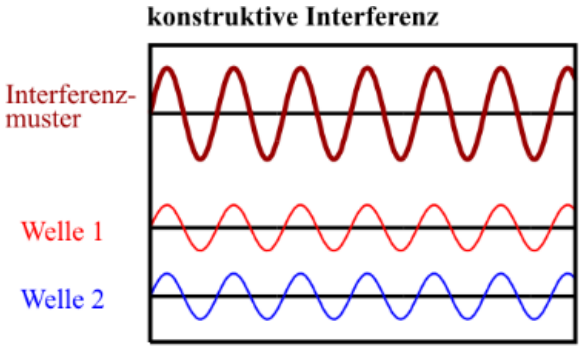


Abbildung 16: Konstruktive Interferenz [31]

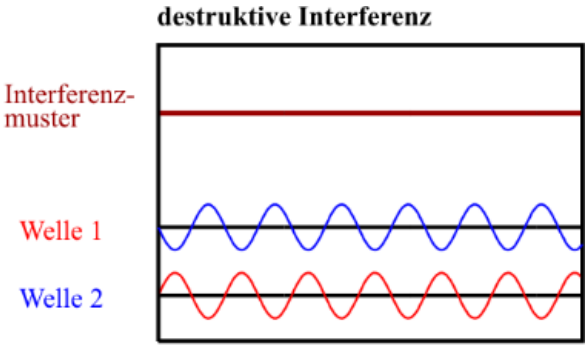


Abbildung 15: Dekonstruktive Interferenz [31]

Der Grund dafür ist die Wellentheorie des Lichts, dabei wird das Licht als eine frequenziell wiederholende Abfolge von Wellenberg und Wellental gesehen. Eine Wellenlänge (Lambda) enthält einen Wellenberg und ein Wellental, da sich diese von der Frequenz abhängig wiederholen. Wenn nun die Lichtwellen um eine Wellenlänge verschoben sind, bedeutet das, dass immer Wellenberg auf Wellenberg und Wellental auf Wellental trifft. Dadurch addieren sich die Wellenlängen und erzeugen ein sogenanntes Maximum. Bei einer halben Wellenlänge Verschiebung trifft dann immer der Wellenberg der einen Welle auf das Wellental der anderen Welle und auch andersherum trifft das Wellental der ersten Welle auf den Wellenberg der zweiten Welle, wodurch sich beide Wellen gegenseitig auslöschen. Dieser Vorgang wird destruktive Interferenz genannt.

Die Frage ist jetzt, wie wird dieser Vorgang zur „Aufteilung" des Lichts in die einzelnen Wellenlängen benutzt. Wie der Name schon sagt, unterscheiden sich die verschiedenen Lichtfarben in ihrer Wellenlänge voneinander. Die Wellenlänge aber wird bei der Interferenz als Wegunterschied für die annähernd parallel laufenden Wellen benutzt. Folglich ändert sich mit beispielsweise wachsender Wellenlänge auch dazu abhängig mit dem gleichen Faktor der Wegunterschied, der durch das Gitter geschaffen werden muss.

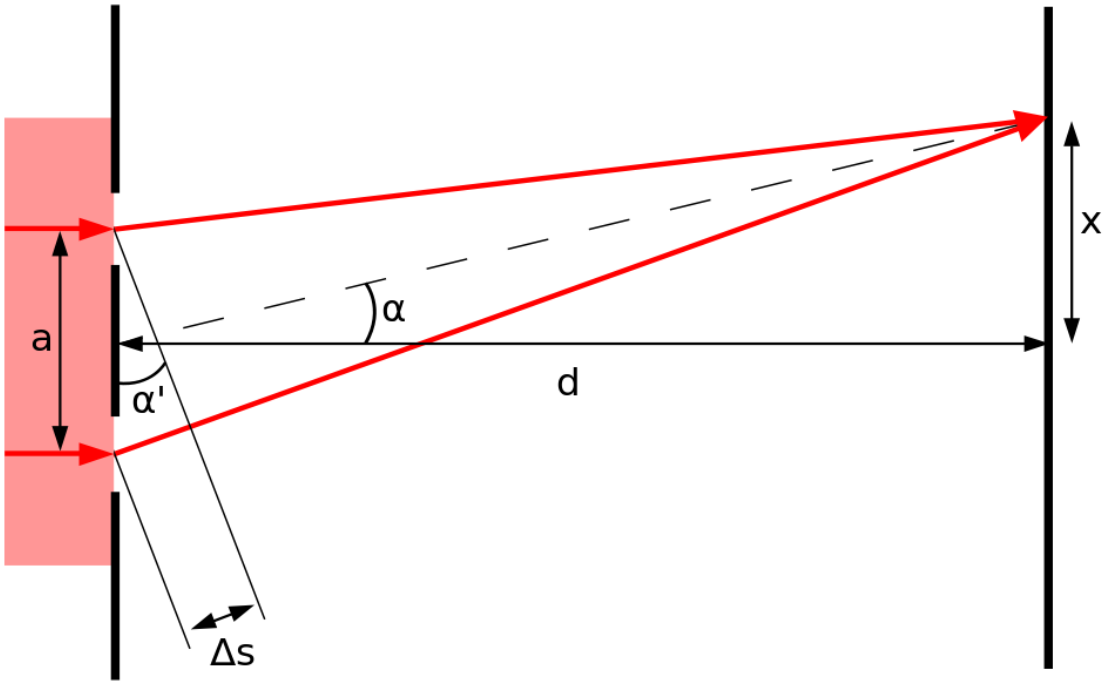


Abbildung 17: Erzeugung eines Wegunterschiedes zwischen zwei Wellenlänge mit einem Doppelspalt [32] (bearbeitet)

In der Abbildung 17, wird der Wegunterschied zwischen zwei Wellen (Δs) mit einem Doppelspalt erzeugt. Das Gitter funktioniert auf die gleiche Weise. Der einzige Unterschied ist, dass das Gitter oft mehrere hundert Spalten besitzt.

Im Detail läuft es bei einem Transmissionsgitter, bei dem es sich um einen beliebig oft nebeneinander gereihten Einzel-/Doppelspalt handelt, wie folgt ab:

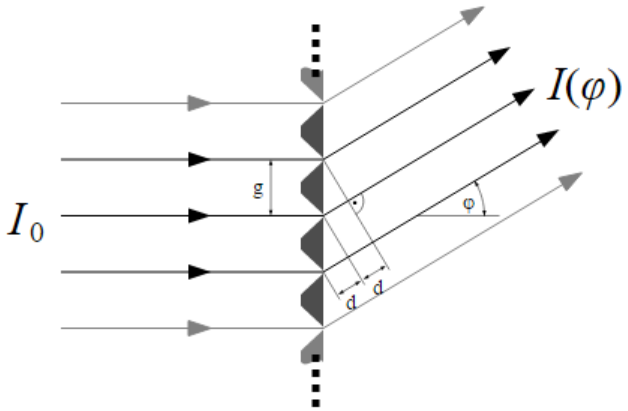


Abbildung 18: Optisches Gitter [33]

Das auf das Gitter einstrahlende Licht sendet von jedem Spalt des Gitters eine eigene Lichtwelle aus. Wenn diese nun miteinander konstruktiv interferieren, entsteht ein Maximum. Bei dem vorherigen Beispiel eines Doppelspaltes handelte es sich nur um zwei Wellen. Das Gitter wiederum besitzt um einiges mehr Spalten, wodurch es auch viele Fälle gibt, bei denen nur die Hälfte der von den Spalten ausgesendeten Wellen konstruktiv interferiert. Dadurch wird ein Nebenmaximum auf dem hinter dem Gitter stehenden Schirm erzeugt. Dieser

Vorgang ist logischerweise auch bei Minima und dadurch resultierende Nebenminima der Fall.

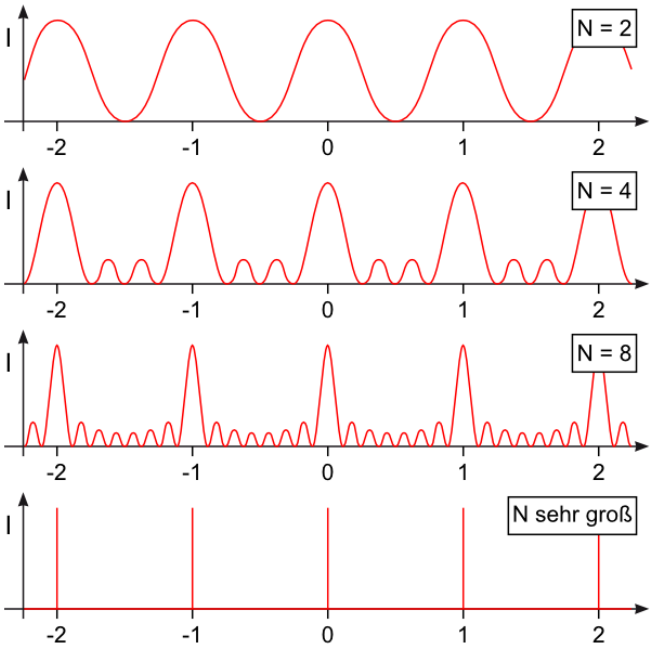


Abbildung 19: Interferenzmuster in Abhängigkeit der Spaltanzahl N [34]

Das Gitter hat dadurch sehr viele Nebenminima, die aber nur ganz schwach sichtbar sind. Der Vorteil dabei ist aber, dass die Hauptmaxima zwar seltener vorkommen als zum Beispiel bei dem Doppelspalt, aber dafür um einiges schärfer sind (siehe Abb. 19). Diese Hauptmaxima werden Ordnungen genannt.

Wenn man nun aber weißes Licht mit allen Wellenlängen auf das Gitter wirft, hat jedes Licht einer bestimmten Wellenlänge ein Hauptmaxima an einer anderen Stelle, da der zu erzeugende Wegunterschied, wie vorher erklärt, anders sein muss. Dadurch reihen sich die einzelnen Farben des Lichts auf einem Schirm hinter dem Gitter aneinander. Dies wird nun Spektrum erster Ordnung genannt. Die Spektren wiederholen sich in den nächsten Ordnungen, da jede Wellenlänge weitere Hauptmaxima 2. 3. … Ordnung besitzt, dennoch nimmt die Intensität der Ordnung ab.

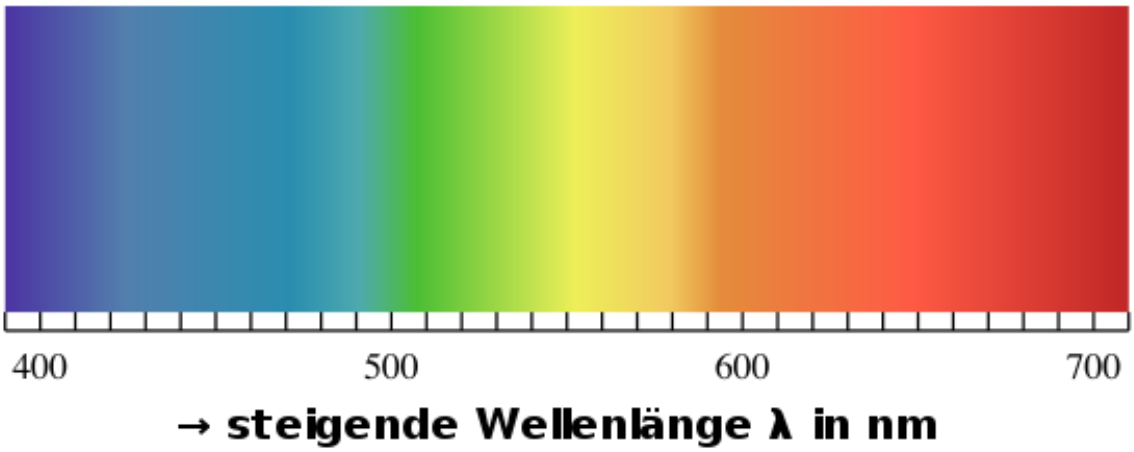


Abbildung 20: Beispiel eines kontinuierlichen Spektrums [35]

In unserem DADOS Spektrograph ist aber kein Transmissionsgitter eingebaut, sondern der Apparat arbeitet mit einem Reflexionsgitter, welches zusätzlich noch „geblazed“ ist.

Der große Unterschied zwischen Transmissionsgitter und Reflexionsgitter ist, dass bei dem Transmissionsgitter ein Wegunterschied zwischen den einzelnen Elementarwellen erzeugt wird, indem mehrere Spalte einzelne Wellen erzeugen, die um eine Gitterkonstante verschoben sind. Bei dem Reflexionsgitter wird der Wegunterschied, wie der Name schon

sagt, durch eine Reflexion der Elementarwellen erzeugt (Abb.: 21). Der Wegunterschied wird hier mit der vorliegenden Formel berechnet. [36]

$$\Delta r = \overline{AD} - \overline{BC} = d \sin \theta_m - d \sin \alpha \qquad \{1\}$$

Umformung (mit Ergänzung):

$$m\lambda = d\,(\sin \theta_m - \sin \alpha) \qquad \{2\}$$

Resultierend ist der Wegunterschied ein Vielfaches der Wellenlänge des einfallenden Lichts.

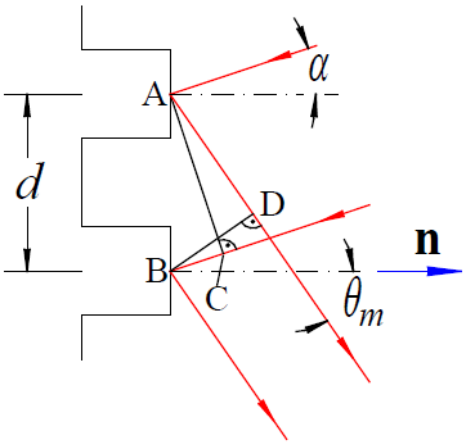


Abbildung 21: Schema der Lichtreflexion bei einem Reflexionsgitter [36]

Der Wegunterschied ist aber abhängig vom Einfalls- und Ausfallswinkel des Lichts. Dadurch besteht auch eine Abhängigkeit zwischen dem Einfalls- und Ausfallswinkel und der Wellenlänge.

Der Ausfallswinkel variiert je nach Wellenlängen. Das ist die Grundlage des Reflexionsgitters, denn dadurch entsteht nun eine Reflexion bei der jede Wellenlänge anders gespiegelt wird und resultierend das Licht wieder in seine einzelnen Wellenlängen aufgeteilt wird. Auf dem Schirm oder auch dem Kameraschirm entsteht ein Farbspektrum.

Das Problem ist, dass ein einfaches Reflexionsgitter keinen Vorteil gegenüber einem Transmissionsgitter besitzt, denn der Nachteil des Transmissionsgitters, dass viel Licht in die 0. Ordnung verloren geht, ist auch bei dem einfachen Reflexionsgitter vorhanden. Dadurch sind die weiteren Ordnungen, in denen das Licht aufgeteilt ist, deutlich schwächer, wodurch wir gar nicht in der Lage wären, so lichtschwache Objekte wie unseren Planetarischen Nebel aufzunehmen. Der Grund dafür ist, dass der Großteil des Lichts bei dem Reflexionsgitter wieder senkrecht zum Gitter (in Abbildung 21 bei α = 0) reflektiert wird und dadurch gar keinen Wegunterschied zwischen den Wellenlängen enthält.

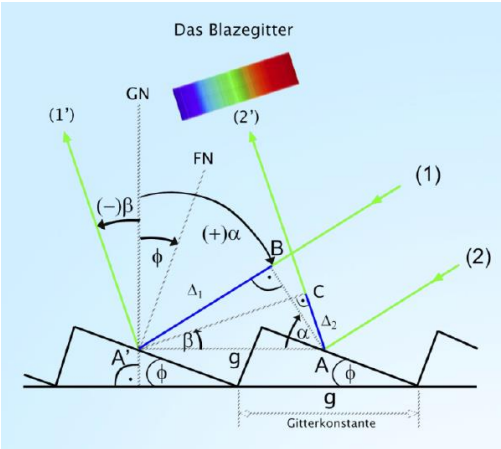


Abbildung 22: Blazegitter [30]

Bei diesem Punkt kommt das Blaze-Reflexionsgitter ins Spiel. Bei diesem Gitter sind die einzelnen Reflexionsflächen mit einem sogenannten Blazewinkel angewinkelt. (Abb.: 22: Φ). Dadurch wird das ganze Licht, welches sonst die 0.Ordnung bilden würde auch in einem Winkel gespiegelt, sodass die 1.Ordnung verstärkt wird. Damit ist das Problem von sehr geringen

Intensitäten in allen Ordnungen, außer der ersten, gelöst und es können deutlich lichtschwächer Objekte aufgenommen werden, ohne dass man lichtstärkere Teleskope oder Kameras braucht. Das Blazegitter ist dadurch das perfekte Gitter für unseren Anwendungsbereich. Im DADOS-Spektrographen ist dieses Gitter in verschiedenen wechselbaren Ausführungen verbaut.

4 Astrofotografie

4.1 Bearbeitung der Bilder

Die Spektren und die daraus geschlossenen Ergebnisse von unserem Planetarischen Nebel geben uns viele Informationen über die Funktionsweise von Planetarischen Nebel und ihren Einfluss auf andere astronomische Objekte. Dennoch ist die eigene bildliche Vorstellung durch diese Daten nicht gegeben, weil Spektren für einen Betrachter schwierig zu deuten sind und vor allem keine Informationen über die äußere Form des Objektes geben.

Damit man trotzdem eine Vorstellung erhält, haben wir mit unserem Versuchsaufbau Farbbilder aufgenommen und diese weiter verarbeitet. Auch hier war ein Stacken der Bilder, wie bei den Spektren, nötig, um ein besseres Ergebnis zu erhalten. Das Stacken wurde in Fitswork durchgeführt.

Nach dem Stacken mussten wir das Bild in Photoshop noch weiter bearbeiten.

