Spektroskopie als Bereicherung der amateurastronomischen Tätigkeit

Maturaarbeit von Peter Stoffer, Gymnasium Burgdorf
Oktober 2004

Betreuende Lehrkraft: Peter Fenner

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 1

2 Die Physik der Spektren ... 3

2.1 Die Strahlungsgesetze ... 3

2.1.1 Thermische Strahlung ... 3

2.1.2 Die Plancksche Strahlungsformel ... 3

2.1.3 Das Wiensche Verschiebungsgesetz ... 3

2.1.4 Das Stefan-Boltzmannsche Gesetz ... 4

2.2 Die Entstehung von Spektrallinien ... 4

2.2.1 Die drei Kirchhoffschen Gesetze ... 4

2.2.2 Das Atommodell von Bohr: Energieniveaus der Elektronen ... 5

2.2.3 Das Wasserstoffatom ... 6

2.2.4 Andere Atome und Moleküle ... 6

2.2.5 Anregung, Ionisation und verbotene Linien ... 7

2.3 Die Spektralklassifikation der Sterne ... 7

3 Die Spektroskopie in der Praxis ... 9

3.1 Aufnahmetechnik ... 9

3.1.1 Instrumentarium ... 9

3.1.2 Ausflüge zu Sternwarten ... 10

3.1.3 Optischer Aufbau ... 10

3.1.4 Auswertung der aufgenommenen Spektren ... 11

3.1.5 Schwachstellen ... 12

3.2 Untersuchte Objekte ... 13

3.2.1 Helle Sterne verschiedener Spektralklassen ... 13

3.2.2 Veränderliche Sterne ... 17

3.2.3 Wolf-Rayet-Sterne ... 20

3.2.4 Planetarische Nebel ... 22

4 Fazit und Ausblick ... 26

Verzeichnis und Daten der Bilder ... 27

Abbildungen ... 27

Spektren ... 27

Literaturverzeichnis ... 29

Verdankungen ... 30

1 Einleitung

Der Mensch ist seit jeher fasziniert ob des wunderbaren Anblicks des Sternenhimmels, der sich in klaren Nächten über unseren Köpfen in die Unendlichkeit erstreckt. Die Ungreifbarkeit des Alls weckte schon vor tausenden von Jahren Fragen in den Köpfen der Menschen über die Herkunft des Lebens und der Welt, den Sinn des Universums.
Dies mag der Grund dafür sein, dass die Astronomie als älteste Wissenschaft bezeichnet wird. Die Himmelskunde nimmt aber auch heute als Astrophysik und Kosmologie eine wichtige Position unter den modernen Wissenschaften ein.
Ausserdem ist die Amateurastronomie eine beliebte Freizeitbeschäftigung vieler Menschen. Erschwingliche Teleskope zeigen dem interessierten Beobachter bereits viele schöne Objekte des Weltalls, wie Mond, Planeten, Sternhaufen, Gasnebel und Galaxien.
Auch die Fotografie dieser Himmelsobjekte ist dem Amateur mit vertretbarem Aufwand möglich. Im Internet finden sich heute Amateuraufnahmen, die dank digitaler Technik der Qualität professioneller Fotografien aus den sechziger Jahren entsprechen.

Da wir nur in den allerwenigsten Fällen direkt zu den zu untersuchenden Objekten gelangen können, sind wir auf die Informationen angewiesen, die wir über die Strahlung erhalten, die von den Himmelsobjekten ausgesandt wird. Diese besteht vorwiegend aus elektromagnetischer Strahlung, unter anderem aus sichtbarem Licht.
Das Licht der Himmelskörper liefert nicht nur Angaben über deren Standort, sondern auch verschlüsselte Informationen über ihre Masse, chemische Zusammensetzung, Dichte, Temperatur und Bewegung.
Um die maximale Information aus dem Licht zu gewinnen, muss dieses in seine einzelnen Wellenlängen aufgetrennt werden. Dabei erhält man das Spektrum der Strahlung, der Vorgang nennt sich Spektroskopie.
Die Spektroskopie spielt in der professionellen Astronomie eine zentrale Rolle, sie wird nicht nur im sichtbaren Wellenlängenbereich, sondern auch in der Radio- oder Röntgenastronomie angewandt.
Trotz ihrer Wichtigkeit in der Wissenschaft erfreut sich die Spektroskopie in der Amateurastronomie keiner grossen Beliebtheit. Dem vergleichsweise hohen Aufwand, den die Spektroskopie erfordert, und dem Fehlen eines ästhetischen Resultats ist das Desinteresse der Amateure an diesem Zweig der Astronomie zuzuschreiben.
Doch gerade die Spektroskopie bietet eine einzigartige Möglichkeit, das Wissen über physikalische Vorgänge im Universum zu vertiefen. Man erhält die Möglichkeit, wissenschaftliche Arbeiten nachzuvollziehen, mit etwas höherem Aufwand sogar selber zu leisten.

Da ich mich sehr für Astronomie interessiere, war mir schon lange klar, dass ich die Maturaarbeit über ein astronomisches Thema schreiben werde.
Da ich nicht nur beobachten, sondern auch selber gewonnene Daten auswerten wollte, kamen für mich zum einen eigene Radiobeobachtungen der Sonne, oder aber spektroskopische Himmelsbeobachtungen in Frage.
Nach etwas intensiveren Recherchen über Radioastronomie wurde mir aber klar, dass die technischen Probleme, die es zu lösen galt, für mich zu kompliziert waren, und ich mit diesem Thema kaum ein Resultat erzielen würde.

Im Fakultativunterricht Astronomie in der Quarta konnten wir einmal die Emissionslinienspektren verschiedener Gase betrachten. Ich war fasziniert von den Möglichkeiten der Spektroskopie. Dies gab den Ausschlag dazu, meine Maturaarbeit der Astrospektroskopie zu widmen.
Die Lektüre von [1] und [4] überzeugte mich von der Durchführbarkeit dieser Idee.

Die Spektroskopie mag unter den Amateuren unbeliebt sein, sie ist aber ein äusserst faszinierendes Teilgebiet der Astronomie.
Mit meiner Arbeit will ich aufzeigen, wie man als Amateurastronom mit Hilfe der Spektroskopie einen tieferen Einblick in die physikalischen Vorgänge des Weltraums gewinnt, und damit die Hintergründe des eigenen Hobbys besser kennen lernt.

2 Die Physik der Spektren

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen erläutert, die zum Verständnis der Spektralanalyse nötig sind. Die Tatsache, dass der Schwerpunkt dieser Arbeit in der Umsetzung der Spektroskopie liegt, wirkt sich auf die Kompaktheit der Darstellung der doch recht umfangreichen physikalischen Hintergründe der Spektroskopie aus.

2.1 Die Strahlungsgesetze

2.1.1 Thermische Strahlung

Jeder Körper sendet elektromagnetische Strahlung aus, deren Stärke und spektrale Energieverteilung von seiner Temperatur und Beschaffenheit abhängt. Diese Strahlung wird thermische Strahlung genannt. (Im Gegensatz dazu steht nichtthermische Strahlung, wie die Synchrotronstrahlung oder die Tscherenkow-Strahlung.)

2.1.2 Die Plancksche Strahlungsformel

Die Strahlung der Sterne lässt sich gut mit dem Planckschen Strahlungsgesetz beschreiben. Dieses gilt im Grunde genommen nur für „schwarze Körper“. Ein schwarzer Körper ist ein idealisiertes physikalisches Modell: Er soll keine Strahlung reflektieren, also ein Absorptionsvermögen von $a = 1$ besitzen, sich im thermischen Gleichgewicht befinden und von Strahlung nicht durchdringbar sein [6].
Sterne absorbieren sehr gut die Strahlung, die in ihrem Innern erzeugt wird und nur langsam an die Oberfläche gelangt. Sie befinden sich zwar nicht im thermischen Gleichgewicht, denn sie strahlen ja Energie ab, doch kann man sie näherungsweise als schwarze Körper betrachten.
Max Planck, der Begründer der Quantenmechanik, betrachtete die Lichtenergie als gequantelt, also aus kleinen Paketen bestehend, den Photonen. Die Photonen besitzen eine Energie von $E = h \cdot \nu$, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum ($6{,}626 \cdot 10^{-34}\,[\mathrm{J \cdot s}]$) und ν die Frequenz ist.
Diese Betrachtungsweise ermöglichte es Planck im Jahr 1900 das Strahlungsfeld des schwarzen Körpers theoretisch darzustellen. Die Strahlungsenergie, die von 1 cm^2 der Oberfläche eines schwarzen Körpers pro Sekunde und Wellenlängeneinheit bei der Temperatur T in die Raumwinkeleinheit austritt, beträgt laut [6]:

$$E(\lambda, T) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1\right)} \tag{1}$$

Dabei ist $k = 1{,}380622 \cdot 10^{-23}\ [\mathrm{J \cdot K^{-1}}]$ die Boltzmann-Konstante.

2.1.3 Das Wiensche Verschiebungsgesetz

Wird die Energieverteilung für verschiedene Temperaturen untersucht, so stellt man fest, dass das Strahlungsmaximum bei höheren Temperaturen zu kürzeren Wellenlängen verschoben ist. Aus (1) lässt sich mathematisch exakt das Wiensche Verschiebungsgesetz herleiten:

$$\lambda_{\max}(T) = C \cdot T^{-1} \tag{2}$$

Man erhält die Wellenlänge des Strahlungsmaximums in Metern, wenn die Temperatur in Kelvin gemessen wird. Dabei ergibt sich die Konstante C zu $2{,}898 \cdot 10^{-3}\ [\mathrm{m} \cdot \mathrm{K}]$.
Heisse Sterne erscheinen also nach dem Wienschen Verschiebungsgesetz blau, kühle Sterne hingegen rot.

2.1.4 Das Stefan-Boltzmannsche Gesetz

Ebenfalls aus dem Planckschen Strahlungsgesetz ist das Stefan-Boltzmannsche Gesetz herleitbar. Es besagt, dass die Gesamtenergie, die über alle Wellenlängen ausgestrahlt wird, mit der vierten Potenz der Temperatur wächst:

$$E(T) = \sigma \cdot T^4 \tag{3}$$

Die Strahlungskonstante beträgt $\sigma = 5{,}66961 \cdot 10^{-8}\ [\mathrm{J} \cdot \mathrm{m}^{-2} \cdot \mathrm{s}^{-1} \cdot \mathrm{K}^{-4}]$.

Die untenstehende Abbildung zeigt eine graphische Darstellung des Planckschen Strahlungsgesetzes, in der sowohl das Wiensche Verschiebungsgesetz wie auch das Stefan-Boltzmannsche Gesetz zum Ausdruck kommt.
Auf die Herleitung der beiden Gesetze wird in dieser Arbeit nicht eingegangen.

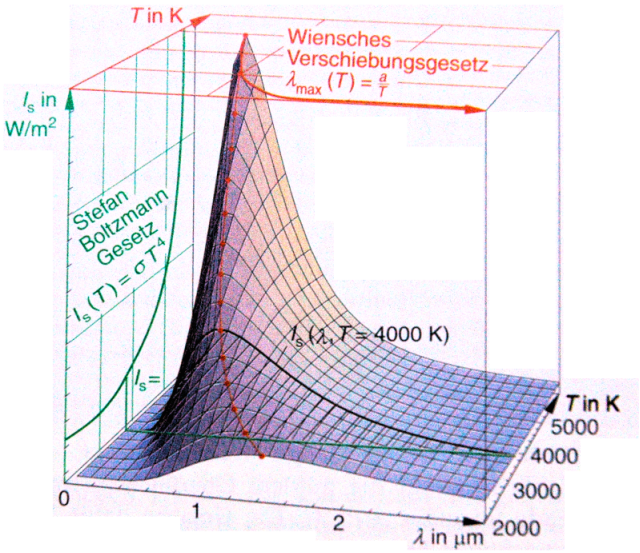


Abbildung 2.1 Das Plancksche Strahlungsgesetz

2.2 Die Entstehung von Spektrallinien

2.2.1 Die drei Kirchhoffschen Gesetze

Gustav Kirchhoff fasste 1859 die grundlegenden Prinzipien im Zusammenhang mit der Erscheinung von Spektren in folgende drei Gesetze [12]:

- Ein glühender fester oder flüssiger Körper oder ein Gas unter hohem Druck erzeugt ein kontinuierliches Spektrum.

- Ein glühendes Gas unter niedrigem Druck erzeugt ein Emissionslinienspektrum. Die Position dieser Linien hängt von der Zusammensetzung des Gases ab.
- Ein kontinuierliches Spektrum, durch ein transparentes kühles Gas niedriger Dichte betrachtet, erzeugt ein Absorptionslinienspektrum. Die Position der Linien hängt von der Zusammensetzung des kühlen Gases ab.

Die meisten Sterne und die Sonne besitzen ein kontinuierliches Spektrum. Da ihre Temperaturen sehr hoch sind, müssen sie aus Gas bestehen.
Man findet meist dunkle Linien in den Spektren von Sternen und Sonne, deren Existenz sich mit einer kühleren Atmosphäre um die Sterne erklären lässt.
Einige neblige Objekte und auch Sterne besitzen ausserdem Emissionslinien in ihren Spektren, was darauf hindeutet, dass sie aus dünnem Gas bestehen bzw. davon umgeben sind [6].

