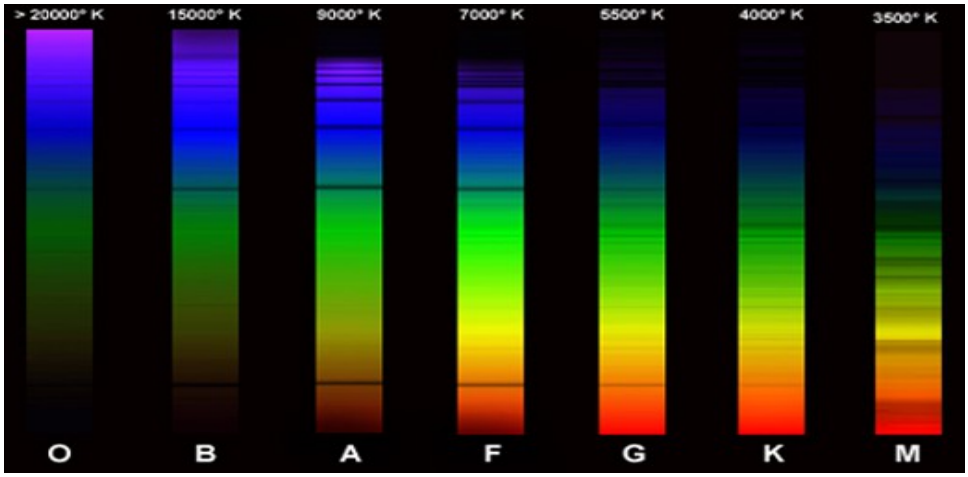
Harvard-Spektralklassifikation von Sternen und Einordnung im Hertzsprung-Russell Diagramm



[A1]

Thesis

zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Applied Science (B.Apl.Sc.) im kombinatorischen Studiengang Bachelor of Arts der Bergischen Universität Wuppertal

Teilstudiengang: Physik

vorgelegt von
Konstantinos Kiosseoglou
Kreiersiepen 2, 42555 Velbert
Matrikelnr.: 0839798

Mentor: Dipl. Physiker Bernd Koch
Erstprüfer: Herr Prof. Dr. Grebe-Ellis
Zweitprüfer: Herr Dr. Passon

Datum der Abgabe
27.3.2017

Überarbeitete Version

Inhaltsverzeichnis

1.Einleitung ... 1
1.1.Motivation und Zielsetzung ... 1
1.2. Astronomie ... 1
2.Theoretische Grundlagen ... 2
2.1.1.Welle-Teilchen-Dualismus ... 2
2.2.Das elektromagnetische Spektrum ... 2
2.3.Spektroskopie ... 4
2.3.1.Das Prismenspektrum ... 4
2.3.2.Das Gitterspektrum ... 5
2.3.3.Das Blaze Gitter ... 5
2.4.Das Bohrsche Atommodell ... 6
2.4.1.Arten von Spektren ... 8
2.5.Wärmestrahlung ... 9
2.6.Die Harvard Klassifikation ... 10
2.7.Leuchtkraftkklasse ... 13
2.8.Das Hertzsprung-Russell Diagramm ... 14
3.3 Praktischer Teil ... 15
3.1.Aufbau, Messung ... 16
3.2.Exemplarische Auswertung ... 19
3.3.Arbeitsschritte zur Einordnung in das Harvard Schema ... 24
3.4.Darstellung der Ergebnisspektren ... 24
3.5.Einordnung der Ergebnisse ... 32
3.6.Problematisierung der Flusskalibrierung ... 33
4.Fazit ... 35

Abstract:

Die Arbeit beleuchtet die Arbeitstechniken, welche zur Erstellung des Hertzsprung-Russell Diagramms (kurz: HRD) notwendig sind. In einem erstem Schritt werden Sternspektren aufgenommen und mit Hilfe der Harvard-Klassifikation ausgewertet, um die unterschiedlichen Spektraltypen und den Arbeitsprozess der computergestützten Auswertung darzustellen. Im weiteren wird die Systematisierung über die Harvard Klassifikation diskutiert um schlussendlich die Darstellung und die Erweiterung im HRD nachzuvollziehen.

In einem abschließenden didaktischen Aufarbeitung soll die Arbeit als exemplarisches Projekt die Möglichkeiten aufzeigen, Astronomie als didaktische Alternative zum klassischen Physikunterricht aufzufassen. Zudem erfolgt eine Darstellung, welche Lehrplaninhalte der gymnasialen Oberstufe NRW im Rahmen des Projekts verortet werden können.

1. Einleitung

1.1. Motivation und Zielsetzung

Durch Beobachtungen und Gespräche mit Schülern - im Rahmen meines Praxissemesters am Carl-Fuhlrott-Gymnasium (CFG) in Wuppertal Cronenberg - konnte ich im angebotenen MINT-EC Fach Astronomie einen Einblick in eine neue Form von Schule und Unterricht bekommen; diese neue Form kann ich nur im Sinne von 'kann'-Veranstaltung und eben nicht als 'muss'-Veranstaltung bezeichnen/umschreiben, da viele der teilnehmenden Schüler im Rahmen ihrer Projekte, im Gegensatz zu meinen Erleben derselben Personen im Regelunterricht, mit einer höheren motivationalen Haltung agierten. Als einer der Hauptgründe wurde ein hoher Grad an Autonomie, die Neuartigkeit des Themas und die praktische Arbeit genannt. Die Vielzahl und vor allem die Güte der in den letzten Jahren erstellten Projektarbeiten haben mir zudem veranschaulicht, dass Schülern über diese ergebnisorientierte Projekte neben einem Wissens- und Kompetenzerwerb vor allem eine Reflexionsbefähigung über die Performanz Ihrer Arbeitsgemeinschaft und der Individualanteile ermöglicht wird.
Im Sinne eines exemplarischen Beispiels sollen in dieser Arbeit die praktischen Aspekte von Messung, Bearbeitung und Auswertung eines solchen Arbeitsprojektes dargestellt werden, so dass diese als Vorlage für ein Astronomieprojekt dienen kann.

1.2. Astronomie

Astronomie gilt als eine der ältesten Wissenschaft überhaupt. Die Auseinandersetzung mit den Himmelsobjekten kann in der Kulturgeschichte der Menschheit als eine treibende Kraft für Kulte, Religionen und Wissenschaften bezeichnet werden, da aus den Wahrnehmungen der uns umgebenden Realität Artefakte wie die Himmelscheibe von Nebra, die Pyramiden oder Stonehenge uns zu Einblicken in die Weltbilder der verschiedenen Epochen befähigen. Die Beobachtungen der Positionsastronomie haben in den verschiedenen Kulturen über Kalendersysteme ermöglicht, den wiederkehrenden Wechsel der Jahreszeiten zu prognostizieren und Ackerbau zu planen ([12], S.37) oder die Orientierung nach Himmelsrichtungen unabhängig von der regionalen Topographie zu ermöglichen.

Der wechselseitige Zusammenhang zwischen der beobachtenden Astronomie und den erklärenden Wissenschaften Mathematik und Physik haben im Verlauf der Geschichte zu einer Vielzahl von Erkenntnissen geführt, lange bevor daraus die für uns heute selbstverständlichen Anschauungen entstanden sind. Populäre Meilensteine in der Geschichte der Astronomie sind bspw. der Paradigmenwechsel durch die Ablösung des ptolemäischen, geozentrischen Weltbildes durch Kopernikus oder die Entdeckung des Gravitationsgesetzes durch Newton als Fundamentalprinzip

der Himmelmechanik. Die Vielzahl der heutigen Kategorien und Untersuchungsgegenstände hat jedoch eines gemeinsam: jegliche Information des uns umgebenden Weltalls gelangt in Form elektromagnetischer Strahlung zu uns, so dass jedwede Erkenntnisse über den Kosmos bis hin zu dem Ursprung der Zeit und den Dimensionen der Unendlichkeit erst durch die fortwährende Entwicklung naturwissenschaftlicher Untersuchungsmethoden ermöglicht wurden. Das zentrale Verfahren der modernen Astronomie , die Spektroskopie, soll in dieser Arbeit - anhand der Klassifikation von Sternspektren - behandelt werden.

2. Theoretische Grundlagen

2.1.1. Welle-Teilchen-Dualismus

In der geschichtlichen Entwicklung ist die Betrachtung der konkurrierenden Theorien des 17. Jahrhunderts nötig, um sich der Entstehung des heute gängigen Begriff des 'Licht-Quants' bewusst zu machen. Der Streit, ob Licht nun aus kleinsten Partikeln bestehe (Newton) oder ein Wellenphänomen seit (Huygens) wurde Anfang des 19.Jahrhunderts durch das Doppelspaltexperiment von Thomas Young in Richtung der Wellentheorie vorübergehend entschieden, indem Photonen entgegen dem damaligen Verständnis klassischer Teilchenphysik ein Interferenzmuster erzeugten.

Die Erkenntnis über die Eigenschaften eines Objektes, das weder Welle noch Teilchen ist, sondern je nach experimenteller Anordnung die eine oder andere Eigenschaften zeigt, erforderte eine neue begriffliche Fassung: das 'Quant', welcher durch die Einführung der Quantenmechanik durch einen Vortrag von Max Planck am 19. Oktober 1900 die Ära einer 'neuen Physik' einleitete [5] . In dem Begriff vereinigen sich klassische Begriffe (Impuls,Masse) mit Wellenbegriffen (Wellenlänge,Frequenz). 1924 wurde dieser scheinbare Widerspruch von Louis de Broglie aufgebrochen, indem er jedem physikalischen Objekt eine Wellenlänge zuordnete, mit der Beziehung: $\lambda = \frac{h}{p}$, mit λ: Wellenlänge, h: Plancksches Wirkungsquantum, p : Impuls

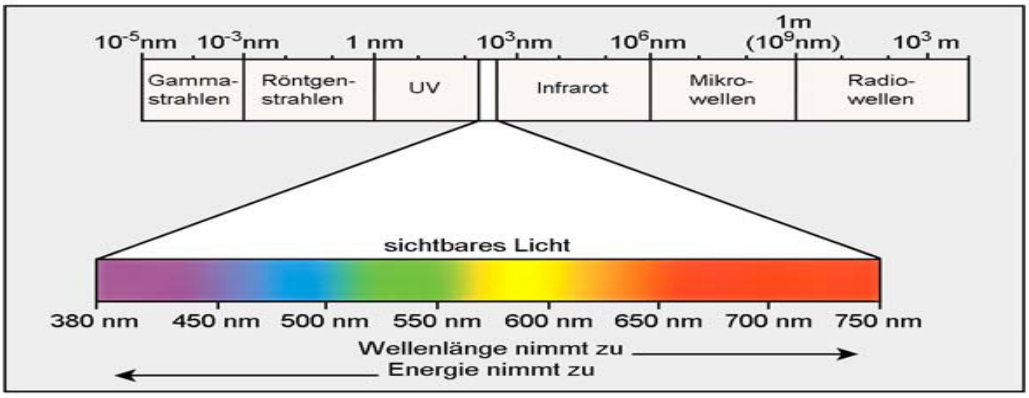
Die Kenngröße der Wellenlänge macht es möglich, durch Untersuchungen von Licht aus astronomischen Quellen Aussagen über die makroskopischen Objekte zu gewinnen.

2.2. Das elektromagnetische Spektrum

Das Licht eine Vielzahl von Wellenlängen, Spektrum genannt, beinhaltet wurde bereits durch die dispersive Aufspaltung von Sonnenlicht mit Hilfe eines Glasprismas im 'Experimentum Crucis' [9] durch Newton 1666 bewiesen. Dabei sprechen wir umgangssprachlich von Licht, obwohl der Bereich der elektromagnetischen Strahlung viel weiter reicht, als unser Auge durch die Wahrnehmung des sichtbaren Lichtes vermuten lässt.

Der in Abb. 1 veranschaulichte Bereich stellt nur Teilausschnitt des vom menschlichem Auge wahrnehmbaren Bereiches von ca. 400-700 nm [1nm=10^{-9} m] dar.

Abb. 1: Spektralbereich elektromagnetischer Strahlung



[A1]

Die charakteristischen Kenngrößen einer elektromagnetischen Welle sind dabei :

- die Energie E , mit [E]=eV (Elektronenvolt)
- die Frequenz f , mit [f]=s^{-1}=Hz (Hertz)
- die Wellenlänge λ. , mit [λ.]= nm =10^{-9} m

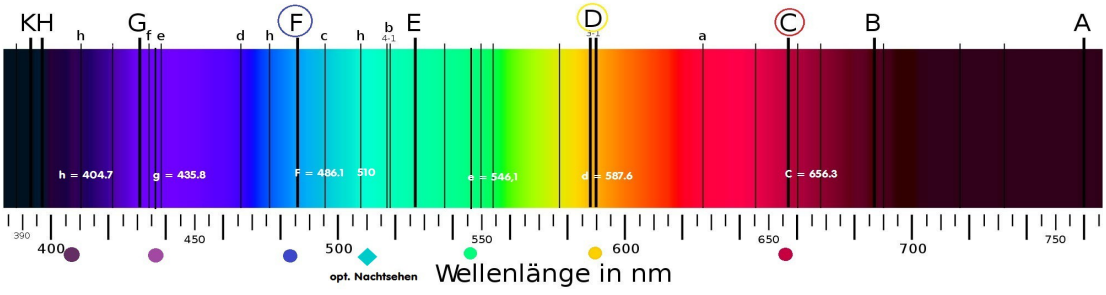
Die elementaren Formeln, mit denen die Beziehung dieser Größen zueinander ausgedrückt werden kann sind :

$$E = h * f \quad , mit \quad f = \frac{c}{\lambda} \quad , c = 2{,}99 * 10^{8} \frac{m}{s} \quad und \quad h = 6{,}626\,10^{-34}\,Js \qquad (1)$$

Also ist die Energie klein bei großer Wellenlänge und umgekehrt.

Gerade diese zuvor skizzierte Eigenschaft des Lichts als Welle zu wirken, macht es uns heute möglich dieses entweder mit Hilfe eines Prismas oder eines Gitters spektral zu zerlegen. 150 Jahre nach Newton untersuchte Joseph v. Fraunhofer das Sonnenspektrum mit verschiedenen Prismen und dokumentierte dunkle Linien als fehlende Anteile im Spektrum, die erst durch die Erkenntnisse der Elementaranalyse von Robert Bunsen und Gustav Kirchhoff ab 1859 interpretiert werden konnten.

Abb.2: Das Fraunhoferspektrum



[A2]

Thermisch angeregte Elemente zeigen ein spezifisches Muster von Linien in der spektralen Analyse, bzw. absorbieren sie diese äquivalenten Energien, wenn sie sich zwischen einer Kontinuum-Quelle und dem Detektor befinden. Dieser Sachverhalt konnte erst durch die Erkenntnisse der modernen Atomphysik aufgeklärt werden. Diese Energien entsprechen den Übergängen diskreter elektronischer Zustände der Energieniveaus im Atom.

2.3. Spektroskopie

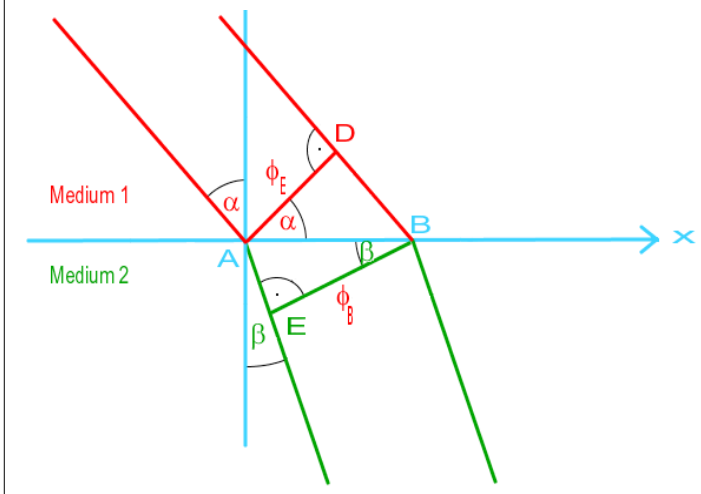
2.3.1. Das Prismenspektrum

Wird ein Lichtstrahl beim Übergang in ein optisch dichteres Medium zum lotrecht gemessenen Einfallswinkel hin abgelenkt spricht man von Brechung oder Dispersion. Bei der Herleitung des durch geometrische Überlegungen leicht zugänglichen Gesetzes von Snellius mit:

Abb.3: Das Snelliussche Brechungsgesetz

$$n = \frac{\sin\ \alpha}{\sin\ \beta} = \frac{c_1}{c_2} \quad , mit\ n \propto \frac{1}{\lambda} \quad (2)$$

C_1 Lichtgeschwindigkeit im Medium 1
C_2 Lichtgeschwindigkeit im Medium 2



[A4]

wird somit ausgesagt, dass der Brechungswinkel n eine Funktion der Geschwindigkeitsrelation bei geringster Gesamtlaufzeit (Fermatisches Prinzip) der jeweiligen Medien ist. Dabei ist die Geschwindigkeit im dichteren Medium immer geringer als im optisch dünneren Medium.
Der Brechungsindex n ist dabei zudem noch Wellenlängenabhängig n=n(λ), stellt jedoch für eine spezifische Wellenlänge eine Materialkonstante dar. Zum Verständnis der Funktionsweise eines Prismas ist dies elementar, da nun nachvollziehbar ist, dass rotes Licht schwächer gebrochen wird als blaues Licht. Die Lichtbrechung am Prisma ist also antiproportional $\frac{1}{\lambda}$ zur Wellenlänge!