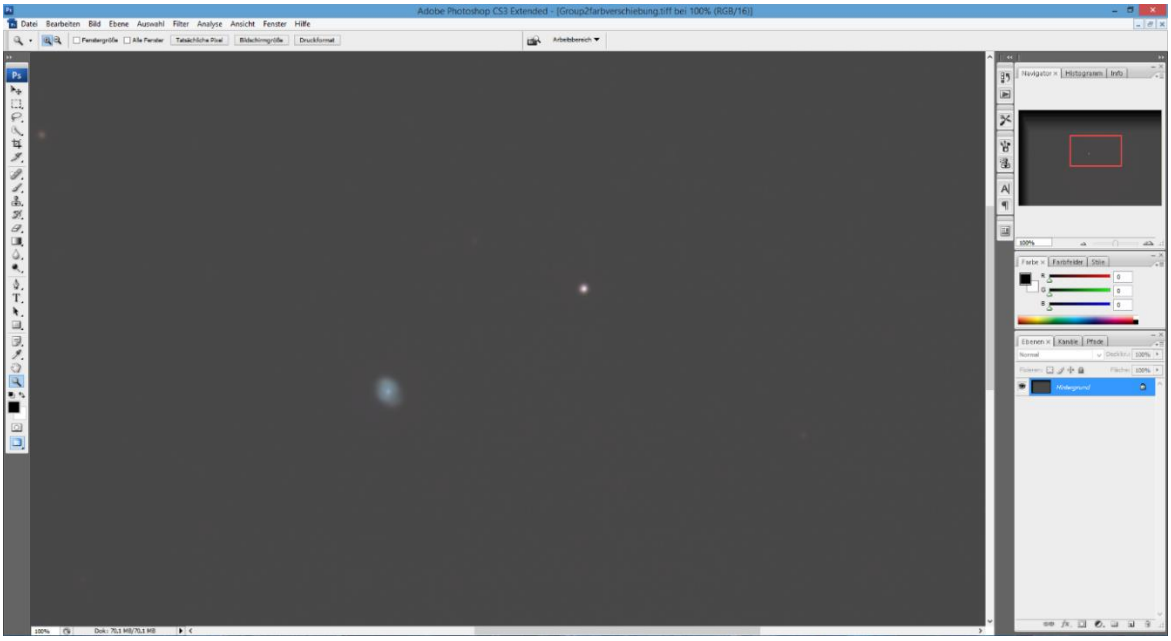


Abbildung 23: Bearbeitung des gestackten Bilds in Photoshop

Um die Qualität des Bildes weiter zu verbessern, haben wir das Bild zunächst geschärft, damit man die Strukturen des Nebels besser erkenne kann. Für diese Funktion ist in Photoshop CS3 ein Schärfungstool zuständig:

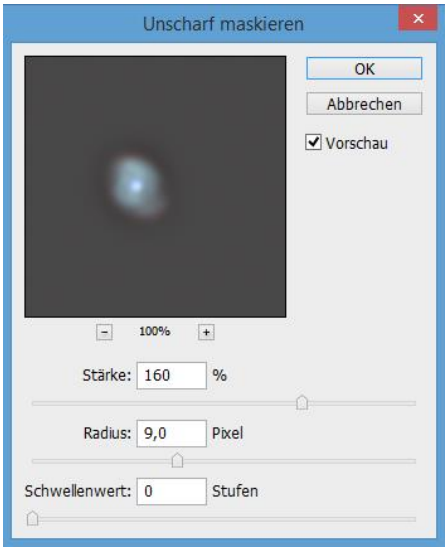


Abbildung 24: Verbesserung des Bildes durch die Funktion <Unscharf maskieren>

Als nächstes mussten wir noch die Atmosphärische Dispersion in dem Bild entfernen.

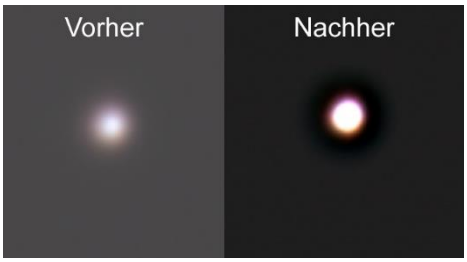


Abbildung 25: Vergleich der Bilder vor und nach dem Schärfen und Beseitigung der Atmosphärischen Dispersion

Dabei haben wir den Nebenstern benutzt, der auf dem Bild zur Orientierung dient, da wir dort die Farbverschiebung besser beurteilen können, da er eigentlich komplett in weiß leuchtet und wir so die blauen und roten Schichten gegeneinander verschieben konnten, sodass sie sich aufheben.

4.2 Ergebnis im Vergleich mit anderen Bildern

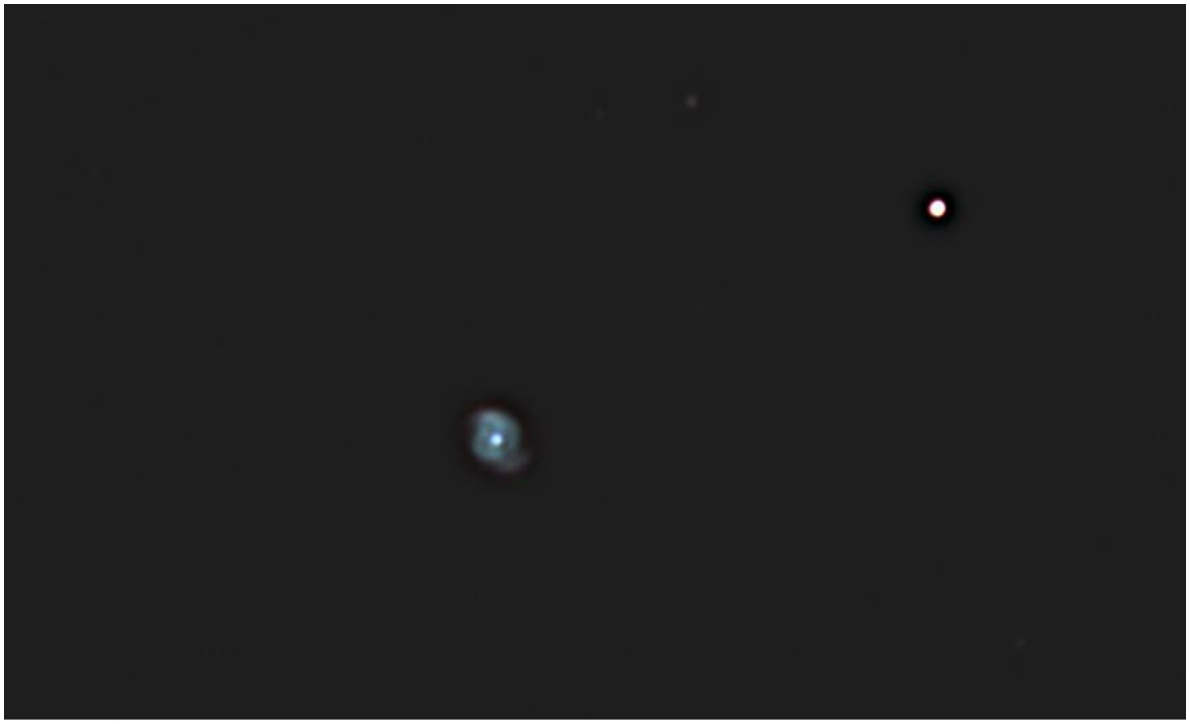


Abbildung 26: Endergebnis: Aufnahme des Planetarischen Nebels (links) mit einem anderen Stern (rechts) zur Orientierung

Auf diesem Bild kann man die Struktur des Planetarischen Nebels erkennen. In der Mitte des Nebels ist die Helligkeitsintensität des Nebels deutlich höher, da sich dort der Zentralstern befindet. Deswegen nimmt die Intensität nach außen immer weiter ab. Auch zu erkennen ist, dass der Nebel oben eine Ausrichtung nach links hat und sich so nach links biegt. Unten richtet sich der Nebel in die genau andere Richtung, also nach rechts.

Die Struktur des Planetarischen Nebels auf unseren Bildern ist nicht so detailliert erkennbar, wie auf den Bildern der Profi-Astronomen der NASA. Der Grund dafür ist, dass unsere Teleskope und Kameras die schwache Helligkeit des Nebels nur mit gewissen Einschränkungen aufnehmen können. Aber der Hauptgrund ist, dass das Hubble Teleskop (Abb.: 27) mit dem die Profi-Astronomen den NGC6543 aufgenommen haben, im Weltraum gelegen ist. Dadurch entsteht ein extrem hoher Aufwand, der mit hochauflösenden Bildern belohnt wird, da die Bilder nicht durch die Erdatmosphäre verfälscht werden. Die Ergebnisse sind atemberaubend und durch das millionenschwere Budget für Hobby-Astronomen nur schwer erreichbar.

Abbildung 27: Hubble Weltraum Teleskop [50]

Abbildung 28: NGC6543 aufgenommen mit dem Hubble Weltraum Teleskop [51]

Trotzdem wollen wir unser Ergebnis mit dem von der NASA vergleichen und auf Ähnlichkeiten untersuchen, da es sich trotz verschiedenem Aufnahmeequipment noch um das gleiche astronomische Objekt handelt.

Als erstes fällt auf, dass auch in dem von der NASA angefertigten Bild die Helligkeitsintensität des Nebels nach außen immer weiter abfällt. Natürlich sind nun auch die feinen Strukturen des Nebels zu sehen, die sich schraubenähnlich durch den Nebel ziehen. Auch die Farbgebung unterscheidet sich. Bei dem Foto der NASA gehen blaue Teilstücke in orangene über. Bei unserem Foto handelt sich es eher um ein recht einheitliches Türkis. Dabei ist aber auch noch zu erwähnen, dass wir nicht wissen, wie die NASA die Farbgebung aufgenommen hat, da es auch Verfahren gibt, in denen Schwarz-Weiß-Bilder nachgefärbt werden. Trotzdem ist in unserem Bild ein deutlich höherer Grünanteil.

Aus uns unbekannten Gründen ist unser Foto gespiegelt. Damit wir die Fotos besser nebeneinander betrachten können, haben wir das Bild mit Photoshop horizontal

gespiegelt. Dadurch stimmt die Ausrichtung der Nebelspitzen in beiden Bildern überein. (Abb.: 29)

Abbildung 29: Vergleich: links das Bild vom Hubble Teleskop; rechts unser Bild horizontal gespiegelt

In unserem Bild kann man die Nebelspitzen erkennen. Sie geben dem Objekt die charakteristische Form eines spitzen Ovals. Dicht um den Weißen Zwerg sieht man in unserem Bild einen violetten Ring. Dies ist die Innere Hülle des Nebels, die auf dem Bild der NASA in einem ähnlichen Farbton zu erkennen ist. Die einzelnen Hüllen sind jedoch kaum erkennbar, da unser Bild mit einer geringeren Auflösung aufgenommen worden ist.

5 Technik

5.1 Das Schülerlabor

Das Schülerlabor des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums bietet hervorragende Möglichkeiten für Schüler, aber auch schulexterne Privatpersonen und Studenten, Messungen und Beobachtungen im Bereich der Astronomie vorzunehmen. Die Leiter der Sternwarte Herr Michael Winkhaus und Herr Bernd Koch bieten an der Schule wöchentlich einen Astronomie Projektkurs an, welcher in der 11. Klassenstufe angewählt werden kann. Im Rahmen dieses Kurses schreibt man statt der üblichen Facharbeit eine Projektarbeit. Auch Schüler anderer Schulen können in Absprache mit der Schule an diesem Kurs teilnehmen.

Abbildung 32: Stationen des Schülerlabors auf dem Dach der Schule

Das Schülerlabor wurde 2009 eingeweiht. Insgesamt stehen auf dem Dach der Schule sieben Stationen zum Messen und Beobachten zur Verfügung. Station 7 ist mit einem großen 12,5-Zoll Cassegrain Teleskop ausgestattet. Dieses ist dauerhaft installiert und mit einem Schiebedach vor der Witterung geschützt. An den Stationen 1-6 (Abb.: 30) kann ein Celestron Edge HD11 installiert werden. Alle Teleskope können mit einer Teleskopsteuerung auf eingespeicherte Objekte oder manuell ausgerichtet werden (Abb.: 31). Zudem stehen für die Stationen 1-6 Wagen zur Verfügung, in denen verschiedene Kameras, kleine zusätzliche Teleskope, ein Laptop, Filter und vieles mehr untergebracht sind (Abb.: 32).

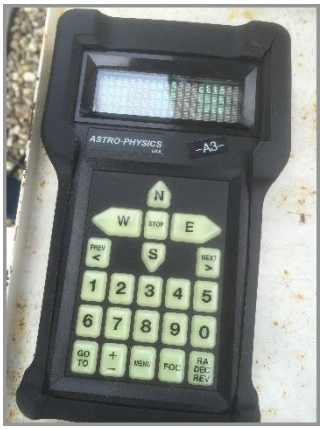


Abbildung 31: Teleskopsteuerung

Abbildung 30: Sternwarte von Innen mit Technikwagen und C11 Teleskopen für die Inseln 1-6

Jede der Stationen ist direkt mit einem LAN-Anschluss versehen, sodass Bilder und ähnliches direkt von den Laptops der Sternwarte auf den lokalen Server gespeichert werden können. Der speziell eingerichtete Astronomie-Raum der Schule ist mit vielen Laptops ausgestattet. Auch mit diesen kann man über den LAN-Anschluss an jedem Platz auf den Server zugreifen. Das erleichtert deutlich die Arbeit, da die Ergebnisse dann an einem geeigneten Ort ausgewertet werden können.

5.2 Unser Aufbau

Abbildung 33: Celestron Edge HD11

Für unsere Messungen haben wir das Celestron Edge HD11 mit einer Brennweite von 2800 mm und eine Öffnung von 280 mm verwendet (Abb.: 33). „HD“ steht hier für High Definition und bezeichnet die Abbildungsqualität und Edge steht für Rand, zusammen also die perfekte punktförmige Abbildung von Sternen bis in die Randbereiche des Gesichtsfeldes“ [37]

Abbildung 34: SBIG STF-8300M

Um die Spektren aufzunehmen, haben wir den DADOS-Spektrografen benutzt (näheres Kapitel 3.4). Da die Länge des Spektrografen bewirkt, dass der Sensor kein scharfes Bild mehr empfangen kann, mussten wir einen 0,8x Brennweitenreduzierer einsetzen. Aufgenommen haben wir mit der SBIG STF-8300M Schwarz-Weiß Kamera (Abb.: 34). Bei einer Auflösung von 3326 x 2504 Pixeln beträgt die Pixelgröße 5,4 µm x 5,4 µm [38].

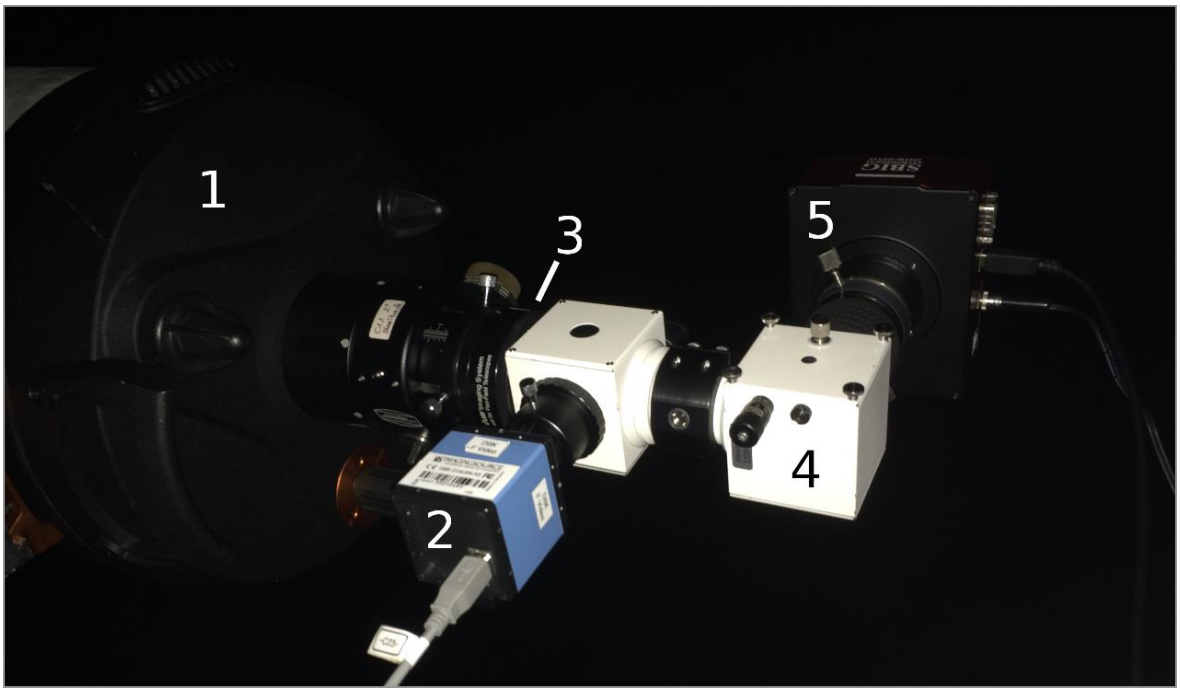


Abbildung 35: Aufbau am Teleskop: 1: Celestron 11 ; 2: Farbvideokamera ; 3: Brennweiten Reduzierer ; 4: DADOS-Spektrograf ; 5: SBIG SW-Kamera

Um die Position des Nebels auf dem Spalt am PC zu beobachten, haben wir noch eine Farbvideokamera anstelle eine Okulars installiert (Abb.: 35). Über das Live Bild am PC konnten wir dann das Teleskop manuell nachführen.

6 Auswertung der Spektren (Abschnitte der Wellenlängenkalibrierung)

Wir konnten einige zufriedenstellende Spektren mit unseren Apparaten aufnehmen. Diese müssen aber noch weiter bearbeitet werden, um bestmögliche Ergebnisse in der Auswertung zu erzielen. Bei den aufgenommen Bildern handelt es sich bisher nur um Rohbilder, welche von der Kamera aufgenommen wurden und dadurch noch einige verfälschende Effekte enthalten. Um aber die Verfälschung der Ergebnisse möglichst gering zu halten, versuchen wir die Effekte zu entfernen. Dies ist zwar bei Verfälschungen, durch die Streuung des Lichts in der Atmosphäre nur schlecht möglich, dennoch gibt es Verfälschungen, die ohne viel Aufwand entfernt werden können. Je mehr Fehler man dadurch ausschließen kann, desto aussagekräftiger wird das Ergebnis.

6.1 Hotpixelentfernung

Als ersten Schritt müssen wir die Hotpixel der Spektren entfernen, da diese alle weiteren Schritte verfälschen würden. Bei Hotpixel handelt es sich um Pixel, welche eine unproportionale Intensität im Vergleich zur Photoneneinstrahlung angeben und somit ein meist weißes Bildsignal ausgeben. Der Pixel stellt dadurch die Lichteinstrahlung im Verhältnis zu den anderen Pixeln heller da. Der Grund dafür kann eine zu hohe ISO Zahl sein, da dadurch die Pixel sehr empfindlich eingestellt werden oder auch hohe Belichtungszeiten können Probleme darstellen. Als letzter Aspekt spielt auch noch die Temperatur des Sensors eine Rolle bei der Pixelfehleranzahl. Deswegen ist unsere CCD Kamera mit einem gekühlten Sensor ausgestattet [39].