2.2.2 Das Atommodell von Bohr: Energieniveaus der Elektronen

Josef von Fraunhofer beobachtete 1814 als erster die oben genannten Linien in den Spektren der Sonne und heller Sterne. Um das Zustandekommen von Spektrallinien zu verstehen, ist jedoch die Kenntnis über den Aufbau des Atoms vonnöten, die Fraunhofer damals fehlte.
Mit dem Atommodell von Bohr (1913) lassen sich die grundlegenden Erscheinungen erklären.
Das Atom, der Grundbaustein der Elemente, besteht aus einem massereichen Atomkern, der sich aus elektrisch positiv geladenen Protonen und ungeladenen Neutronen zusammensetzt, und der Atomhülle, einem System von negativ geladenen Elektronen. Da ein Atom elektrisch ungeladen ist, müssen sich die Zahl der Elektronen und der Protonen entsprechen. Die Zahl der Protonen im Kern bestimmt das chemische Element.
Laut Bohr können die Elektronen nur in bestimmten erlaubten Bahnen oder Schalen den Kern strahlungsfrei umlaufen[1]. Weiter vom Kern entfernte Bahnen entsprechen dabei höheren Energiezuständen.
Die Elektronen können ihre Bahn bzw. ihr Energieniveau ändern, indem sie Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung (Photonen) aufnehmen oder abgeben. Die Energie der emittierten oder absorbierten Photonen, die der Wellenlänge der Strahlung entspricht, ist gleich der Differenz zwischen den Energieniveaus des betreffenden Elektrons. Es gilt folgender Zusammenhang [12]:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta E} \tag{4}$$

Der genaue physikalische Sachverhalt ist in [5], S. 408/409, zu finden.
Die Kräfte zwischen Elektronen und Atomkern sind bei jedem Element verschieden, entsprechend müssen die Elektronen beim Wechsel in eine andere Schale eine dem Element spezifische Energie aufwenden. Daraus folgt, dass jedes Element bei ganz bestimmten Wellenlängen Licht absorbiert oder emittiert.
Die Untersuchung der Spektrallinien eines Mediums gibt deshalb Auskunft über dessen chemische Zusammensetzung.

[1] Gemäss der Quantisierung der Energie im atomaren Bereich nach Planck.

2.2.3 Das Wasserstoffatom

Wegen seines einfachen Aufbaus (ein Proton im Atomkern, ein Elektron in der Hülle) eignet sich das Wasserstoffatom besonders zur Darstellung oben genannter Vorgänge.
Die Spektrallinien des Wasserstoffs lassen sich auf bestimmte Serien verteilen. Johannes Rydberg fand bereits 1890 folgende Gesetzmässigkeit:

$$\frac{1}{\lambda} = R \cdot \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \tag{5}$$

Die Konstante $R = 1{,}09737312 \cdot 10^7 \ [\mathrm{m}^{-1}]$ wird Rydbergkonstante genannt und hängt nur von verschiedenen Naturkonstanten ab [5].
Die Variablen n und m sind ganze Zahlen, wobei m immer grösser als n ist. Man erhält die Wellenlängen einer Serie, wenn bei festem n alle möglichen Werte von m durchlaufen werden [6].
Dieses Verhalten kann mit dem Bohrschen Modell erklärt werden:
Man nummeriert die Elektronenschalen ausgehend vom Atomkern. Die Variable n ist nun die Nummer der tieferen der Schalen, zwischen denen das Elektron wechselt, m die Nummer der höheren.
Abbildung 2.2 zeigt schematisch die Elektronenschalen des Wasserstoffatoms und die verschiedenen Serien. Die Balmerserie, von der zweiten Schale ausgehend, ist die wichtigste, da die entsprechenden Wellenlängen im sichtbaren Spektralbereich liegen.

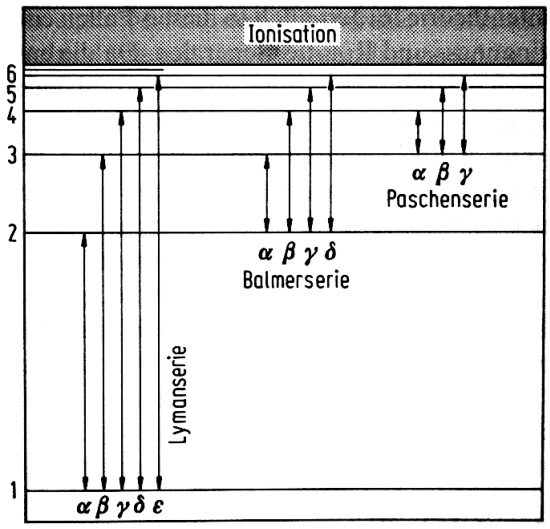


Abbildung 2.2 Schematische Darstellung der Energieniveaus beim Wasserstoffatom

2.2.4 Andere Atome und Moleküle

Bei den Atomen anderer Elemente wird diese Darstellung der Spektrallinien komplexer. Die Elektronen beeinflussen sich gegenseitig. Ausserdem können auch noch Energieübergänge innerhalb der Elektronenschalen, in den Orbitalen, stattfinden. Dies ist der Grund dafür, dass jedes Element seine eigenen spezifischen Spektrallinien erzeugt.

Ebenso sind die Vorgänge bei Molekülen, dem Zusammenschluss mehrerer Atome, nochmals komplizierter. Neben den durch Elektronensprünge hervorgerufenen existieren weitere Energieniveaus aufgrund von Schwingungen und Rotationen der Atomkerne. Die Kombination dieser drei Effekte erzeugt viele nahe beieinander liegende Spektrallinien, so genannte Banden [6].

2.2.5 Anregung, Ionisation und verbotene Linien

Bei niedrigen Temperaturen befinden sich praktisch alle Atome eines Gases im Grundzustand, ihre Elektronen sind auf den untersten Schalen anzutreffen. Durch Absorption elektromagnetischer Strahlung oder Kollision mit anderen Teilchen kann ein Elektron auf ein höheres Energieniveau gelangen. Diesen Vorgang nennt man Anregung. Der Anteil der angeregten Atome hängt vor allem von der Temperatur ab.
Wird ein Atom soweit angeregt, dass das Elektron vom Atomkern abgetrennt wird, so spricht man von Ionisation. Ein Ion kann weiter angeregt werden, seine Energieniveaus unterscheiden sich jedoch von denen des neutralen Atoms, weshalb Ionen ein ihnen eigenes Spektrum erzeugen.
In der Regel kehrt ein Elektron, das auf ein höheres Niveau gebracht wurde, nach etwa 10^{-8} Sekunden in einen niedrigeren Zustand zurück. Es gibt aber auch stabilere Zustände, in denen es mehrere Sekunden oder Minuten verweilen kann.
Unter Laborbedingungen wird dem Elektron in diesem Zustand seine Energie durch Stösse mit anderen Teilchen wieder entzogen, es kommt nicht dazu, seine Energie zu emittieren. Dies geschieht nur unter Bedingungen, wie man sie im Weltraum vorfindet und die dem irdischen Hochvakuum entsprechen.
Die dabei entstehenden Linien können also nur bei Himmelsobjekten und nicht im Labor beobachtet werden. Sie werden deshalb „verbotene Linien“ genannt.

2.3 Die Spektralklassifikation der Sterne

Die Spektren der Sterne bestehen, wie oben bereits erwähnt wurde, aus einem Kontinuum, dem mehr oder weniger Spektrallinien (meistens Absorptionslinien, selten Emissionslinien) überlagert sind. Die Stärke der Linien wird zum einen durch die Häufigkeit der sie erzeugenden Elemente in der Sternatmosphäre, zum anderen durch den Anregungs- und Ionisationsgrad dieser Elemente bestimmt [14].
Anregungs- und Ionisationsgrad steigen mit der Temperatur, der Ionisationsgrad fällt mit steigender Dichte.
Da die chemische Zusammensetzung der meisten Sternatmosphären ähnlich ist, wird das Aussehen des Spektrums vor allem durch die physikalischen Eigenschaften des Sterns bestimmt (Temperatur, Masse).
Die Spektralklassifikation der Sterne erfolgt nach physikalischen Gesichtspunkten, in erster Linie nach der Temperatur.
Heutzutage benützt man eine Einteilung der Sterne in folgende Spektralklassen:

O - B - A - F - G - K - M

Dabei nimmt in dieser „Hauptfolge“ die effektive Temperatur von links nach rechts ab. Zur Verfeinerung werden die Klassen dezimal unterteilt (Anhängen einer arabischen Ziffer von 0 bis 9). Es existieren zudem die „Nebenfolgen“, zu denen die Klassen S, R und N gehören. Die Wolf-Rayet-Sterne gehören zu der Klasse W, die in der Hauptfolge der Klasse O vorangestellt wird.
Die Klassen O, B und A werden als „früh“ bezeichnet, die Klassen K und M als „spät“, wobei diese Begriffe historisch bedingt sind und nicht in Zusammenhang mit einer zeitlichen Entwicklung der Sterne stehen.

Auf die geschichtlichen Hintergründe dieses Klassifikationsschemas wird hier nicht eingegangen.

Die folgende Tabelle zeigt die wichtigsten Merkmale der Klassen der Hauptfolge (nach [6]):

Tabelle 2.1

Spektral - klasse	**Farbe**	**Atmosphären - temperatur [K]**	**Kriterien**
O	blau	>25’000	Linien hoch ionisierter Atome, Balmerserie schwach
B	blau	11’000 – 25’000	Linien ionisierter Atome, Heliumlinien, Balmerserie zunehmend
A	blau	7’500 – 11’000	Maximum der Balmerserie, Linien einfach ionisierter Atome
F	blau/ weiss	6’000 – 7’500	Balmerserie abnehmend, Linien einfach ionisierter und neutraler Metalle
G	weiss/ gelb	5’000 – 6’000	Schwache Balmerserie, Linien neutraler Metalle sehr stark, erste CH-Banden
K	orange/ rot	3’500 – 5’000	Sehr starke Linien neutraler Metalle, Molekülbanden (CH, CN, TiO)
M	rot	< 3’500	Sehr starke TiO-Banden, Linien neutraler Metalle mit geringer Anregungsenergie

Einige Spektralklassen werden im praktischen Teil näher behandelt.

3 Die Spektroskopie in der Praxis

In diesem Kapitel stelle ich meine praktische Beschäftigung mit Spektroskopie während des Sommers und Herbstes 2004 vor.
Obwohl ich die Spektren aufgezeichnet habe, werde ich der Einfachheit halber den (terminologisch nicht ganz korrekten) Begriff „Spektroskopie“ und nicht den Begriff „Spektrografie“ benutzen.

3.1 Aufnahmetechnik

3.1.1 Instrumentarium

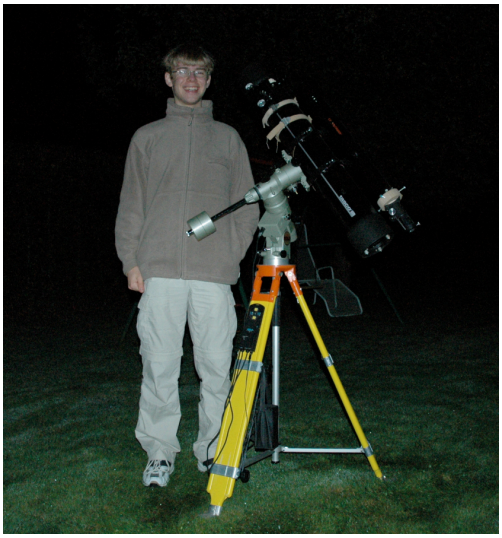


Abbildung 3.1 Das Teleskop im Einsatz

3.1.1.1 Das Newtonteleskop

Ich besitze seit einiger Zeit ein Spiegelteleskop vom Typ Newton mit einer Öffnung von 114 mm und einer Brennweite von 900 mm. Das Newtonteleskop sitzt auf einer GP-DX-Montierung von Vixen und ist mit elektrischer Nachführung ausgestattet.
Das Teleskop konnte seine Qualitäten bereits bei vielen visuellen Beobachtungen während der letzten Jahre unter Beweis stellen. Dank der sehr stabilen Montierung mit Nachführung und einigen kleineren Modifikationen ist es auch für Astrofotografie geeignet. Erste Schritte in diesem Bereich unternahm ich seit etwa eineinhalb Jahren.

3.1.1.2 Das Spektroskop

Nachdem der Wunsch entstanden war, selber Spektroskopie zu betreiben, musste ein geeignetes Spektroskop gefunden werden. In Frage kamen sowohl Gitter, wie auch Prismen, wobei ein Gitter den Vorteil der linearen Dispersion besitzt, was die Auswertung der Spektren erheblich erleichtert.
Die Lektüre von [1] zeigte, dass das Blazegitter-Spektroskop von Baader Planetarium eine finanziell vertretbare Lösung war, mit der sicher Resultate erzielt werden konnten.
Das Spektroskop mit einem Durchmesser von 1.25 Zoll besitzt ein Standardfiltergewinde, das den Anschluss an Okular oder Kameraadapter ermöglicht. 207 Linien pro Millimeter, insgesamt etwa 5400 Furchen, ergeben ein theoretisches spektrales Auflösungsvermögen von ca. 0.1 nm.

Abbildung 3.2 Das Baader Blazegitter-Spektroskop

Die Besonderheit des Blazegitters liegt darin, dass seine Furchen so konzipiert sind, dass der Hauptteil des Lichtes in eines der beiden Bilder erster Ordnung fliesst. Diese Ordnung nennt man „geblazed“.
Auf die physikalischen Hintergründe eines optischen Gitters wird in dieser Arbeit nicht eingegangen, da diese im Physikunterricht behandelt wurden. Der Stoff ist in [5], S. 296/297, zu finden.