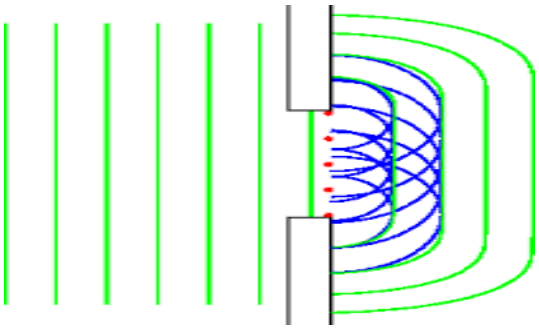
2.3.2. Das Gitterspektrum

Bei der Verwendung von optischen Gittern wird zwischen Transmission und Reflexionsgittern unterschieden. Dabei handelt es sich um eine sich wiederholende Abfolge von Spalten oder äquivalenten Reflexionsbereichen. Die Beschreibungsgrößen solcher Gitter sind die Gitterkonstante g als Spaltabstand ([g]= m) oder die Spaltbreite b. Der wirkende Mechanismus mit welchem die Wellenlängen aufgespalten werden wird als 'Beugung' bezeichnet und ist auf die Interferenz von Wellenmaxima zurückzuführen, die sich aus dem Gangunterschied von Wellen zwischen zwei benachbarten Spalten ergibt. Hintergrund hinsichtlich der Wellennatur des Lichtes ist das Prinzip nach Huygens, bei dem jeder Punkt einer Welle gleichzeitig wieder Ausgangspunkt einer neuen Elementarwelle ist. Somit entstehen Muster der positiven Überlagerung als Funktion der Wellenlänge, welche durch die Formel

$$I(\sin\beta) = I_0 \cdot \left(\frac{\sin\phi}{\phi}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sin N\alpha}{\sin\alpha}\right)^2 \quad \text{,mit} \quad \phi = \frac{\pi b}{\lambda}\sin\beta\,,\ \alpha = \frac{\pi g}{\lambda}\sin\beta\ \,,\ N = Ordnung$$

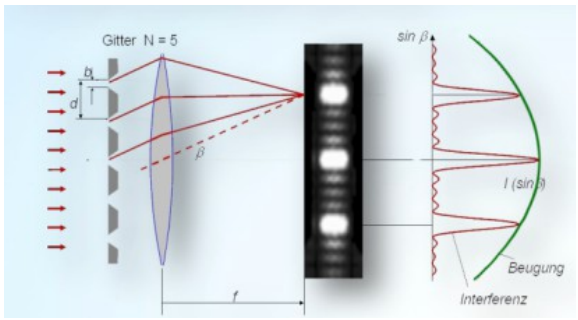
beschrieben werden ([5], S.743). Der Winkel ϕ bezeichnet dabei den Winkel zwischen der Gitternormalen und der Ordnung.

Abb. 4: Huygensches Prinzip



[A5]

Abb. 5: Beugung am Gitter



[A6]

Die sich wiederholenden Einheiten der Intensitätsmaxima in A6 werden dabei als 'Ordnung' bezeichnet. Zudem ist noch anzumerken, das mittig in der 0.Ordnung eine Mischung aller Wellenlängen stattfindet und bspw. somit bei der Verwendung von Tageslicht wieder ein weißer Fleck entsteht.

2.3.3. Das Blaze Gitter

Da Transmissionsgitter die gegebene Lichtintensität auf alle Ordnungen verteilt und das Trägermaterial eine wellenlängenabhängige Durchlässigkeit besitzt ist dieses für belichtungsschwache Objekte eher ungeeignet. Abhilfe liefert die besondere Bauweise

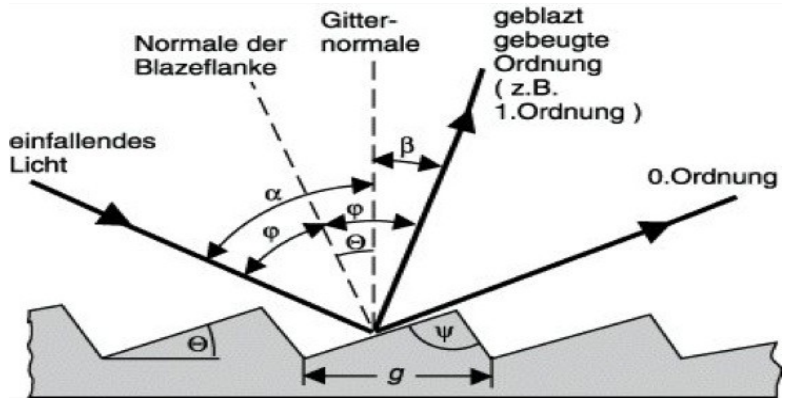
des Blazegitters mit unsymmetrischem, dreieckförmigen Furchenprofil , welche über den Blazewinkel θ für eine bestimmte Genzwellenlänge λ_{max} berechnet wird[15]. Die besondere Bauform ermöglicht so mehr Lichtintensität in die 1. Ordnung zu leiten.

$$\theta = \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{2}\arcsin\left(\frac{N\lambda_{max}}{g} - \sin\alpha\right) \quad , mit \quad \begin{matrix} \alpha : Einfallswinkel \\ N : Ordnung \end{matrix} \tag{3}$$

Zusätzlich muss beachtet werden, dass das spektrale Auflösungsvermögen mit steigender Ordnung steigt, die Lichtintensität jedoch sinkt und sich überlappende Bereiche in höheren Ordnungen ergeben. Die Gittergleichung lautet:

$$N\lambda = g\cdot(\sin\alpha - \sin\beta) \tag{4}$$

Abb. 7: Das Blazegitter



[A7]

Je nach Verwendungszweck hinsichtlich des zu analysierenden Spektralbereiches und der Auflösung gibt es verschiedene Bautypen, bei denen - bspw. in der für hohe Ordnungen optimierten Echelle-Gitteranordnung - die kurzen Flanken als Gitter verwendet werden, um hohe Auflösungen über einen großen Spektralbereich zu ermöglichen. Dies wird ermöglicht, indem die sich überlappenden Ordnungen durch ein um 90 ° verschobenes zweites Gitter aufgespalten werden (cross disperser).

2.4. Das Bohrsche Atommodell

Bis Anfang des 20.Jahrhunderts musste sich die Spektroskopie auf ursächliche physikalische Erklärungen mit rein empirischen Erkenntnisprozessen begnügen. Niels Hendrik David Bohr entwickelte jedoch 1913 aus den Erkenntnissen der Quantenmechanik ein Atommodell, mit welchem die Linienspektren des Wasserstoffes erklärt werden konnten. Das heute durch die Schrödingergleichung überholte Modell lieferte zu seiner Zeit eine gute Beschreibung der experimentellen Erkenntnisse für das Wasserstoffatom und beschreibt - als vereinfachtes Modell für

Wasserstoff- die physikalischen Hintergründe hier hinreichend genau. Es versagt jedoch bei schwereren Elementen bei der exakten Berechnung der beobachteten Wellenlängen. Seine Annahme beruhte u.A. auf Ergebnissen de Broglies zu stationären Energiezuständen. Er nahm an, dass die Elektronen des Wasserstoff-Atoms nur in diskreten Zuständen um den Atomkern kreisen oder ihrer Bahnen verändern konnten - in Analogie zu Planetenbahnen. Die Annahme war, das Elektronen, als stehende Welle gedacht, nur in Bahnen ganzzahliger Wellenlänge stabil sind:

$$2\pi r_n = n\lambda \quad , mit\ n = 1,2,3.. \tag{5}$$

Licht entsteht bei der Änderung von elektronischen Zuständen von einem höher angeregten zu einem tieferen Energieniveau, damals als Kugelschalen gedacht, welche durch die Hauptquantenzahl n beschrieben wird ([11], S.1170).

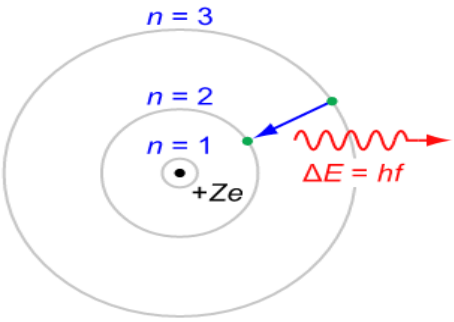
$$E_N = \frac{-Z^2 \cdot E_0}{n^2} \quad , mit\ E_0 = 13{,}6\,eV \tag{6}$$

E_0 beschreibt dabei die Ionisierungsenergie für die Entfernung des Elektrons aus dem Grundzustand n=1 ins unendliche. Der Energieunterschied bestimmter Übergänge einer 'höheren' n-ten zu einer daruntergelegenen m-ten 'Schale' wird in Form von Licht abgestrahlt, welches nach (1) eine Beziehung für die Wellenlänge emittierter Strahlung ermöglicht:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{hc}{(E_n - E_m)} = 91{,}2 \cdot \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)^{-1} nm \tag{7}$$

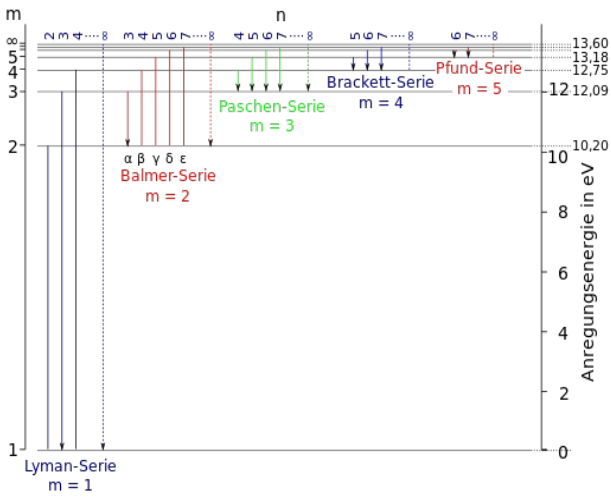
Die Vermessung dieses Modells ermöglichte den Bezug zu Serien , die nach den Übergängen im Atom sortiert sind.

Abb. 8: Energieniveaus im Bohrschen Atommodell



[A8]

Abb. 9: Termschema der Wasserstoffserien



[A9]

Die Energie der Serienbereiche des Linienspektrums von Wasserstoff bildet sich in Bereichen unterschiedlicher Energie ab. Die Lyman-Serie mit Bezug zum Grundniveau n=1 ist die Energiereichste und findet sich im Ultravioletten Bereich, die Balmerserie mit n=2 im sichtbaren Bereich und die Paschen-Serie mit n=3 im Infraroten. Die für die Spezifikation der Sternspektren nach der Harvard Klassifikation wichtigste Serie ist die Balmerserie. Da Anders Jonas Ångström, ein schwedischer Physiker, u.a. diese 1862 im Sonnenspektrum durch exakte Messungen Nachgewiesen hatte, ist diese Einheit heute noch in der Astronomie gebräuchlich und entspricht 1Å= 10^{-10} m.

Tabelle1: Wellenlängen und Farben der Balmerserie

Übergänge von n=2	Bezeichnung der Linie	Wellenlänge λ [Å]	Farbe
3 → 2	Hα	6562.85	rot
4 → 2	Hβ	4861,33	blau-grün
5 → 2	Hγ	4340,47	violett
6 → 2	Hδ	4101,74	violett
7 → 2	Hε	3970,07	violett
8 → 2	Hζ	3889,05	violett
9 → 2	Hη	3835,38	ultraviolett
10 → 2	Hθ	3797,90	ultraviolett
11 → ∞	H∞	3645,60	ultraviolett

Die Linien der Übergänge m=3 bis m=8 liegen noch im mit dem Auge sichtbaren Bereich (380-750nm). Diese Linien werden im weiteren für die Kalibration der im praktischen Teil aufgenommenen Spektren verwendet

2.4.1. Arten von Spektren

Im wesentlichen unterscheiden wir 3 Arten von Spektren, welche in der Astronomie gegenseitig überlagert vorkommen können: Emissions-, Absorptions- und kontinuierliche Spektren ([12], S.225).

Emissionsspektren entstehen wie im oberen Abschnitt als Folge diskreter elektronischer Übergangsenergien. Diese werden als gebunden-gebunden Übergänge bezeichnet.

Kontinuierliche Spektren entstehen, indem freie Elektronen mit einer Energie größer E_0 von einem Atom oder Ion eingefangen werden. Da die Energie beliebig groß sein kann Strahlung jeder beliebigen Wellenlänge entstehen - ein Kontinuum. Diese Übergänge werden als frei-gebunden Übergänge bezeichnet. Für das Spektrum von Sternen Klasse A bis M ist besonders der H → H^--Ionen Übergang bedeutend. Auch frei-frei Übergänge sind möglich und tragen zu einem kontinuierlichen Verlauf bei.

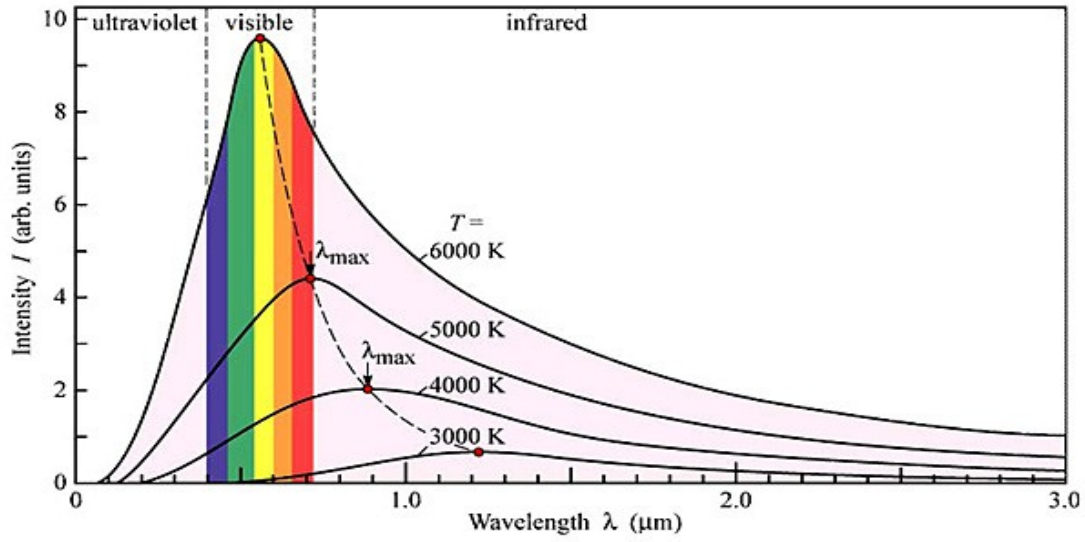
Absorptionsspektren entstehen bei der Transmission von Strahlung einer kontinuierlichen Quelle durch ein kühles Gasmedium. Dabei werden diejenigen Anteile des Lichtes Absorbiert, die den diskreten Energiedifferenzen des im Gas enthaltenen chemischen Elementes entsprechen.

2.5. Wärmestrahlung

Jeder Körper, der sich im thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung befindet, emittiert elektromagnetische Strahlung. Emission und Absorption befinden sich im Gleichgewicht. Ein idealer schwarzer Körper (Absorption=100%) als Modellvorstellung würde unter dieser Bedingung jede Strahlung wieder zu 100% emittieren, da sich sonst seine Temperatur ändern würde. Eine alternative Bezeichnungsweise bzw. Modellierung wird als Hohlraumstrahlung bezeichnet ([11],S.633). Der Intensitätsverlauf der emittierten Strahlung ist eine Funktion dieser Gleichgewichtstemperatur. Die Gesetzmäßigkeiten, welche elektronischen Energieniveaus eines Elements in Abhängigkeit der vorherrschenden Temperatur besetzt sind, entscheiden über die Ausprägung der Intensität der Absorptionslinien und der Serienintensität. Aus den Erkenntnissen Stefan Boltzmanns leitete Planck sein Gesetz der Intensitätsverteilung ab [13]:

$$u(\lambda) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \cdot \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1} \tag{8}$$

Abb. 10: Der Strahlungsfluss eines idealen schwarzen Körpers



[A10]

Die Lage des Maximums wird dabei über das Wiensche Verschiebungsgesetz angegeben, und ermöglicht eine Aussage über die Temperatur des Körpers.

$$\lambda_{Max} \cdot T_{eff} = 2{,}90 \cdot 10^{-3}\, m \cdot K \tag{9}$$

Da die in der Sonne über die Kernfusion erzeugte Strahlung der Sterne über 100000 Jahre benötigt, um aus dem Kern in die Photosphäre zu gelangen und dort in Strahlung abgegeben zu werden, wird der thermische Gleichgewichtszustand annähernd angenommen, so dass über die Analyse der Spektren die Effektivtemperatur der Hülle bestimmt werden kann.