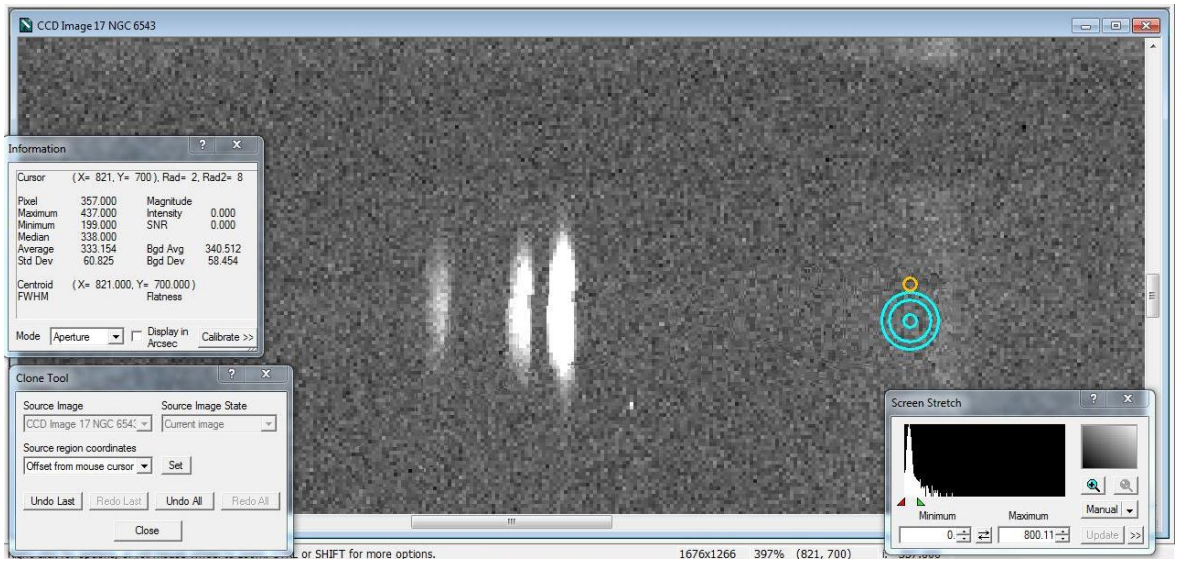


Abbildung 36: Hotpixelentfernung mit MaximDL

Zum Entfernen der Hotpixel benutzten wir das Programm MaximDL, welches uns von der Astronomieabteilung des CFG zur Verfügung gestellt wurde.

Mit diesem Programm konnten wir die Hotpixel entfernen, indem wir sie durch Pixel an anderen Stellen ersetzt haben. Dabei haben wir darauf geachtet, dass die benutzen Referenzpixel nur eine schwache Photonenausstrahlung ausgesetzt waren, damit die ersetzen Hotpixel keine fälschliche Information ausgeben, die an eine andere Stelle gehört. Dadurch haben wir die Hotpixel sozusagen nur ausgelöscht, da es unmöglich ist die alte Information wieder herzustellen. Das ist aber weiter nicht schlimm, da die Bereiche der Hotpixel meistens eher weniger von Bedeutung sind und es nur wichtig ist, dass sie keine maximale Einstrahlung vortäuschen.

6.2 „Stacking“ der Spektren

Als nächsten Arbeitsschritt haben wir das Stacking der Spektren vorgenommen. Das Stacking erhöht die Qualität der Spektren, da alle Spektren miteinander addiert werden und daraus der Mittelwert gezogen wird. Auf diese Weise werden einmal auftretende Effekte oder Verfälschungen durch Streulicht oder veränderte Sichtbedingungen größtenteils ausgelöscht. Hinzu kommt noch, dass das Grundrauschen der Spektren minimiert wird. Dem zufolge ist es immer von Vorteil möglichst viele Aufnahmen von dem Objekt mit auch variierender Belichtungszeit zu machen.

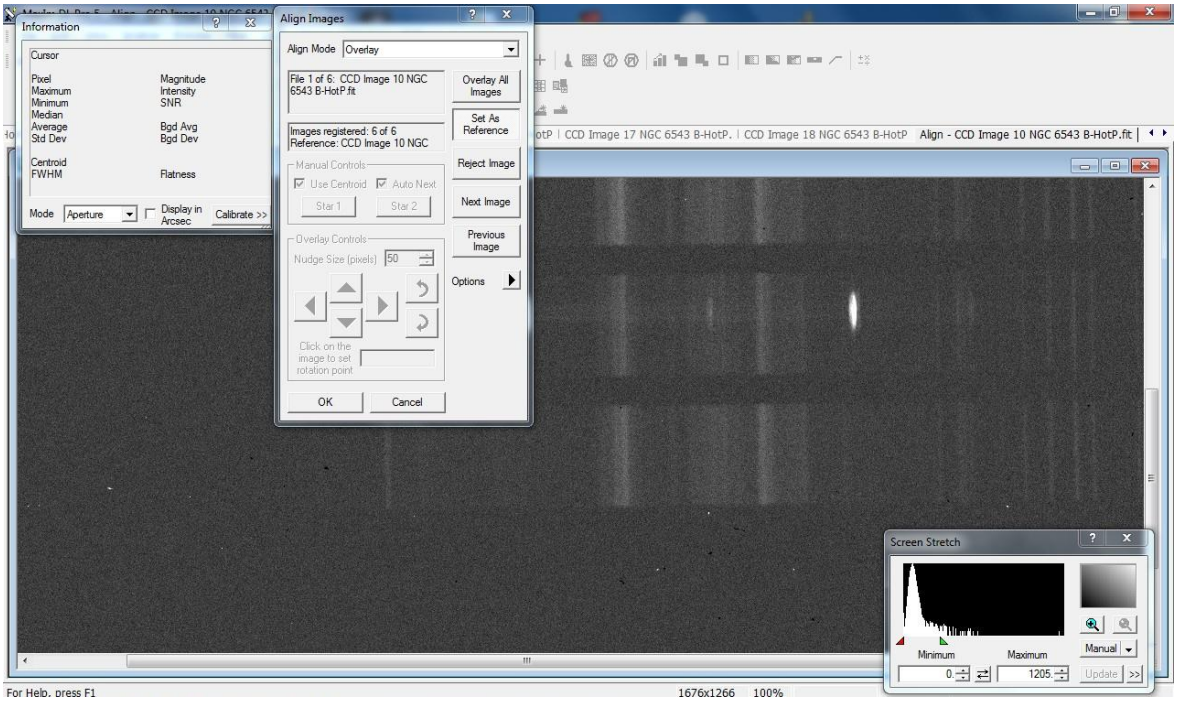


Abbildung 37: Stacking der Spektren

Dabei entsteht ein Problem, denn nicht alle Spektren passen perfekt abdeckend übereinander, wodurch eine Verschiebung der charakteristischen Linien gegeneinander entsteht. Wenn man die Spektren auf diese Weise Stacken würde, wäre das Ergebnis kontraproduktiv. Die Lösung für dieses Problem ist eine weitere Funktion in MaximDL, bei der man die Spektren gegeneinander verschieben kann, sodass die entscheidenden Spektrallinien abdeckend aufeinander treffen (Abb.: 38).

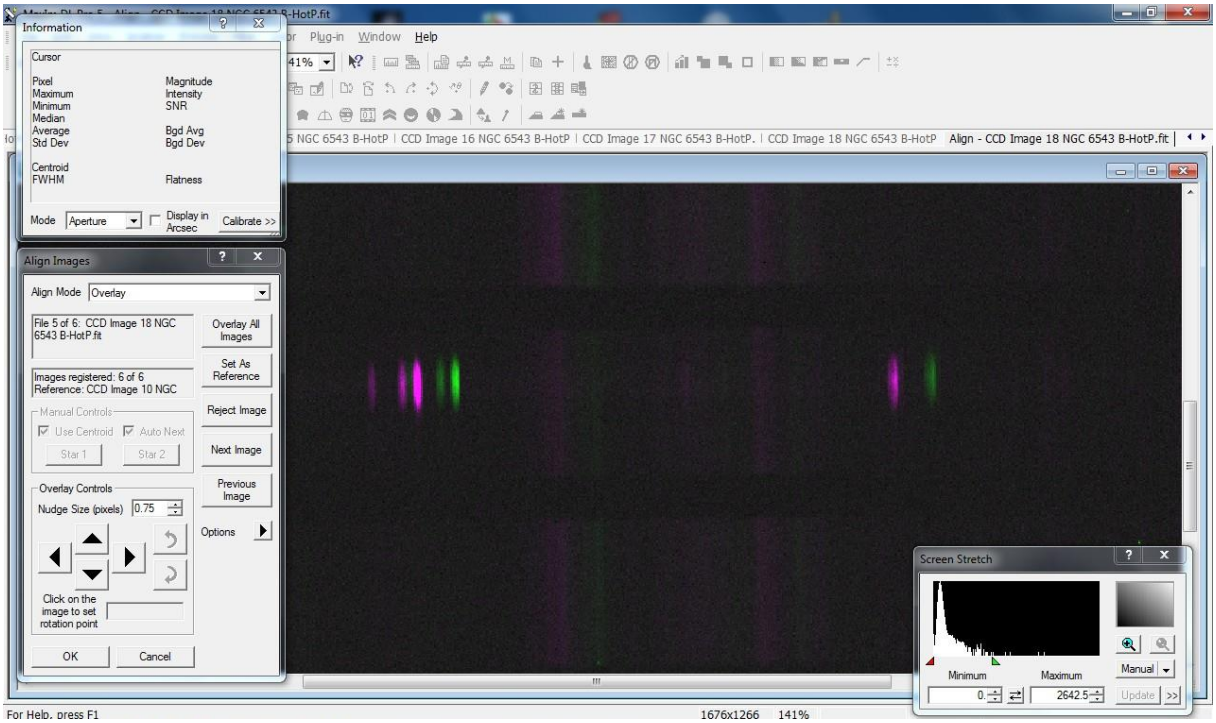


Abbildung 38: Stacking der Spektren mit Verschiebung

In der oberen Abbildung ist die Verschiebung zu sehen. Das eine Spektrum ist neonpink und das andere ist neongrün markiert. Nun kann man sie mit den Pfeiltasten genau übereinander schieben.

6.3 Subtraktion des Himmelshintergrundes

Die Hotpixelentfernung und das Stacken hat die Qualität des Spektrums stark angehoben. Dennoch ist noch ein wichtiger Schritt zu erledigen. Wir müssen den Himmelshintergrund von dem Spektrum abziehen, damit nur noch der Planetarischen Nebel auf dem Spektrum zu sehen ist. Dafür haben wir den Himmelshintergrund aufgenommen, indem wir mit dem Teleskop ein kleines Stück von dem Nebel weggeschwenkt sind, sodass das Teleskop kein Licht mehr von dem Nebel auffängt. Auch vom Himmelshintergrund haben wir mehrere Aufnahmen gemacht, um sie miteinander zu stacken.

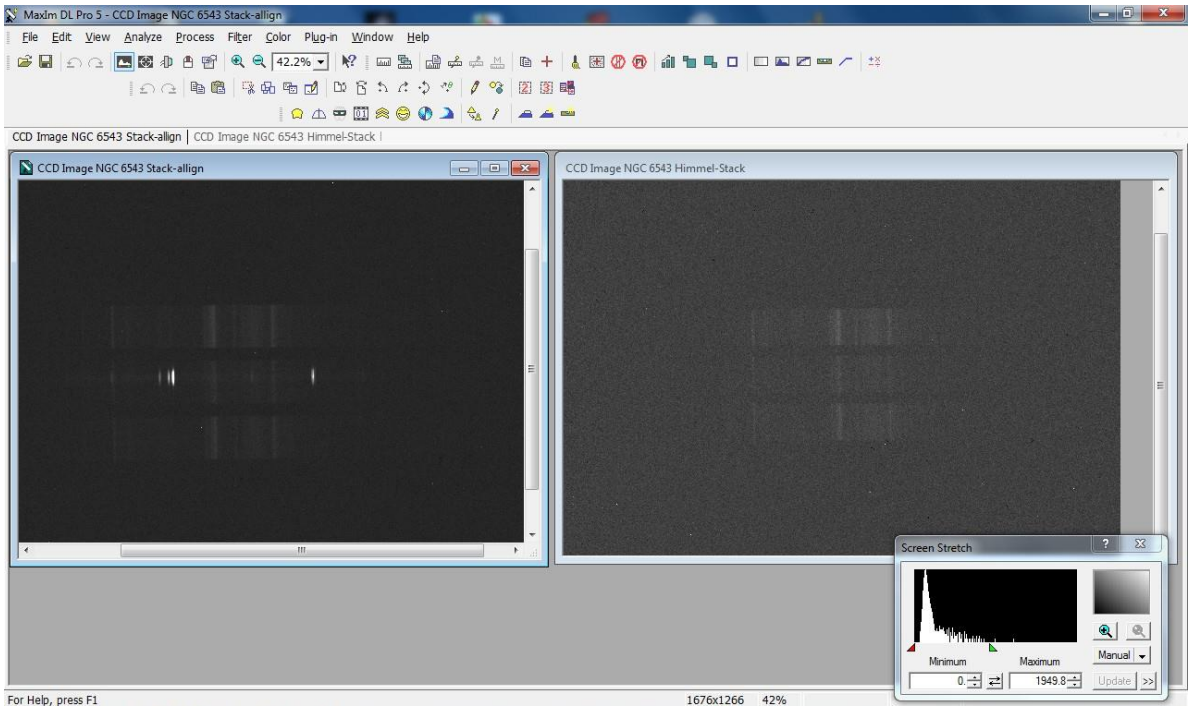


Abbildung 39: Himmelshintergrund (links) mit unserem Spektrum von NGC6543 (links)

In Abbildung 39 ist ein Spektrum des Planetarischen Nebels mit dem Himmelshintergrund neben dem Himmelshintergrund alleine dargestellt. Bei dem Vergleich kann man direkt erkennen, dass ein Großteil der Linien des Spektrums aus dem Himmelshintergrund stammt und nur einige wenige das Resultat des Planetarischen Nebels sind. Die Wichtigkeit der Subtraktion ist, wie zu sehen, nicht zu vernachlässigen.

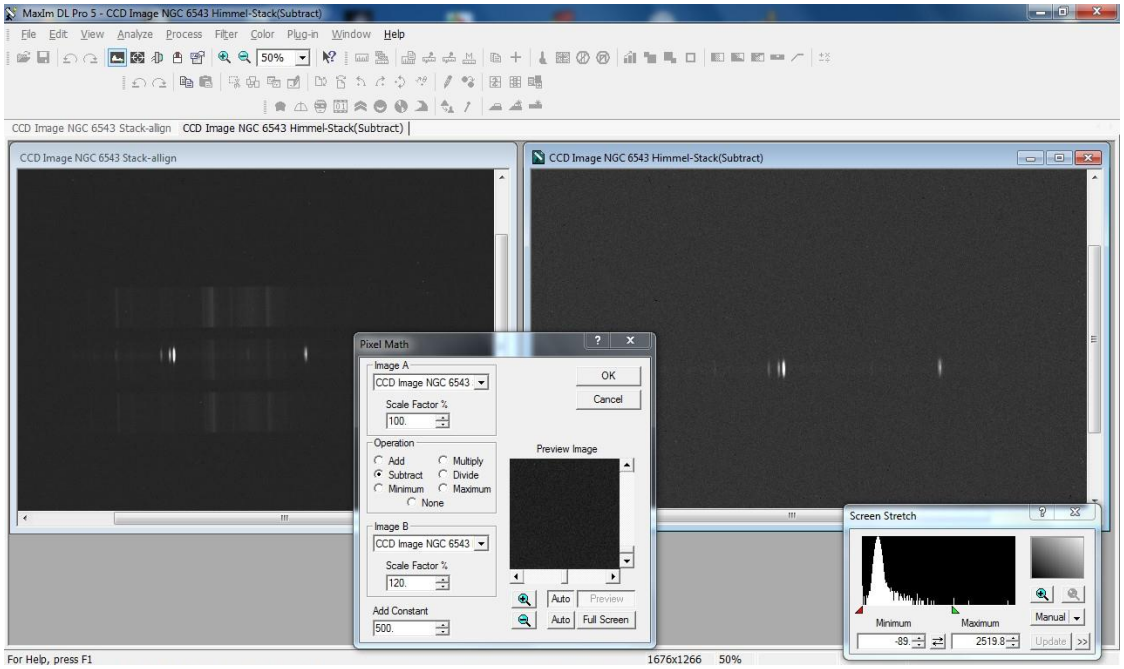


Abbildung 40: Pixel-Math

Die Subtraktion wird auch mit dem Programm MaximDL durchgeführt. Dafür gibt es ein extra Tool „Pixel-Math“, das verschiedene Rechenmethoden wie zum Beispiel addieren, subtrahieren, dividieren und multiplizieren von zwei Spektren zulässt.

6.4 Zwischenergebnis der Spektrenauswertung

Als Zwischenergebnis haben wir ein Spektrum, welches nun bereit ist zur weiteren Analyse, da wir die gröbsten Messfehler beseitigt haben. Um schon einen Zwischenblick auf das Spektrum als Kurve zu werfen, kann man mit MaximDL das Spektrum in einen Graphen umwandeln, der die Intensität auf der Y-Achse darstellt. Auf der X-Achse muss dazu noch die jeweilige Wellenlänge ergänzt werden. Dies geschieht im nächsten Schritt.

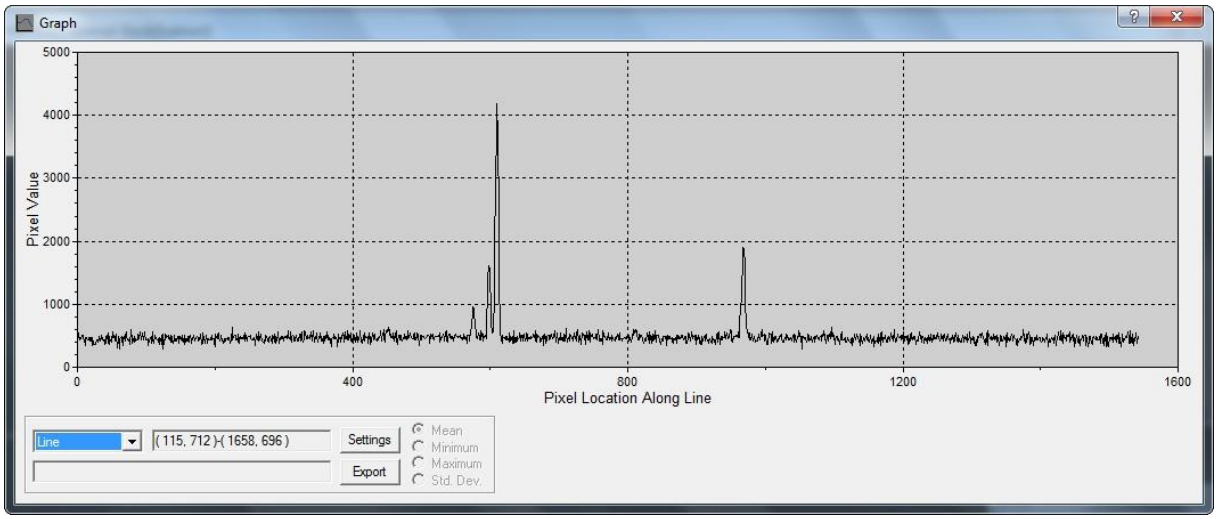


Abbildung 41: Darstellung des Graphen mit MaximDL

6.5 Wellenlängenkalibration

Nachdem wir das Spektrum nun qualitativ aufgebessert haben, fehlt noch der wichtigste Schritt zum fertigen Spektrum. Wir müssen die Wellenlänge kalibrieren, was bedeutet, dass dem Spektrum als Graph an der X-Achse Wellenlängen zugewiesen werden. Dadurch stellen wir die Abhängigkeit zwischen der Intensität und der Wellenlänge her. Das Spektrum kann dann die Intensität jeder Wellenlänge, die die Kamera erfassen konnte, angeben. Mit dieser Information können wir unser Primärziel „Welche Elemente stößt der Planetarische Nebel aus?“ weiter verfolgen.