3.1.1.3 Kamera

Nach der Anschaffung dieses Spektroskops fehlte nur noch eine geeignete Kamera. Erste Versuche, mit einer analogen Spiegelreflexkamera Spektren zu fotografieren, erwiesen sich aus mehreren Gründen nicht als praktikabel:

- Bei hohem Verbrauch wird das Filmmaterial schnell sehr teuer.
- Die grossen Zeitspannen zwischen dem Fotografieren des Spektrums, dem Erhalt des entwickelten Films und einer neuen Gelegenheit, Aufnahmen zu machen, verunmöglichten ein schnelles Reagieren auf Probleme.
- Das Entwicklungslabor konnte weder Abzüge noch digitale Daten von dem Negativ gewinnen, da die automatisierte Entwicklung nicht bei Bildern ohne erkennbaren Rand funktioniert.

Da ich mir schon seit langer Zeit eine digitale Spiegelreflexkamera wünschte, schien dies der gegebene Zeitpunkt zu sein, in einen solchen Apparat zu investieren. Es folgte die Anschaffung einer Nikon D70, welche dank abnehmbarem Objektiv und der Möglichkeit zur Langzeitbelichtung für die Astrofotografie geeignet ist.
Die Auflösung der Kamera beträgt 6.1 Megapixel.

Abbildung 3.3 Nikon D70

3.1.2 Ausflüge zu Sternwarten

3.1.2.1 Sternwarte Urania, Burgdorf

Am 29. Juli 2004 unternahm ich einen Ausflug in die Sternwarte Urania des Gymnasiums Burgdorf, wo ich mit dem Zeiss-Refraktor Aufnahmen von Spektren gewann. Dieses Linsenteleskop mit einer Öffnung von 130 mm liefert ein exzellentes Bild bei der Beobachtung von Planeten, scheint aber weniger für die Spektroskopie geeignet zu sein: Die verbleibenden Farbfehler führen zu einer Unschärfe im Blaubereich des Spektrums, die eine kontrastreiche Abbildung verhindert.

3.1.2.2 Sternwarte Uecht bei Niedermuhlern

Dank der zuvorkommenden Unterstützung von Herrn Niklaus konnte eine Exkursion in die Sternwarte Uecht unternommen werden. Das dortige Newtonteleskop mit 320 mm Öffnung konnte für Aufnahmen verwendet werden.
Leider stellten sich auch hier Probleme: Der Fokus des Teleskops lag so nahe beim Tubus, dass die auf normale Art adaptierte Kamera nicht mehr scharf gestellt werden konnte. Mit einer Bastellösung konnte sie zwar doch noch in den Fokus gebracht werden, allerdings lag dabei das Spektroskop näher bei der Brennebene, was zu kürzeren Spektren und einer geringeren spektralen Auflösung führte.

3.1.3 Optischer Aufbau

Am Beispiel des 114/900-Newtonteleskops soll der Aufbau der Aufnahmeoptik erklärt werden.

Das parallel einfallende Licht von den Himmelskörpern wird vom Hauptspiegel des Teleskops gebündelt. Der Fang- oder Sekundärspiegel dient dazu, den Strahlengang aus dem Teleskop zu leiten.
In der bei allen Aufnahmen verwendeten spaltlosen Anordnung wird das Gitterspektroskop vor der Brennebene in den Strahlengang eingeführt. In der Brennebene (Fokus) liegt der CCD-Chip der Kamera.
Anfängliche Versuche mit Okularprojektion schlugen fehl, da die zusätzlichen Linsen im Strahlengang und die durch ein grösseres Bild hervorgerufene kleinere Helligkeit des Spektrums einen sehr schlechten Kontrast zur Folge hatten und so die Sichtbarkeit von Spektrallinien verhinderten.

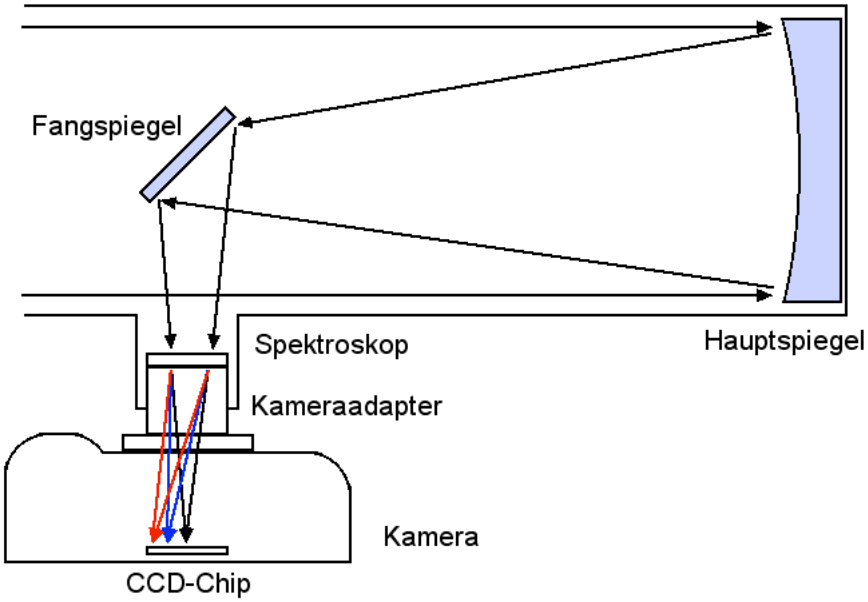


Abbildung 3.4 Aufbau der Aufnahmeoptik

3.1.4 Auswertung der aufgenommenen Spektren

Um ein Maximum an Informationen aus den Aufnahmen von Spektren herauszuholen, muss der Intensitätsverlauf des Spektrums grafisch aufgezeichnet werden. Helligkeitsunterschiede direkt auf dem Bild zu erkennen stellt sich als ausserordentlich schwierig dar. Wird der Helligkeitsverlauf jedoch vom Computer ausgelesen und in einer Kurve dargestellt, so sind auch kleine Schwankungen direkt ersichtlich.
Um diesen Prozess schnell und effizient an jedem aufgenommenen Bild vollziehen zu können, beschloss ich, ein Programm zu schreiben, das diese Aufgabe erfüllt.
Mit REALbasic 5 entwickelte ich unter Mac OS X das Programm „Spektralanalyse“.
Das Programm ist in drei Aufgabenbereiche gegliedert, für die jeweils ein Fenster zuständig ist:

- Die Erfassung der Aufnahmedaten erfolgt im Fenster „Datenblatt“.
- Die Bearbeitung der Aufnahme (zuschneiden, drehen, entzerren) wird im Fenster „Spektrumsbearbeitung“ erledigt.
- Im Fenster „Spektralanalyse“ wird das Spektrum ausgewertet, indem der Intensitätsverlauf grafisch dargestellt wird.

Alle Fenster lassen sich vom Projektfenster über Knöpfe aufrufen.

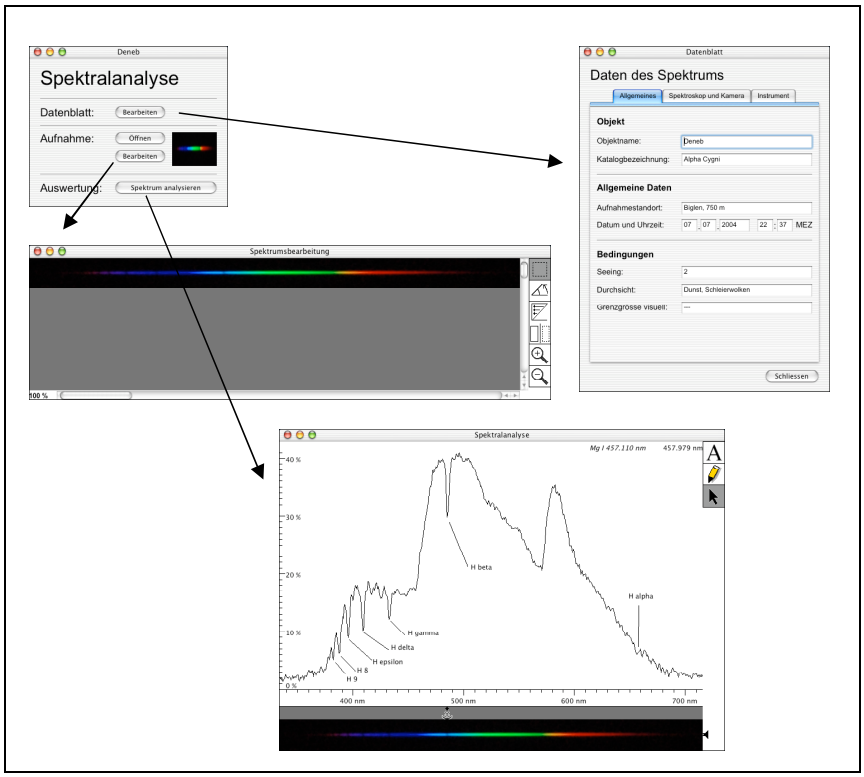


Abbildung 3.5 Aufbau des Programms „Spektralanalyse“

3.1.5 Schwachstellen

Das benutze Aufnahmesystem weist verschiedene Schwachstellen auf:

- Das Lichtsammelvermögen des 114/900-Newtonteleskops ist eher als gering einzustufen. Schwache Objekte sind deshalb nur schwer zugänglich und erfordern längere Belichtungszeiten, wodurch das Signal-Rausch-Verhältnis negativ beeinflusst wird.
- Die Fokustoleranz des Newtonteleskops ist sehr gering, was das Scharfstellen sehr schwierig macht.
- Durch die spaltlose Anordnung hängt die spektrale Auflösung stark vom Seeing (Luftunruhe) ab. Das theoretische Auflösungsvermögen des Spektroskops von 0.1 nm wird nie erreicht. In der Praxis beträgt das Auflösungsvermögen etwa 2 nm.
- Flächenhafte Objekte können nur bedingt untersucht werden, da in der spaltlosen Anordnung das Spektrum eine Überlagerung einzelner Bilder verschiedener Wellenlängen darstellt. Die Auflösung einzelner Spektrallinien gelingt nur bei einer geringen Objektausdehnung.
- Die Abhängigkeit der Empfindlichkeit des CCD-Chips von der Wellenlänge des Lichts beeinflusst den Intensitätsverlauf des aufgenommenen Spektrums. Bei der Auswertung bestünde zwar die Möglichkeit, diesen Effekt wegzurechnen, darauf verzichtete ich aber wegen des recht hohen Aufwandes.

Allgemein kann gesagt werden, dass die Möglichkeiten der verwendeten Aufnahmemethode beschränkt sind. Besonders die spektrale Auflösung ist recht niedrig.

Eine Ausrüstung, mit der bessere Resultate erzielt werden könnten, würde aber „sehr viel Eigenbauaufwand oder einen tiefen Griff in die Geldbörse“ erfordern, wie mir

Ernst Pollmann, Leiter der Fachgruppe Spektroskopie der Vereinigung der Sternfreunde Deutschland, mitteilte.[2]
Im folgenden Abschnitt wird gezeigt, dass auch mit dieser Ausrüstung schöne Ergebnisse bei verschiedenen Objekten erreicht werden können.

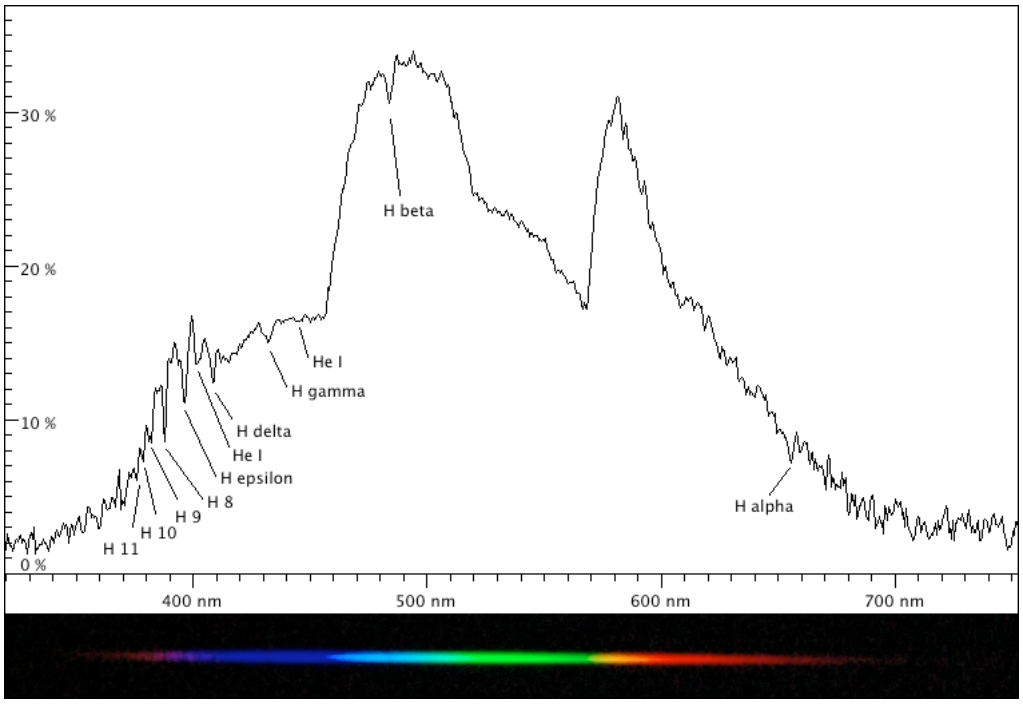
3.2 Untersuchte Objekte

3.2.1 Helle Sterne verschiedener Spektralklassen

Im Verlauf des Sommers und Herbstes 2004 konnte ich Aufnahmen von hellen Sternen der wichtigsten Spektralklassen gewinnen. Diese Spektralklassen werden hier mit Hilfe des jeweils besten Spektrums etwas näher erläutert. Die Bilder der Spektren sind das Resultat der Auswertung mit dem Programm „Spektralanalyse“. Über dem Bild ist jeweils die Intensität gegen die Wellenlänge aufgetragen.