2.6. Die Harvard Klassifikation

Sterne werden heute in Spektralklassen entsprechend ihrer Effektivtemperatur eingeteilt. Diese wiederum bestimmt im wesentlichen die innere Struktur des Spektrums.

Die ersten dunklen Spektrallinien wurden 1802 von William Hyde Wollaston beobachtet „Da die Öffnungen von Spektroskopen üblicherweise schlitzförmig sind, sah man enge farbige Lichtstreifen, so genannte Spektrallinien“ [5, S.14]. Fraunhofer untersuchte unabhängig von Wollaston die Doppellinie des Natriums durch eine zufällige Übereinstimmung in einer Lampe und dem Spektrum der Sonne und fand im Sonnenspektrum eine Reihe weiterer Linien, welche er alphabetisch sortierte. Gustav Robert Wilhelm Bunsen und Kirchhoff entdeckten 1859 durch Ihre Elementaranalyse, dass die fehlenden Linien in J.Fraunhofers Spektrum mit den Emissionslinien ihrer untersuchten Elemente übereinstimmten und lieferten einen Erklärungsansatz, der erst 1913 durch die Veröffentlichung von Niels Bohr physikalisch geklärt werden konnte. Die spektralen Untersuchungen dieser Linien in den Spektren der Sterne war zu dieser Zeit bereits sehr weit fortgeschritten.

Eine kompakte Zusammenfassung der Entstehungsgeschichte der Klassifizierung von Spektren nach der Harvard-Klassifikation findet sich bei Dvorak [5].

Die heute gängige Klassifizierung von Sternspektren orientiert sich an einer Buchstabensequenz (hier mit Darstellung eines Merksatzes),

O	B	A	F	G	K	M
„Oh	Be	A	Fine	Girl,	Kiss	Me“

die in ihrer Sortierung zufällig erscheint. Die Großbuchstaben bezeichnen dabei Spektralklassen, die bzgl. Ihres physikalischen Hintergrundes eine Sortierung nach den Effektivtemperaturen der Hülle von den heißen O-Sternen bis hin zu den kühlen M-Sternen darstellt.

Die Gründe dafür finden sich in der Abfolge von Sortierungsversuchen verschiedener Forscher, welche sich mit Sternspektren befasst haben.

Angelo Secci, ein Geistlicher an der Vatikanssternwarte in Italien, hatte um 1877 ca. 4000 Sterne beobachtet und in fünf (Farb-) Klassen eingeteilt:

Tabelle 2: Das Klassifikationssystem Seccis

I	Weiß-blaue Sterne	Mit wenigen breiten Banden, die er dem Wasserstoff zuordnen konnte
II	Gelbe Sterne	Mit vielen feinen Linien wie in der Sonne
III		Mit komplexen, bandenförmigen Linien
IV	Rote Sterne	Mit hellen Spektrallinien
V		Mit breiten Banden

Da diese erste Kategorisierung der Spektralklassen auf die bloße Beobachtung beruhte, konnten ähnliche unabhängige Kategorisierungsversuche, u.a. von Rutherford oder Huggins, nicht untereinander in Konkurrenz treten, bis Henry Draper 1872 mit der Einbringung von Fototechnik erste Aufnahmen von Sternspektren erstellte. Sein früher Tod hätte diese Entwicklung beendet; Seine Frau Anna Palmer Draper, welche in seine Arbeit eingebunden war, konnte diese am Harvard College Observatorium mit der Unterstützung des damaligen Direktors Edward Pickering fortsetzen.

Die Hausangestellte der Drapers, Williamina Fleming bekam den Auftrag, die erstellten Spektren zu sortieren und Orientierte sich im ersten Versuch an Seccis Kategorisierung, erweiterte diesen jedoch aufgrund des verbesserten Auflösungsvermögens. Die vier Linien, welche Henry Draper aufgenommen hat, konnten jetzt zu vielen hundert Linien aufgelöst werden. Sie unterteilte Seccis Kategorien , A-D für Kategorie I etc., und brachte diese in eine alphabetische Reihenfolge in einem ersten Versuch von A bis Q.

Abb.11-15: Die Pioniere der Astronomie am Harvard Observatorium

A.Maury [A11]

W.Fleming [A12]

A.J.Cannon[A13]

Antonia Maury, eine Astronomin vom Vassar College und Drapers Nichte, welche durch das Voranschreiten der Auflösungsvermögens und Verwendung eines Mikroskops neue Linien erkennen konnte, sortierte diese um. Sie ordnete diese nach dem Vorhandensein und den Verhältnissen der Wasserstoff- und Heliumlinien.

[A14]

E.Pickering mit Mitarbeitern[A15]

Im ersten Schritt schlug sie eine Umkehrung von A und B vor und sortierte im Laufe der Zeit die ursprüngliche Anzahl von 22 Kategorien in 12 Kategorien um. Durch eine statistische Auswertung Edward Pickerings wurden weitere Kategorien zusammengefasst, zur beinahe vollständige Klassifikation B,A,F,G,K,M.

Diese wurde im letzten Schritt von Annie Jump Cannon weiterentwickelt, indem Sie durch eine Forschungsreise nach Afrika die Besonderheit der O-Sterne, Linien einfach ionisierten Heliums zu enthalten, erkannte und schlug zudem eine Unterkategorisierung vor. 1922 wurde das verfeinerte System von der IAU (International Astronomic Union) als Standard verifiziert.

Tabelle. 3: Das Harvard-Klassifikationssystem

Spektralklasse mit Temperatur (T_{eff})	Charakteristische Absorptionslinien im optischen Bereich
O bis 50000K	Intensives kontinuierliches Spektrum mit Absorptionslinien des ionisierten Heliums; insgesamt sehr wenig Fraunhofer-Linien
B bis 28000K	Wasserstofflinien treten auf ; auch Linien des neutralen Heliums
A bis 9900K	Balmerlinien des Wasserstoffs im Maximum; Linien des ionisierten Kalziums treten auf
F bis 7400K	Balmerlinien werden schwächer ; Calciumlinien sind sehr stark ausgeprägt; Metalllinien treten auf.
G bis 6000K	Starke Calciumlinien; Balmerlinien sehr schwach; intensive Linien des Eisens treten auf
K bis 4900K	Intensive Linien des Eisens und anderer Metalle; zahlreiche Molekülbanden
M kleiner 3500K	Viele Linien neutraler Metalle, besonders von Eisen; starke Titanoxid-Banden; auch Linien des Kalziums

Ein zusätzliches Kriterium , mit dem die neuzeitliche Einordnung eines Sternspektrums nach der Morgan-Keenan-Klassifikation - vorgenommen wird, ist die Leuchtkraft eines Sterns.

Diese wird über die Beziehung ([12], S.180):

$$L = \sigma A T^4 \quad , mit\ A_{Fläche} = 4\pi R^2 \tag{10}$$

Ausgedrückt und bezeichnet mit L die Gesamtstrahlungsleistung eines Sterns. Da die Fläche quadratisch über den Radius zunimmt, nimmt die Größe eines Stern in Bezug auf seine absolute Helligkeit eine große Wirkung
Die Konvention zur Beschreibung anderer Sterne.bezieht sich auf unsere Sonne als Standard mit dem Symbol $L_\odot$.

Tabelle 4: Leuchtkraftklassen nach Morgan-Keenan-Klassifikation

I a-0	Extrem helle Überriesen
I a,ab,b	Helle bis weniger helle Überriesen
II	Helle Riesensterne
III	Riesensterne
IV	Unterriesensterne
V	Hauptreihensterne, Zwerge
VI	Unterzwerge
VII	Zwerge

Indem in Verbindung mit dem Spektraltyp zusätzlich die durch eine Ziffer bezeichnete Spektralklasse angegeben wird; bspw. wird dann ein Stern als A9 oder M2 angegeben. Dies ermöglicht eine Einteilung in zwischen Klassen, die neben der Temperatur auch eine Aussage über die Größe eines Sterns ermöglichen. Dies ist notwendig weil die äquivalenten Größen Masse, Druck oder Dichte einen Effekt auf die Sternatmossphäre haben und darüber auf die Besetzungswahrscheinlichkeiten der Elektronen einwirken. Dies wiederum hat einen Einfluss auf die Linienstärken der Absorption und das Spektrum.Deshalb ist eine Klassifikation über eine der Masse äquivalente Größe sinnvoll.

2.7. Leuchtkraftkklasse

Die vom einem Beobachter wahrgenommene Gesamthelligkeit eines Sterns oder astronomischen Objekts sagt aufgrund der gigantischen Entfernungen im Kosmos nichts über die wahre Leuchtkraft nach aus. Hipparchos von Nicäa katalogisierte um die 1000 Sterne und unterteilte diese in 6 Größenklassen. Größenklassen als Begriff, weil ein Stern bei gleicher Spektralklasse (T_{eff}=konstant) nach (10) nur seine Größe ändern kann, um seine Strahlungsleistung und damit seine Helligkeit zu verändern.

Um 1850 normierte Norman Robert Pogson in einen logarithmischen Bezug, welche auch auf dem logarithmischen Helligkeitsempfinden des Auges entspricht:

$$\Delta m = m_1 - m_0 = -5\,\text{mag} \cdot lg\frac{I_1}{I_0} = -2{,}5^m\, lg\frac{I_1}{I_0}$$
$$\frac{I_1}{I_0} = 10^{-0{,}4\,\Delta m} \qquad (11)$$

Für einen Unterschied einer Magnitude ergibt sich damit ein Helligkeitsunterschied von 2,5. Der Standard für die Helligkeit der Sterne am Nachthimmel wurde mit der Zuweisung für die Wega mit dem Magnitudenwert m=0 vorgenommen. Alle Objekte die heller sind bekommen ein negatives Vorzeichen wie bspw. der Mond m=-12,7 oder die Sone m=-27. Der Standard für den Vergleich von relativer und absoluter Helligkeit wird mit 10 PC in folgender Weise dargestellt :

$$m - M = -5 + (5 \cdot \log r[\,pc\,]) \qquad (12)$$

m = Scheinbare Helligkeit
M = Absolute Helligkeit
r = Entfernung in pc

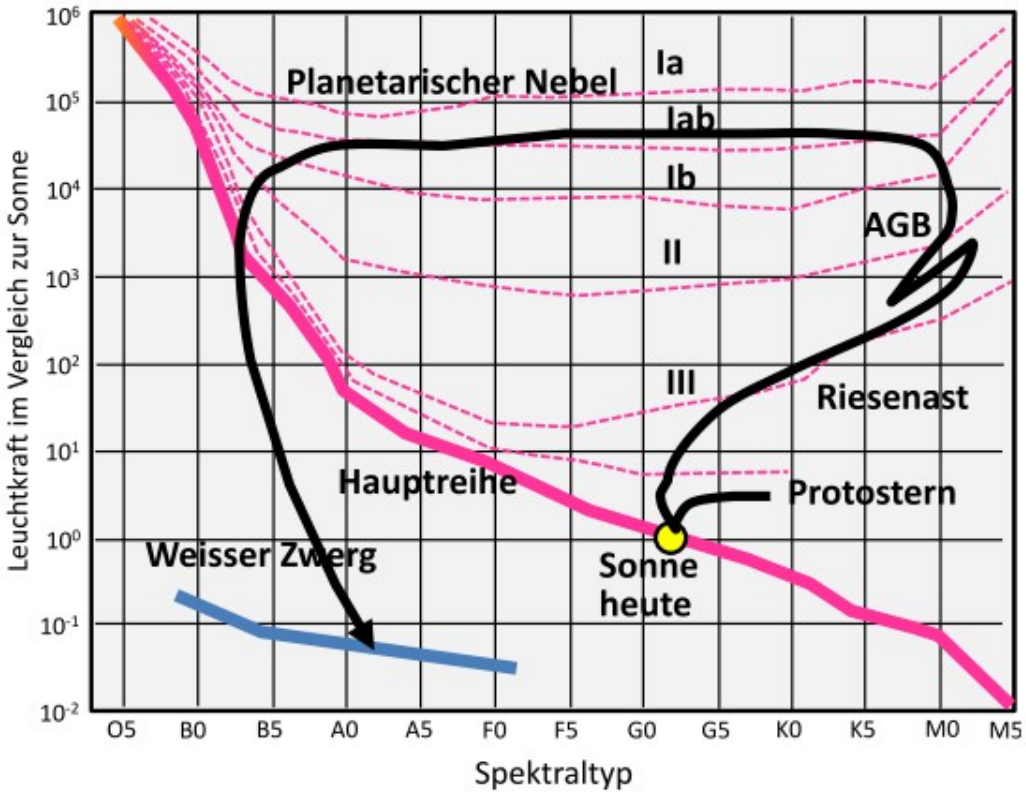
Für einen Stern, welcher sich wie z.B. die Wega in 10 pc = 3,26 Lichtjahre befindet löst sich die Formel nach m=M auf.

2.8. Das Hertzsprung-Russell Diagramm

Das Hertzsprung -Russell Diagramm (HRD) wurde Anfang des 20 Jahrhunderts von Henry Norris Russell basierend auf den Arbeiten von Ejnar Hertzsprung erstellt. Diesem war eine Asymmetrie in der Verteilung der Spektraltypen G und K bzgl. ihrer Größenklasse aufgefallen. Mit der Sonne als Bezugspunkt L=1 und einer dekadischen Einteilung der Absoluthelligkeiten ergibt sich in Form eines Diagramms ein Schema, in dem die Häufigkeitsverteilungen eine Aussage über den Zustand und der zeitlichen Entwicklung eines Sterns ermöglicht wird. Andere Darstellungsformen sind Leuchtkraft gegen die Effektivtemperatur.

Zudem gibt es auch Abwandlungen in Form von Farben-Helligkeits Diagrammen, in denen der Farbindex gegen die absolute Helligkeit aufgetragen wird. Bei dieser Variante sind jedoch einige Zusätzliche Effekte wie bspw. das fehlen einiger Hauptreihensterne oder horizontale Verschiebungen durch Entfernungseffekte zu berücksichtigen.

Abb.16: Das Hertzsprung-Russell Diagramm



[A17]

Da 90 % aller Sterne in der Hauptreihe verteilt sind ([2], S.296) wird damit nach der MKK Klassifikation der Regelfall (Größenklasse V) als Hauptreihe dargestellt. Abweichend zur Darstellung hier wird die Helligkeit des HRD alternativ häufig auch über die Magnitude M mit dem Indice M_V versehen. Das abgebildete Schema beschreibt den Lebenszyklus der Hauptreihensterne (schwarzer Linienverlauf), welcher beschreibt, dass vergleichbare Sterne V_Größenklasse - wie unsere Sonne – gegen Ende ihrer Entwicklung zuerst zu roten Riesen anwachsen, um dann als weiße Zwerge zu enden.

Als Werkzeug ist es in der Astronomie mit diesem Diagramm nur mit Wissen des Spektraltyps möglich, weitere Aussagen wie Entwicklungszustand, Leuchtkraft, Masse und über (12) die Entfernung zu bestimmen.

3. 3 Praktischer Teil

Die Spektren wurden in der Schülersternwarte des Carl- Fuhlrott-Gymnasiums aufgenommen Die Sternwarte besteht seit 2009 und ermöglicht Schülern, Studenten und Besuchern einen Einblick bis hin zu Projektarbeiten im astronomischen Bereich. Die Arbeitsprojekte können sowohl am Haupttteleskop im zentralen Astrolabor, als auch an den sechs Arbeitsstationen - Inseln genannt - die sich benachbart auf dem Schuldach befinden, umgesetzt werden. Die Inseln werden mit einem Materialwagen

aus dem Astrolabor angefahren und enthalten bis auf das C11-Teleskop unterschiedlichste Ausrüstung wie Filter, Kameras und Okulare, die bei jeder Messung aufgebaut und in Betrieb genommen werden müssen.

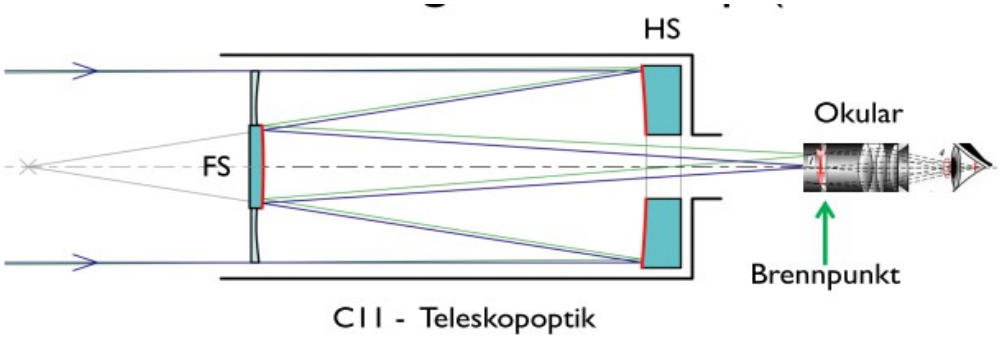
3.1. Aufbau, Messung

Vor der Messung musste die gesamte Messvorrichtung bestehend aus:

- Astro-Physics 900GTO-Montierung
- Celestron 11‘‘(C11) EdgeHD-Teleskop
- DADOS Spaltspektrograf mit 200 L/mm
- SBIG STF-8300M CCD-Kamera
- Notebook mit der Software Maxim DL

in Betrieb genommen werden. Kernbestandteile sind Teleskop, Spektrograf und Kamera. Das C11 ist ein Spiegelteleskop mit einer Brennweite von 2800mm und erzeugt "ein auf dem Kopf stehendes Bild eines Objekts entsteht im Brennpunkt der Zwei-Spiegel-Optik". [15]. Der Hauptspiegel (HS) hat einen Durchmesser von 28 cm (=11 Zoll) und wird mittels Justierschrauben zum scharfstellen des Bildes gesteuert. Da in unserem Fall Spektren erzeugt wurden, ist eine Problematisierung der Abbildungseigenschaften des Fangspiegels (FS) überflüssig.