Für die Kalibrierung der Wellenlängen brauchen wir jedoch Referenzspektren, von anderen Publikationen, um diese mit unseren zu vergleichen. Dabei suchen wir im Referenzspektrum nach charakteristischen Linien, die wir in unserem Spektrum wieder

erkennen. Auf diese Weise können wir die Spektrallinien mit ihrer Wellenlänge versehen. Als Referenz nutzen wir in unserer Projektarbeit die Daten von dem Astronomen Mark Westmoquette [40], [41].

Für die Wellenlängenkalibration benutzen wir das Programm Vspec, da es für diese Aufgabe ideal ist.

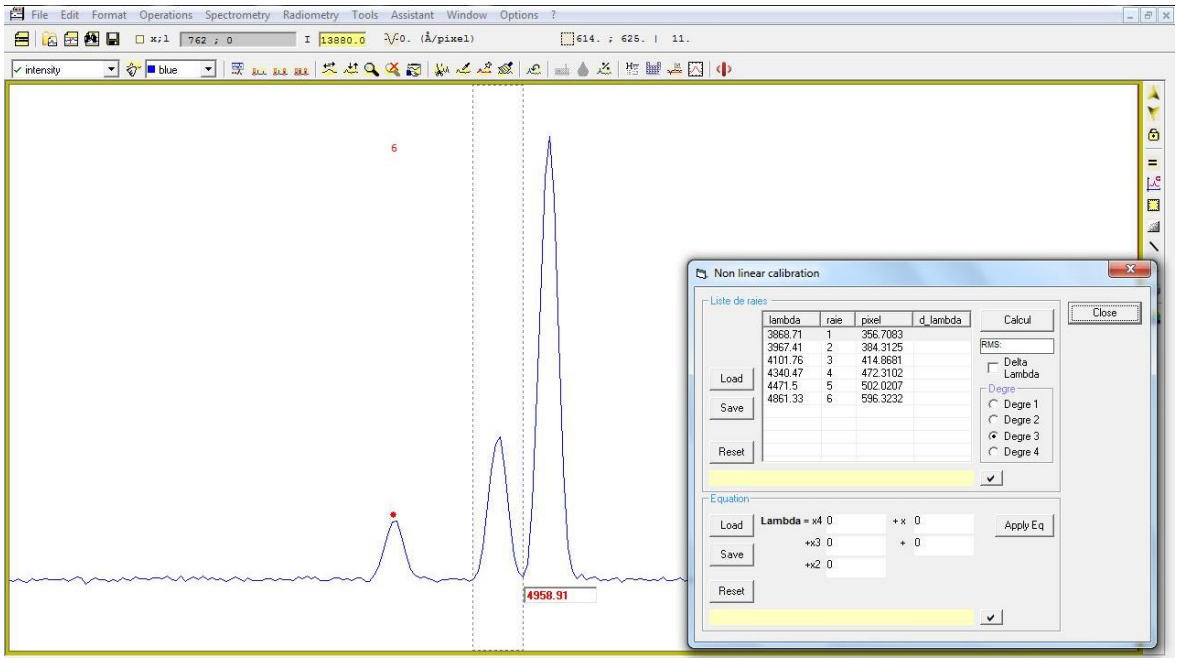


Abbildung 42: Intensitätsbergidentfikation

Das Spektrum, welches wir in MaximDL bearbeitet haben, wird nun in Vspec geladen. Dabei wird das Spektrum in die Form eines Graphen umgeformt, bei dem die Intensität auf der Y-Achse dargestellt wird. Dadurch kann man die charakteristischen Linien umso besser erkennen, da diese eine hohe Intensität besitzen. Diese Spektrallinien haben wir nun anhand von Referenzspektren mit ihrer Wellenlänge versehen. Dafür müssen wir in das Spektrum hereinzoomen um die einzelnen „Intensitätsberge“ mit einem Werkzeug zu markieren, wodurch das Programm anschließend den charakteristischen Punkt des Intensitätsmaximums des Berges erkennt und mit der eingegebenen Wellenlänge versieht (Abb.: 42).

Je mehr Linien man mit der Wellenlänge versieht, desto genauer wird die spätere Berechnung. Jedoch müssen die angegebenen Wellenlängen genau identifiziert werden und nicht mit anderen Linien verwechselt werden, sonst nimmt die Genauigkeit wieder ab. Glücklicherweise ist Vspec dabei behilflich und gibt bei jeder angegebenen Wellenlänge an, wie stark sie von den anderen abweicht, wenn man die X-Achse nun mit den Wellenlängen durch Hochrechnung versieht. Denn das Programm berechnet anhand den angebenden Wellenlängen die ganze X-Achse hoch und ersetzt dabei die X-Werte durch Wellenlängen in Angström. Auch bei uns gab es zunächst stark abweichende Werte, die wir jedoch wieder aus der Berechnung herausnehmen konnte, weil uns viele Spektrallinien zur Verfügung stehen, die wir identifizieren konnten.

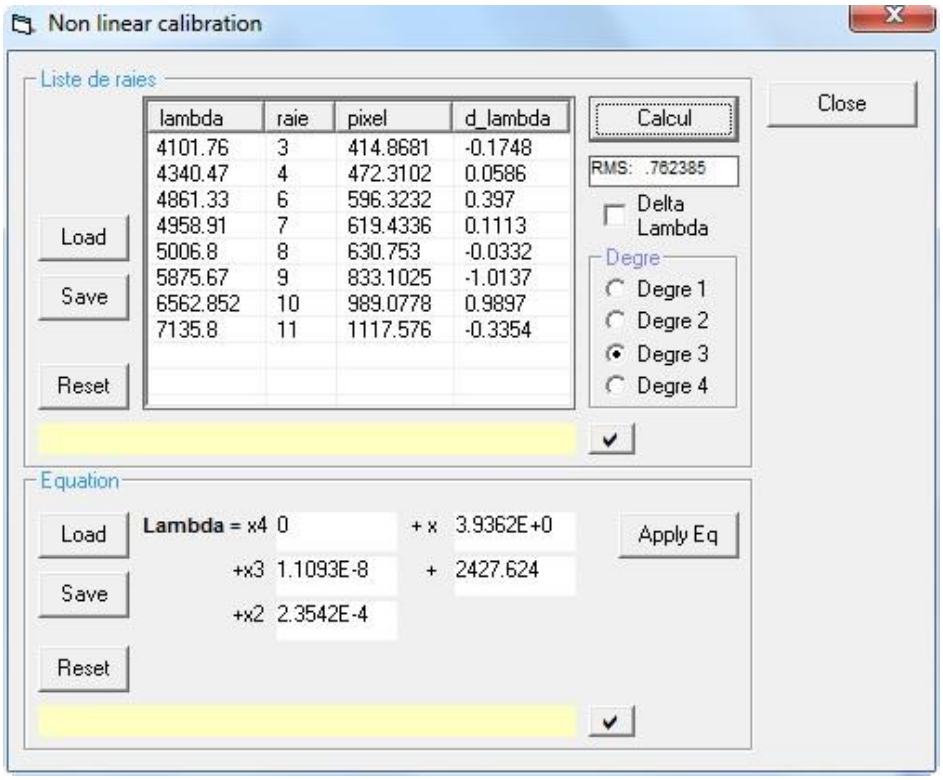


Abbildung 43: Tabelle der Wellenlängen

Vspec trägt die Werte zur Hochrechnung in eine Tabelle ein und gibt nach der Berechnung eine allgemeine Abweichung an. Dies beträgt bei uns 0.76 Ångström. Mit diesem Wert kann man zufrieden, sein da er unter unserem angepeilten Genauigkeitsrichtwert von einem Ångström liegt und der Wert auch durch viele Abweichungen beeinflusst ist.

Nun ist der größte Teil der Auswertung erledigt, da wir nun ein Spektrum haben, das mit den Wellenlängen und deren Intensität versehen ist. Dadurch können wir schon erste Abschätzungen über die Zusammensetzung des Planetarischen Nebels treffen, da als Beispiel die Sauerstoff O[III] Linien stark vertreten sind. Die Ergebnisse, die wir aus dem nun fast kompletten Spektrum ziehen können, behandeln wir aber im nächsten Kapitel.

Als nächsten erstellen wir noch ein synthetisches Farbspektrum, weil wir unsere Spektren mit einer schwarz-weiß CCD Kamera aufgenommen haben, um die Qualität zu steigern. Farbspektren haben den Vorteil, dass man die Zusammensetzung des Spektrums mit den verschiedenfarbigen Wellenlängen besser erkennen kann.

Dafür müssten wir zunächst die Intensität des Spektrums erhöhen, was bedeutet dass wir das Spektrum mit einem Faktor multipliziert haben. Diesen Vorgang hat Vspec für uns übernommen, sodass wir nur ein „Strecken“ Tool anwenden mussten. Dadurch sind die Differenzen von Minima und Maxima gestiegen, wodurch das Synthesespektrum einem originalen Farbspektrum näher kommt. Für die endgültige Farbspektrumsynthese mussten wir dadurch nur noch den Funktionen des Programms folgen.

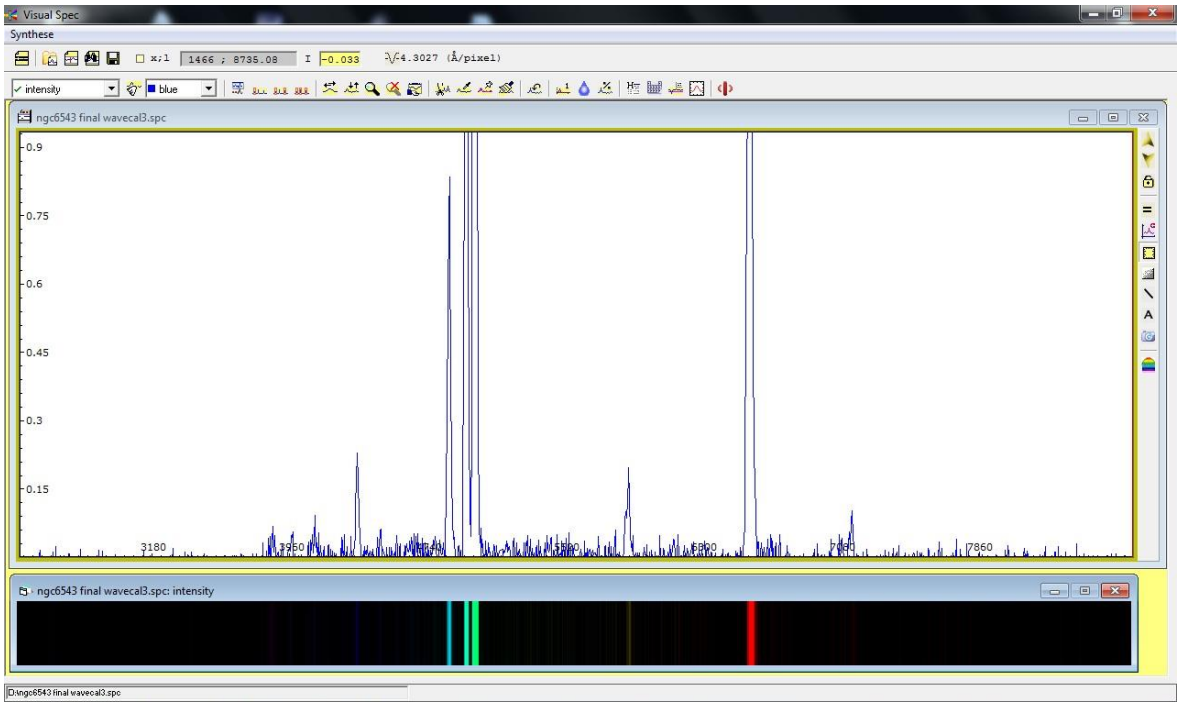


Abbildung 44: Finales Farbspektrum

Das Farbspektrum ist aber für die weitere Auswertung von geringer Bedeutung, sondern dient lediglich zu Veranschaulichung.

In Abbildung 44 ist unser Finales Spektrum zu sehen, das wir zu Weiterverarbeitung benutzen. Der letzte Schritt der methodischen Auswertung ist nun nur noch die Überprüfung der Werte. Dieser Schritt ist zwar nicht unbedingt nötig, dennoch ist er leicht durchzuführen und lässt uns erkennen, ob bei der Auswertung alles richtig gelaufen ist.

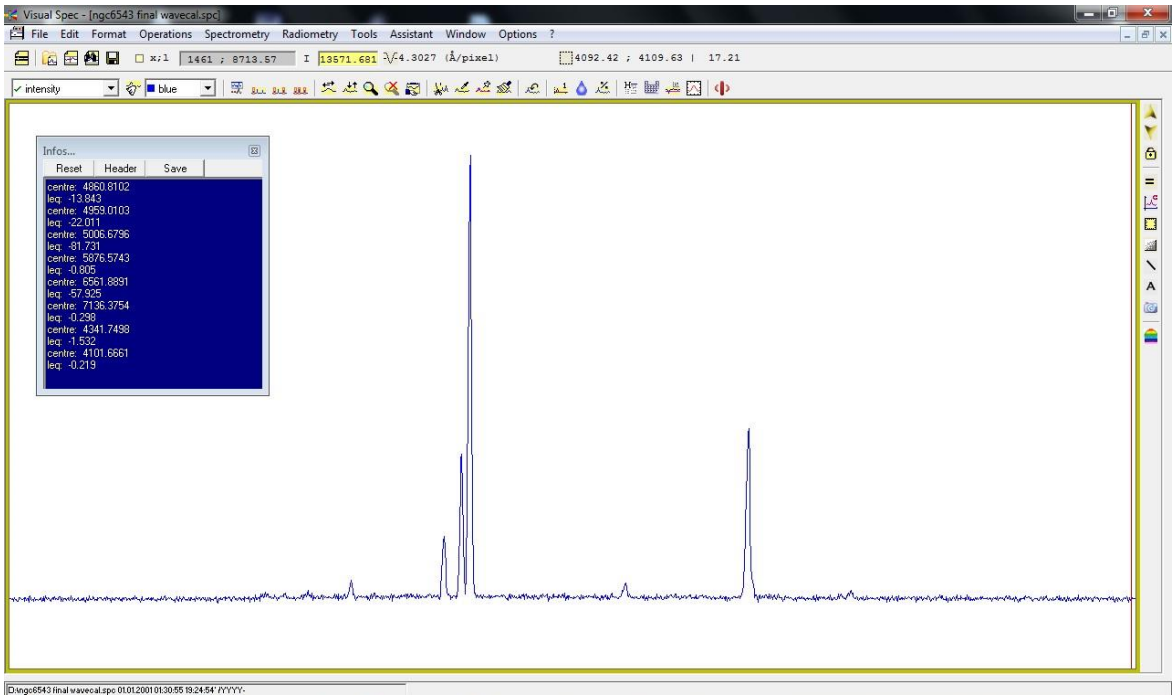


Abbildung 45: Überprüfung der Wellenlängen

Bei der Überprüfung der eingegebenen Werte benutzen wir weiter Vspec, indem wir die Intensitätsberge, die wir mit Wellenlängen versehen markieren und deren Y-Wert ausgeben. Dadurch können wir überprüfen, ob diese Werte mit denen die wir eingegeben haben übereinstimmen. Denn durch die Hochrechnung können die Werte verändert werden, da sie an die anderen angepasst werden. Dieser Vorgang kann natürlich durch möglichst genaue Wellenlängenbeschriftung minimiert werden. Die Möglichkeit dafür ist aber nicht immer vorhanden.

Bei unserer Überprüfung stimmten die Werte überwiegend nahezu überein. Die größte Abweichung beträgt circa 1,3 Ångström. Sonst liegt die Abweichung aber unter einem Ångström. Dazu kann man sagen, dass durch die Hochrechnung nur eine kleine Abweichung entstanden ist, die auch schon durch die Auflösung des Spektrums begründet werden kann. Ein Pixel des aufgelösten Spektrums entspricht mehreren Ångström an Wellenlänge.

Die Genauigkeit ist dementsprechend zufriedenstellend und verspricht aussagekräftige Ergebnisse über die Zusammensetzung des Planetarischen Nebels und dessen ausgestoßene Materie und über die Elektronentemperatur im Nebel.