3.2.1.1 Spektralklasse B

Als Vertreter der Klasse B wird hier der Stern Epsilon Cassiopeiae betrachtet.



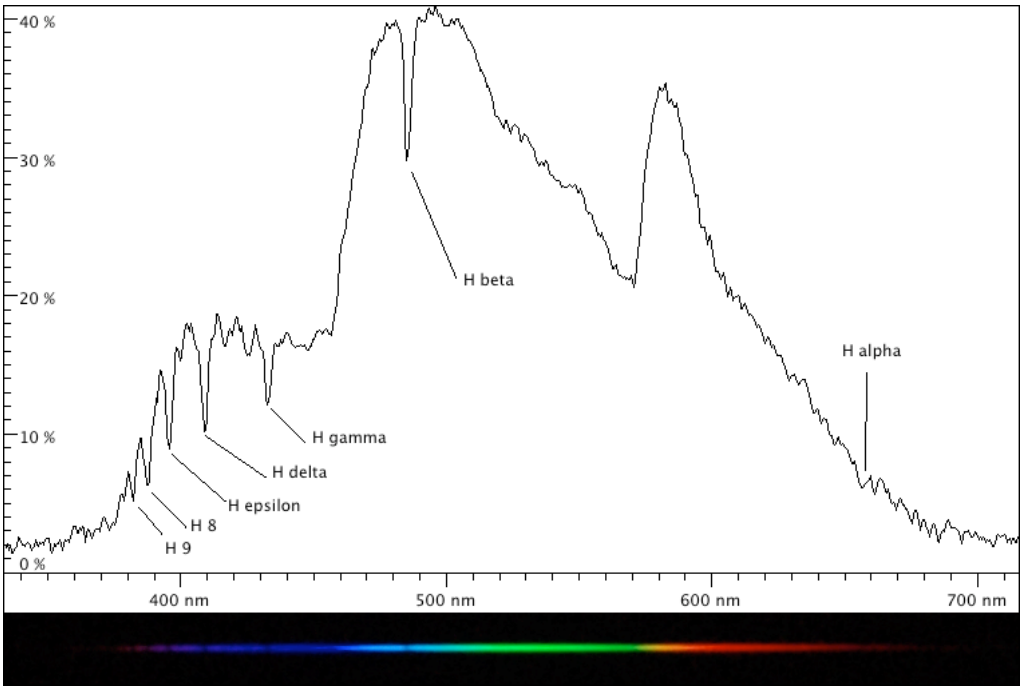
Spektrum 1 Epsilon Cassiopeiae, Spektraltyp B3

Bei der Spektralklasse B ist die Balmerserie des Wasserstoffs bereits recht deutlich. Bei obigem Beispiel sind alle Linien von H bis H 11 dank der guten Qualität dieser Aufnahme auszumachen. Ausserdem konnten Linien des neutralen Heliums (He I) identifiziert werden. Linien ionisierter Elemente sind nicht erkennbar.
Sterne dieser Spektralklasse besitzen eine recht hohe Oberflächentemperatur (11'000 – 25'000 Kelvin). Bei frühen B-Sternen könnten deshalb Linien des ionisierten Heliums beobachtet werden. Bei späteren B-Sternen reicht die Temperatur nicht mehr aus, um das Helium zu ionisieren.
Im Bild des Spektrums fällt auf, dass der blaue Bereich im Vergleich zum roten Teil recht ausgeprägt ist, was mit der hohen Temperatur im Einklang steht.

[2] Private E-Mail vom 6. Juli 2004

3.2.1.2 Spektralklasse A

Viele helle Sterne gehören zu dieser Klasse, wie zum Beispiel alle drei Mitglieder des Sommerdreiecks, Vega, Deneb und Atair. Untenstehend ist das Spektrum von Deneb zu sehen.

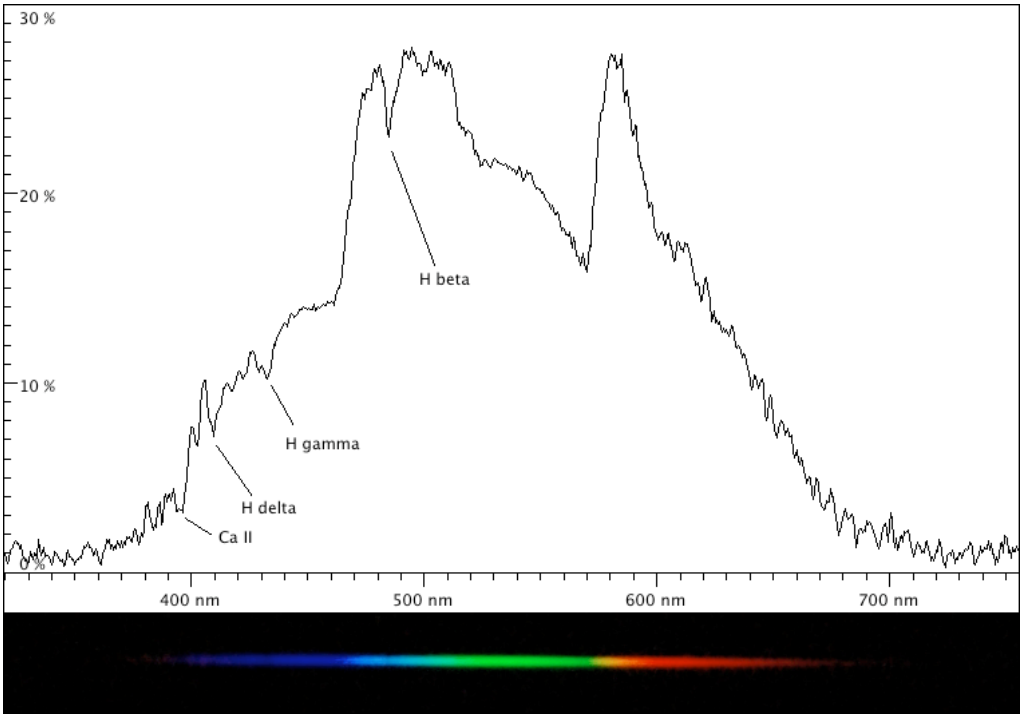


Spektrum 2 Deneb (Alpha Cygni), Spektraltyp A2

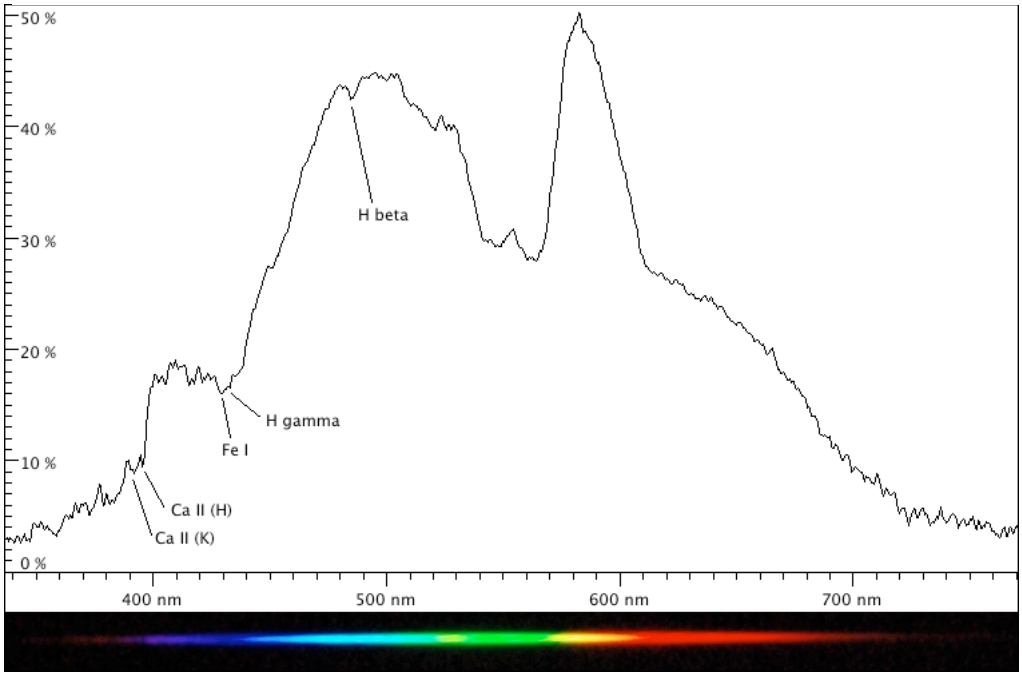
Es leuchtet sofort ein, weshalb die Sterne der Spektralklasse A auch „Wasserstoffsterne“ genannt werden. Die Balmerserie ist dominierend, andere Linien konnten hingegen nicht identifiziert werden.
Die Tiefe der Einbrüche im Graph zeigt die grosse Intensität der Wasserstofflinien. Bei keinem anderen Spektraltyp konnten so starke Linien beobachtet werden. Auch auf dem Bild des Spektrums unterhalb des Graphs sind die Linien deutlich sichtbar.

3.2.1.3 Spektralklassen F bis K

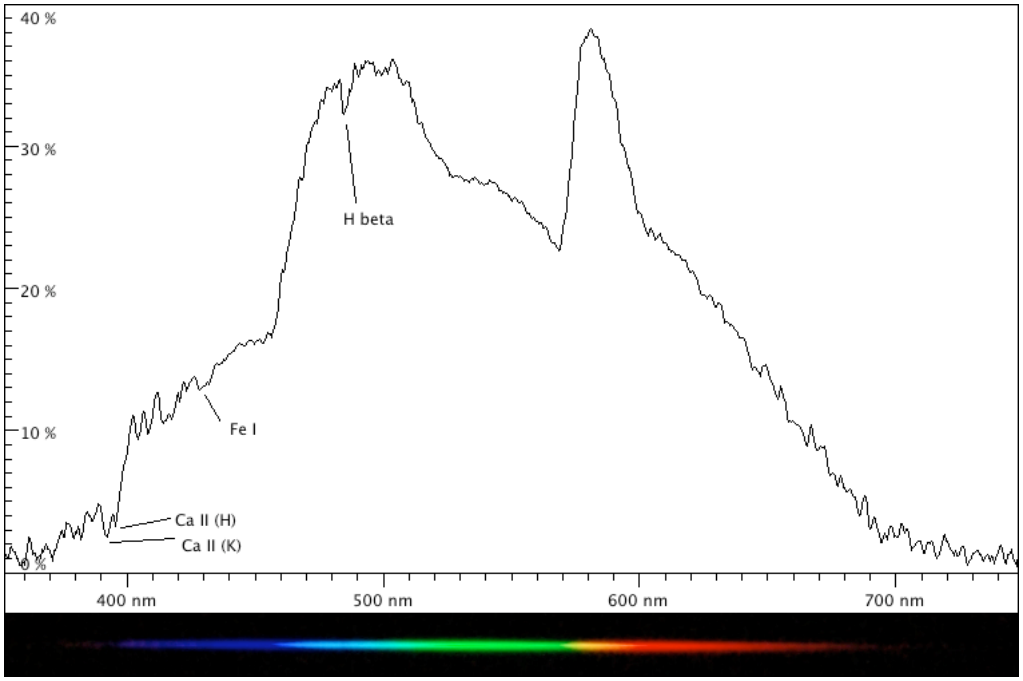
Die Balmerserie ist schon bei der Klasse F deutlich schwächer geworden. Bei den späteren Typen verschwindet sie beinahe vollständig, im Spektrum von Alpha Cassiopeiae ist nur noch die H – Linie zu erkennen.
Bei der Spektralklasse F ist eine Linie bei 397 nm erkennbar. Es handelt sich wohl um eine Überlagerung der H – Linie und der Ca II (H) – Linie.
Bei den beiden späteren Klassen erscheint ausserdem der zweite Teil der Kalzium-Doppellinie, die Ca II (K) – Linie bei 393.4 nm. Eisen taucht im Spektrum von Capella erstmals auf, im Spektrum von Alpha Cassiopeiae sind zwei Absorptionslinien des Eisens sichtbar.
Die Oberflächentemperaturen der Sterne sinkt im Verlauf der Klassen F bis K von 7'500 Kelvin auf 3500 Kelvin. Da Kalzium eine relativ tiefe Ionisationsenergie besitzt, sind auch noch bei diesen tiefen Temperaturen Absorptionen des einfach ionisierten Kalziums vorhanden (Ca II).
Bei den späten Typen reicht die Temperatur nicht aus, um andere Elemente zu ionisieren, es sind entsprechend Linien neutraler Metalle sichtbar (Fe I).