Abb.17: Das Celestron 11‘‘(C11) EdgeHD-Teleskop



[A15]

Die kompakte Bauweise hat den Vorteil, dass große Brennweiten auf kleinen Raum möglich sind. An dem Teleskop wurde der DADOS-Spaltspektrograf mit dem am geringsten auflösenden Gitter 200 L/mm verwendet, damit die Spektren vollständig auf den Kamerasensor abgebildet werden können.

Abb.18: C11 mit DADOS Spektrograf und SBIG CCD Kamera

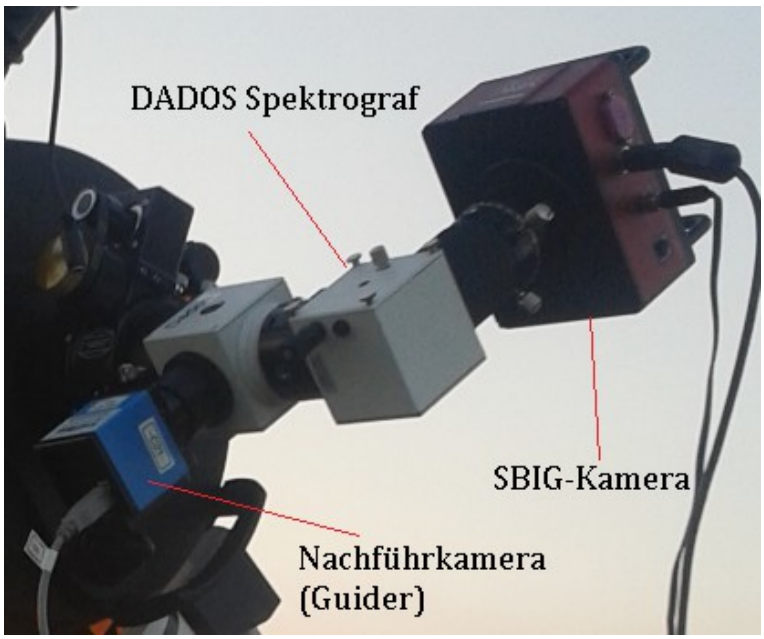


Abb.19: Arbeitsteilung mit Schülern des Projektkurses

Das Teleskop muss vor Spektrenaufnahme an einem großen Objekt oder dem Mond scharfgestellt werden. Anschließend wird ausgehend von der ersten Ordnung des Spektrografen, entweder an einer Kalibrierlampe oder einem anderen diskreten Spektrum, der gewünschte Bereich an der Justierschraube des Spektrografen eingestellt werden, sowie das erzeugte Spektrum mit dem Okular der Kamera scharfgestellt werden. Mit Hilfe der Steuerung wird anschließend das gewünschte Objekt angefahren bis es im Sucher mittig zu sehen ist. Gefahr besteht darin, das Steuerung,Sucher und Teleskop nicht synchronisiert sind. Für diesen Fall muss mit einer Wasserwaage in Parkposition die Fixierung neu eingestellt und mit einem Objekt in der Steuerungsdatenbank synchronisiert werden.

Die vermessenen Objekte werden mit unterschiedlichen Belichtungszeiten aufgenommen, indem das Objekt mit dem Auge über den Slit-Viewer am DADOS im Spalt positioniert und während der Messung mit der Steuerung der Montierung so gut wie möglich stabil gehalten wird.

Abb.20: Collage der Größenrelationen am Spalt

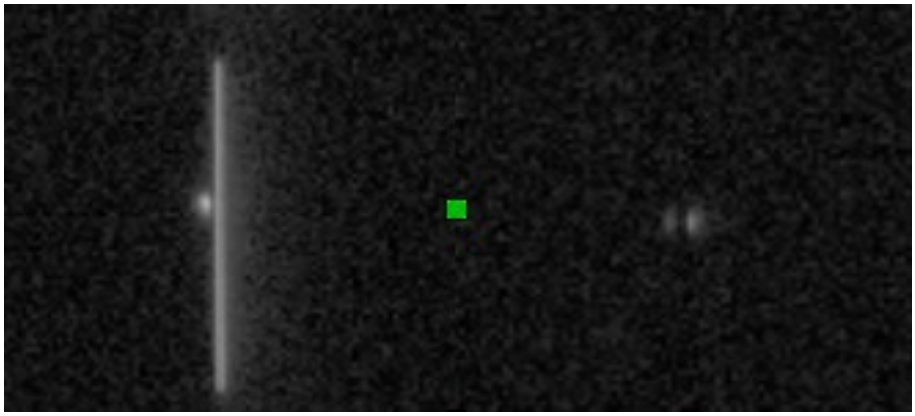


Tabelle 5: Beobachtungsobjekte der Messreihe

Spektralklasse	Name (Bayer-Bezeichnung)	Leuchtkraftklasse / Magnitude	Katalogname nach[20] : Henry Draper Hipparchos
O	Mintaka (δ Ori A)	O9.5II 2.2 m	HD 36486 HIP 25930
B	Alcyone (η Tauri)	B7 IIIe 2.87 m	HD 23630 HIP 17702
A	Sirius (αCMa A)	A1 Vm -1.46 m	HD 48915 HIP 32349
F	Mirfak (α Per)	F5 lb 1.8m	HD 20902 HIP 15863
G	Capella (α Per)	G0 lll 0.1m	HD 34029 HIP 24608
K	Aldebaran (α Tau)	K5 lll 0.9 m	HD 29139 HIP 21421
M	Beteigeuze (α Ori)	M1-2 Ia-Iab 0.5m	HD 39801 HIP 27989

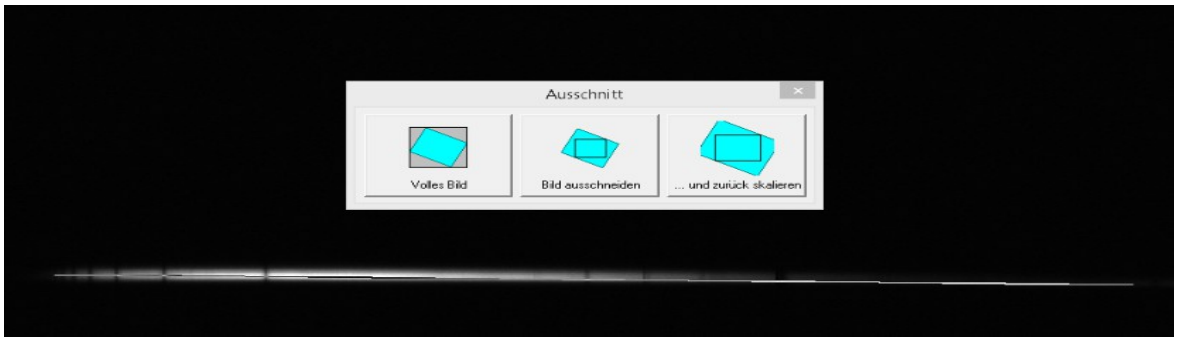
Die Bayer-Bezeichnung besteht formal aus einem griechischen Buchstaben in Kombination mit dem Genitiv des lateinischen Namens des Sternbilds, in dem der Stern liegt.
Die Messung wird über das Notebook vorgenommen und direkt zur Überprüfung der Belichtungsstärke über ein Histogramm hinsichtlich Ihrer Eignung bewertet und

gespeichert. Die Daten werden von der Beobachtungsinsel an der Server übertragen. Typische Aufnahmezeiten liegen zwischen 10-100 Sekunden.

3.2. Exemplarische Auswertung

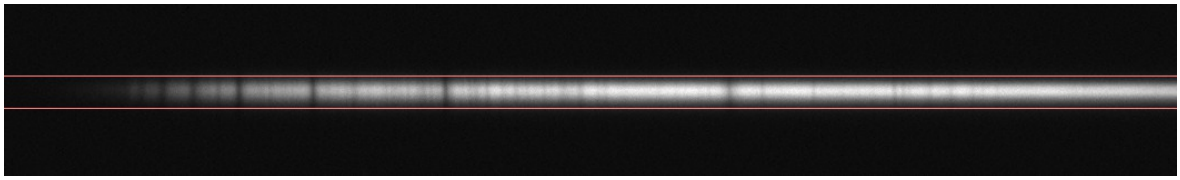
Der Ablauf der Datenverarbeitung soll mit Hilfe folgender Screenshots abgebildet werden. Die Beschreibungen der einzelnen Arbeitsschritte sind jeweils unter den Bildern.

Abb. 21.: Begradigen und ausschneiden der Aufnahme mit Fitswork



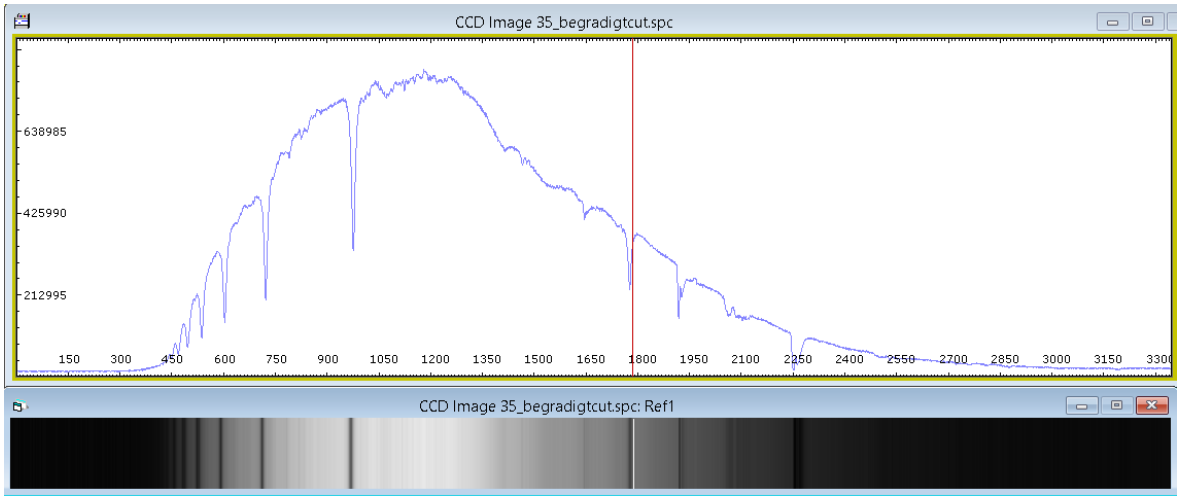
Die Begradigung der Rohspektren wird mit der Software Fitswork vorgenommen. Die Spektren werden geladen und mittels der Befehlskette *Bearbeiten>Bildgeometrie>Bild rotieren mit Hilfslinie* rotiert (volles Bild) und anschließend per Hand gezogenem Rahmen ausgeschnitten und gespeichert. Der Rahmen sollte nicht zu knapp gezogen werden. Da ober- und unterhalb des Spektralstreifens nicht sichtbare Bildinformationen enthalten sind.

Abb. 22.: Erzeugen einer Rohspektrums mit VSPEC



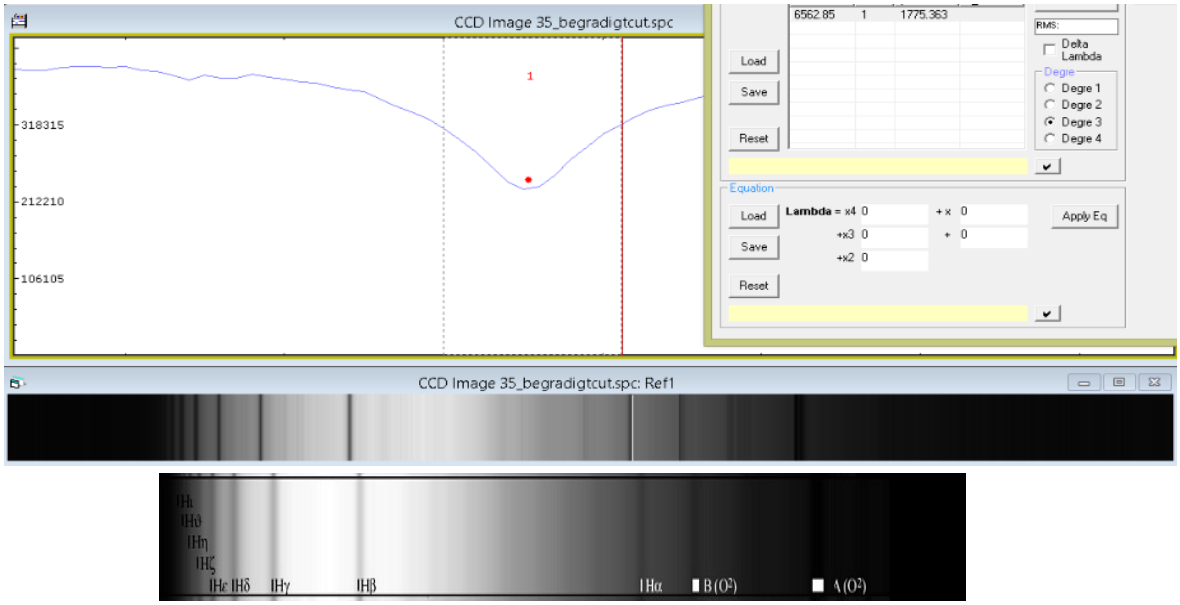
Mit der Software VSPEC wird nun zuerst das aktuelle Arbeitsverzeichnis, in welchem sich die Daten befinden, eingestellt *Options>Perferences* und mit *Button > display reference binning zone* ein Rahmen erzeugt und über dem Spektralstreifen platziert. Mit dem Mausrad kann der Kontrast geändert werden, um die Bildinformationen sichtbar zu machen. Der Button *referenc binning* erzeugt automatisch ein Spektrum, in welchem Anteile der Lichtverschmutzung heraus gemittelt werden. Das erzeugte Spektrum wird als Rohspektrum bezeichnet, da die optischen Eigenschaften der gesamten Messkette enthalten sind und dieses noch nicht wellenlängenkalibriert ist. Die Namensgebung der Dateien sollte zudem entsprechend funktional gewählt sein

Abb.23: Erzeugen eines synthetischen Spektrums



Bei wiederholten Spektrenbearbeitungen kann es sein, dass das aktuelle Rohspektrum über *Menü>Edit>replace>intensity* in den aktuellen Arbeitsspeicher geladen werden muss. Über *Tools>Synthesis* wird ein synthetisches Spektrum erzeugt, welches zur Orientierung dient aber auch das Messergebnis veranschaulicht.