7 Erster Teil des Experiments - Identifikation der Elemente

7.1 Relevante Elemente

Tabelle 1: Identifizierbare Elemente im Spektrum

Nummer	Wellenlänge (Literaturwert)	Bezeichnung	Element	Zur Kalibrierung verwendet?
1	3868.71 Å	[Ne III]	Neon	Nein
2	3889.05 Å	Hζ	Wasserstoff	Nein
3	3967.41 Å	[Ne III]	Neon	Nein
4	3970.07 Å	Hε	Wasserstoff	Nein
5	4101.76 Å	Hδ	Wasserstoff	Ja
6	4340.47 Å	Hγ	Wasserstoff	Ja
7	4471.5 Å	He I	Helium	Nein
8	4861.33 Å	Hβ	Wasserstoff	Ja
9	4958.91 Å	[O III]	Sauerstoff	Ja
10	5006.8 Å	[O III]	Sauerstoff	Ja
11	5875.64 Å	He I	Helium	Ja
12	6562.852 Å	Hα	Wasserstoff	Ja
13	7135.8 Å	[Ar III]	Argon	Ja

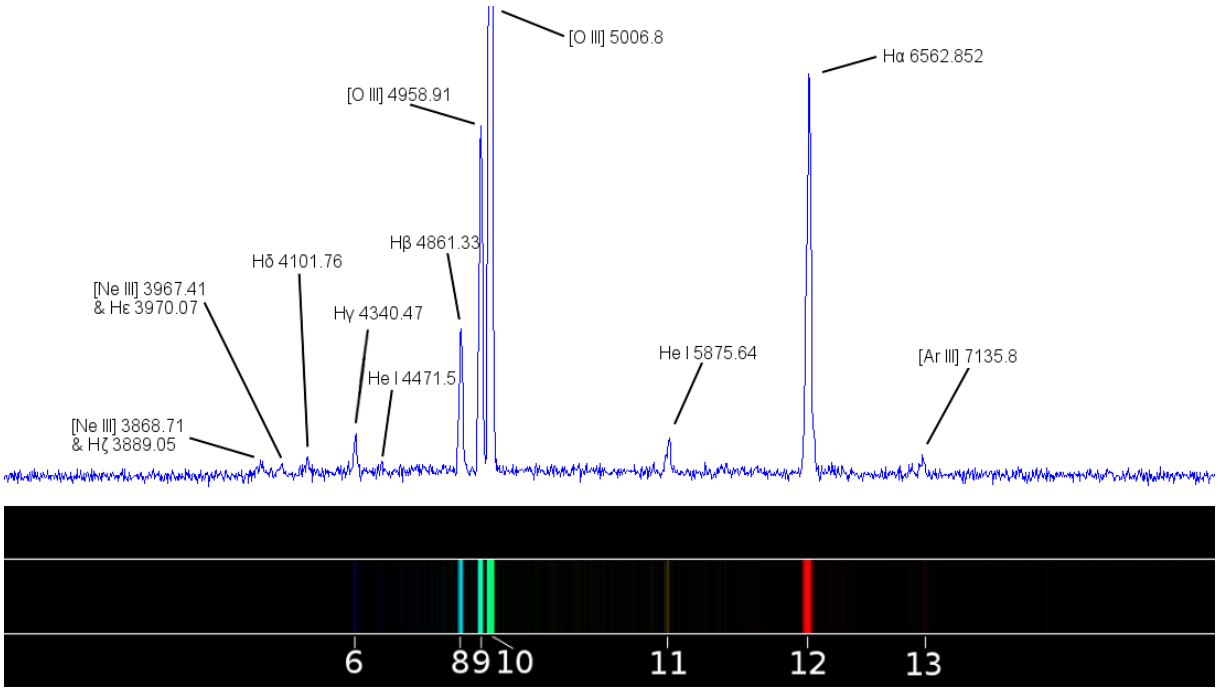


Abbildung 46: Nachkoloriertes Spektrum mit Intensitätskurve ; Bezifferung im Farbspektrum nach Tabelle 1

In unserem Spektrum konnten wir im Verlauf der Kalibration die Zusammensetzung des Nebels untersuchen. Die Vorgehensweise dabei ist die Identifikation der im Spektrum enthaltenen Emissionslinien.

In unserem Ergebnis besteht der Planetarische Nebel zu einem großen Teil aus Wasserstoff, da wir diverse Emissionslinien des Wasserstoffs erkennen konnten. Hinzu kommt noch, dass auch Sauerstoff zu einem recht großen Teil vorhanden ist. Dieser lässt sich durch die [OIII] Linien identifizieren. Die [OIII] Linien lassen direkt auf eine sehr geringe Dichte des Planetarischen Nebels schließen, da verbotene Übergänge durch ihre Funktionsweise nur bei geringer Dichte möglich sind.

Im niedrigen Wellenlängenbereichen konnten wir auch Neon identifizieren. Diese Linien sind aber nur schwach sichtbar und verschwimmen mit den Wasserstofflinien, die auch im niedrigen Wellenlängenbereich zu finden sind. Das ist der Grund, warum wir die Neonlinien und auch ein Teil der Wasserstofflinien nicht zu Wellenlängenkalibration verwenden konnten (siehe 5. Spalte Tabelle 1). Wir haben Neon in die Tabelle aufgenommen, da es trotzdem ein Teil der Zusammensetzung des Nebels ist, wenn auch nur schwach vertreten.

Als letztes sind auch Helium und Argon Bestandteile des Nebels, wobei Argon im sehr hohen Wellenlängenbereich zu identifizieren ist.

7.2 Vergleich mit der Referenzarbeit

Nummer	*Gemessene Wellenlänge (in nm)*	*Literaturwert (in nm)*	*Differenz (in nm)*	*Element und Bezeichnung*	*Verboten?*
1	432,85	434,04	-1,19	Wasserstoff: Hγ bzw. HI	nein
2	446,66	447,15	-0,49	Helium: HeI	nein
3	485,99	486,13	-0,14	Wasserstoff: Hβ bzw. HI	nein
4	495,68	495,89	-0,21	Sauerstoff: [OIII]	ja
5	500,52	500,68	-0,16	Sauerstoff: [OIII]	ja
6	586,98	587,56	-0,58	Helium: HeI	nein
7	630,97	631,20	-0,23	Schwefel: [SIII]	ja
8	656,44	656,28	0,16	Wasserstoff: Hα bzw. HI	nein
9	668,67	667,81	0,86	Helium: HeI	nein
10	674,19	673,08	1,11	Schwefel: [SII]	ja

Abbildung 47: Tabelle der identifizierten Elemente aus der Referenzarbeit

In der Facharbeit zum Thema Spektroskopie von Planetarischen Nebeln, welche von Andreas Gerhardus verfasst wurde, wird die chemische Zusammensetzung der Ülanetarischen Nebel NGC 6543 und M57 behandelt. Damit wir unsere Werte besser beurteilen können, vergleichen wir unsere Ergebnisse zur chemischen Zusammensetzung des Planetarischen Nebels NGC 6543 mit denen aus der Arbeit von Andreas Gerhardus[41].

In beiden Ergebnissen gestaltet sich die Grundzusammensetzung aus Wasserstoff, der durch die Balmerserie sichtbar wird, dabei sind in der Referenzarbeit die Linien Hα, Hβ und Hγ enthalten. In unserer Arbeit konnten wir noch die Wasserstofflinien Hδ, Hε und Hζ identifizieren. Jedoch sind die Linien Hε und Hζ nur sehr schlecht von dem Hintergrundrauschen zu trennen, da sie eine sehr geringe Intensität besitzen. Des Weiteren sind auch die beiden [OIII] bei λ = 4958,9 Å und bei λ = 5006,8 Å in beiden Ergebnissen identifiziert worden und auch die beiden Helium Linien bei λ = 4471,5 Å und bei

λ = 5875,6 Å. Dabei handelt es sich um die Literaturwerte aus den beiden Arbeiten, aber auch die eigenen Ergebnisse von Andreas Gerhardus weichen davon nicht stark ab.

Unterschiede entstehen bei der Identifikation von Neon und Schwefel. In der Referenzarbeit wurden zwei Schwefellinien identifiziert. In unserem Spektrum sind diese Linien nicht erkennbar, da sie sehr nah an der Hα Linie liegen und dadurch überlagert werden und die Linien nicht mehr voneinander unterschieden werden können. Für eine bessere Erkennbarkeit, würden wir ein höher auflösendes Spektrum benötigen, welches mehr Pixel pro Ångstrom besitzt.

Im niedrigen Wellenlängenbereich konnten wir aber Neon als Nebenmaxima der Hε und Hζ Linien identifizieren. Diese Werte müssen wir jedoch mit Vorsicht betrachten, da die Intensitäten der Linien gering sind.

Im hohen Wellenlängenbereich enthält unser Spektrum noch einen Intensitätspeak, den wir als Argon Emissionslinie identifizieren konnten. Diese Linie besitzt eine deutlich höhere Intensität als die Neonlinien und ist dadurch nicht vom Grundrauschen beeinflusst.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Ergebnisse aus der Referenzarbeit mit unseren grundlegend übereinstimmen. Die für den Planetarischen Nebel NGC 6543 charakteristischen Wasserstoff-, Sauerstoff-, und Heliumlinien sind beidseitig enthalten. Unterschiede treten zwar bei Neon und Schwefel auf. Dies kann man aber auf das Grundrauschen bei den geringen Intensitäten der Neon Linien und auf die fehlende Auflösung bei den Schwefel Linien, die dadurch überlagert werden, zurückführen. Nur bei Argon ist unklar, warum wir dies nur in unserem Spektrum identifizieren konnten.

7.3 Beurteilung der Ergebnisse

In unserem Spektrum konnten wir zunächst vor allem die Balmer-Serie identifizieren. Dabei konnten wir sechs im Wasserstoffspektrum sichtbare Emissionslinien in unserem Spektrum erkennen. Hinzu kommt noch, dass die Hα und Hβ Linien eine hohe Intensität besitzen. Daraus können wir den Schluss ziehen, dass der Wasserstoff einen großen prozentualen Anteil an der Zusammensetzung des Planetarischen Nebels innehält. Der Grund für den großen Anteil ist, dass der Stern im Hauptreihenstadium aus etwa 70% Wasserstoff besteht [8]. Im Laufe der Sternentwicklung wird der Wasserstoffgehalt im Kern des Sterns fast vollständig verbraucht. In den äußeren Schichten ist die Konzentration allerdings noch recht hoch. Das hat die Folge, dass in den äußeren Schichten die Wasserstofffusion startet. Wenn nun aber die äußere Schichten als Planetarische Nebel abgestoßen werden, stoppt die Wasserstofffusion in diesen Schichten, da sie sich durch die immer größer werdende Entfernung immer weiter abkühlen.

Der Wasserstoff liegt im Planetarischen Nebel in neutraler Form als HI Atom vor, da er durch die geringere Temperatur nicht mehr als Plasma (HII) vorliegt, sondern wieder ein Elektron in seinem Atomverband bindet.

Das Helium, welches wir in unserem Spektrum identifizieren konnten, ist das Produkt der Wasserstofffusion. Bei dem Helium verhält es sich ähnlich wie bei dem Wasserstoff. Nachdem die Wasserstofffusion ausgesetzt hat, fängt das Helium an sich zu Kohlenstoff zu fusionieren, wodurch auch Sauerstoff entsteht [42]. Die Heliumfusion startet auch in der Hülle, wenn der Vorrat im Kern aufgebraucht ist und die äußerste Wasserstoff Hülle abgestoßen ist. Aber auch die Heliumfusion wird durch den Austritt aus dem Sternverband gestoppt. Dadurch wird das Helium auch zu einem hohen Anteil ausgesendet. Im Planetarischen Nebel liegt auch das Helium in neutraler Form vor.

Das nächste ausgestoßene Element, der Sauerstoff, wird auch durch die Heliumfusion erklärt. Wie schon vorher erwähnt, handelt es sich bei dem Sauerstoff um ein Nebenprodukt der Heliumfusion.

Bei den Sauerstoffemissionslinien handelt es sich um Verboten Linien. Dadurch ist ein weiterer Beweis gegeben, dass der Nebel eine besonders geringe Dichte besitzt, da Verbotene Übergänge, durch ihren metastabilen Zustand (siehe Kapitel 3.2) nur bei einer geringen Dichte auftreten. Die geringe Dichte ist jedoch auch schon aus der Namensgebung als Nebel abzuleiten.

Auch durch die Identifikation von geringen Mengen an Neon können wir Schlüsse auf die Entwicklung des Planetarischen Nebels ziehen. Neon beweist, dass der Stern in seiner Entwicklung das Kohlenstoffbrennen als letztes Fusionsstadium innehält, bevor er sich in den Zustand eines abkühlenden Weißen Zwerges begibt. Denn Neon ist das Produkt der Kohlenstofffusion [42], [43]. Dadurch ergibt sich eine Ausgangsmasse des Zentralsterns zwischen 4 bis 8 Sonnenmassen. Der Grund dafür ist, dass die Kohlenstofffusion nur bei Sternen mit der 4-fachen Sonnenmasse eintreten kann und sich der Stern ab einer 8-9 fachen Sonnenmasse zu einer Supernova entwickelt [44].

Dennoch ist dieses Ergebnis mit Widersprüchen versehen, da das Zwischenprodukt Kohlenstoff, aus dem das Neon fusioniert wird, nicht in unserem Spektrum enthalten ist.

Hinzu kommt noch, dass die Emissionslinien, anhand derer wir Neon identifizieren konnten, nur eine geringe Intensität besitzen. Die geringe Intensität macht es schwieriger, die Linien von dem Grundrauschen und den benachbarten Wasserstofflinien zu trennen. Dadurch können leicht Verfälschungen der Linienintensität und Linienposition entstehen, was die Folge von einer falschen Identifikation mit sich bringen kann.

Als letztes Element ist auch Argon in unserem Planetarischen Nebel enthalten. Argon entsteht allerdings erst im letzten für einen Stern möglichen Fusionsprozess. Dabei handelt es sich um das Siliziumbrennen, bei dem vor allem Eisen entsteht [42]. Dennoch geben einige Quellen das Siliziumbrennen auch als Entstehung von Argon an [45].

Das Siliziumbrennen widerspricht jedoch dem Endstadium des Weißen Zwerges, da das Siliziumbrennen nur bei Sternen mit einer deutlich höheren Masse eintritt. Deswegen bleibt die Frage der Herkunft des Argons ungeklärt.

Um den Nachweis von Argon und auch Neon stichhaltiger erklären zu können, müssen noch weitere Untersuchungen folgen, die ihren Schwerpunkt auf die Entstehung und Vorkommen von Argon und Neon legen.

Die Planetarischen Nebel spielen in Verbindung mit den Zentralsternen eine große Rolle für den galaktischen Raum, da im Verlaufe der Sternentwicklung Wasserstoff zu immer schwereren Elementen umgewandelt wird und diese als Nebel abgestoßen werden.

Diese Elemente sind die Basis für Planeten und weitere Sterne. So sind Wasserstoff und Sauerstoff grundlegende Elemente für das Leben auf der Erde und auch Helium, Neon und Argon kommen auf der Erde vor. Dabei besitzt Argon den drittgrößten Anteil an der Atmosphäre nach Stickstoff und Sauerstoff [46].

Zusammenfassend lässt sich jedoch sagen, dass der Zentralstern eher massearme Elemente aussendet, da er eine zu geringe Masse besitzt, um Elemente wie zum Beispiel Silizium zu Eisen fusionieren zu lassen [42] und andere massereichere Elemente im Kern zurückbleiben.

8 Zweiter Teil des Experiments - Bestimmung der Elektronentemperatur

8.1 Verfahren

Zur Berechnung von der Elektronentemperatur T_e kamen grundlegend vier Verfahren in Frage: Das [OIII], [SII], [OII] und das [NII] Verfahren. Für das [OIII] Verfahren benötigt man die [OIII] Linien bei λ = 5007 Å, λ = 4959 Å und λ = 4363 Å. Beim [NII] Verfahren braucht man die [NII] Linie bei λ = 6584 Å, λ = 6548 Å und λ = 5755 Å. Bei dem [SII] und [OII] Verfahren wird das Verhältnis zwischen zwei [SII] bzw. zwei [OII] Linien gemessen, um daraus die Elektronendichte zu errechnen. Die Linien für den Vergleich sind die [NII] Linien bei λ = 6716 Å und λ = 6731 Å oder die [OII] Linien bei λ = 3729 Å und λ = 3726 Å. Die Vergleichslinien von beiden Verfahren haben allerdings so geringe Intensitäten, dass sie in unserem Spektrum komplett im Kamerarauschen verschwinden. Das [NII] Verfahren können wir auch nicht anwenden, da die Intensitäten der beiden [NII] Linien bei λ = 6548 Å und λ = 6584 Å mit der dazwischen liegenden Hα Linie überlappen (Abb.: 48). [47]

Abbildung 48: [NII] und [SII] Verfahren auf Grund von Identifikationsschwierigkeiten nicht möglich

Die letzte Möglichkeit war schließlich, die Intensität mit dem [OIII] Verfahren zu berechnen. Allerdings war es uns nicht möglich die [OIII] Linie bei λ = 4363 Å exakt zu bestimmen, da sich diese mit der benachbarten intensitätsreichen Hγ Linie bei λ = 4340 Å überlagert. *(Abb.: 49)*.

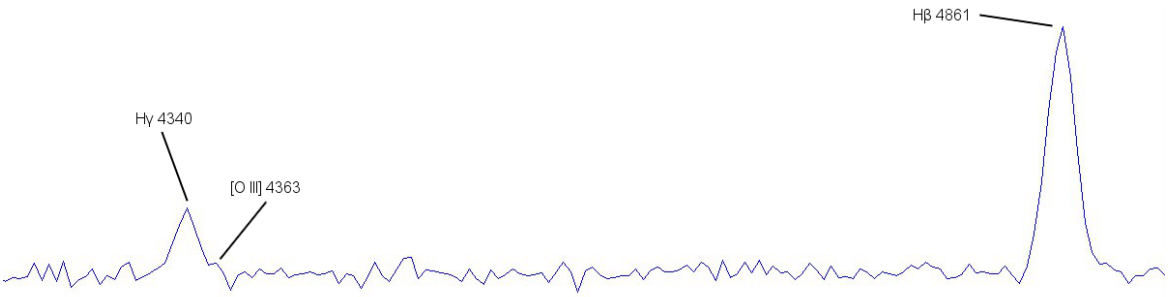


Abbildung 49: Intensitätsmessung ungenau durch Überlappen von Hγ mit [OIII] bei λ = 4363 Å

Um T_e mit dem [OIII] Verfahren zu berechnen, wendet man folgende Formeln an: [47]

$$R = \frac{I(5007) + I(4959)}{I(4363)} \qquad \{3\}$$

$$T_e = \frac{33000}{\ln(R/9{,}85)} \qquad \{4\}$$

8.2 Auswertung

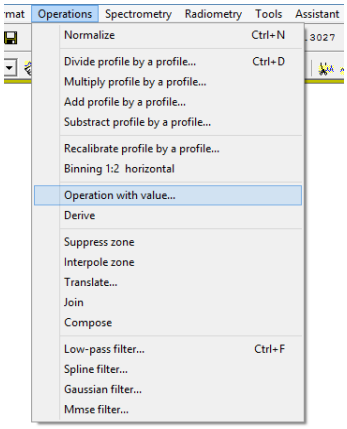


Abbildung 51: Menü <Operations> bei Vspec

Zuerst haben wir mit Vspec an unserer fertigen Intensitätskurve des Spektrums die Intensität der relevanten Linien ([OIII]) gemessen. Dafür ist wichtig, dass die Kurve auf Null gesetzt ist. Dazu muss die Linie so verschoben werden, dass die y-Koordinate in Vspec ungefähr in der Mitte des Kamerarauschens den Wert Null hat. Das erreicht man mit Hilfe der Funktion <Operation with Value> (Abb.: 50). Dann kann man einen Wert mit der Kurve addieren, subtrahieren, multiplizieren oder dividieren (Abb.: 52). In unserem Fall haben wir etwas weniger als Eins subtrahiert, um eine größere Fehlmessung zu vermeiden.