Spektrum 3 Beta Cassiopeiae, Spektraltyp F2



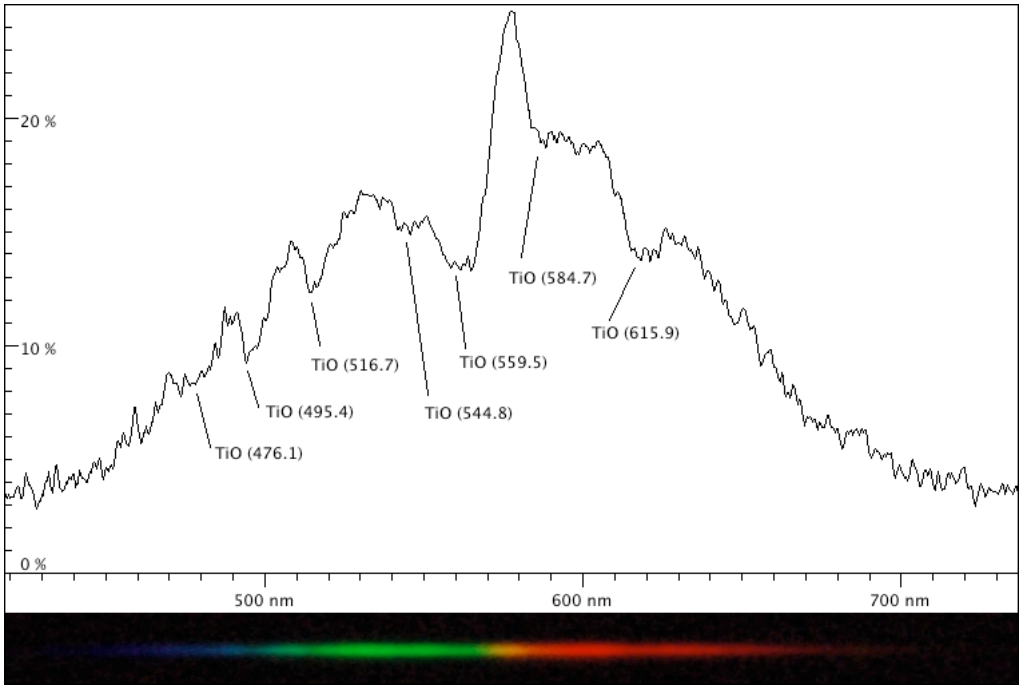
Spektrum 4 Capella (Alpha Aurigae), Spektraltyp G8



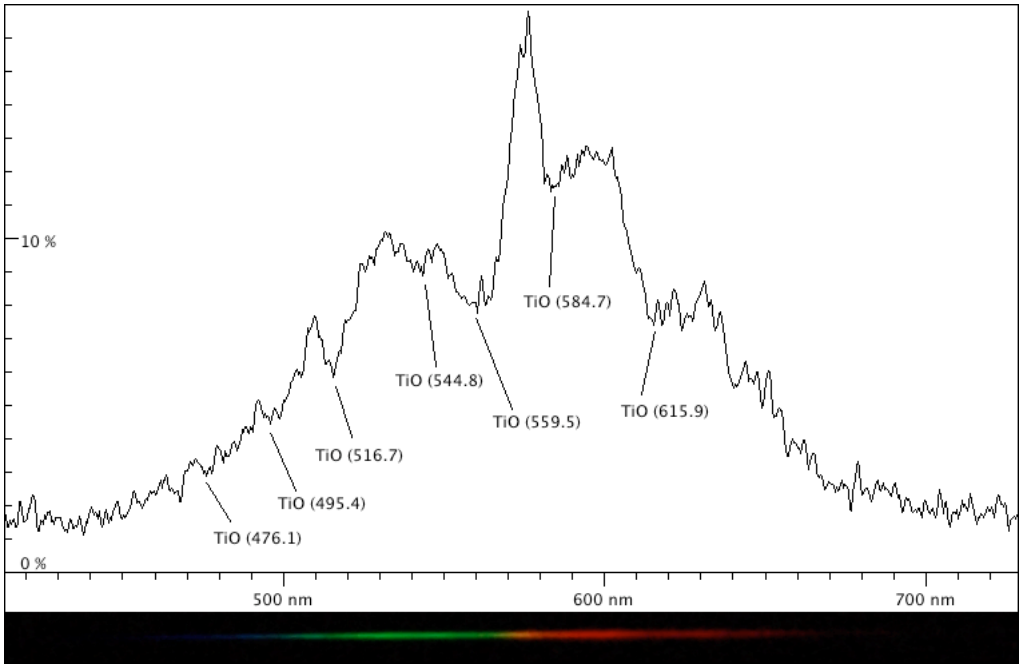
Spektrum 5 Alpha Cassiopeiae, Spektraltyp K0

3.2.1.4 Spektralklasse M

Sterne der Spektralklasse M besitzen eine sehr tiefe Oberflächentemperatur (kleiner als 3500 Kelvin). Es sind gemäss dem Wienschen Verschiebungsgesetz Sterne, deren Strahlungsmaximum im roten Spektralbereich liegt.
Die zwei prominentesten Vertreter dieser Spektralklasse sind die Hauptsterne der Sternbilder Orion und Skorpion, die Sterne Beteigeuze und Antares. Ihre Spektren besitzen ein völlig anderes Aussehen als diejenigen der bisher behandelten Spektralklassen.
Wegen der tiefen Temperaturen können Moleküle in den Atmosphären dieser Sterne existieren. Im Kapitel zur Theorie der Spektren wurde beschrieben, dass Moleküle Absorptionen verursachen, die sich stark von den Linien von Atomen unterscheiden, sie erzeugen so genannte Banden.
In den Aufnahmen von Beteigeuze und Antares sind diese Molekülbanden sehr schön zu erkennen. Sie werden allesamt vom Titanoxid erzeugt.
Ebenfalls sehr deutlich sichtbar ist die Ausgeprägtheit des roten Spektralbereiches verglichen mit dem blauen Anteil.
Diese beiden Spektren zeigen dank dieser deutlichen Merkmale sehr schön die Eigenheiten ihrer Spektralklasse und ermöglichen einem so, ihre physikalischen Eigenschaften nachzuvollziehen.



Spektrum 6 Beteigeuze (Alpha Orionis), Spektraltyp M2



Spektrum 7 Antares (Alpha Scorpii), Spektraltyp M1

3.2.2 Veränderliche Sterne

Unter veränderlichen Sternen versteht man Sterne, die ihre scheinbare Helligkeit variieren. Man unterteilt sie in die zwei Grundtypen der optischen und der physikalischen Veränderlichen.
Optische Veränderliche sind Doppelsterne, deren Lichtwechsel durch eine periodische Verdeckung der einen Komponente durch die andere zustande kommt.

Physikalische Veränderliche sind hingegen Sterne, deren Leuchtkraftvariationen durch Änderungen des Radius und der Temperatur verursacht werden [14].
Physikalische Veränderliche können demnach auch Variationen in ihrem Spektrum aufweisen, die Intensität von bestimmten Linien oder gar der Spektraltyp selber kann einer Schwankung unterworfen sein.
Während einer Schönwetterperiode (27. bis 31. Juli und 2. August) konnte ich den Veränderlichen Delta Cephei, den Prototyp der Cepheiden, beobachten. Um dessen spektrale Eigenheit zu verstehen, müssen kurz die physikalischen Vorgänge bei dieser Art von Veränderlichen unter die Lupe genommen werden.

3.2.2.1 Cepheiden

Die Cepheiden gehören zu der Gruppe der Pulsationsveränderlichen, Sterne, die eine zyklische radiale Volumenänderung aufweisen.
Die Pulsation, die mit einer Änderung der Oberflächentemperatur einhergeht, ist die Ursache für die Leuchtkraftvariation. Die Leuchtkraft ist in folgender Weise von Radius und Effektivtemperatur abhängig [3]:

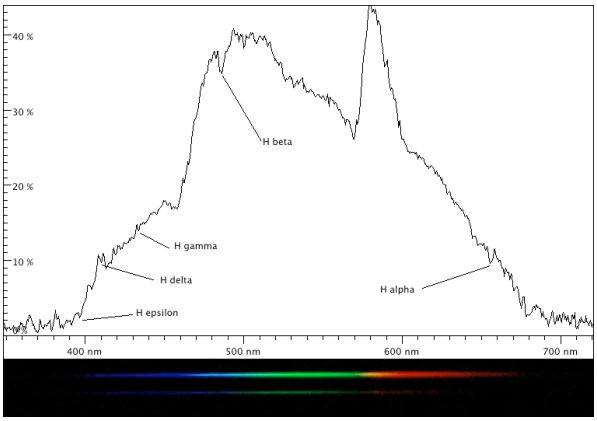
$$L = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \sigma \cdot T_{eff}^{\ 4} \tag{6}$$

Dies folgt aus (3) durch Einsetzen von $E = \frac{L}{4 \cdot \pi \cdot R^2}$.
Die Radiusänderung lässt sich aus Beobachtungen der Radialgeschwindigkeit herleiten, die Effektivtemperatur ist mit spektroskopischen Beobachtungen bestimmbar. Aus diesen beiden Parametern lässt sich die Leuchtkraftvariation bestimmen.
Der Zeitpunkt der maximalen Leuchtkraft fällt recht genau mit der Maximaltemperatur zusammen, jedoch nicht mit dem Zeitpunkt des grössten Radius. Da die Leuchtkraft mit der vierten Potenz der Temperatur, jedoch nur mit der zweiten Potenz des Radius steigt, ist dies zu erwarten.
Die Ursache dieser Art von Veränderlichkeit ist heute recht gut verstanden [3]. Die Sterne befinden sich im Gleichgewicht zwischen nach innen wirkender Schwerkraft und nach aussen wirkendem Druck des Gases. Der Druck (und mit ihm Dichte und Temperatur) nimmt von aussen nach innen monoton zu.
Bei einer lokalen Ausdehnung gelangen Gasmassen in weiter aussen liegende Bereiche, wo die Schwerkraft überwiegt und sie zurückdrängt. Die Gase schwingen zurück und werden von der steigenden Druckkraft angehalten und wieder nach aussen beschleunigt. Dieser Vorgang führt zu einer Oszillation des Sternkörpers.
Diese Schwingung würde wegen Reibungsverlusten zum Stillstand kommen, wenn sie nicht angetrieben würde. Der Antrieb ist im Strahlungsdruck des Sterns zu suchen, der, wegen des von der Dichte abhängigen Absorptionsvermögens des pulsierenden Gases, der Schwingung periodisch Energie zuführt.
Cepheiden besitzen in der Astrophysik eine besondere Bedeutung, da die von Henrietta Swan Leavitt entdeckte Perioden-Leuchtkraft-Beziehung dieser Sterne Entfernungsbestimmungen erlauben.

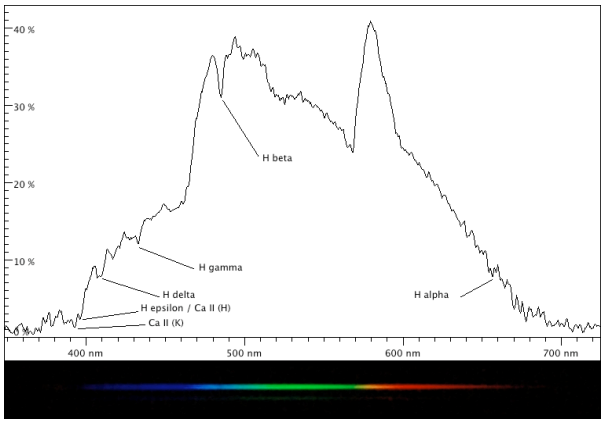
3.2.2.2 Die Beobachtung von Delta Cephei

Die Tatsache, dass Sterne Variationen in ihrem Spektrum aufweisen, ist faszinierend und regt einen an, solche Veränderungen selber nachzuweisen.
Delta Cephei weist eine Periodenlänge von nur 5.4 Tagen auf, daher ist die Beobachtung einer vollen Periode auch bei mitteleuropäischen Wetterverhältnissen mit etwas Glück möglich.

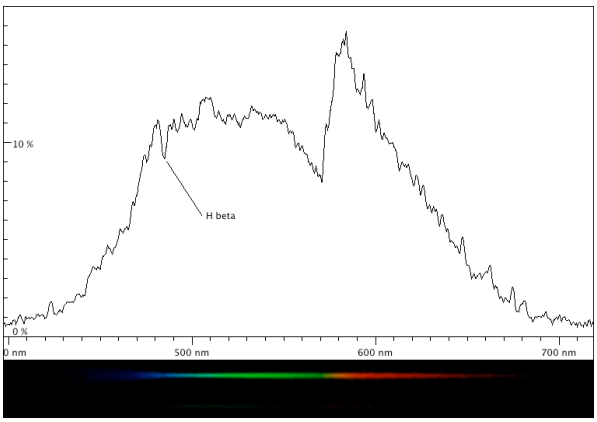
Die ersten fünf der untenstehenden Spektren zeigen einen Zyklus, das Spektrum 13 wäre vom Stadium her zwischen Spektrum 8 und 9 einzuordnen.