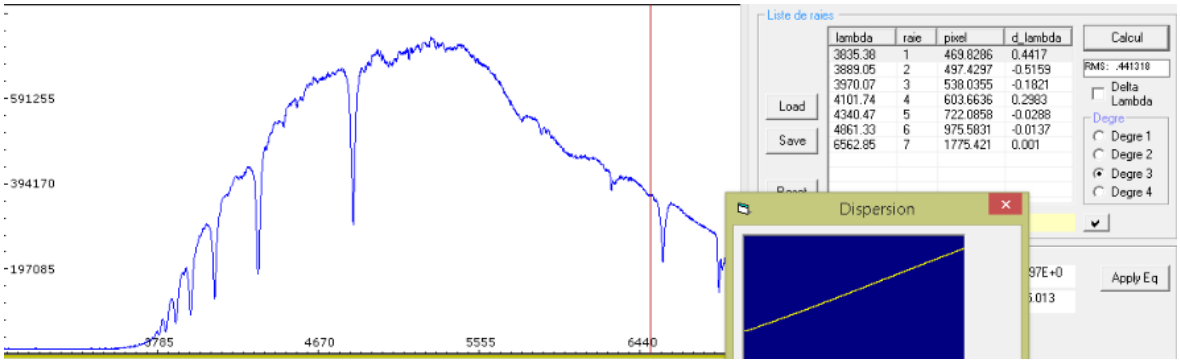
Abb.24: Auffinden der relevanten Linienspektren mit Hilfe eines Referenzspektrums



[A16]

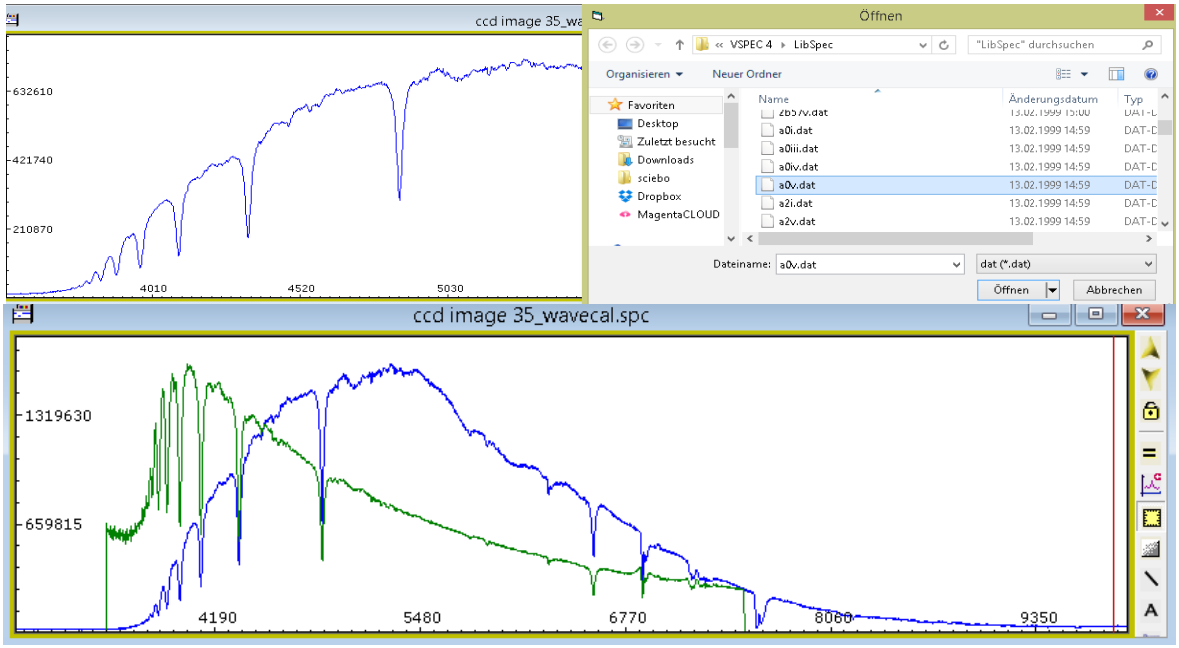
Im Standartverfahren wird vor einer Messung bzw. Messreihe ein Spektrum einer Kalibrierlampe aufgenommen, da die Sichtung und Zuordnung von Spektren bzw. der Linien ohne einen definierten Bezugsrahmen ein hohes Maß an Erfahrung benötigt. In diesem Fall wurde jedoch darauf verzichtet, um den historischen Prozess nachzuvollziehen. Die über Erfahrung erlernte Mustererkennung wird über ein Referenzspektrum nachvollzogen. Das markanteste Muster hier ist die Balmerserie.

Abb. 25: Kalibrieren des Rohspektrums mit Linien der Balmerserie



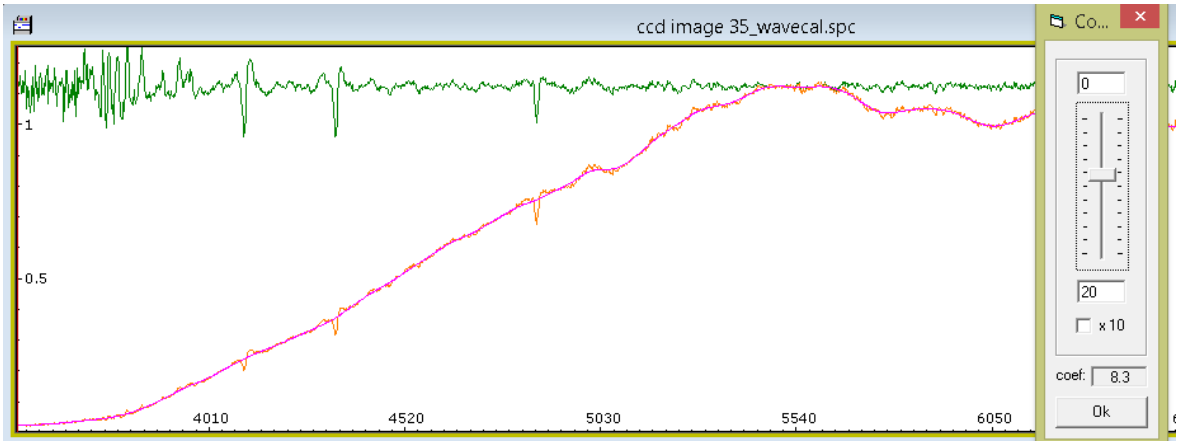
Mit *Button>calibration multiple lines* werden nun die in Tab.2 angegebenen Wellenlängen eingegeben, was der standardmäßigen Energie-Kanal Eichung und er experimentellen Physik entspricht. Mit der Maus werden die Bereiche eingegrenzt und mit einer Lupenfunktion zur genaueren Eingrenzung vergrößert. Der RMS Wert (Root Mean Square) bezeichnet den Fehler der Kalibration, welche <1 Å sein sollte.

Abb. 26: Division durch ein Referenzspektrum aus Datenbank



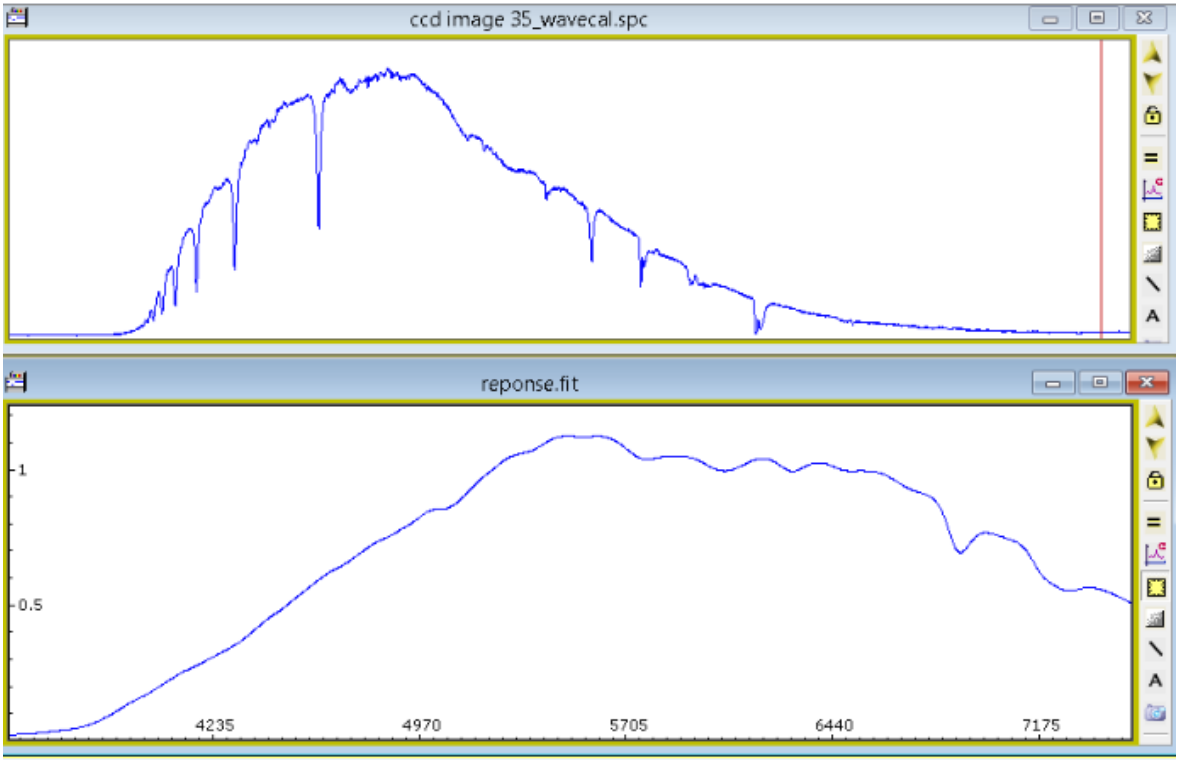
Nach speichern des wellenlängenkalibrierten Spektrums ('Wavecal.spc') wird ein Bezugsspektrum gleicher Spektralklasse aus einer Datenbank mit *Menü>Assistant>Instrumental response >>Button> Pickels* ausgewählt und mit *Button>Division and Extraction* das Rohspektrum durch das Bezugsspektrum dividiert, um die Instrumentenfunktion zu bestimmen. Es wird davon ausgegangen, dass die Bezugsspektren professionell erstellt wurden von Einflüssen der Messkette bereinigt sind.

Abb. 27.: Glätten der Instrumentenfunktion mittels Spline-Filter



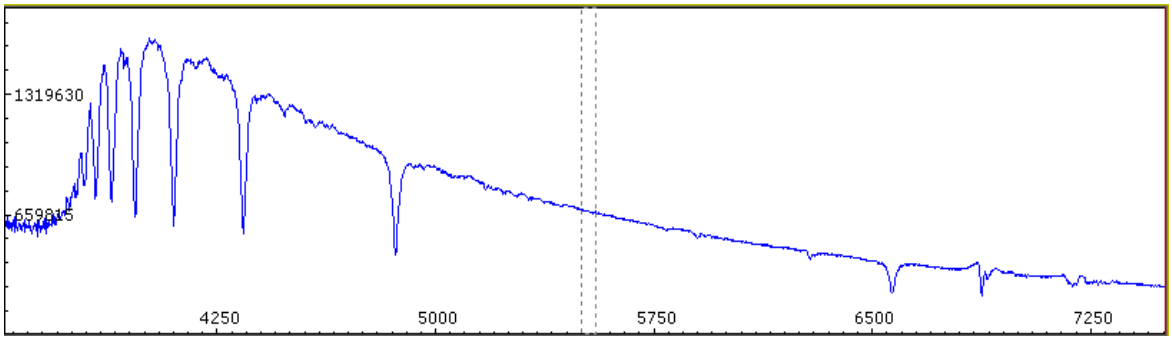
Die so ermittelte Instrumentenfunktionwird mit *Menü>Operatios>spline Filter* über den Regler geglättet und gespeichert (response.spc).

Abb. 28: Erzeugung eines flusskalibrierten Spektrums durch Division



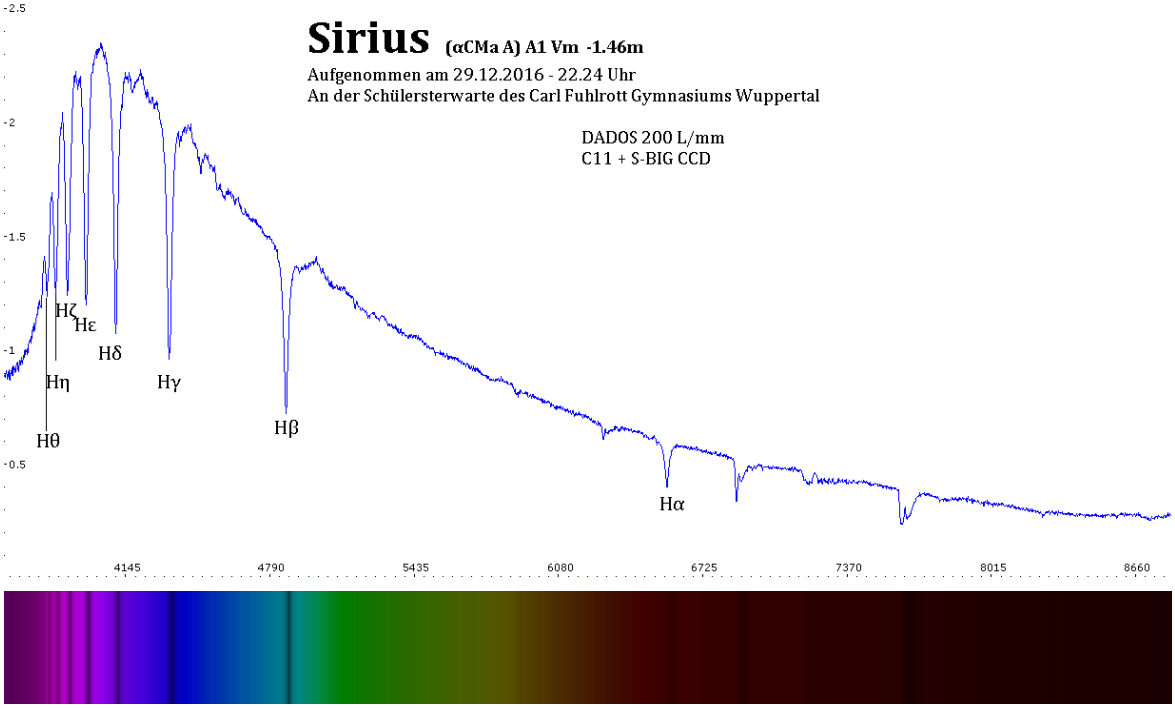
Das wellenlängenkalibrierte Spektrum wird durch die Instrumentenfunktion dividiert über *Menü>Operations>Divide a Profile by a Profile* und ein - dem Anschein nach - flusskalibriertes Spektrum erhalten; *Wischbutton* zur Bereinigung der Arbeitsfläche, dann *Menü>Edit>replace>intensity*. Die Problematisierung dieses Schrittes erfolgt in Kapitel 3.7.1. Die Datei wird noch gespeichert (fluxcal.spc). Mit Zunahme der Arbeitsschritte verdeutlicht sich hier die Wichtigkeit verschiedener funktionaler Bezeichner. (oben: Rohspektrum; unten: geglättete Instrumentenfunktion)

Abb.29: Divisionsergebnis normieren und zuschneiden des Spektrums



Nach Konvention wird der Wellenlängenbereich von 5000-5050 Å mit dem *Button Normalize* auf den Intensitätswert 1 normiert.Mit der linken Maustaste Wird der relevate Bereich ausgeschnitten und gespeichert(fluxcal_normiert.spc oder Final.spc)

Abb. 30.: Finales normiertes Flussspektrum mit synthetischem Spektrum



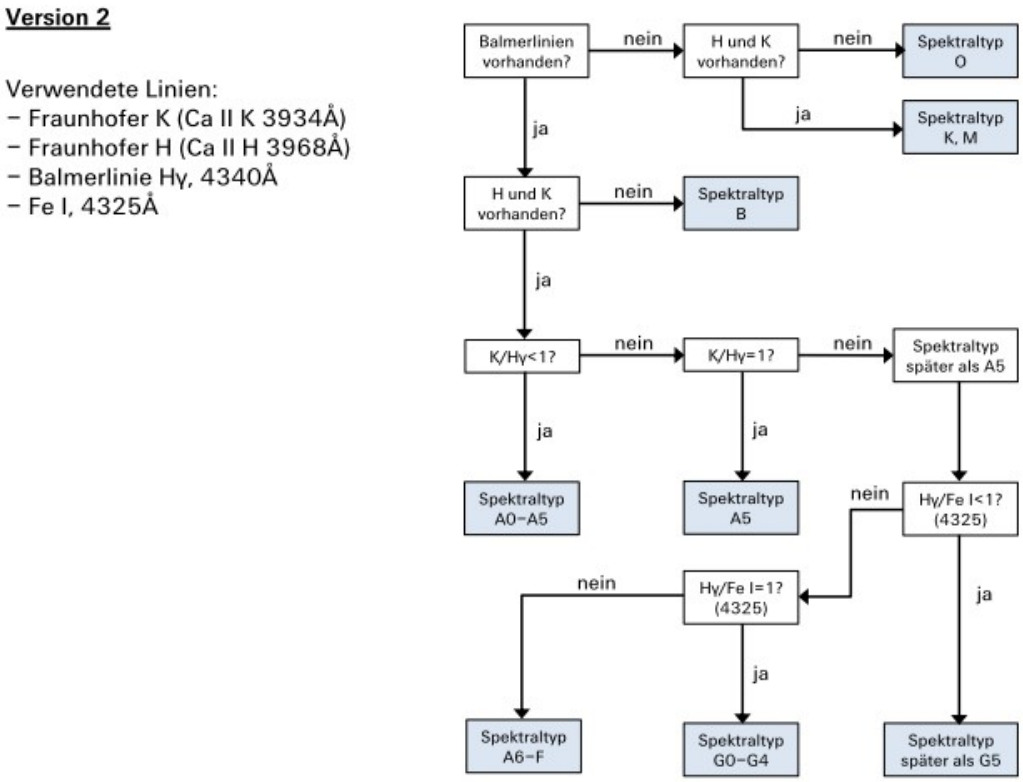
Das fertige normierte und flusskalibrierte Spektrum wird zugeschnitten und mit einem synthetischen Spektrum (s.Abb.:23) versehen welches mit R*echtsklick>colore* eingefärbt wird. Die relevanten Absorptionslinien werden mit einem Grafikprogramm beschriftet und eine Überschrift mit Bezeichnung und relevanten Daten hinzugefügt.

Format
„Objektname
Aufgenommen am Datum - Uhrzeit
DADOS 200 L/mm“

3.3. Arbeitsschritte zur Einordnung in das Harvard Schema

Im Folgenden werden die Arbeitsschritte zur Einordnung in die Harvard Klassifikation dargestellt. In der Arbeitsweise eines Programmablaufplans wird ausgehend von der Balmerserie die Verteilung und die Intensität verschiedener Absorptionslinien gesucht und anhand verschiedener Kriterien eingeordnet.