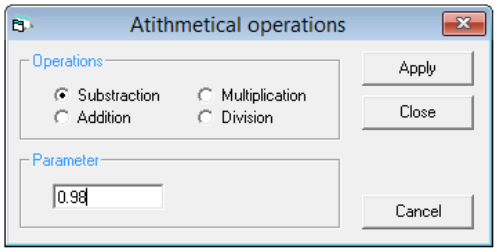


Abbildung 50: Fenster zum Verrechnen der Kurve mit einem beliebigen Wert

Anschließend kann man die Intensität messen. Die Intensität einer Linie ist der Flächeninhalt der zugehörigen Kurve. Diesen kann man auch mit Vspec berechnen. Da die Einheiten in der späteren Rechnung durch Kürzen wegfallen, ist es egal, in welcher Flächeneinheit Vspec misst. Man muss die Kurve zuerst von der ersten Steigung bis zum letzten Fall eingrenzen. Wichtig ist, dass keine andere Spektrallinie mit der zu messenden überlappt, da ansonsten deren Intensität mitberechnet werden würde. Wenn zwei Intensitäten übereinander liegen, kann man die Grenzen schätzen. Dies führt allerdings zu einer ungenaueren Berechnung. Im zweiten Schritt öffnet man per Rechtsklick auf die eingegrenzte Fläche das Menü < Computation >. Dieses Menü bietet unter anderem die Möglichkeit, über Anwählen des Punktes < Area >, den Flächeninhalt unter der Kurve zu berechnen. Sobald < OK > gedrückt wird, erscheint im Fenster „Infos…“ der berechnete Wert unter dem Punkt < aire: > (Abb.: 51).

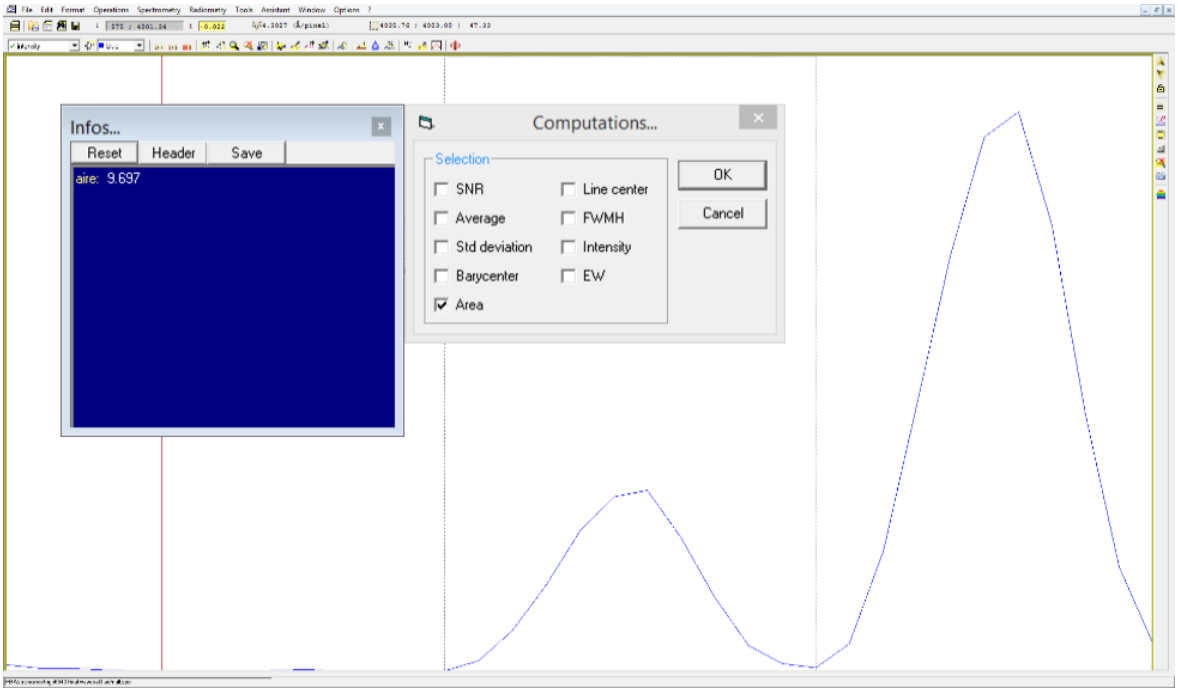


Abbildung 52: Flächeninhaltsberechnung mit Vspec über <Computation>

Damit wir nicht durch kleine Fehler beim Eingrenzen ungenaue Ergebnisse erzielen, haben wir die gleiche Messung mit jeder Linie zehnmal wiederholt. Dann haben wir alle zehn Messdurchgänge einzeln behandelt und R und T_e berechnet. Die Endergebnisse unserer Rechnung bestehen aus dem Durchschnitt aller Ergebnisse, die wir für R beziehungsweise T_e berechnet haben (Abb.: 54).

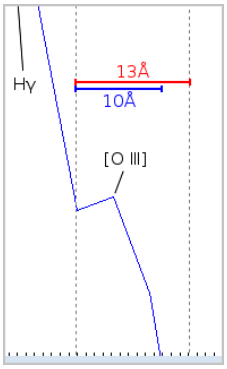


Abbildung 53: Minimale Messbreite bei Vspec (Rot) größer als unsere Linie (Blau)

Bei der Intensitätsberechnung mit Vspec hatten wir das Problem, dass Vspec erst ab einer gewissen Breite eines Messbereiches überhaupt eine Berechnung durchführen kann. Die Linie, die wir messen wollten, war allerdings kleiner (Abb.: 53). Deswegen mussten wir bei der [OIII] Linie bei λ = 4364 Å zuerst die Intensität von der [OIII] und Hγ Linie

zusammen berechnen und dann die Intensität der Hγ Linie wieder subtrahieren, um die Intensität der [OIII] Linie zu erhalten. Diese Rechnung sieht man auch in unserer Excel-Tabelle mit den Messungen (Abb.: 54).

Messung	[O III] 4363,21	[O III] 4958,91	[O III] 5006,84		Hγ 4340,47	Hγ 4340,47 + [O III] 4363,21		R		Te
1	0.064	9.697	30.258		0.917	0.981		624.296875		7730.66218
2	0.064	9.648	30.258		0.917	0.981		623.531250		7732.885161
3	0.064	9.648	30.258		0.917	0.981		623.531250		7732.885161
4	0.064	9.697	30.258		0.917	0.981		624.296875		7730.66218
5	0.064	9.683	30.258		0.917	0.981		624.078125		7731.296909
6	0.064	9.633	30.258		0.917	0.981		623.296875		7733.566467
7	0.064	9.697	30.258		0.917	0.981		624.296875		7730.66218
8	0.064	9.697	30.258		0.917	0.981		624.296875		7730.66218
9	0.064	9.697	30.258		0.917	0.981		624.296875		7730.66218
10	0.064	9.697	30.258		0.917	0.981		624.296875		7730.66218
Mittelwert	0.064	9.679	30.258		0.917	0.981		624.021875		7731.460678

Abbildung 54: Screenshot der Excel Tabelle mit unseren Ergebnissen: Spalten 2-4: Intensität der Linien in Flächeneinheiten. Spalten 6-7: Berechnung des Flächeninhalts von der [OIII] bei λ = 4363,21 Å. Spalten 9-10: R und Te gemäß Formel {3} und {4} in Ångström. Die noch nicht gerundeten Ergebnisse sind hier gelb hinterlegt.

8.3 Ermittlung des temperaturbestimmten Bereiches

Die Temperaturbestimmung der Elektronen im Planetarischen Nebel gehört zu den essentiellen Auswertungsschritten bei der Untersuchung eines Objektes, da die Elektronentemperatur für die Energie die ein astronomisches Objekt besitzt steht. Bei der Messung kann es aber zu Problemen kommen, weil wir in unserem Fall den Planetarischen Nebel durch unser Spektrum nur zweidimensional untersuchen und darstellen können. Dadurch werden verschiedene Ebenen des Planetarischen Nebels auf eine reduziert. Dieser Vorgang hat eine starke Auswirkung auf die Elektronentemperaturbestimmung, denn wie zuvor erwähnt, besitzt der Planetarische Nebel verschiedene Schichten mit stark abweichenden Temperaturen. Um also nun eine vertrauenswürdigen Wert zu ermitteln, den wir mit Literaturwerten vergleichen können, müssen wir zunächst feststellen, welchen Bereich vom Nebel wir aufgenommen haben. Des Weiteren gibt es Bereiche mit geringeren oder auch höheren Intensitäten.

Die Bestimmung unseres festgelegten Bereiches konnten wir anhand des Verhältnisses zwischen der Brennweite des Teleskops und der Breite des Spaltes des Spektrometers mit der aufgeführten Formel ausrechnen.

$$\tan(\frac{\alpha}{2}) = \frac{d}{2f} \qquad \{5\}$$

wobei:

- $\alpha = zu\ berechnener\ Winkel\ am\ Himmel\ (\ in\ Grad/Bogenmaß)$
- $d = 25\mu m = 25 * 10^{-6}\ (Breite\ des\ Spalts\ im\ Spektrometer)$
- $f = 2800\ mm * 0{,}8$

$= \quad 2{,}4\ m\ (Brennweite\ des\ C11\ Teleskops\ inklusive\ Brennweiten\ Reduzierer)$

Als Ergebnis ermittelten wir den Wert $\alpha = 6{,}4 * 10^{-4\circ} = 2{,}3\ ''$

Der Wert 2,3 Bogensekunden ist verschwindend gering, das sieht man auch daran, dass es umgeformt 0,006 ° sind. Unser Planetarischer Nebel liegt aber in einer so weiten Entfernung, dass dieser Wert immer noch genug ist, um den Nebel größtenteils auf den Schirm zu bekommen. Für eine bessere Vorstellung können wir diesen Spalt vor ein Bild von NGC6543 [48] setzen, dass mit Bogensekundenlängeneinheiten versehen ist.

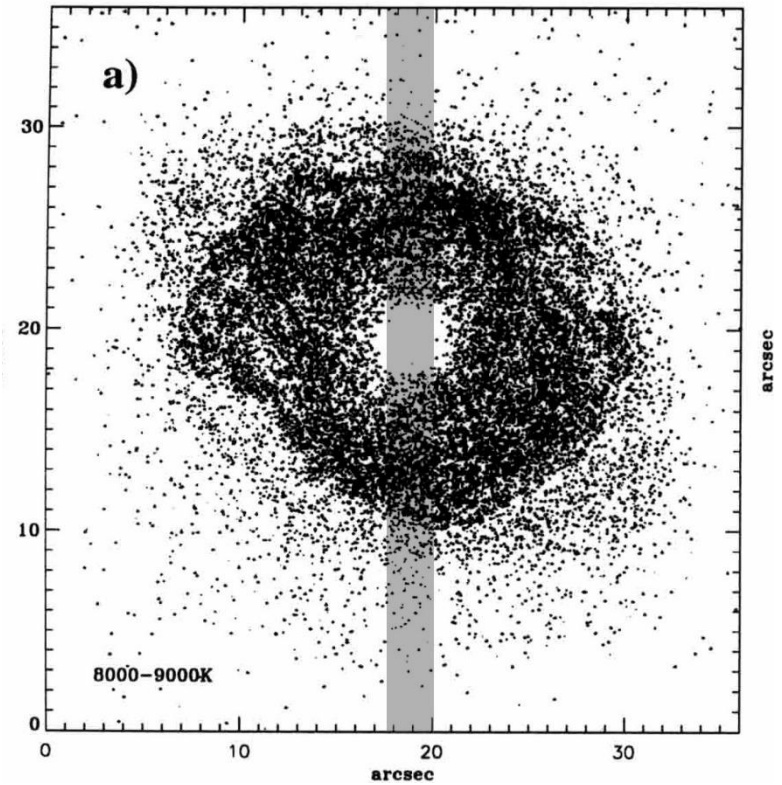


Abbildung 55: Position des Spalts des Spektrographen auf dem Nebel [48]

In dieser Abbildung (Abb.: 55) sieht man die Breite des Spaltes im Vergleich zu dem Planetarischen Nebel. Dabei ist der Spalt dunkel unterlegt und über das Bild geschoben. Nun ist aber zu sehen, dass der Spalt nur einen kleinen Bereich des Nebels abdeckt, da der Planetarische Nebel rund 25 -30 Bogensekunden breit ist.

Trotzdem ist der Mittelpunkt des Nebels auf dem Spektrum, der den Nebel zum Leuchten bringt. Dadurch haben wir den Bereich mit der größten Intensität in unserem Spektrum. Ein weiterer Beweis dafür, dass wir mit unserem Spektrum die Mitte von

NGC6543 aufgenommen haben, ist eine weitere Grafik aus der Facharbeit über die Elektronentemperatur in verschiedenen Bereichen.

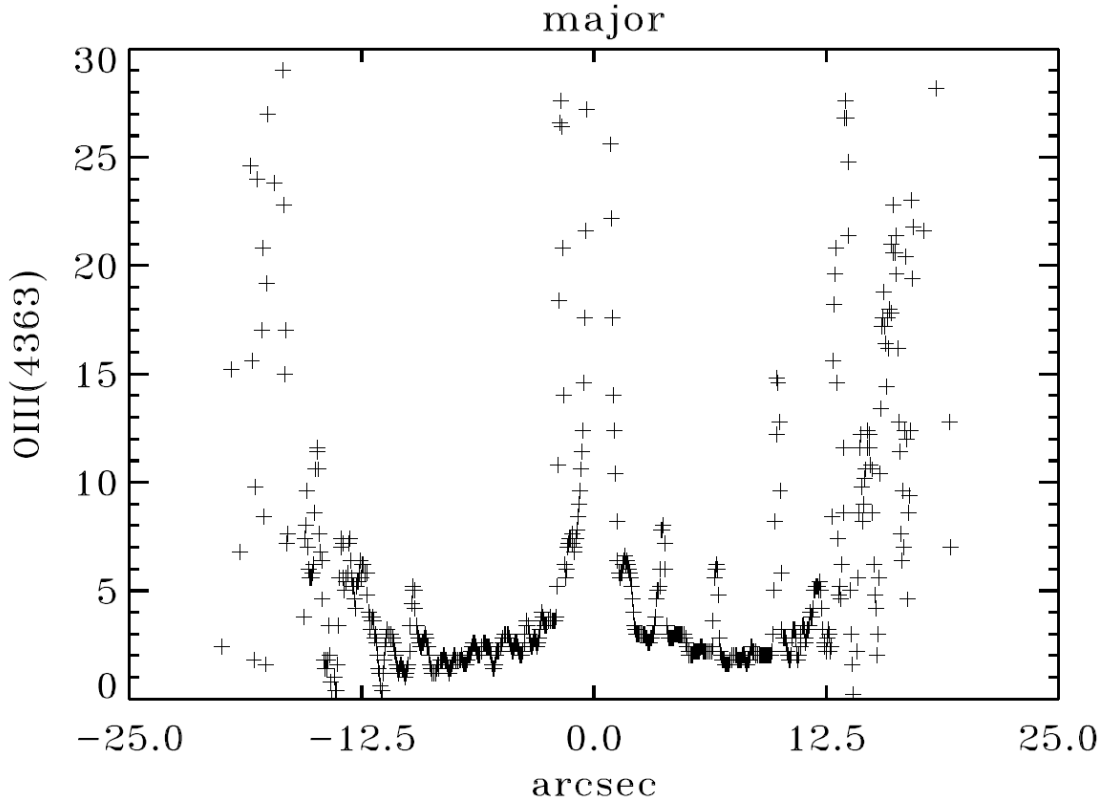


Abbildung 56: Intensitätsverteilung der [OIII] Linie bei λ = 4363 Å über die Breite des Planetarischen Nebels [48]

Diese Grafik stellt die Intensität der [OIII](4363) im Verlauf der Breite des Planetarischen Nebels da. Zu sehen ist, dass die Intensität bei unter -12,5 bei 0 und bei über 12.5 Bogensekunden am stärksten ist und sonst eine nur sehr geringe Intensität besitzen (Abb.: 56). An der Beschriftung der Y-Achse sieht man, dass selbst die Maxima der Intensität nur einen relativen Wert von 30 besitzen.

Diese Beobachtung stimmt mit der von uns überein, da auch in unserem Spektrum die [OIII](4363) nur schwer zu erkennen ist und fast im Rauschen untergeht. Dennoch ist zu sagen, dass wir sie identifizieren können, obwohl wir durch unsere Lage in der Nähe einer Stadt mit vielen Luftverschmutzungen und Lichteffekten kämpfen müssen und dadurch ein etwas größeres Rauschen in unserem Spektrum vorweisen. Das ist der Grund dafür, dass wir davon ausgehen, dass wir ein Intensitätsmaximum der [OIII](4363) erwischt haben. Des Weiteren handelt es sich dabei um das Maxima, dass in der Mitte des Planetarischen Nebels gelegen ist, da sonst die allgemeine Intensität des Spektrums zu gering wäre. Denn die anderen Maxima der Linie sind ziemlich weit weg vom Zentralstern, sodass dort die Helligkeit für ein Spektrum mit unserer Ausrüstung nicht mehr ausreichen würde.

8.4 Nachführung des Aufnahmeausschnitts

Wir müssen natürlich auch beachten, dass sich die Position von dem Planetarischen Nebel von unsere Perspektive durch die Erdrotation verändert. Deswegen müssen wir zwischen den Aufnahmen der Spektren ein Guiding durchführen, damit der Nebel immer an derselben Stelle im Spektrum liegt, um ein qualitatives Stacken zu ermöglichen. Dieses Guiding kann in der Teleskopeinrichtung eingestellt werden. Wir haben uns aber für ein manuelles Guiding entschieden, weil wir uns auf das Auto-Guiding des Teleskops nicht verlassen konnten, da es nicht einwandfrei funktionierte. Für das Guiding haben wir eine Farbvideokamera benutzt (Abb.: 57). Diese Farbkamera ist parallel neben der CCD Kamera an den DADOS Spektrographen angeschlossen, an der Stelle an dem sonst das Okular zum Ausrichten des Spalts angebracht ist.