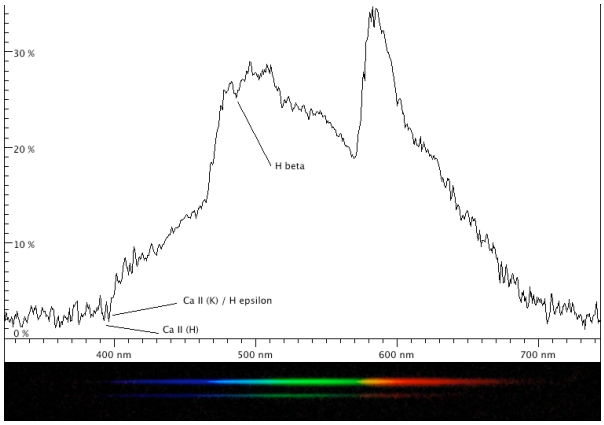
Spektrum 8 Delta Cephei, 27.7.2004



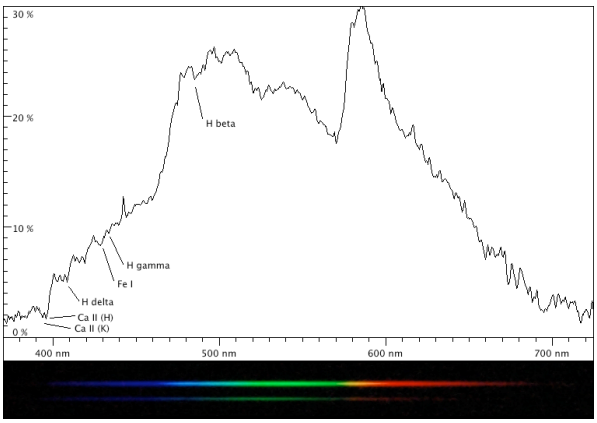
Spektrum 9 Delta Cephei, 28.7.2004



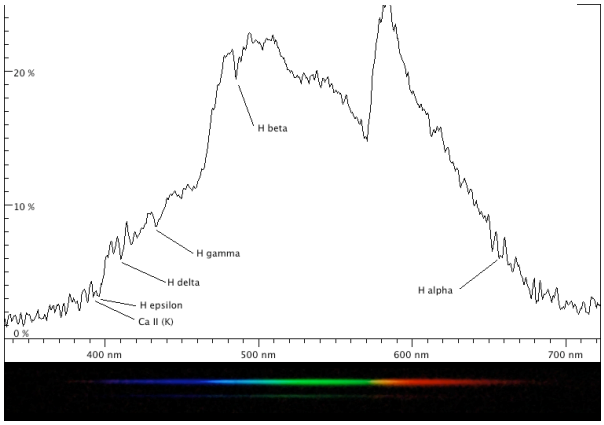
Spektrum 10 Delta Cephei, 29.7.2004



Spektrum 11 Delta Cephei, 30.7.2004



Spektrum 12 Delta Cephei, 31.7.2004



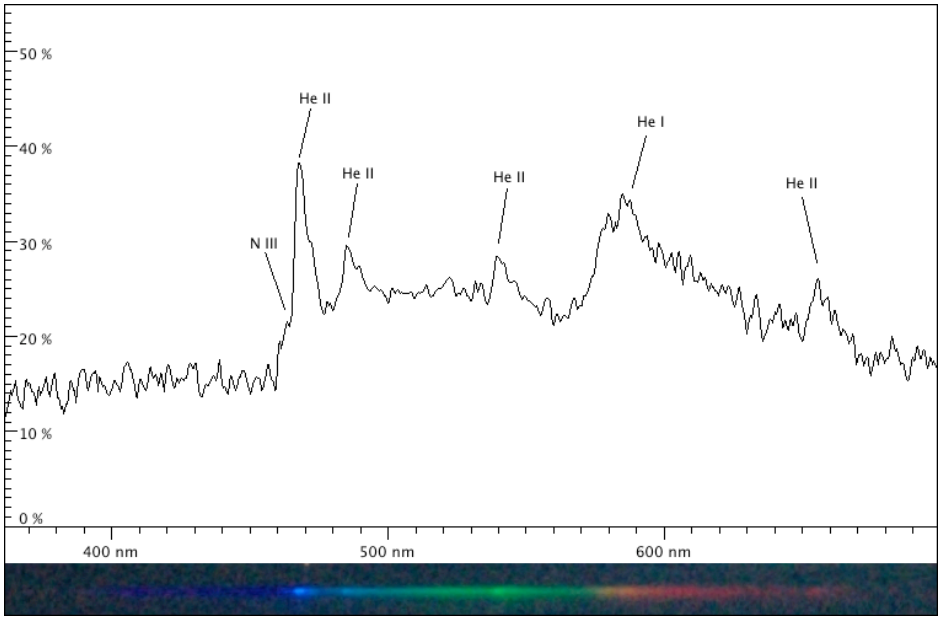
Spektrum 13 Delta Cephei, 2.8.2004

Das Strahlungsmaximum von Delta Cephei wurde laut [8] am 29. Juli um ein Uhr erreicht, also kurz nach der Aufnahme des Spektrums 9. Der Spektraltyp sollte vom Spektrum 9 bis zum Spektrum 12 von F nach G ändern, die Spektren 8 und 13 sollten im raschen Wechsel zurück zur Klasse F liegen.
Wenn man die aufgenommenen Spektren genau betrachtet, so kann man tatsächlich eine Veränderung feststellen, die mit den theoretischen Forderungen vereinbar sind. Die deutlichste Veränderung liegt in der Intensität der H – Linie und im Erscheinen

der Kalzium-Doppellinie: Die am 28. Juli noch sehr deutliche Wasserstofflinie wird bis zum 31. Juli immer schwächer, wogegen die Kalziumlinien an Intensität gewinnen.
Die Ursachen der schlechten Qualität des Spektrums 10 sind in Abschnitt 3.1.2.1 beschrieben.
Der Vergleich der verschiedenen Spektren von Delta Cephei mit denjenigen aus Abschnitt 3.2.1 erlaubt eine ungefähre Zuordnung zu den Spektralklassen und führt zu dem korrekten Ergebnis, dass dieser Stern eine Variation des Spektraltyps zwischen F und G aufweist.

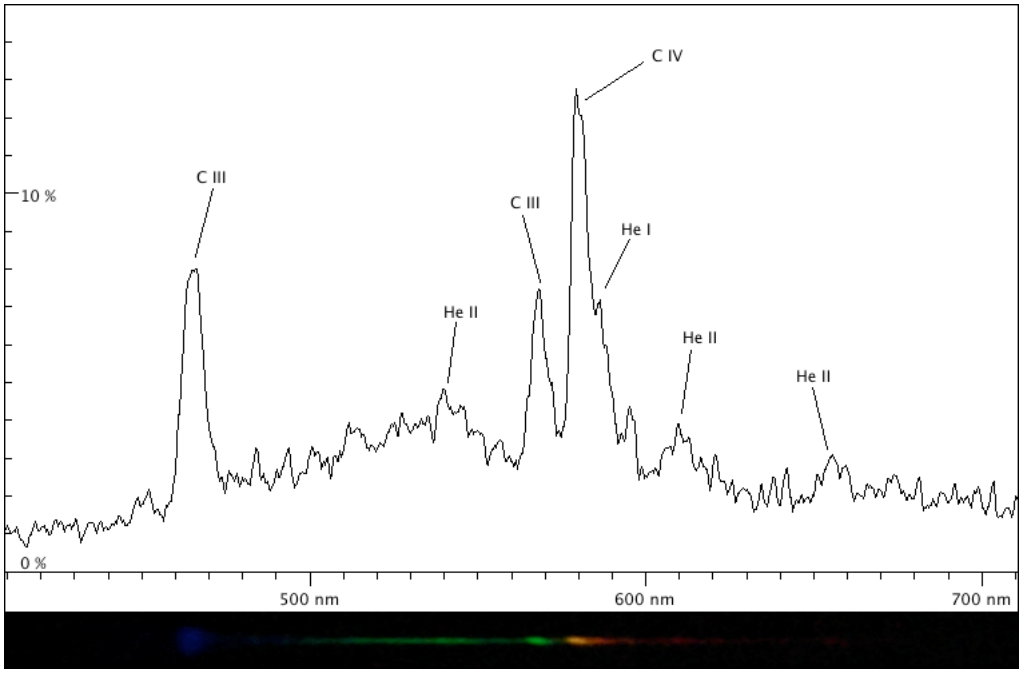
3.2.3 Wolf-Rayet-Sterne

Wolf-Rayet-Sterne zeichnen sich dadurch aus, dass sie sehr breite Emissionslinien in ihrem Spektrum besitzen. Sie bilden eine eigene Spektralklasse W, die in die Untertypen WN und WC aufgeteilt wird, je nachdem, ob das Spektrum von Stickstoff- oder von Kohlenstoffemissionen dominiert wird.
Wolf-Rayet-Sterne sind äusserst leuchtkräftige Sterne, die die höchsten bekannten Effektivtemperaturen aufweisen, nämlich 20'000 bis 80'000 Kelvin [12]. Sie besitzen eine sehr hohe Massenverlustrate, ihre Gashüllen expandieren mit Geschwindigkeiten von 1000 bis 2500 km/s.
Der hohe Massenverlust führt dazu, dass der Stern während kurzer Zeit einen grossen Teil der äusseren Schichten verliert und der Blick auf tiefere Schichten freigegeben wird.
Bei den WN-Sternen können wir Sternregionen sehen, die mit Helium und Stickstoff, den Produkten des Wasserstoffbrennens, angereichert sind. Bei den WC-Sternen führte der noch höhere Massenverlust dazu, dass wir in Regionen hineinsehen, die ursprünglich tiefer im Stern lagen und grössere Mengen Kohlenstoff, das Endprodukt des Heliumbrennens, enthalten.
Die meisten Wolf-Rayet-Sterne befinden sich in recht grosser Entfernung zu uns, daher besitzen sie eine ziemlich niedrige scheinbare Helligkeit (ab ca. 7 mag). Diese Sterne mit dem vorhandenen Equipment zu fotografieren, stellt eine etwas grössere Herausforderung dar. Dank der grossen Lichtausbeute von CCD-Kameras sind die Belichtungszeiten aber nicht allzu lange.

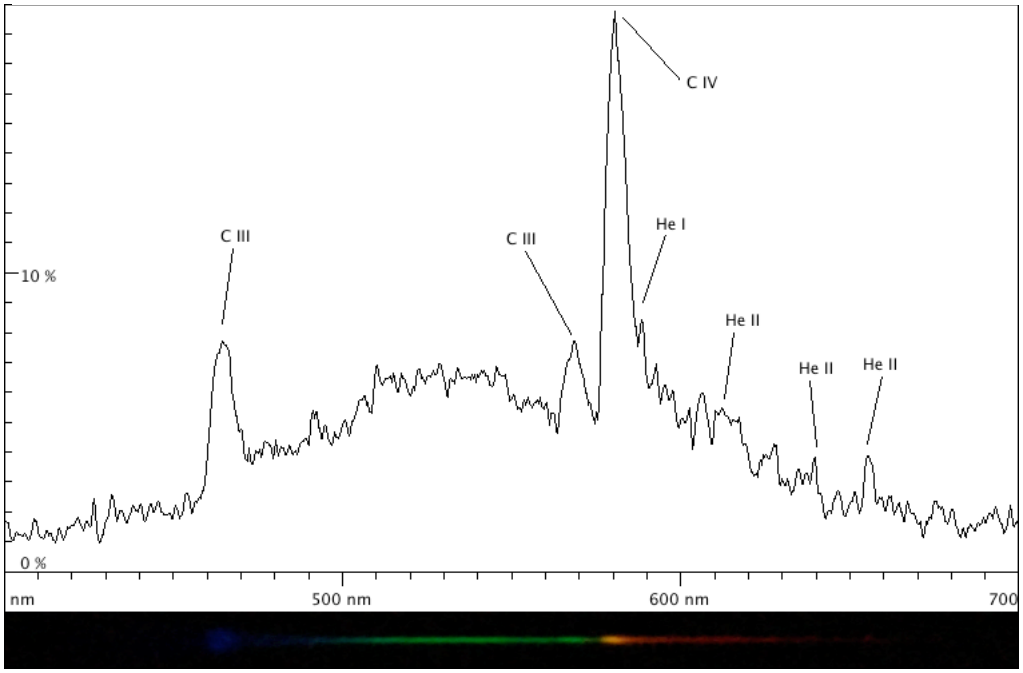


Spektrum 14 V1770 Cygni, Spektraltyp WN6

Das Spektrum 14 zeigt einen WN-Stern. Gut erkennbar sind einige Emissionslinien von Helium und eine Stickstofflinie.
Die zwei folgenden Spektren gehören zu WC-Sternen. Sie lassen sich klar vom WN-Spektrum unterscheiden. Die drei stärksten Emissionslinien stammen von zwei- bzw. dreifach ionisiertem Kohlenstoff (C III und C IV). Auch hier sind wieder Heliumlinien vorhanden.



Spektrum 15 V1042 Cygni, Spektraltyp WC8



Spektrum 16 V1679 Cygni, Spektraltyp WC7

Interessant ist auch die Tatsache, dass sich die hellsten Wolf-Rayet-Sterne des Nordhimmels alle im Sternbild Schwan befinden.

3.2.4 Planetarische Nebel

Bei dieser Objektklasse handelt es sich um relativ regelmässige, kleine Gasnebel, die durch den Ausstoss von Materie durch einen in seiner Entwicklungsphase fortgeschrittenen Stern entstehen. Planetarische Nebel werden vom Zentralstern, bei dem es sich meistens um einen O-Stern handelt, zum Leuchten angeregt.
Der Name der Planetarischen Nebel kommt daher, weil sie zum Teil im Teleskop einem Planeten ähneln, sie haben aber in einem physikalischen Sinn nichts mit Planeten zu tun.
Die Gase der Planetarischen Nebel sind oft hoch angeregt und ionisiert. Die zur Ionisation nötige energiereiche Strahlung stammt vom heissen Zentralstern.
Typisch für die Spektren der Planetarischen Nebel sind die grosse Intensität verbotener Linien (z.B. [O III] und [N II]), Wasserstoffemissionen und ausserdem Emissionslinien des einfach ionisierten Heliums (He II).
Der Vergleich der [O III] – Linien mit der H α – Linie liefert einen Hinweis auf den Anregungszustand des Nebels, denn die Ionisationsenergie von Sauerstoff ist relativ gross, und so deuten die [O III] – Linien auf sehr energiereiche Strahlung hin.

Die Abbildung 3.7 zeigt den Planetarischen Nebel M57, den Ringnebel in der Leier. Er gehört zu den grössten Planetarischen Nebeln.
Was an der Fotografie auffällt, ist die unterschiedliche Färbung von Randregionen und Mitte. Der Rand des Nebels leuchtet rot, während die zentraleren Gebiete intensiv blau leuchten.