Abb. 31: Programmablaufplan zur Klassierung von Spektren



Mit diesem groben Arbeitsformalismus ist es auch für Amateure möglich, die grobe Klassierung von Sternspektren vorzunehmen. Da das Auflösungsvermögen des DADOS Spektrografen bei 13,5 Å liegt und eine Vermessung der Linien zu große Fehler produziert, reicht es aus die Intensitätsverhältnisse mit dem Auge abzuschätzen.

3.4. Darstellung der Ergebnisspektren

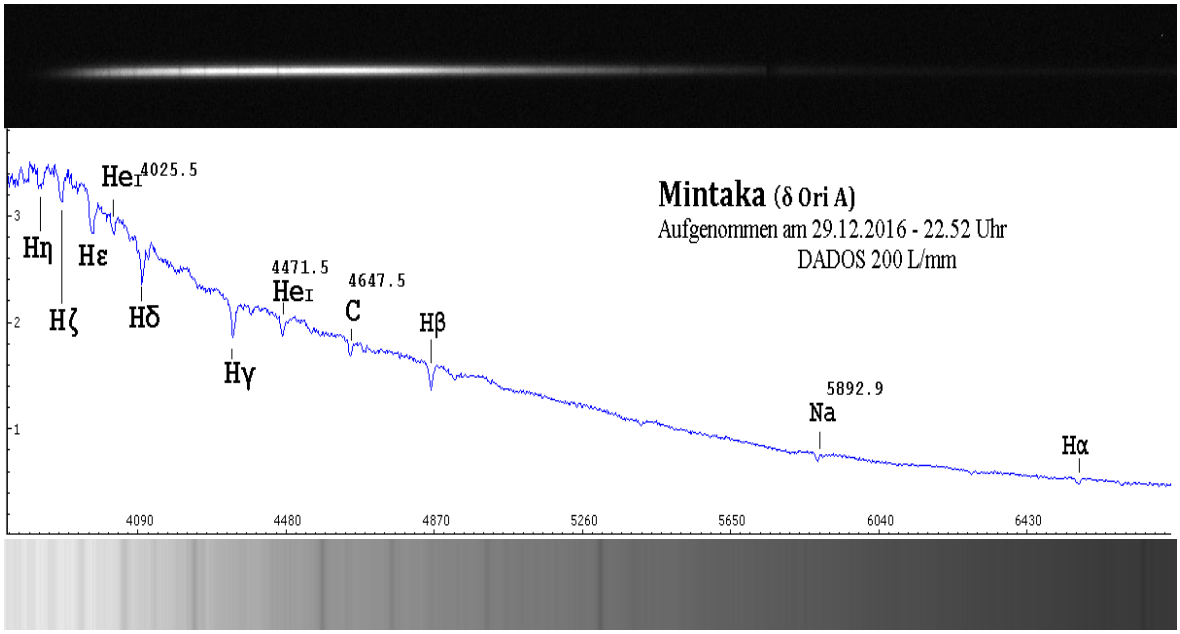
Die Spektren werden im folgendem Kapitel einzeln diskutiert, indem der Ablaufplan für das jeweilige Spektrum überprüft wird und eine Aussage zur Einordnung erfolgt.

Bezugspunkt ist einerseits der Plot des Spektrums, andererseits jedoch in Rückschau auf die Entstehungsgeschichte der Klassifikation das mit dem verarbeiteten Spektrum erzeugte synthetische Spektrum in schwarzweißer Farbe. Die synthetischen Spektren sind zudem Software bedingt nicht im selben Maßstab abgebildet wie der Plot. Relevante Linien sind in Abb.: 31 enthalten.

Zusätzliche Informationen finden sich in Walkers Buch ([17], S. 56).

Dargestellt sind jeweils ein Bild der entsprechenden Rohaufnahme, ein ausgewerteter und beschrifteter Plot (Intensität gegen Wellenlänge) sowie ein mit der Software Vspec synthetisch erzeugtes Spektrum. Die jeweiligen Entscheidungswege sind als Teilausschnitte der Abb. 31 mit Pfeilen als Veranschaulichung der Entscheidungswege in eine Abbildungskopie neben dem Text eingefügt.

Abb. 32: Mintaka



Das erst Maß im Alltagsgebrauch wäre die maximale Intensität der Verteilung, hier im UV Bereich. Im Plot fällt zunächst die Balmerserie und Ihre geringe Intensität auf . Durch die nicht vorhandenen Ca Linien endet hier schon die Einordnung mit der Klassierung der Spektralklasse B, da die Übergänge in diesem Fall . Im sw-Spektrum fällt zudem ein wichtiges Muster zwischen $H\beta$ und He_I auf. Da Mintaka nach Hipparchos mit O 9,5 Klassiert wird und in anderen, wie im Henry Draper Katalog zeigt sichm das die Klassierung mit fließenden Grenzen arbeitet und nicht technologisch über Interpretation zustande kommt.

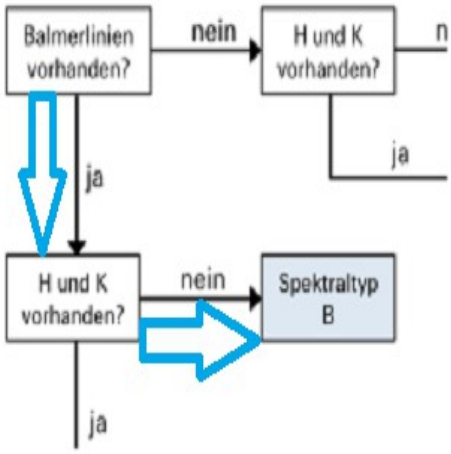
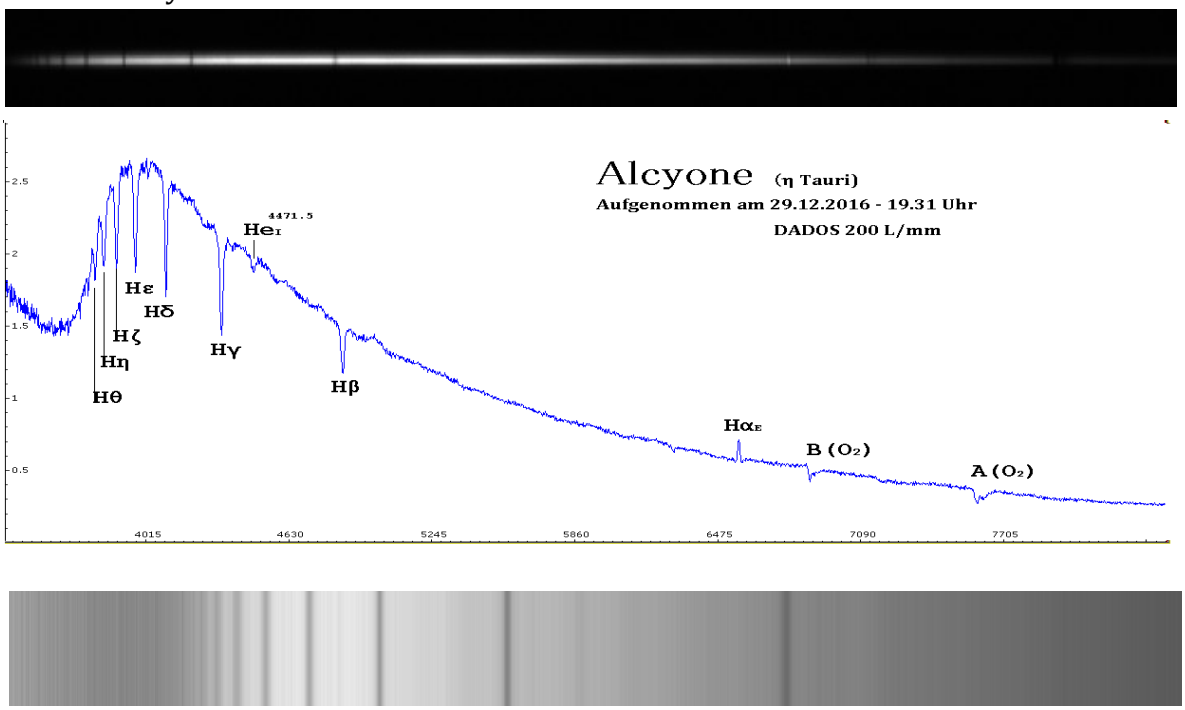
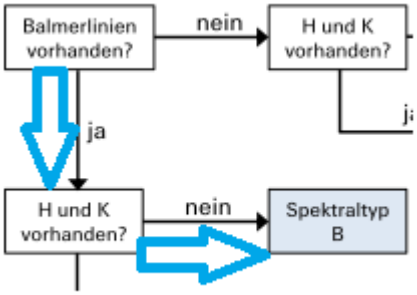


Abb. 33: Alcyone

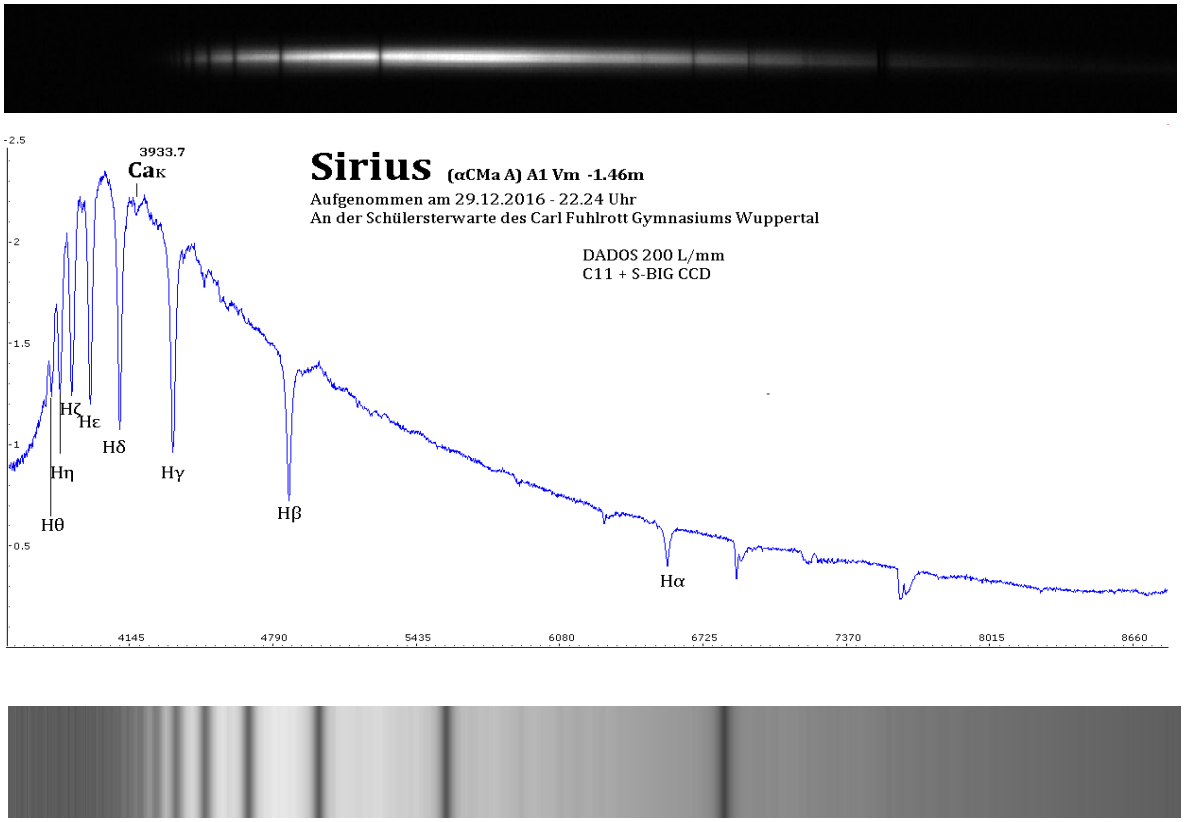


Im Vergleich zu Mintaka sind die Absorptionslinien im sw-Spektrum deutlich intensiver und das Muster ist klar zu erkennen. In der linken Hälfte fehlen auch hier die Fraunhoferlinien und K für Calcium, also Klasse B (Tab. 4 ->B7e). Das Suffix 'e' bezeichnet die Emissionslinie von H_α . Dieser Sonderfall tritt bei Sternen mit einer Akkretionsscheibe um den Stern ein, in der die Emission von H_α durch Absorptions-Emissions Effekte der Akkretionsscheibe, welche überwiegend aus aus Wasserstoff besteht, entstehen.



Im Plot sind noch die tellurischen Linien (Absoption in der Erdatmosphäre) für Sauerstoff zu sehen, welche die Software bei Bedarf für eine Optimierung der Darstellung automatisch entfernen bzw. herausrechnen kann.

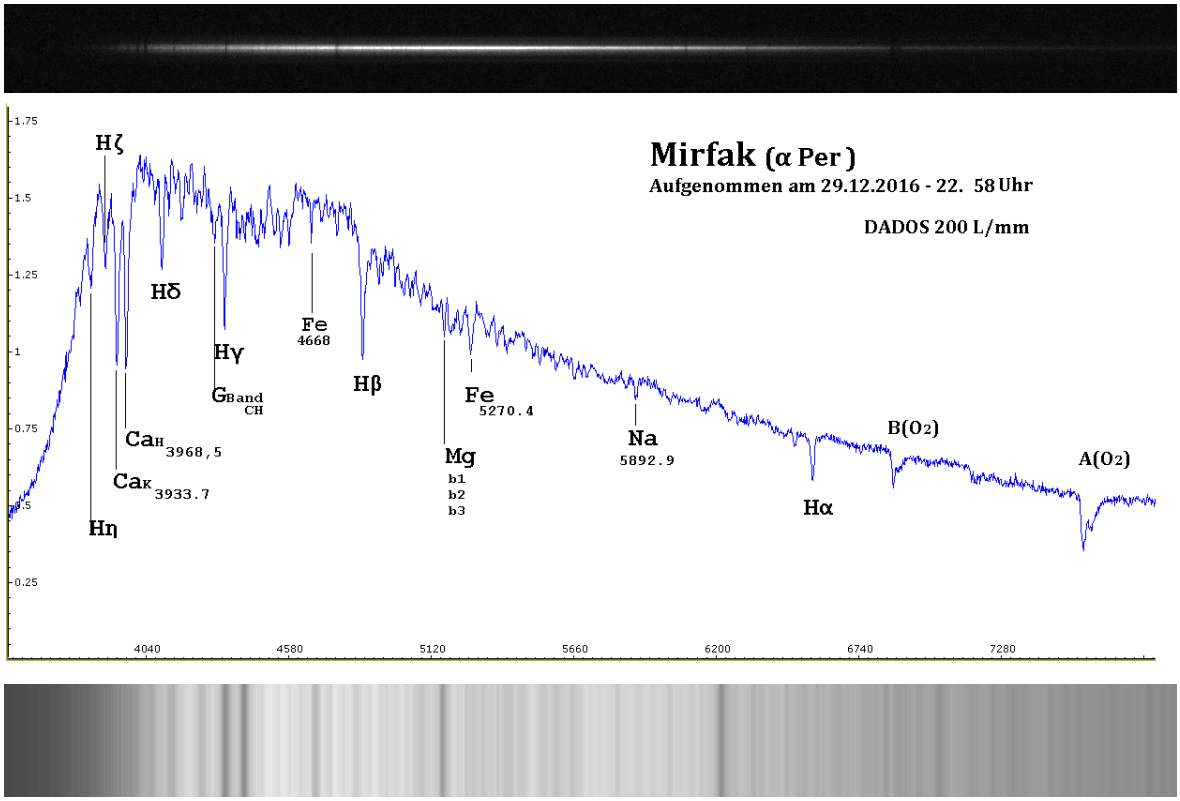
Abb. 34: Sirius A



In diesem Fall wird bezüglich der vorhandenen Ca_K Linie das Intensitätsverhältnis zwischen Ca_K zu H_γ im Plan berücksichtigt und endet bei A-A5. In diesem Fall sehr passend. Die Balmerserie ist hier sehr markant ausgeprägt.

Aus den letzten drei Spektren wird auch qualitativ deutlich, dass sich das Maximum der Intensitätsverteilung in Richtung höherer Wellenlängen verschiebt.

Abb. 35: Mirfak



Im sw-Spektrum sind jetzt links dominante Ca Linien zu erkennen und das Spektrum sieht im Ganzen gröber Strukturiert aus. Das Grundmuster der Balmerserie H_α bis H_γ ist noch zu erkennen. Es sind jedoch mit bloßem Auge ohne Vergrößerung kaum Aussagen möglich. Im Plot erkennt man jetzt Eisen und einen Ansatz einen Natriumlinie. Aus dem Plan ergibt sich folgender Weg:

Klasse A6-F (s. Schaubild rechts)

Die Klassifizierung in Henry-Draper Katalog wird mit FV1b angegeben. Zusätzlich zu den bekannten Linien tritt eine neue Linie auf, die CH Molekülbande (G) mit Vibrations- und Rotationszustände([12], S.246) , welche als Orientierungsmarke bei Spektren mit Calciumlinien helfen kann.