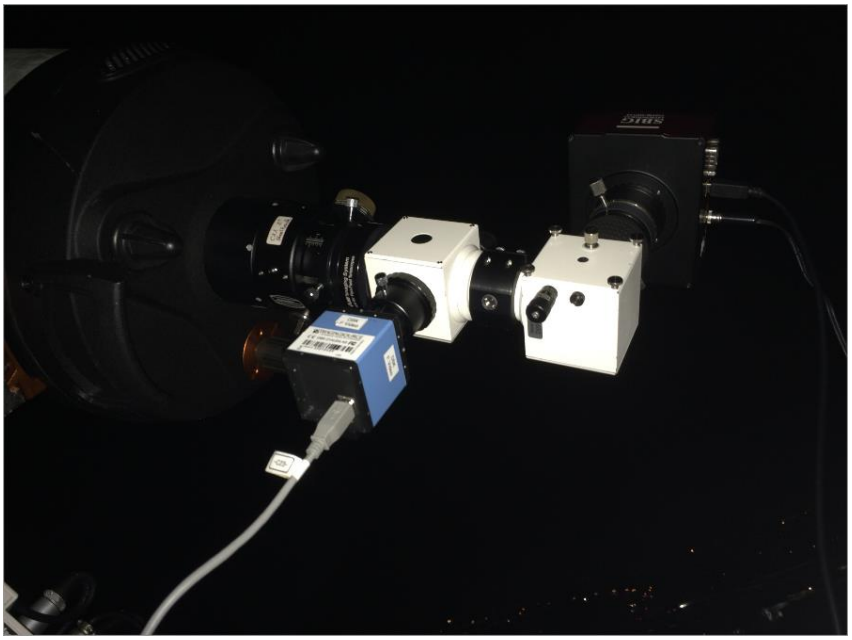


Abbildung 57: Aufbau mit DADOS Spektrograph, SBIG CDD Kamera (hinten rechts) und einer Farbvideokamera (vorne links; blau)

Das Problem dabei ist, dass die Farbkamera durch ihre deutlich kleineren Sensorpixel deutlich lichtunempfindlicher ist, als die CCD SBIG Kamera oder das menschliche Auge. Resultierend verschwand der Planetarische Nebel bei der Farbvideokamera fast im Grundrauschen und war deswegen nur schwer zu erkennen. Das ist der Grund dafür, dass wir uns ein alternatives Himmelsobjekt zum Guiding suchen mussten.

In unserem Fall konnten wir einen nah gelegenen Stern benutzen, der eine recht hohe Helligkeitsintensität besitzt und so gut sichtbar ist (Abb.: 58).

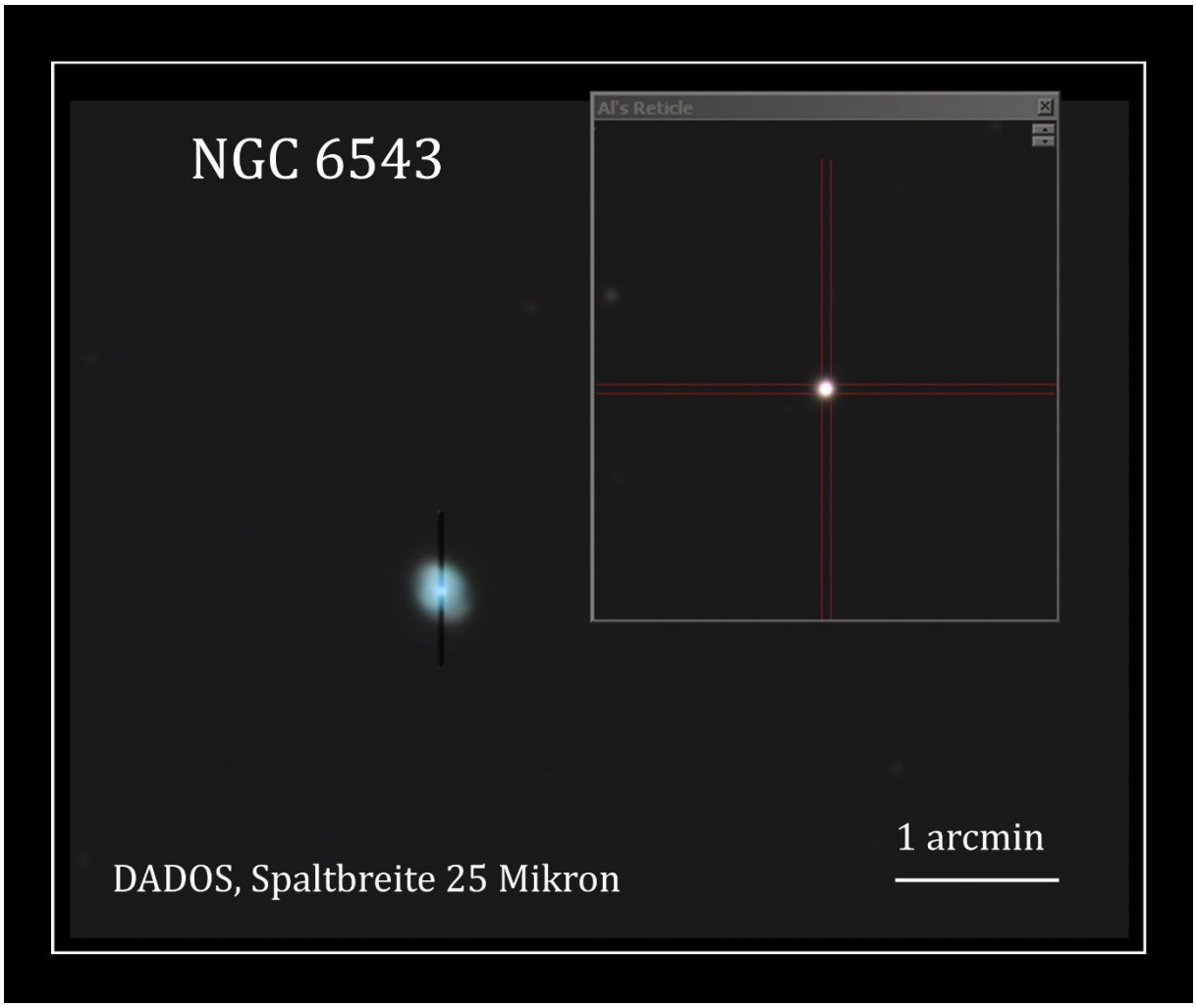


Abbildung 58: Nachstellung von der Aufnahme mit dem Guiding anhand des benachbarten Sterns (erstellt von Bernd Koch)

Damit wir das Guiding mit einer höheren Genauigkeit durchführen können, haben wir uns ein Kreuz mit dem Tool AlsReticle über den Nebenstern gelegt. Dadurch konnten wir die Bewegungen des Ausschnitts deutlich schneller erfassen und besser nachjustieren.

Durch das Guiding können wir zusätzlich sicher sein, dass bei allen Aufnahmen der Spalt auf dem Mittelpunkt des Planetarischen Nebels liegt. In der Abbildung ist der Spalt künstlich vor den Nebel geschoben, um zu veranschaulichen welcher Bereich von dem Planetarischen Nebel im Emissionsspektrum abgebildet wird (Abb.: 58).

8.5 Beurteilung des gemessenen Werts anhand der Intensität der Schichten

Da wir nun wissen, dass unser Spektrum zentral liegt, können wir mit der Beurteilung der Temperatur beginnen. Die Temperatur ist abhängig von den verschiedenen Schichten des Planetarischen Nebels, die jeweils verschiedene Temperaturen besitzen. Dafür stellt unsere Referenzarbeit eine weitere Grafik zur Verfügung. Damit können wir unseren ermittelten Wert von 7730 K mit den Literaturwerten vergleichen und bewerten, ob es sich dabei um ein glaubwürdiges Ergebnis handelt das weiter verwendet werden kann.

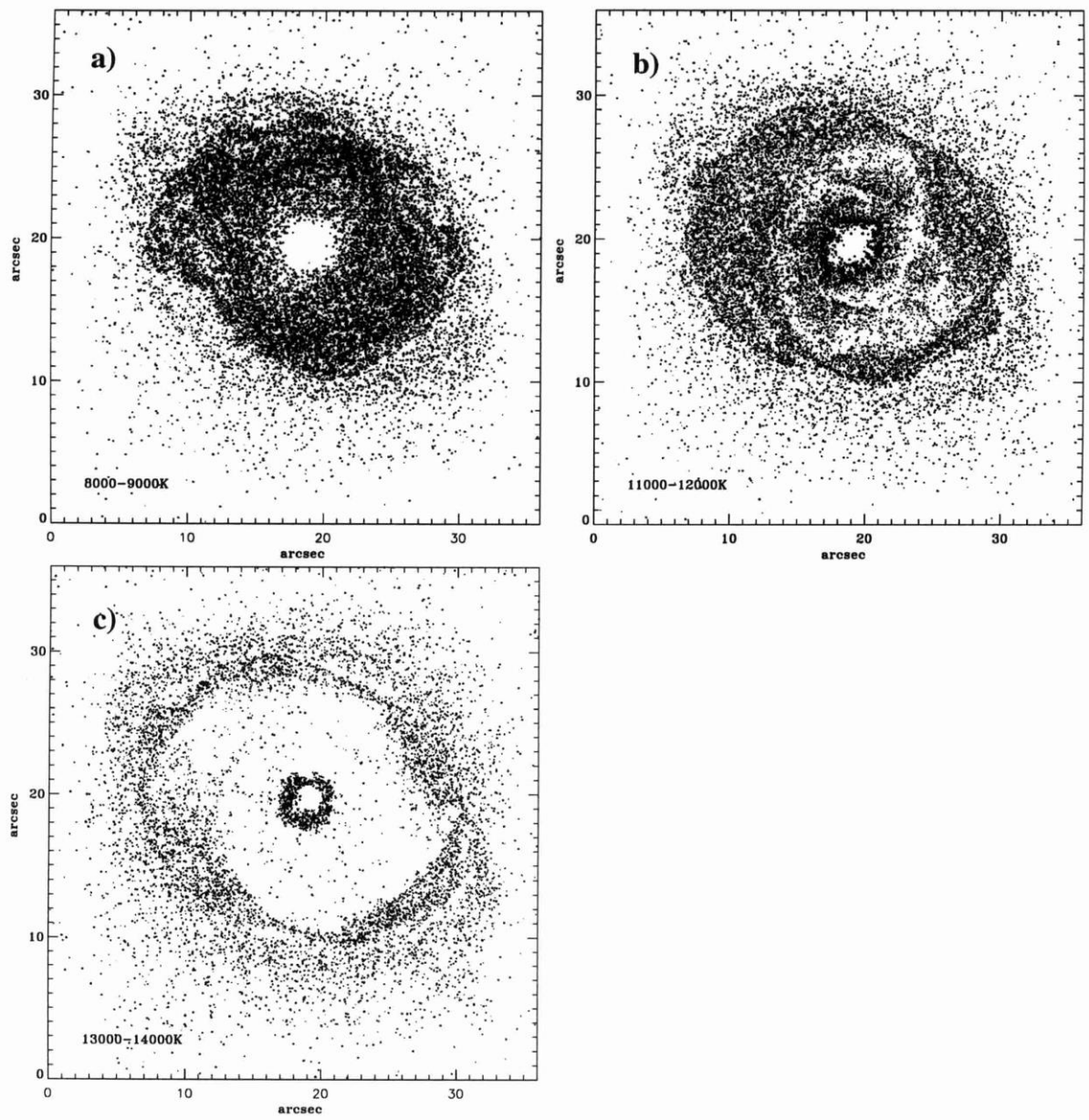


Abbildung 59: Schichten des Planetarischen Nebels mit dem Literaturwert der zugehörigen Temperatur [48]

In der Grafik sieht man die verschiedenen Bereiche mit dem dazu gehörenden Temperatur-Literaturwert. Die Helligkeitsintensität ist dabei durch die Dichte der schwarzen Partikel dargestellt. Dadurch sieht man direkt, dass die Schicht mit der höchsten Intensität die

Temperatur von 8000-9000K besitzt. Die anderen Schichten sinken mit ihrer Intensität, aber besitzen dafür eine steigende Temperatur. In Abbildung 59 b) ist der Wert 11000-12000K angegeben und bei Abbildung 59 c) 13000-14000K. Zusätzlich ist zu sagen, dass die heißeste Schicht deutlich weiter weg vom Zentralstern liegt. Dadurch wird diese schon durch die Lage kaum vom Spalt des Spektrographen eingefangen. Hinzu kommt noch, dass die Helligkeitsintensität so gering ist, dass sie im Rauschen der Kamera verschwindet.

Damit können wir sicherstellen, dass wir nicht die Temperatur der äußeren und heißesten Schicht bestimmt haben. Dieses Ergebnis passt auch zu unserem Wert, da die Temperatur der äußersten Schicht von 13000-14000 K stark von unserem Wert abweicht.

Nun bleiben noch die beiden Schichten aus der Abbildung 59 a) und 59 b) mit jeweils 8000-9000K und 11000-12000K Elektronentemperatur. Zu b) lässt sich sagen, dass die Intensität der Schicht auch deutlich schwächer ist als in a), vor allem in dem Bereich um den Zentralstern, da dort sozusagen kleine Löcher der Schicht b) entstehen. Trotzdem lässt sich nicht leugnen, dass auch kleine Teile der heißeren Schicht mit aufgenommen wurden und diese dadurch den resultierenden Gesamtwert der Temperatur nach oben schieben [48].

Der alleinige Wert der Schicht a) liegt zwischen 8000K und 9000K. Da unser Spektrum auch noch Inhalte von der b) Schicht erhält, würden wir den Wert auf 9000K setzen. Bei diesem Wert handelt es sich um den Literaturwert der Referenzarbeit, den wir an unsere Aufnahmeverhältnisse angepasst haben. Dieser Wert dient als Vergleichsmöglichkeit, da er von professionellen Astronomen aufgenommen wurde und so dem aktuellen Forschungsstand um den Planetarischen Nebel NGC 6543 entspricht.

Unser Wert von 7700K weicht auf den ersten Blick von dem Literaturwert von 9000K ein wenig ab. Dennoch müssen dabei die Situationsverhältnisse in Betracht gezogen werden. Als erstes ist auch der Literaturwert nicht vollkommen festgelegt, da in der Referenzarbeit Wertebereich angeben sind, die auch eine starke Abweichung beinhalten, da auch die professionellen Astronomen Messungenauigkeiten nicht vollkommen vermeiden können. Dabei spielt natürlich auch der Zeitpunkt der Aufnahme eine Rolle. Hinzu kommt noch, dass wir nicht hundertprozentig sagen können, welche Schichten des Planetarischen Nebels zu welchem Grad in unserem Spektrum enthalten sind. Dabei handelt es sich bisher nur um die möglichen Abweichungen des Literaturwerts. In Wirklichkeit gibt es aber natürlich auch eine Abweichung des Werte, den wir aufgenommen haben, wobei diese Abweichung deutlich entscheidender ist, da unsere Aufnahmesituation nicht perfekt war. Wenn man diese Faktoren miteinberechnet, ist es ein sehr zufriedenstellendes Ergebnis, da viele Faktoren den Wert beeinflussen, aber trotzdem nur eine überschaubare Abweichung vorhanden ist.

9 Fehlerbetrachtung

Die Genauigkeit unserer Messergebnisse wird durch viele Faktoren beeinflusst.

Die Qualität der Messergebnisse hängt von der Qualität des Equipments und der Sorgfalt der Durchführung ab. Bei zu geringer Kameraauflösung können Linien nicht so gut voneinander unterschieden werden. Je höher die Auflösung ist, desto genauer werden die Emissionslinien im Spektrum und im spektralen Scan dargestellt. Zudem ist es sehr hilfreich, wenn das Kamerarauschen sehr gering ist. Wenn dies der Fall ist, können auch sehr schwache Emissionen festgestellt werden.

Bei unseren Messungen lag das Problem nicht beim Equipment. Der Grund für die leichte Unschärfe des Spektrums lag in einer Fokusverschiebung infolge einer Temperaturänderung im Laufe des Abends.

Auch atmosphärische Bedingungen beeinflussen die Qualität der Aufnahmen. So ist es wichtig, dass der Himmel klar ist. Wolken schwächen die Intensität des Himmelsobjekts deutlich. Wir hatten das Glück, unsere Aufnahmen in einer wolkenlosen Nacht machen zu können. Auch die nah gelegene Müllverbrennungsanlage machte mit ihrer starken Abgasentwicklung keine Probleme. Wenn abends die Temperatur sinkt, kann sich Feuchtigkeit auf dem Teleskop niederschlagen, welche die Intensität auch senkt. Als während unserer Beobachtung das Teleskop beschlug, haben wir dies vorsichtig mit einem Fön behoben. Um solch einen Fall zu vermeiden, kann präventiv eine Wärmemanschette angelegt werden.

Bei langen Belichtungszeiten muss das Stativ ruhig stehen. Schon aus kleinen Erschütterungen können insbesondere in der Astrofotografie verschwommene Bilder resultieren. Da unsere Sternwarte auf dem Dach des Schulgebäudes installiert ist, beeinflusst selbst vorsichtiges Gehen durch das Mitschwingen des Daches Ungenauigkeiten.

Durch die Quanteneffizienz des Sensors unserer Kamera werden die Farben in unterschiedlichen Intensitäten aufgenommen. Dadurch können die Relationen der Linien zueinander leicht fehlerhaft sein.

Durch unseren Standort im dicht besiedelten NRW ergibt sich ein Nachteil. Durch die Lichter in nah gelegenen Städten wie Köln und Düsseldorf entsteht eine starke Lichtverschmutzung des Himmels. Auch wenn man ein Spektrum des Himmelshintergrundes subtrahiert, bleibt durch starke Streuung eine Resthelligkeit vorhanden.

Je genauer das Spektrum sein soll, desto feiner sollte das Spektralgitter sein. Wir haben mit einem Gitter aufgenommen, welches 200 Linien pro Millimeter hatte. Dies war für unsere Untersuchungen leider zu ungenau, da sich Intensitäten überschnitten, die wir dann nicht genau identifizieren und messen konnten. Da die Zeit nicht ausreichte, wollen wir bei unserer weitergehenden Forschung im Rahmen einer besonderen Lernleistung im Abitur

ein weiteres Spektrum mit höherer Auflösung aufnehmen. Dafür werden wir ein Gitter mit 900 Linien pro Millimeter verwenden.

Die Helligkeit des Objekts wird durch interstellare Extinktion beeinflusst. Das bedeutet, dass das Licht auf dem Weg vom Objekt bis zu uns immer wieder auf Teilchen trifft, die dieses Licht absorbieren. Zu einem großen Teil ist dafür der interstellare Staub verantwortlich. Dabei wird das Licht gestreut und absorbiert. Dieser Vorgang wird unter dem Begriff Extinktion zusammengefasst. Dieses tritt unregelmäßig im Spektrum auf, sodass sich die Relationen der Linien zueinander im Spektrum verändern. Wir haben diesen Fehlfaktor nicht korrigiert, wollen dies aber auch im weiteren Verlauf unserer Forschung berücksichtigen [49].

10 Zusammenfassung

In unserer Facharbeit haben wir uns mit zwei Experimenten beschäftigt, die sich mit der Aufnahme und Auswertung von Emissionsspektren des Planetarischen Nebels NGC 6543 auseinander gesetzt haben.