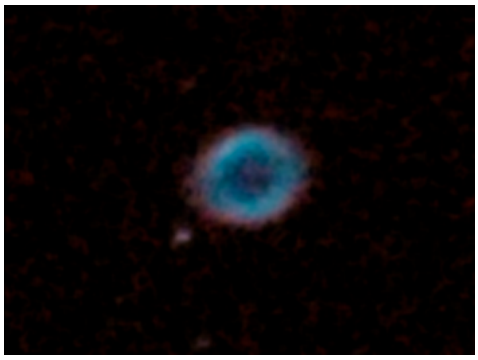
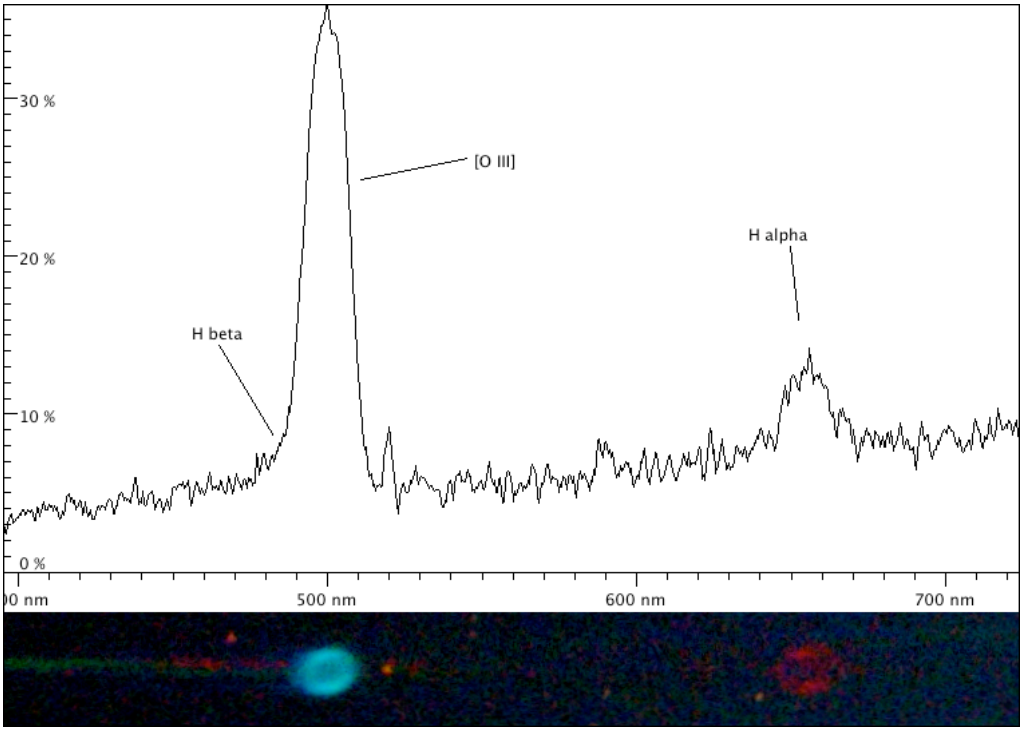


Abbildung 3.6 Der Ringnebel M57

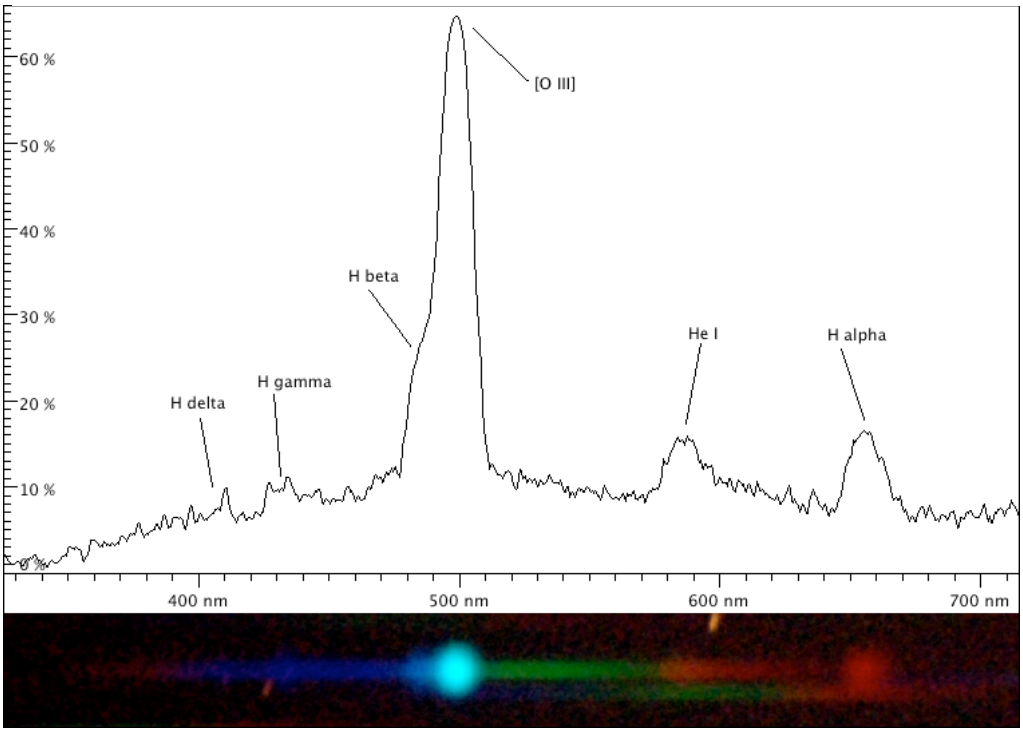
Die spektroskopische Untersuchung gibt uns Aufschluss über diese Erscheinung.
Das Spektrum 17 zeigt deutlich, dass der Ringnebel vorwiegend bei zwei Wellenlängen leuchtet: Im roten Spektralbereich liegt die H α – Linie, im Blaubereich liegt die [O III] – Doppellinie. Das Spektrum lässt ausserdem eine schwache H β – Emission erahnen. Werden die Bilder der zwei hellsten Emissionen verglichen, bestätigt sich die Beobachtung, die bei Abbildung 3.7 gemacht wurde:
Die rote Wasserstoffemission ist vor allem im Randbereich zu finden, während die Sauerstoffemission eher die inneren Bereiche betrifft. Dies leuchtet ein, da in den zentraleren Regionen die Strahlungswirkung des Zentralsterns grösser ist.

Bemerkenswert sind die Spektren von NGC 7027 und NGC 7662. Die ziemlich lang gezogenen Emissionen im roten Bereich sind als Überlagerungen der H α – Linie mit den zwei [N II] – Linien zu verstehen[3]. Dies ist, zusammen mit der auffallenden Intensität der [O III] – Linien und vor allem dem Vorhandensein der He II – Linie bei 468.6 nm, ein Hinweis auf die besonders hohe Anregung der beiden Nebel.

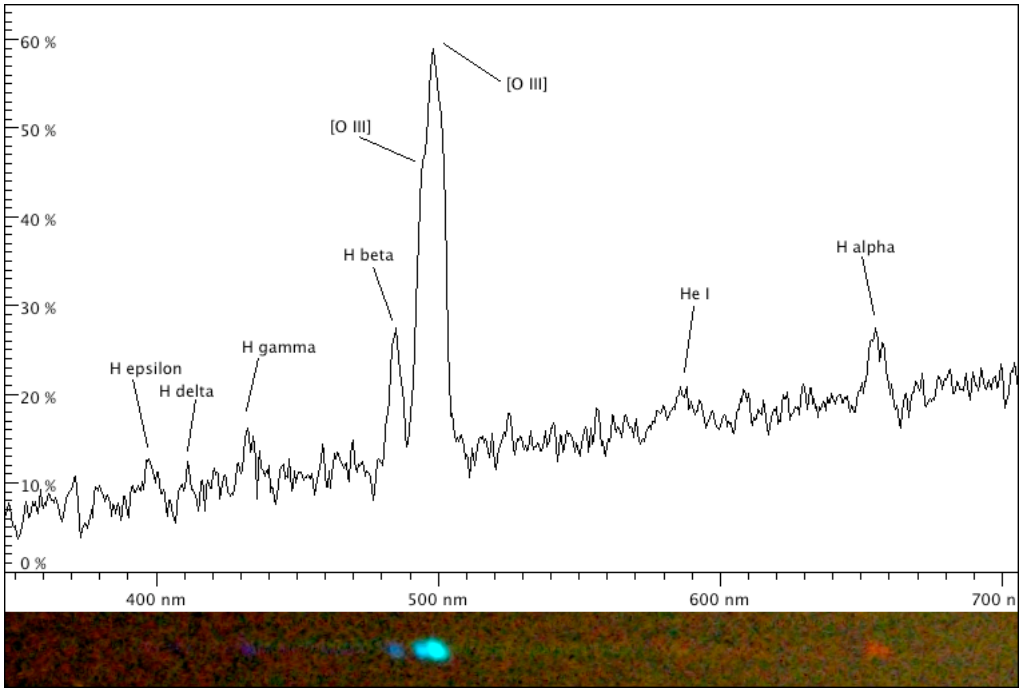
[3] Hinweis von Bernd Hanisch in einer privaten E-Mail vom 1. Oktober 2004