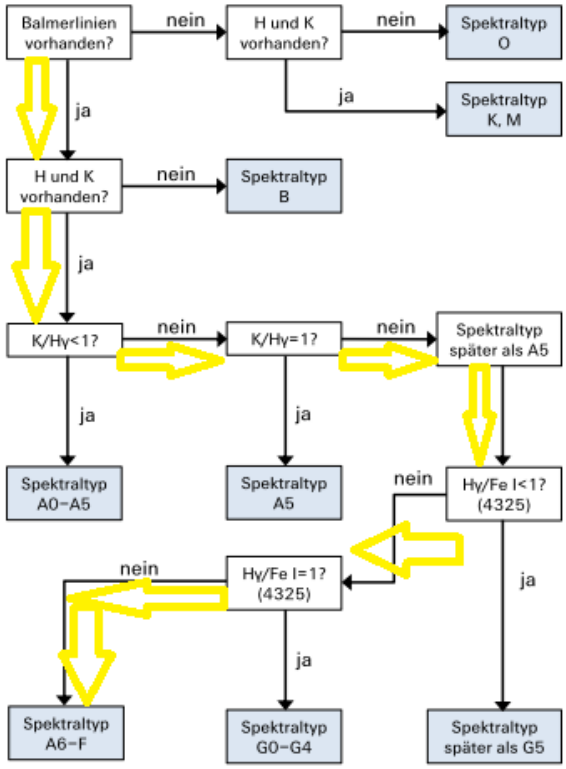
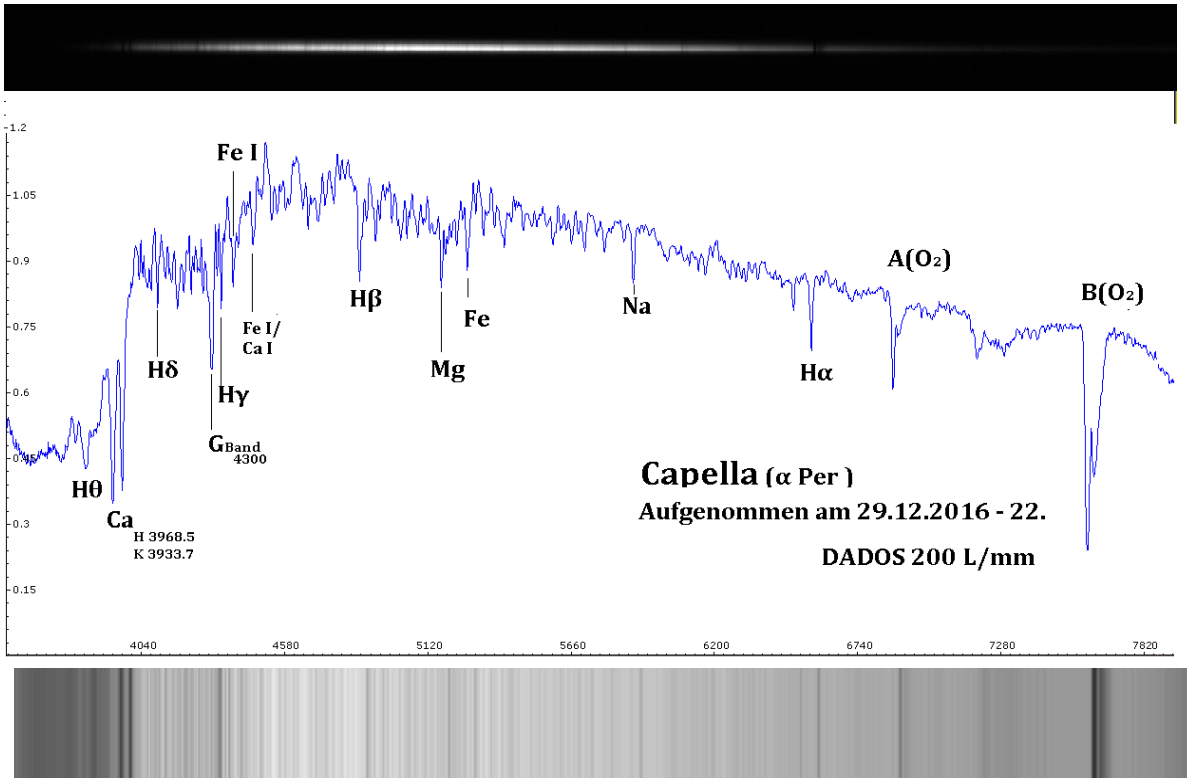


Abb. 36: Capella



In diesem sw-Spektrum sind wieder die starken Fraunhoferlinien des Calciums zu sehen und die Feinstrukturierung des Spektrums nimmt zu; die Balmerserie ist noch zu erkennen, fügt sich jedoch merkbar in den Hintergrund ein und sind ab dieser Klasse als Orientierungspunkt für Kalibrationen nicht mehr nützlich. Neue Metalllinien des Magnesiums erscheinen im Plot. Im Ablauf (s.rechts) entscheidet sich die Einordnung nach der Interpretation der Linienstärke. Es kann jedoch ungefähr von gleicher Intensität ausgegangen werden, was schlussendlich Klasse G0-G4 ergibt. (Tab.4 =G0)

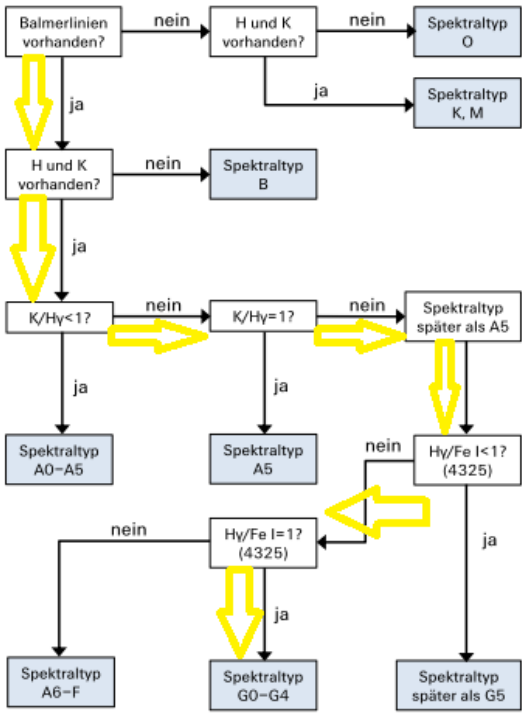
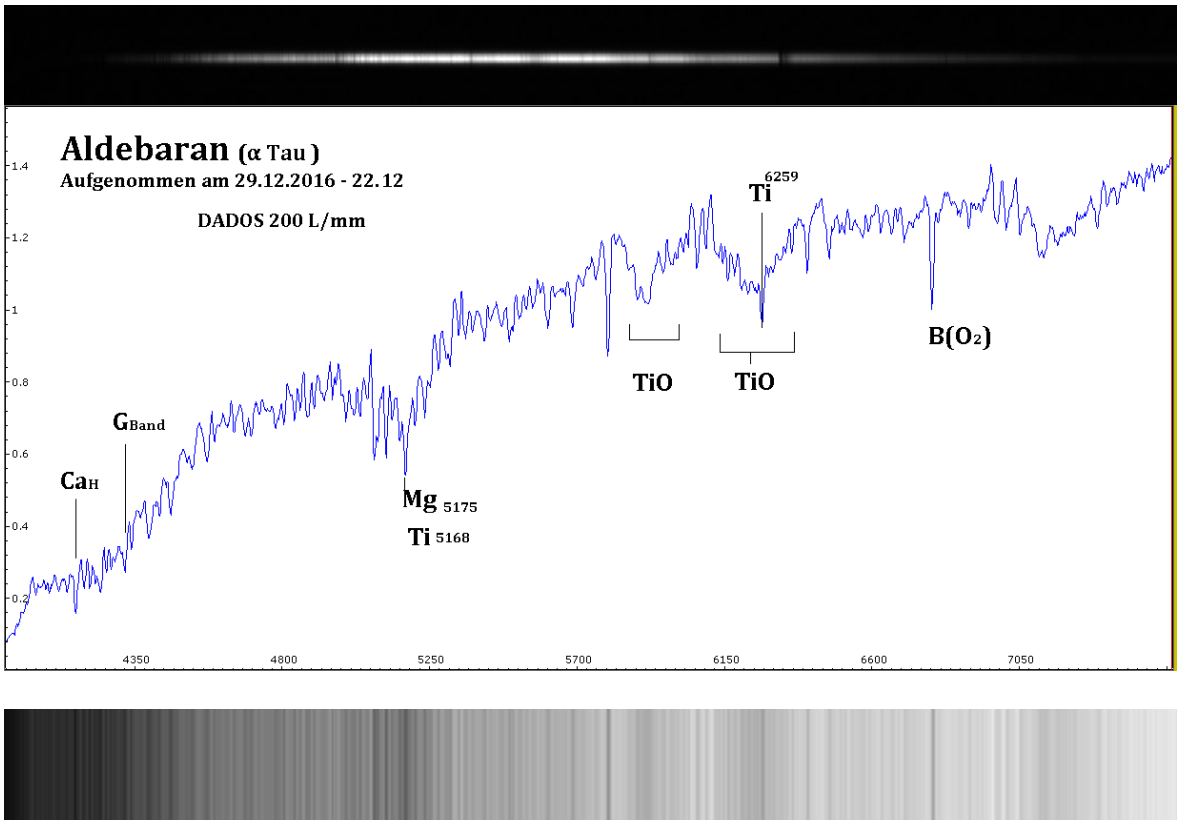


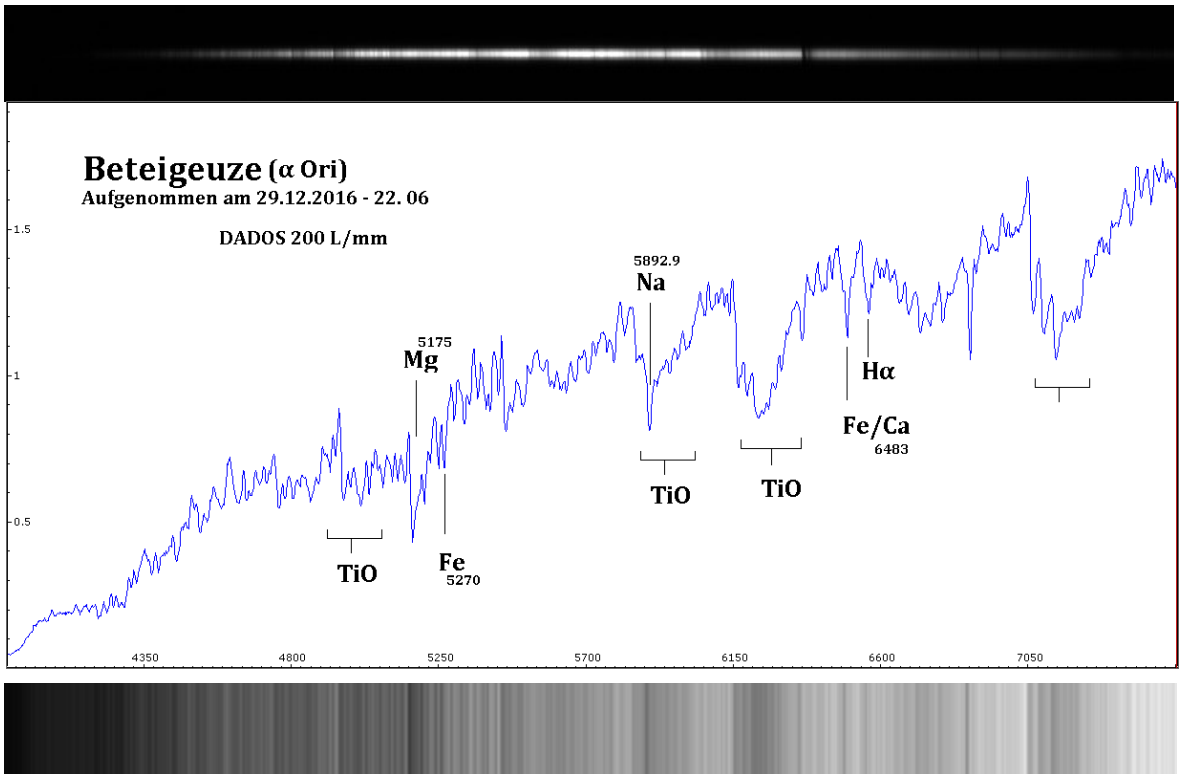
Abb.: 37: Aldebaran



Im sw-Spektrum sind nun breite dunkle Bereiche, sogenannte Bandenstrukturen zu erkennen, ein klarer Hinweis auf eine späte Klasse, welche dem Titanoxid zugeordnet werden kann die Vielzahl der Metallabsorptionen hat eine beinahe verrauschte Struktur. Eine Zuordnung auf der Basis der optischen Eindrücke wird kaum mehr möglich, da die verwendete Auflösung hier an Ihre Grenzen kommt. Es kann z.B. nicht zwischen Mg (5168-5183Å) oder TiO (5168Å)unterschieden werden. Auf dem sw-Spektrum in dennoch die Ca Linien, meiner Einschätzung die Ca_H Linie zu erkennen, so dass der vorgezeichnete Weg nachvollziehbar ist. Die Schwierigkeit der Deutungen in den Spektralklassen K und M zeigt sich schon daran, dass beide in der selben Klassierung im Plan stehen.

In der Wellenlängenkalibration auf 4 Stützstellen konnte lediglich ein RMS Wert von 2.39 erreicht werden.

Abb. 38: Beteigeuze



Das gleiche Bild ergibt sich bei Beteigeuze. Mit Hilfe von Bildmaterial über [20] wurden noch die Linien für Magnesium und Eisen gefunden, rein optisch ergibt sich jedoch der selbe Weg wie bei Aldebaran. Die Klassierung endet bei K oder M. Die rechte Bandenstruktur kann sowohl Wasserdampf oder Sauerstoff sein.

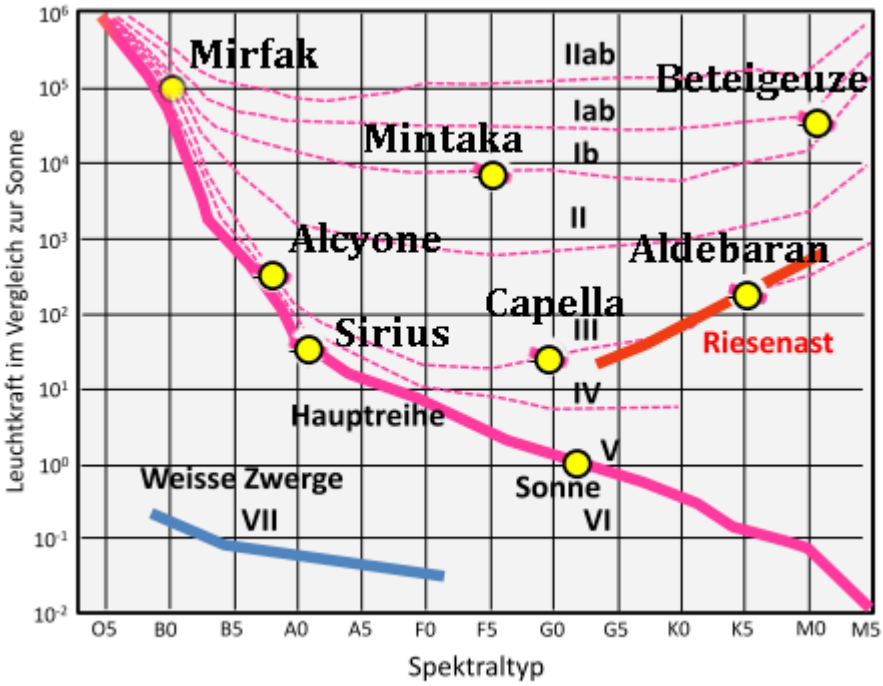
In der Erstellung mit 6 Referenzpunkten konnte lediglich ein RMS Wert von 1,76 erreicht werden, was zudem die Verlässlichkeit der Zuordnung schwierig macht.

In Walkers Buch [A17] existiert noch eine andere Variante, welche für die Unterscheidung der Klassen K und M über die Linienintensitäten G-Band (4300-4310Å) / TiO (5168Å) entscheidet. Dieser Weg führt jedoch in beiden Fällen zu keinem verlässlichen Ergebnis, da entweder das G-Band oder die TiO Bande nicht genau lokalisiert werden kann.

3.5. Einordnung der Ergebnisse

Problematisch im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit wäre die Redundanz vom Wissen über die Klassen und den Einordnungsprozess, im Wissen, dass diese bereits bekannt sind. Der Lernwert dieser Arbeit behandelt also die Mustererkennung von Spektren und ihre - in Bezug zu den verschiedenen Absorptionslinien - Probleme der Orientierung bei der praktischen Arbeit. Die Einordnung der Ergebnisse ins Hertzsprung-Russell-Diagramm zeigt die übergreifenden Ergebnisse der statistischen Auswertung und Ihrer Interpretation.

Abb.39: Einordnung der Spektralklassen in das HRD



[A17] (bearbeitet)

Wie zu erkennen ist, kann die Zuordnung der Spektralklasse eine erste Orientierung hinsichtlich der Leuchtkraftklasse sein, ohne Dezimalstellen genaue Werte zu ermöglichen. Die Unterscheidung der Spektralklassen hinsichtlich ihrer absoluten Helligkeit findet aber erst über die Größenklassen, welche in Tabelle 3 aufgezählt sind, einen wirklichen Zusammenhang.