Bei dem ersten Experiment handelt es sich um die Ermittlung der Zusammensetzung des Planetarischen Nebels NGC 6543 Dafür mussten wir die Emissionslinien aus unserem aufgenommenen Emissionsspektrum identifizieren und mit Hilfe von Referenzspektren den zugehörigen Elementen zuordnen. Dabei spielt die Intensität der Emissionslinie eine wichtige Rolle für den prozentualen Anteil am Nebel. Wie zu erwarten, konnten wir die Balmer-Serie des Wasserstoffs identifizieren und daraus einen hohen Anteil an Wasserstoff feststellen.

Des Weiteren enthält der Planetarische Nebel NGC 6543 auch große Mengen an Helium und Sauerstoff. Diese Ergebnisse stimmen mit denen aus einer uns vorliegenden Referenzarbeit überein.

Wir konnten jedoch auch geringe Mengen an Neon und Argon feststellen, die durchaus schwierig im Kontext zu erklären sind. Bei Neon fehlt das Zwischenprodukt Kohlenstoff in unserem Spektrum. Da im Normalfall Kohlenstoff zu Neon fusioniert, wir aber keinen Kohlenstoff nachweisen konnten, entsteht bei der geringen gemessenen Neonintensität hier möglicherweise eine Fehlerquelle durch das vorhandene Grundrauschen.

Auch eine Erklärung für den vorliegenden Nachweis von Argon ist nicht ganz einfach. Argon entsteht nur bei deutlich massereicheren Sternen, die sich zu einer Supernova entwickeln und ist normalerweise nicht in einem Planetarischen Nebel vorhanden.

Hinzu kommt noch, dass Neon und Argon in unserer Referenzarbeit nicht enthalten sind und es generell wenige Quellen gibt, die über einen Neon oder Argon Nachweis berichten.

Deswegen müssen wir den Nachweis von Neon und Argon mit Vorsicht betrachten, wodurch weitere Untersuchungen über einen möglichen Neon und Argon Anteil im Planetarischen Nebel nötig sind. Dies würde dazu dienen, die vorhandenen Widersprüche auszuräumen.

Bei dem zweiten Experiment haben wir die Temperatur der im Nebel enthaltenen Elektronen bestimmt. Die Temperatur haben wir anhand des am Anfang aufgenommenen Emissionsspektrums ermittelt. Im Genaueren haben wir das [OIII] Verfahren angewendet. Es gibt zwar noch einige andere Verfahren, mit denen man die Temperatur mit einem hohen Genauigkeitsgrad bestimmen kann, diese waren jedoch bei unserem Spektrum nicht möglich. Bei diesen Verfahren sind die benötigten Emissionslinien nicht zu identifizieren, da sie entweder im Rauschen verschwinden oder mit anderen Emissionslinien verschwimmen. Bei dem [OIII] Verfahren wird die Intensität der drei Sauerstoffemissionslinien miteinander verglichen. Das Verhältnis wird anschließend in einer Formel zur Temperaturberechnung benutzt.

Auf diese Weise konnten wir die Temperatur des Planetarischen Nebels von 7700 K bestimmen. Zur Überprüfung der Aussagekraft im Hinblick auf die Richtigkeit wurde unser Ergebnis mit Werten aus der Literatur verglichen. Dafür mussten wir jedoch erst den Bereich des Nebels bestimmen, den wir bei der Messung unseres Emissionsspektrums erfasst haben.

Mit Hilfe mehrerer Abbildungen konnten wir einen in der Literatur beschriebenen Wert für unseren aufgenommenen Bereich bestimmen. Dieser Wert liegt bei 9000 K. Damit liegt unser Wert von 7700 K unter den vorhandenen Gegebenheiten trotz möglicher Fehlerquellen sehr nah an dem Literaturwert. Selbst Werte in der Literatur werden in Wertebereichen angegeben, die durchaus Abweichungen enthalten können.

Die Emissionsspektren bieten dem Leser jedoch kein vollkommenes Bild des Planetarischen Nebels NGC 6543, den wir in unserer Projektarbeit behandelt haben. Zu einem besseren Verständnis tragen vor allem die aufgenommenen Bilder bei, in denen man die Grundstruktur und Schönheit des Planetarischen Nebels erkennen kann.

11 Resümee - Ausblick

Abschließend können wir sagen, dass wir unser Ziel erreicht haben. Wir haben gut verwertbare Spektren aufgenommen. Trotz einiger Fehlerfaktoren, die uns während unserer Durchführung aufgefallen sind, haben wir ein Ergebnis erzielt, das nur geringe Abweichungen zu vorherigen Ergebnissen aufzeigt. Nun werden wir uns dieser Fehlerquellen annehmen, um die resultierenden Fehler zu berichtigen. Dafür wollen wir unter anderem erneut ein Spektrum aufnehmen. Allerdings werden wir dafür ein Spektralgitter mit einer höheren Auflösung benutzen. Zudem werden wir darauf achten, dass wir den Fokus beibehalten. Da wir skeptisch sind, ob Neon und Argon wirklich in dem Spektrum vorkommen, wollen wir zu einer sicheren Aussage bezüglich ihrer Existenz kommen. Ein verbessertes Ergebnis hoffen wir in Form einer besonderen Lernleistung im Abitur 2017 vorlegen zu können.

Mit unseren Bildern, die wir zusätzlich aufgenommen haben, sind wir ebenfalls sehr zufrieden, da wir durch diese einen Eindruck von dem Nebel bekommen haben, der mit dem einfachen Betrachten von Bildern im Internet nicht zu vergleichen ist.

Nicht nur die Forschung für unser Ergebnis der Projektarbeit hat uns einen weiten Einblick in die Astronomie und Astrophysik ermöglicht, sondern auch der vorbereitende Unterricht hat interessante Fakten und eindrucksvolle Fotos aus unserem Universum gezeigt.

Diese Projektarbeit war zusammen mit dem Projektkurs eine echte Bereicherung und wir freuen uns darauf, dieses Projekt an unserer Sternwarte fortführen zu dürfen.

12 Danksagung

Zuerst wollen wir uns bei dem Leiter unseres Projektkurses Astronomie Herrn Bernd Koch bedanken. Ohne ihn wäre ein solcher Kurs wahrscheinlich nie zustande gekommen. Er investiert viel Zeit und Können in diesen Kurs, wodurch es uns möglich war, sogar nach Unterrichtsschluss bis in die späten Abendstunden oder an Wochenenden mit ihm zu arbeiten. Er stand uns in der ganzen Zeit für Antworten auf unsere Fragen zur Verfügung.

Des Weiteren wollen wir Herrn Michael Winkhaus danken, ohne den es die Sternwarte nicht geben würde. Er kümmert sich schon seit vielen Jahren um Spenden für deren Instandhaltung und Verbesserung. Ohne seine Bemühungen hätten viele Schüler - so auch wir - nicht die Möglichkeit, kostenfrei professionelles Equipment der Astrophysik zu nutzen.

Deswegen wollen wir auch allen Spendern danken, die dabei geholfen haben und auch immer noch helfen, dieses Projekt zu unterstützen.

Auch wollen wir uns dafür bedanken, dass wir an unserer Schule die Möglichkeit bekommen, unsere Interessen zu verwirklichen, indem wir diesen Projektkurs sowie auch andere Kurse wählen können, die in die Abiturnote aufgenommen werden. So werden diese besonderen Angebote nicht zu einer zusätzlichen Belastung für die Schüler.

Zuletzt wollen wir unseren Eltern für die durchgehende Unterstützung während des Verfassens der Arbeit danken.

13 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 Facharbeit, die im Wortlaut oder dem Inhalt nach aus anderen Werken entnommen wurden, in jedem einzelnen Fall mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht haben.

Verwendete Informationen aus dem Internet sind auf der beigefügten DVD zu finden.

Wir sind damit einverstanden, dass die von uns verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit in der Bibliothek der Schule zugänglich gemacht wird.

Jonathan Hilberg:

Ort, Datum Unterschrift

Immanuel Gehlmann:

Ort, Datum Unterschrift

Quellenverzeichnis

[1]	http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1995/49/image/h/	26.05.2016
[2]	http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2006/01/	30.05.2016
[3]	J. Grehn; J. Krause: Metzler Physik 12 Astrophysik Ausgabe Bayern, Schroedel 2012, S. 98	
[4]	http://www.astronomia.de/index.htm?http://www.astronomia.de/sternent.htm	29.05.2016
[5]	https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7027	22.05.2016
[6]	Joachim Grehn; Joachim Krause: Metzler Physik. Schroedel 2012 S. 100ff	
[7]	http://www.whv.shuttle.de/whv/kaethekollwitz/astro/sterne2.htm	29.05.2016
[8]	Joachim Grehn; Joachim Krause: Metzler Physik. Schroedel 2012	
[9]	https://de.wikipedia.org/wiki/Roter_Riese#/media/File:Aldebaran-Sun_comparison_de.svg	29.05.2016
[10]	https://de.wikipedia.org/wiki/Roter_Riese	29.05.2016
[11]	Joachim Grehn; Joachim Krause: Metzler Physik. Schroedel 2012 S. 102	
[12]	https://de.wikipedia.org/wiki/Katzenaugennebel	29.05.2016
[13]	https://de.wikipedia.org/wiki/Robert_Wilhelm_Bunsen	29.05.2016
[14]	The Scientific Papers of Sir William Huggins http://stars.astro.illinois.edu/sow/n6543.html	29.05.2016
[15]	http://www.britannica.com/biography/William-Huggins	29.05.2016
[16]	http://stars.astro.illinois.edu/sow/n6543.html	30.05.2016
[17]	http://stars.astro.illinois.edu/sow/n6543.html	29.05.2016
[18]	https://en.wikipedia.org/wiki/Nebulium	29.05.2016
[19]	Präsentation; Bernd Koch: Was uns das Licht der Sterne erzählt.	
[20]	https://de.wikipedia.org/wiki/Doppelspaltexperiment#/media/File:Slit_double_150_28.5.svg	30.05.2016
[21]	https://de.wikipedia.org/wiki/Doppelspaltexperiment	29.05.2016
[22]	Spektroskopische Ermittlung der chemischen Zusammensetzung und der Elementverteilung in Planetarischen Nebeln, von Andreas Gerhardus (Weblink veraltet)	
[23]	https://de.wikipedia.org/wiki/Stimulierte_Emission	29.05.2016
[24]	https://de.wikipedia.org/wiki/Spontane_Emission	29.05.2016
[25]	https://de.wikipedia.org/wiki/Verbotener_%C3%9Cbergang	29.05.2016
[26]	http://www.chemie.de/lexikon/Metastabiler_Zustand.html	29.05.2016

[27]	http://www.chemie.de/lexikon/Verbotener_%C3%9Cbergang.html	29.05.2016
[28]	Joachim Grehn; Joachim Krause: Metzler Physik. Schroedel 2012 S. 45	
[29]	https://de.wikipedia.org/wiki/Prisma_(Optik)	30.05.2016
[30]	DADOS Tutorial; Bernd Koch	
[31]	https://de.wikipedia.org/wiki/Interferenz_(Physik)#/media/File:Interferenz_sinus.png	29.05.2016
[32]	https://de.wikipedia.org/wiki/Doppelspaltexperiment#/media/File:Double-slit_schematic.svg	29.05.2016
[33]	https://de.wikipedia.org/wiki/Optisches_Gitter#/media/File:Beugungsgitter.svg	29.05.2016
[34]	https://lp.uni-goettingen.de/get/text/1055	26.05.2016
[35]	https://de.wikipedia.org/wiki/Infrarotspektroskopie	29.05.2016
[36]	Carl von Ossietzky Universität Oldenburg - Fakultät V- Institut für Physik Modul Grundpraktikum Physik – Teil II : Beugung an periodischen Strukturen Gitter-Spektralapparat	
[37]	Baader Planetarium GmbH – Bedienungsanleitung zu den Celestron EdgeHD Teleskopen – 01 – Einführung und allgemeine Beschreibung des EdgeHD Systems: http://www.baader-planetarium.de/news/edgehdwhitepaper.pdf	29.05.2016
[38]	http://www.teleskop-express.de/shop/product_info.php/info/p7516_SBIG-STF-8300m-Full-Frame-Transfer-SW-CCD-Kamera----D-22-2-mm---5-4--m-Pixel.html	29.05.2016
[39]	https://de.wikipedia.org/wiki/Hotpixel	29.05.2016
[40]	http://www.star.ucl.ac.uk/~msw/lines.html	29.05.2016
[41]	Andreas Gerhardus: Facharbeit zum Thema, Spektroskopische Ermittlung der chemischen Zusammensetzung und der Elementarverteilung in Planetarischen Nebeln	
[42]	http://abenteuer-universum.de/sterne/stern.html	30.05.2016
[43]	http://www.periodensystem-online.de/index.php?el=10	30.05.2016
[44]	http://lexikon.astronomie.info/Nova/Nova.html	30.05.2016
[45]	http://www.periodensystem-online.de/index.php?el=18	30.05.2016
[46]	https://de.wikipedia.org/wiki/Argon	30.05.3016
[47]	Richard Walker: Analyse und Interpretation astronomischer Spektren, Version 9.1 12/2013 S.:108,109	
[48]	S.Hyung, G.Mellema, S.-J. Lee, H.Kim: The electron temperature of the inner halo of the Planetary Nebula NGC 6543 2001	
[49]	http://www.spektrum.de/lexikon/physik/extinktion/4658	29.05.2016
[50]	http://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/shuttle/sts-82/html/s82e5937.html	29.05.2016
[51]	http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_211.html	30.05.2016

Abbildungsverzeichnis

1	Planetarischer Nebel NGC6543	S. 5
2	Orion Nebel : Staub-/Gasnebel : Entstehungsort von Sternen	S. 5
3	Hertzsprung-Russell-Diagramm	S. 6
4	Vergleich zwischen der Sonne und einem Roten Riesen mit 2,5facher Sonnenmasse	S. 7
5	William Huggins an seinem Teleskop	S. 8
6	Erstes Spektrum von NGC6543 von William Huggins	S. 9
7	Photonen als Teilchen, die von einer Glühbirne ausgesendet werden	S. 10
8	Interferenzmuster von einem Doppelspalt	S. 10
9	Interferenzversuch mit einer CCD-Kamera als Nachweis des Lichtes als Welle/Teilchen Objekt	S. 11
10	Entstehung von Photonen	S. 12
11	"Erlaubte" Übergänge von Wasserstoff	S. 13
12	Brechung des Lichtes am Prisma	S. 14
13	Erklärung des DADOS Spektrographen	S. 15
14	DADOS Spektrograph von oben mit geöffneten Würfeln	S. 16
15	Konstruktive Interferenz	S. 17
16	Dekonstruktive Interferenz	S. 17
17	Erzeugung eines Wegunterschiedes zwischen zwei Wellenlänge mit einem Doppelspalt	S. 18
18	Optisches Gitter	S. 18
19	Interferenzmuster in Abhängigkeit der Spaltanzahl N	S. 19
20	Beispiel eines kontinuierlichen Spektrums	S. 19
21	Schema der Lichtreflexion bei einem Reflexionsgitter	S. 20
22	Blazegitter	S. 20
23	Stationen des Schülerlabors auf dem Dach der Schule	S. 21
24	Verbesserung des Bildes durch die Funktion <Unscharf maskieren>	S. 22
25	Vergleich der Bilder vor und nach dem Schärfen und Beseitigung der Atmosphärischen Dispersion	S. 22
26	Endergebnis: Aufnahme des Planetarischen Nebels mit einem anderen Stern zur Orientierung	S. 23
27	Hubble Weltraum Teleskop	S. 23

28	NGC6543 aufgenommen mit dem Hubble Weltraum Teleskop	S. 24
29	Vergleich: links das Bild vom Hubble Teleskop; rechts unser Bild horizontal gespiegelt	S. 25
30	Stationen des Schülerlabors auf dem Dach der Schule	S. 26
31	Teleskopsteuerung	S. 26
32	Sternwarte von Innen mit Technikwagen und C11 Teleskopen für die Inseln 1-6	S. 26
33	Celestron Edge HD11	S. 27
34	SBIG STF-8300M	S. 27
35	Aufbau am Teleskop	S. 27
36	Hotpixelentfernung mit MaximDL	S. 28
37	Stacking der Spektren	S. 29
38	Stacking der Spektren mit Verschiebung	S. 30
39	Himmelshintergrund mit unserem Spektrum von NGC6543	S. 31
40	Pixel-Math	S. 31
41	Darstellung des Graphen mit MaximDL	S. 32
42	Intensitätsbergidentfikation	S. 33
43	Tabelle der Wellenlängen	S. 34
44	Finales Farbspektrum	S. 35
45	Überprüfung der Wellenlängen	S. 35
46	Nachkoloriertes Spektrum mit Intensitätskurve	S. 37
47	Tabelle der identifizierten Elemente aus der Referenzarbeit	S. 39
48	[NII] und [SII] Verfahren auf Grund von Identifikationsschwierigkeiten nicht möglich	S. 43
49	Intensitätsmessung ungenau durch Überlappen von Hγ mit [OIII] bei λ = 4363 Å	S. 43
50	Menü <Operations> bei Vspec	S. 44
51	Fenster zum Verrechnen der Kurve mit einem beliebigen Wert	S. 45
52	Flächeninhaltsberechnung mit Vspec über <Computation>	S. 44
53	Minimale Messbreite bei Vspec größer als unsere Linie	S. 45
54	Screenshot der Excel Tabelle mit unseren Ergebnissen	S. 46
55	Position des Spalts des Spektrographen auf dem Nebel	S. 47
56	Intensitätsverteilung der [OIII] Linie bei λ = 4363 Å über die Breite des Planetarischen Nebels	S. 48

57	Aufbau mit DADOS Spektrograph, SBIG CDD Kamera und einer Farbvideokamera	S. 49
58	Nachstellung von der Aufnahme mit dem Guiding anhand des benachbarten Sterns	S. 50
59	Schichten des Planetarischen Nebels mit dem Literaturwert der zugehörigen Temperatur	S. 51

Genutzte Software

Vspec:	Bearbeitung der Spektren: Wellenlängenkalibration des Spektrums und Synthese eines Farbspektrums
MaximDL:	Bearbeitung der Rohspektren: Subtraktion des Himmelshintergrundes und Erstellung einer Intensitätskurve
Photoshop CS3:	Bearbeitung von Bildern und Grafiken
ALS Reticle:	Bildschirmfadenkreuz zur manuellen Nachführung am Teleskop per Live-Ansicht
EOS Utility:	Live-Ansicht und Steuerung der Canon EOS 450D Kamera zur Anfertigung der Bilder des Planetarischen Nebels
Gimp 2.8:	Bearbeitung von Bildern und Grafiken
Fitswork	Stacken der Farbbilder