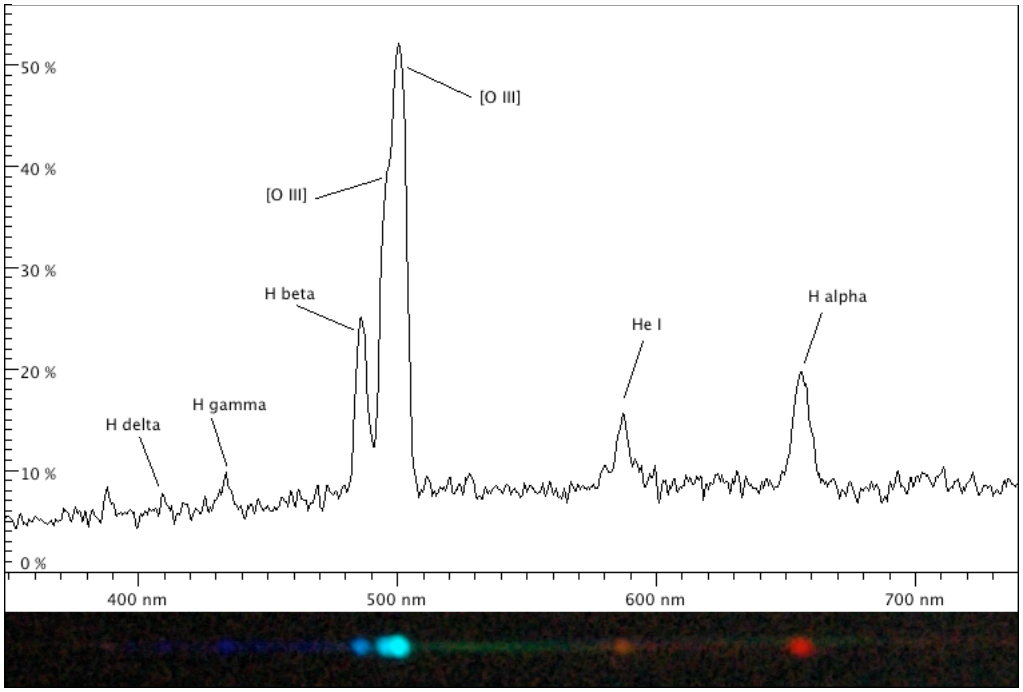
Spektrum 17 M57, Ringnebel in der Leier



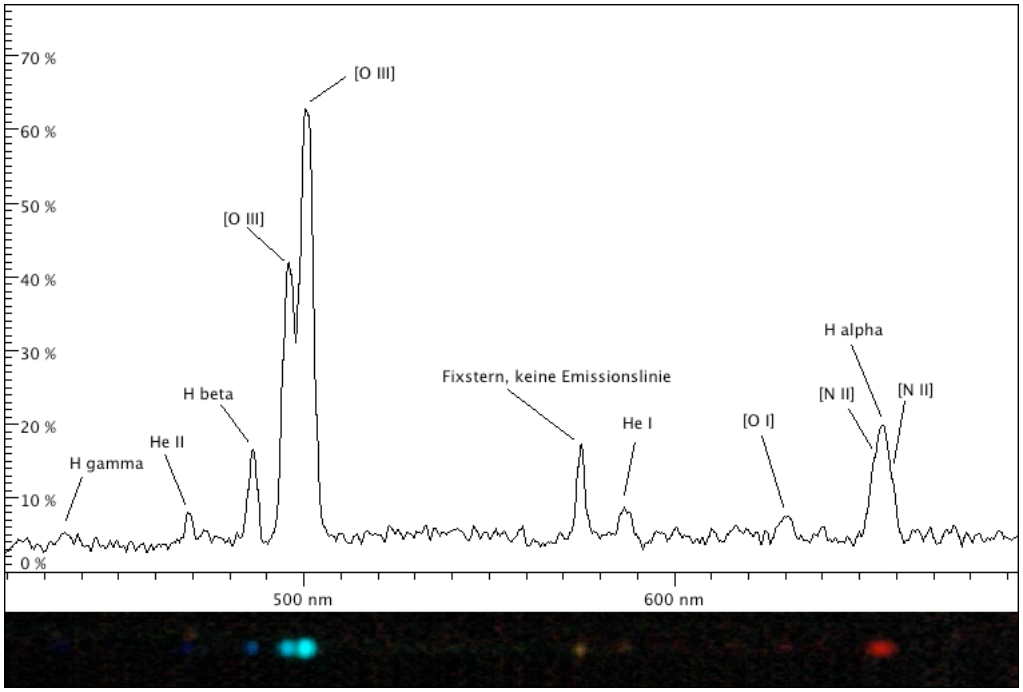
Spektrum 18 NGC 6826



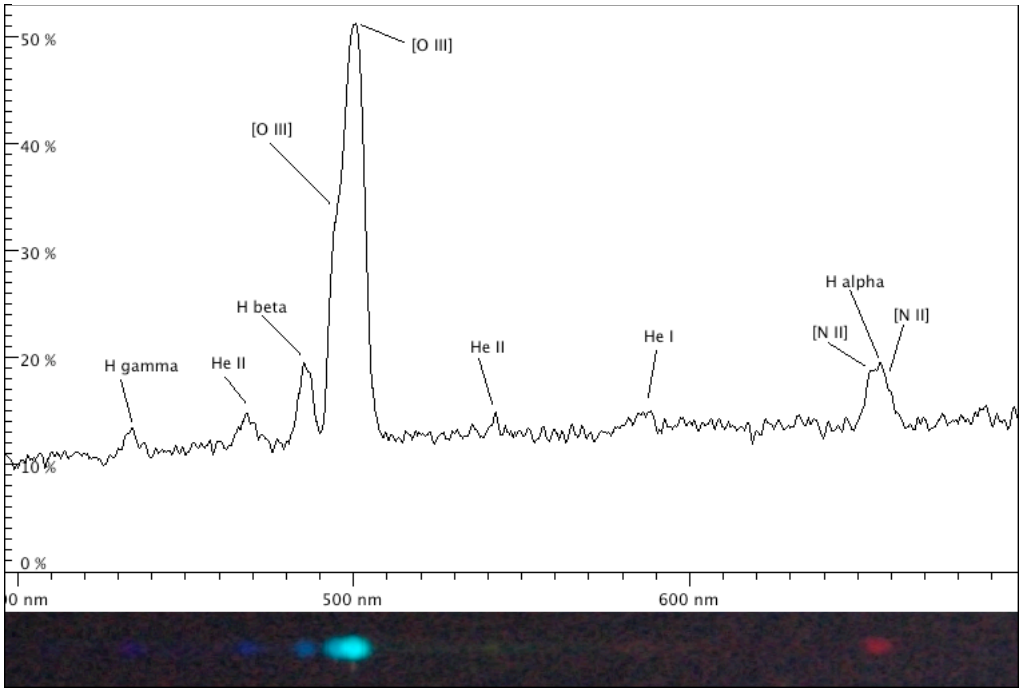
Spektrum 19 NGC 6210



Spektrum 20 NGC 6543



Spektrum 21 NGC 7027



Spektrum 22 NGC 7662

4 Fazit und Ausblick

Ich blicke auf ein halbes Jahr intensiver Beschäftigung mit Spektroskopie zurück. Meine von Anfang an vorhandene Begeisterung für dieses Thema stellte sich als Schlüssel zum erfolgreichen Ausgang dieser Auseinandersetzung heraus, half sie mir doch, mehrfache Misserfolge in der praktischen Betätigung zu überwinden.
Der Neueinstieg in diesen Bereich der Amateurastronomie erfordert Durchhaltewillen. Doch mit der Zeit erkennt man immer besser, wo man bisher Fehler gemacht hat und wie diese zu verhindern sind. Mit zunehmender Erfahrung steigen die Aussichten auf Erfolg, immer bessere Resultate bereiten Freude und erhöhen die Faszination an diesem Thema.
Die notwendige Beschäftigung mit den theoretischen Hintergründen ermöglicht es einem, die physikalischen Prozesse im Universum anhand eigener Beobachtungen und Fotografien nachzuvollziehen. Freude macht sich in einem breit, wenn man erkennt, dass sich die Resultate, die man selber erzielt, in das gewonnene Bild des Stoffs einreihen und der oft als grau empfundenen Theorie die Farbe der Praxis verleihen.
Die Vertiefung in die Materie dieses Themas führt zu einer stärkeren Verbundenheit mit dem Hobby Astronomie als Ganzes. Der betriebene Aufwand, die investierte Zeit und Arbeit, wird mit einem umfassenderen Verständnis, der Freude an den Ergebnissen und mit einer Erweiterung des Bekanntenkreises belohnt. Ich erhielt Kontakt zu Leuten mit ähnlichen Interessen, mit denen ich Erfahrungen austauschen konnte.

In dieser Arbeit verzichtete ich bewusst darauf, ein Unterthema genauer zu behandeln. Ich wollte aufzeigen, worin für den Amateurastronom die Möglichkeiten einer Beschäftigung mit der Spektroskopie bestehen. Ich glaube, dies ist mir gelungen.
Im Verlauf der letzten Monate stellte ich fest, dass sich mir trotz der anfangs als sehr beschränkt betrachteten Ausrüstung eine ganze Reihe spezieller Beobachtungsmöglichkeiten eröffnen. Die Tatsache, dass ich das Potenzial meines Instrumentariums noch nicht ausgeschöpft habe, regt natürlich dazu an, mich weiter mit Spektroskopie zu befassen und einige Gebiete genauer unter die Lupe zu nehmen.
Als Beispiel wäre die Beobachtung Planetarischer Nebel zu nennen, die trotz erhöhter Ansprüche an die Genauigkeit viele interessante Rückschlüsse auf die Physik dieser Objekte ziehen lässt.
Ebenso wäre zu den Wolf-Rayet-Sternen noch manches genauer zu untersuchen. Faszinierend ist, dass diese Sterne, die noch immer Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen sind, auch schon dem Amateur eine Reihe von Besonderheiten zeigen.
Die Möglichkeiten bei der spektroskopischen Beobachtung veränderlicher Sterne erachte ich bei meinem Instrumentarium eher als beschränkt.

Abschliessend bleibt zu sagen, dass ich meine Themenwahl für diese Arbeit in keiner Weise bereue. Die Astrospektroskopie ist für den interessierten Amateur trotz nicht zu unterschätzendem Aufwand eine äusserst lohnenswerte Beschäftigung.

Verzeichnis und Daten der Bilder

Abbildungen

Abbildung 2.1 Das Plancksche Strahlungsgesetz 4
Aus [5] entnommen.
Abbildung 2.2 Energieniveaus beim Wasserstoffatom 6
Aus [6] entnommen.
Abbildung 3.1 Das Teleskop im Einsatz 9
Abbildung 3.2 Das Baader Blazegitter-Spektroskop 9
Abbildung 3.3 Nikon D70 10
Abbildung 3.4 Aufbau der Aufnahmeoptik 11
Abbildung 3.5 Aufbau des Programms „Spektralanalyse“ 12
Abbildung 3.6 Der Ringnebel M57 22
Aufnahme vom 9.7.2004, 22.51 MEZ
Fokal durch 114/900-Newton
Nikon D70, 1.5 Minuten bei 1600 ASA belichtet
Seeing 2, klar

Spektren

Alle Spektren sind, wenn nichts anderes erwähnt ist, mit der Nikon D70 fokal durch das 114/900-Newtonteleskop bei 1600 ASA aufgenommen.

Spektrum 1 Epsilon Cassiopeiae, Spektraltyp B3 13
Aufnahme vom 30.7.2004, 23.49 MEZ, 10 sec. belichtet
Seeing 2, klar
Spektrum 2 Deneb (Alpha Cygni), Spektraltyp A2 14
7.7.2004, 22.37 MEZ, 2 sec. belichtet
Seeing 1, Dunst, Schleierwolken
Spektrum 3 Beta Cassiopeiae, Spektraltyp F2 15
30.7.2004, 23.42 MEZ, 2 sec. belichtet
Seeing 2, klar
Spektrum 4 Capella (Alpha Aurigae), Spektraltyp G8 15
4.10.2004, 23.09 MEZ, 2 sec. belichtet
Seeing 3, klar
Spektrum 5 Alpha Cassiopeiae, Spektraltyp K0 16
30.7.2004, 23.38 MEZ, 2 sec. belichtet
Seeing 2, klar
Spektrum 6 Beteigeuze (Alpha Orionis), Spektraltyp M2 17
5.10.2004, 00.29 MEZ, 1 sec. belichtet
Seeing 2, etwas Dunst
Spektrum 7 Antares (Alpha Scorpii), Spektraltyp M1 17
7.7.2004, 22.36 MEZ, 1 sec. belichtet
Seeing 1, Dunst, Schleierwolken
Spektrum 8 Delta Cephei, 27.7.2004 19
23.21 MEZ, 10 sec. belichtet
Seeing 2, klar

Spektrum 9 Delta Cephei, 28.7.2004 19
22.43 MEZ, 5 sec. belichtet
Seeing 3, klar
Spektrum 10 Delta Cephei, 29.7.2004 19
23.03 MEZ, fokal durch 130/1950-Zeiss-Refraktor (Urania)
2 sec. belichtet
Seeing 3, Dunst
Spektrum 11 Delta Cephei, 30.7.2004 19
22.19 MEZ, 10 sec. belichtet
Seeing 3, klar
Spektrum 12 Delta Cephei, 31.7.2004 19
22.08 MEZ, 10 sec. belichtet
Seeing 3, Schleierwolken
Spektrum 13 Delta Cephei, 2.8.2004 19
22.49 MEZ, 8 sec. belichtet
Seeing 2, klar
Spektrum 14 V1770 Cygni, Spektraltyp WN6 20
30.7.2004, 23.18 MEZ, 1 min. belichtet
Seeing 3, klar
Spektrum 15 V1042 Cygni, Spektraltyp WC8 21
30.7.2004, 00.25 MEZ, fokal durch 130/1950-Zeiss-Refraktor (Urania)
42 sec. belichtet
Seeing 2, klar
Spektrum 16 V1679 Cygni, Spektraltyp WC7 21
30.7.2004, 00.28 MEZ, fokal durch 130/1950-Zeiss-Refraktor (Urania)
33 sec. belichtet
Seeing 2, klar
Spektrum 17 M57, Ringnebel in der Leier 23
27.7.2004, 23.47 MEZ, 4 min. belichtet
Seeing 3, klar
Spektrum 18 NGC 6826 23
3.10.2004, 20.51 MEZ, fokal durch 320/1850-Newton (Uecht)
3 min. belichtet
Seeing 2, etwas Dunst
Spektrum 19 NGC 6210 24
5.10.2004, 21.14 MEZ, 5 min. belichtet
Seeing 2, klar
Spektrum 20 NGC 6543 24
6.9.2004, 21.48 MEZ, 5 min. belichtet
Seeing 3, klar
Spektrum 21 NGC 7027 25
8.9.2004, 21.34 MEZ, 3 min. belichtet
Seeing 2, klar
Spektrum 22 NGC 7662 25
4.10.2004, 22.30 MEZ, 4 min. belichtet
Seeing 2, wenig Dunst

Literaturverzeichnis

[1] Biefang, Joachim: Blazegitter, SuW 1/2002, S. 67

[2] Burnham, Robert, Jr.: Burnham's Celestial Handbook, Dover Publications, Inc., 1978

[3] Drechsel, H.; Herczeg, T. J.: Veränderliche Sterne. In: G. D. Roth (Hrsg.): Handbuch für Sternfreunde, 4. Auflage, Band 2, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1989

[4] Fachgruppe Spektroskopie der VdS: Einführung in die Spektroskopie für Amateure, <http://www.eso.org/~akaufer/docs/EinfSpek.pdf>

[5] Grehn, J.; Krause J. (Hrsg.): Metzler Physik, 3. Auflage, Schroedel Verlag, Hannover, 1998

[6] Häfner, Reinhold: Grundlagen der Spektralanalyse. In: G. D. Roth (Hrsg.): Handbuch für Sternfreunde, 4. Auflage, Band 1, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1989

[7] Karkoschka, Erich: Atlas für Himmelsbeobachter, 3. Auflage, Franckh-Kosmos Verlag, Stuttgart, 1997

[8] Keller, Hans-Ulrich: Kosmos Himmelsjahr 2004, Franckh-Kosmos Verlag, Stuttgart, 2003

[9] Neckel, Th.: Die Milchstrasse und ihre Objekte. In: G. D. Roth (Hrsg.): Handbuch für Sternfreunde, 4. Auflage, Band 2, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1989

[10] Pollmann, Ernst (Hrsg.): Spektrum, Mitteilungsblatt der Fachgruppe Spektroskopie der Vereinigung der Sternfreunde e.V., Rundbrief Nr. 13, 1997

[11] Sinnot, Roger; Perryman, Michael: Millenium Star Atlas, Sky Publishing Corporation, 1997

[12] Tonkin, Stephen (Ed.): Practical amateur spectroscopy, Springer-Verlag, London, 2002

[13] Wurm, Karl: Die Planetarischen Nebel. In: Kienle, Hans (Hrsg.): Scientia astronomica, Band 1, Akademie-Verlag, Berlin, 1951

[14] Zimmermann, Helmut; Weigert, Alfred: Lexikon der Astronomie, 8. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, 1999

Verdankungen

Ich danke ganz herzlich allen Personen, die mir bei der Erstellung dieser Arbeit behilflich waren. Mein besonderer Dank geht an

- Kurt Niklaus, den Betreuer der Sternwarte Uecht. Er stellte mir in grosser Hilfsbereitschaft und mit Begeisterung seine Zeit und das Instrumentarium der Sternwarte zur Verfügung.
- Bernd Hanisch, Mitglied der Fachgruppe Spektroskopie der Vereinigung der Sternfreunde Deutschland. Er unterstützte mich bei der Auswertung der Spektren von Wolf-Rayet-Sternen und Planetarischen Nebeln, zu denen er mir auch detaillierte Informationen sandte.
- Ernst Pollmann, Leiter der Fachgruppe Spektroskopie der VdS. Er sandte mir Informationen zu dem Baader-Blazegitter und beriet und ermutigte mich während meinen ersten Aufnahmeversuchen.
- meine Familie, die mir oft geduldig zuhörte.