Der genaue Deutungszusammenhang über die realen Verhältnisse ist jedoch immer fraglich, wie bereits bei der Spektralklassenzuordnung ersichtlich geworden ist. Beispielsweise sind Mintaka und Sirius Mehrfachsternensysteme, so dass in Bezug zur Eindeutigkeit und Belastbarkeit der gemessenen Eigenschaften innerhalb eines komplexen Themengebietes nur mit modernsten astronomischen Mitteln und Mehtoden eine genaue Zuordnung der relevanten Parameter erfolge kann, damit sie einen wissenschaftlichen Anspruch genügen können.

Das Herzsprung-Russell-Diagramm dient dabei als Orientierungs- und Kontrollmethode.

3.6. Problematisierung der Flusskalibrierung

Die Instrumentenfunktion ist durch eine Division mit einem Bezugsspektrum entstanden nach der Beziehung[16]:

$$Instrumentenfunktion = \frac{Rohspektrum}{flusskalibriertes\,Spektrum} \tag{13}$$

Durch die Schar von Instrumentenfunktionen ist erkennbar, das die gesamte abbildende Optik von weit mehr als nur den verwendetet Kernbauteilen wie Teleskop, Spektrograf und Kamera abhängt, obwohl sich eine gemeinsame Grundstruktur zeigt. Zur Vergleichbarkeit der Funktionen wurden die Plots im abgebildete Wellenlängenbereich von 350-750 nm ausgeschnitten

Der Hauptgrund der Unterschiedlichkeit der Funktionen findet sich u.a. in den atmosphärischen Bedingungen und in vernachlässigbaren Anteilen im interstellaren Medium,. Da schon unser blauer Tageshimmel eine Folge der Rayleigh-Streuung ist gibt es zudem noch weitere Bedingungen, die die Transmission elektromagnetischer Strahlung beeinflussen. Aufsteigende warme Luft kann bspw. wie eine Linse wirken und chromatische Disperion verursachen.

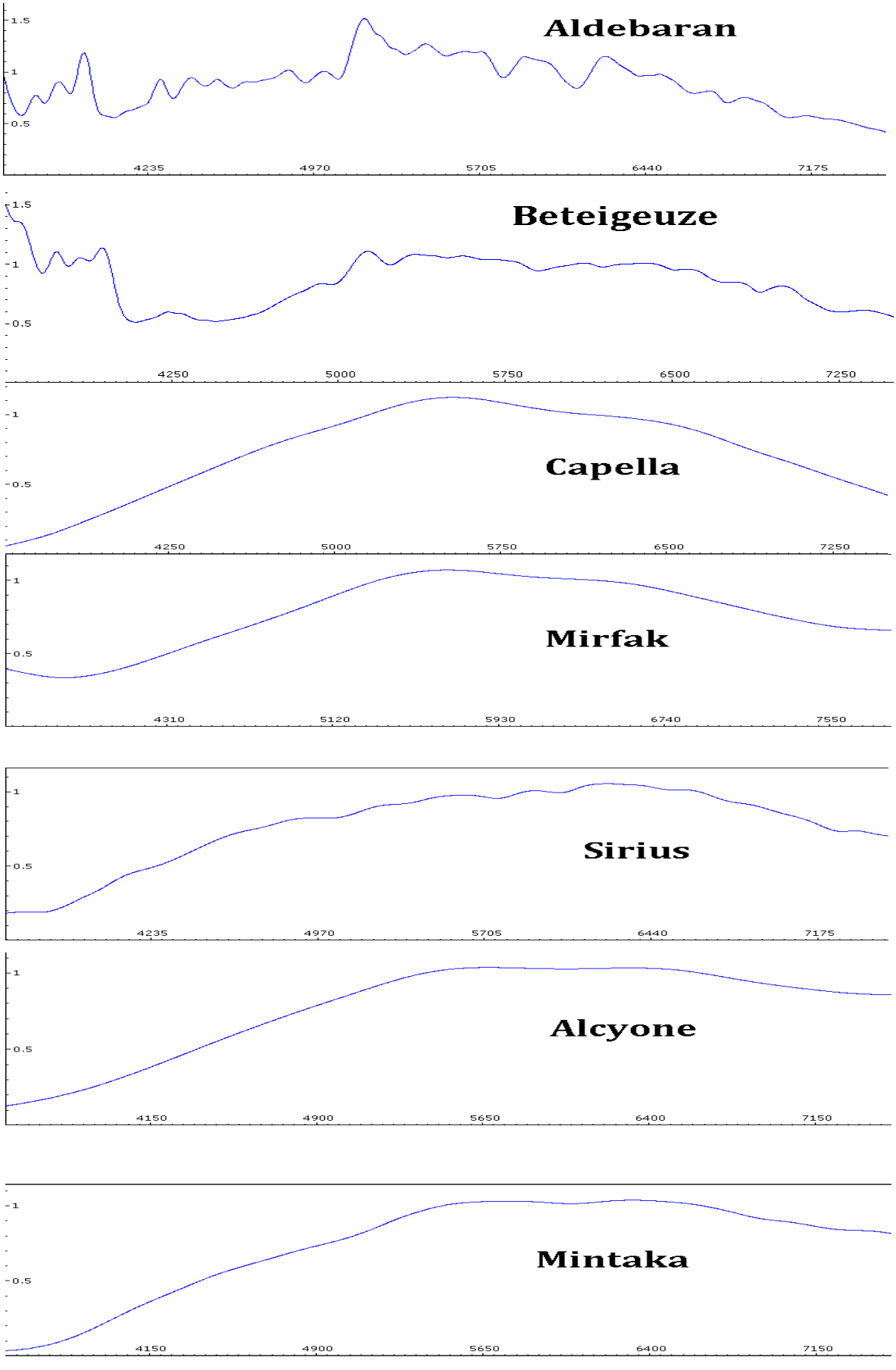
Die erste Erkenntnis für spektroskopische Aufnahmen ist demnach, dass eine präzise Flusskalibration nur über eine Standardkerze bekannter Wellenlängenverteilung außerhalb der Atmosphäre möglich ist. Deshalb wird in diesem Verfahren aus einer Datenbank ein mit professionellen Mitteln gewonnenes normiertes Bezugsspektum gewählt, um sich dem 'wahren' Flussbild des gemessenen Stern 'anzunähern', um den Prozess zu verdeutlichen.

Bei der Division des Rohspektrums durch die Instrumentenfunktion wird nach (13) der Fluss des Bezugsspektrums in der Messung abgebildet. Leider gibt es mit den Mitteln der Sternwarte des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums keine alternative Lösung für dieses Problem.

Unter diesen Gesichtspunkten ist auch klar, warum eine Bestimmung der Effektivtemperatur nach Planck keinen Sinn macht, da so lediglich die Temperatur des Bezugsterns dargestellt würde.

Es folgt ein Vergleich der ermittelten Instrumentenfunktionen:

Abb.40: Instrumentenfunktionen der Messreihe



4. Fazit

Der eigenständige Projektkurs Astronomie am Carl-Fuhlrott-Gymnasium ist für Schüler der Qualifikationsphase des Leistungskurses Physik der 11.Klasse (Q1) offen und eine der Wahlmöglichkeiten zur Erbringung der benötigten Leistungsnachweise zur Zulassung der Abschlussprüfung. Darüber hinaus könne jedoch auch andere Schüler aus Interesse teilnehmen. Die erbrachten Leistungen fliessen für die Schüler der Qualifikationsphase als 5. Fach in das Abitur ein. Darüber hinaus können weiterführende Arbeiten als besondere Lernleistung eingebracht werden, unter Anderem zur erarbeitung eines MINT-Zertifikates.

Anstelle weitreichender Bezüge zu Jhon Deweys oder Hugo Gaudings ([21], S.179) Phasenmodellen der Arbeitspädagogik oder didaktischen Grundlegungen zu Projektarbeiten möchte ich zuallererst meine eigenen Eindrücke der Möglichkeiten eines astronomischen Projektkurses schildern.

Im Regelfall werden Schülerrinnen und Schüler im Rahmen von Unterricht mit bereits vollständigen Erkenntnissen der Sie umgebenden Welt 'beschäftigt', in der Hoffnung, dass diese einen Kompetenzerwerb erfahren. Problematisch ist dabei , dass Lernen „in Seiner Struktur anarchisch ist“[20]. Also können nur Lernanlässe geschaffen werden, die im Optimalfall zu Lerngelegenheiten werden können. Den Projektkurs sehe ich in diesem Zusammenhang als Exzellenzinitiative. Der eigentliche Zugewinn besteht darin, dass Schüler sich mit praktischen Aspekten eines größeren Vorhabens insofern auseinandersetzten, da Sie über die Ergebnisse Ihrer Arbeit im Zentrum des Prozesses stehen und auf eine greifbare Erfahrung hinsichtlich Ergebnis und Performanz stützen können.

Der Bezug zum Lernplan kann zum Inhaltsfeld Mechanik, Quantenobjekte und Strahlung und Materie in vielfältiger Weise hergestellt werden [22]. Als Einsatzmöglichkeit in der Schule sehe ich keine Einschränkung bzgl. der Kursstufe oder der Zielgruppe, jedoch Einschränkungen in Dimensionen der Betreuung und des Equipments. Vor allem bietet das Fach Astronomie in Kombination mit Naturwissenschaft einen breiten interdisziplinären Ansatz.

Im ganzen habe ich mein Ziel, der Astronomie und Ihrer Methoden zur Erkenntnisgewinnung ein Stück nähergekommen und sehe viele Möglichkeiten das erworbene Wissen im Regelunterricht einbringen zu können.

Zuletzt möchte Ich Herrn Koch für die gute Betreuung und sein Engagement danken!

Quellen

[1] Scholz, Matthias: kleines Lehrbuch der Astronomie,
ebook
https://www.astronomie.de/bibliothek/kleines-lehrbuch-der-astronomie/
Band 1-15
Beispielhafter Link für Band 1:
https://www.astronomie.de/fileadmin/user_upload/Bibliothek/kleines_lehrbuch_der_astronomie/Kleines%20Lehrbuch%20der%20Astronomie%20und%20Astrophysik%20Band%202.pdf (Zugriff zuletzt 22.3.2017, 16.34 Uhr)

[2] Hanslmeier, Arnold: Einführung in Astronomie und Astrophysik,
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

[3] Dvorak, Jhon(2013):The Women Who Created Modern Astronomy,
Zeitschrift: Sky&Telescope 8/2013, S.28-34

[4] http://www.epsilon-lyrae.de/Spektroskopie/ArtikelSpektroskopie/ArtikelGeschichte.html (Zugriff zuletzt 21.3.2017, 11. 53 Uhr)

[5] Hecht, Eugene : Optik,
Oldenbourg Verlag, München 2009

[6] Grehn, Joachim; Krause, Joachim(Hrsg.):Metzler Physik, Astrophysik,
Ausgabe Bayern,Schroedel Verlag Braunschweig 2012

[7] Echelle Spektrometer:
http://www.uni-tuebingen.de/fakultaeten/mathematisch-naturwissenschaftliche-fakultaet/fachbereiche/physik/institute/astronomie-astrophysik/institut/astronomie/forschung/abgeschlossene-projekte/orfeus/echelle-spektrometer.html (Zugriff zuletzt 24.3.2017, 2.19 Uhr)

[8] Spektroskopiegeschichte Zeiss-Planetarium Jena:
http://spektroskopie.fg-vds.de/pdf/spektroskopiegeschichte.pdf
(Zugriff zuletzt 18.3.2017, 12.00 Uhr)

[9] Newton Experimentum Crucis:
https://www.princeton.edu/~his291/Experimentum_Crucis.html (Zugriff zuletzt 18.3.2017, 14.21 Uhr)

[10] Schäfer, Hans:Elektromagnetische Strahlung: Informationen aus dem Weltall, Vieweg Verlag, Braunschweig 1985

[11] Tipler,Paul A.; Mosca,Gene: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure, Spektrum Verlag, Heidelberg 2004

[12] Wilfreid Kuhn (Hrsg.):Handbuch der experimentellen Physik, Aulis Verlag, Hallbergmoos 2011

[13] Paul A. Tipler, Mosca, Gene: Moderne Physik, Oldenbourg Verlag, München 2010

[14] https://books.google.de/books?id=DUAgBAAAQBAJ&pg=PA115&lpg=PA115&dq=temperatur+Alkione_(Stern&source=bl&ots=fzw2Lk3Al3&sig=RaMwcQQ1amVy5jNxlFxI3OU9Zws&hl=de&sa=X&ved=0ahUKEwjn07rB1PHSAhVHWCwKHZ5tAtAQ6AEIKTAB#v=onepage&q=temperatur%20Alkione_(Stern&f=false (Zugriff zuletzt 21.3.2017, 2.19 Uhr)

[15] Koch, Berd : Teleskopkunde, PDF; Arbietsmaterialien der Schülersternwarte des CFG

[16] Koch, Bernd: Tutorial-DADOS-V35D-Version:2014-04-14 – Arbeitsmaterialien der Schülersternwarte CFG

[17] Walker, Richard: Analyse und Interpretation astronomischer Spektren, Onlineressource/Arbeitsmaterial der Schülersternwarte CFG, 12/2013 http://docplayer.org/10843605-Analyse-und-interpretation-astronomischer-spektren.html (Zugriff zuletzt 24.3.2017, 13.44 Uhr)

[18] Richard Walker:Spektralatlas für Amateurastronomen, Ebook, Arbeitsmaterial der Schülersternwarte CFG, 5/2011

[19] Bildmaterial zu Aldebaran:
https://farm9.static.flickr.com/8176/8044296280_49df0a73d3_b.jpg (Zugriff zuletzt 25.3.2017, 19.25 Uhr)
https://hiveminer.com/Tags/aldebaran,spectrum/Timeline (Zugriff zuletzt 25.3.2017, 19.29 Uhr)

[20] Beispielspektren:
http://www.sternwarte-habichtswald.de/astromania/galerie/Spektren/spektren.html#Anchor-Al-34063

(Zugriff zuletzt 25.3.2017, 10.12 Uhr)

[20] Meyer, Hilbert: Unterrichtsmethoden I,Cornelsen Verlag, Berlin 2013

[21] Blüggel, Lars; Hegemann, Annelie; Schmidt, Martin: Impulse Physik,
Ernst Klett Verlag Stuttgart 2015

[22] Lehrpläne Sekundarstufe II Physik NRW:
http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SII/ph/KLP_GOSt_Physik.pdf

Abbildungen

[A1]:) http://www.wittmann-travel.de/fileadmin/Bilder/Sternwarte/Spektralklassen%20der%20Sterne.jpg (Zugriff: 18.3.2017,0.41 Uhr)
[A2]:http://www.uni-duesseldorf.de/MathNat/Biologie/Didaktik/Fotosynthese_neu/dateien/licht/bilder/licht.jpg
[A3]: http://rohr.aiax.de/spectrum_02.jpg (Zugriff: 19.3.2017,2.46 Uhr)
[A4]:http://www.chemgapedia.de/vsengine/media/vsc/de/ph/14/ep/einfuehrung/wellen/bilder/brechung1.png (Zugriff: 21.3.2017,10.17 Uhr)
[A5] http://www.phynet.de/upload/Optik%20-%20Huygens.png (Zugriff: 21.3.2017,12.34 Uhr)
[A6] Bernd Koch 2014, DADOS Tutorial V35D
[A7] http://www.spektrum.de/lexika/images/optik/fff556_w.jpg (Zugriff: 21.3.2017,16.24 Uhr)
[A8]https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/55/Bohr-atom-PAR.svg/2000px-Bohr-atom-PAR.svg.png (Zugriff: 22.3.2017,22.46 Uhr)

[A9] https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Wasserstoff-Termschema.svg (Zugriff: 22.3.2017,22.58 Uhr)

[A10] http://www.cefns.nau.edu/geology/naml/Meteorite/Images/PlanckCurve.jpg#

[A11]http://www.sternwarte-habichtswald.de/astromania/galerie/Spektren/spektren.html#Anchor-Al-34063

[A11]https://en.wikipedia.org/wiki/Williamina_Fleming#/media/File:Williamina_Paton_Stevens_Fleming_circa_1890s.jpg

[A12]http://platestacks.cfa.harvard.edu/files/platecollection/files/antonia_maury.jpg?m=1466011228

[A13]https://en.wikipedia.org/wiki/File:Annie_Jump_Cannon_1922_Portrait.jpg

[A14]Gruppenbild unten links

[A15] Gruppenbild unten rechts

http://www.tagesspiegel.de/images/pickerings-harem-the-group-included-harvard-computer-and-astronomer-henrietta-swan-leavitt-18681921-annie-jump-cannon-18631941-williamina-fleming-18571911-and-antonia-maury-18661952-foto-harvard-college-observatory/19544364/1-format6001.jpg

http://public.media.smithsonianmag.com/legacy_blog/pickering-611.jpg

[A16] http://www.sternwarte-habichtswald.de/astromania/galerie/Spektren/spektren.html#Anchor-Al-34063

[A31] Richard Walker (2013): Analyse und Interpretation astronomischer Spektren (Onlineressource/Arbeitsmaterial der Schülersternwarte CFG)