

Spektralanalyse und Kategorisierung zirkumpolarer Sterne

-

Besondere Lernleistung

erarbeitet mit dem Tutor Herr Jan Mager, in Kooperation
mit dem Verein der Sternwarte Trier e. V., von Lucas
Eekhof

Inhalt

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Einleitung: | 4 |
| 1.1 | Vorwort: | 4 |
| 1.2 | Eigene Motivation/Relevanz des Themas: | 4 |
| 2 | Wissenschaftliche Grundlagen: | 5 |
| 2.1 | Absorption und Emission von bestimmten Wellenlängen durch bestimmte Stoffe | 5 |
| 2.2 | Sternaufbau und die absorbierende Gasschicht | 5 |
| 2.3 | Spektroskopie | 7 |
| 2.4 | Einordnung in den Wissenschaftlichen Kontext | 10 |
| 2.4.1 | Geschichte der Spektroskopie und Spektralklassifizierung: | 10 |
| 2.4.2 | Das Herzprung-Russell Diagramm: | 11 |
| 2.5 | Korrektur auf das Plancksche Strahlungsgesetz | 13 |
| 3 | Arbeitsprozess: | 15 |
| 3.1 | Beobachtungsprozess und verwendetes Material | 15 |
| 4 | Evaluation: | 16 |
| 4.1 | Auswertung der Ergebnisse | 16 |
| 4.1.1 | Beta Leonis | 16 |
| 4.1.2 | Alpha Canis Minoris | 17 |
| 4.2 | Interpretation und Literaturvergleich | 17 |
| 4.2.1 | Beta Leonis | 18 |
| 4.2.2 | Alpha Canis Minoris | 18 |
| 4.3 | Anmerkung: | 20 |
| 4.4 | Fazit | 20 |
| 4.5 | Fehlerbetrachtung | 20 |
| 4.5.1 | Auswertung auf die Kernfrage | 20 |
| 4.5.2 | Weiteres zur Genauigkeit | 21 |
| 4.6 | Aufgetretene Probleme bei der Durchführung: | 22 |
| 4.6.1 | Hardwareprobleme: | 22 |
| 4.6.2 | Softwareprobleme | 23 |
| 5 | Literatur- und Quellenverzeichnis | 23 |
| 5.1 | Literaturverzeichnis | 23 |

| | | |
|-----|----------------------------|----|
| 5.2 | Quellenverzeichnis | 24 |
| 6 | Anhang | 24 |
| 6.1 | Beta Leonis..... | 24 |
| 6.2 | Alpha Canis Minoris..... | 28 |
| 7 | Erklärung des Autors | 31 |

1 Einleitung:

1.1 Vorwort:

Die Astronomie ist eine immer weiter voranschreitende Wissenschaft, die während Wissenschaften wie die Teilchenphysik eher das Mikro beschreiben, aus den gesammelten Erkenntnissen das Makro der Dinge beschreibt. Gestattet man sich einen Blick auf den Teilbereich der Kosmologie, so wird dies besonders deutlich: Nicht ein Aspekt der Gesamtheit des Universums wird hinterfragt und erschlossen, nein, es ist diese große Gesamtheit selbst die ergründet und beschrieben wird. So muss eine solche Wissenschaft, die die große Gesamtheit des Universums begreifen will, an einer Stelle Fuß fassen. An diesem Punkt kommen solche Beobachtungen zum Tragen, wie sie auch im Rahmen dieses Projekts durchgeführt worden sind. Durch die Spektroskopie wird es möglich das Licht, die fast einzige Nachricht, die uns über die großen Weiten des Alls noch erreicht, zu zerlegen und bis in seine kleinste Eigenschaft hin zu analysieren, um ihm so Informationen über Art und Zustand der Stoffe denen es begegnete abzugewinnen.

1.2 Eigene Motivation/Relevanz des Themas:

Durch die fortwährende Motivation der Wissenschaft neue Hypothesen zu untermauern und neue Erkenntnisse zu gewinnen ist es nötig empirische Beobachtungen anzustellen. Die astronomische Beobachtung ist dabei eines der wichtigsten Mittel der Physik und der Kosmologie: Durch sie kann der Mensch die tatsächlichen Verhältnisse im Universum begreifen, und sich auf der so neu aufgeschlossenen Architektur des Wissens zu eigenem Wohle verwenden und sich weiterentwickeln. Das Durchschauen dieser Bezüge erlaubt es dem Menschen, sein eigenes, rationales Verständnis zu entwickeln und verbessern. So denke man beispielsweise an die zahlreichen Erfindungen und Neuerungen, welche von der Astronomie und Physik erst möglich gemacht wurden: Das Global Positioning System, die genaueste Kartierung der Erde und ihrer Atmosphäre oder der Satellitenfunk: All jene Errungenschaften leisten ihren großen Teil nicht nur zur Verbesserung der Lage des einzelnen, sondern eröffnen durch ihren monumentalen Charakter, und die Notwendigkeit der Kooperation neue Wege, Völker und Staaten zu verbinden, die internationale Kooperation zu fördern.

Im Übrigen ist es wichtig, die Möglichkeiten der Amateurastronomie immer weiter auszureizen, und durch Veröffentlichung der Ergebnisse immer mehr Leute zu motivieren, mit den ihnen zur Verfügung stehenden Mitteln und Ressourcen nach den Sternen zu greifen. Ein weiterer Beweis der Machbarkeit solcher Beobachtungen mit den Mitteln der Amateurastronomie ist eine wichtige Botschaft, die viel Potential hat, neues Interesse und Motivationen im Bereich der amateurtechnischen Beobachtung zu wecken. ¹

¹ Aus eigener Erfahrung bot sich mir selbst ein Fenster zu der Wissenschaft durch die Astronomie-AG des Vereins der Sternwarte Trier e. V. und insbesondere den aktuellen AG-Leiter Herrn Dr. rer. nat. Rüdiger de Boer, welcher das Projekt mit ständiger Beratung begleitete

2 Wissenschaftliche Grundlagen:

2.1 Absorption und Emission von bestimmten Wellenlängen durch bestimmte Stoffe

Um den Nucleus jedes Atoms sind Elektronen angeordnet. Diesen Elektronen lassen sich bestimmte, diskrete Energiezustände zuweisen: Sie müssen sich auf einem dieser Energieniveaus aufhalten. Energiewerte, die sich nicht auf einem dieser diskreten Niveaus befinden, sind verboten. Im Grundzustand, dem unangeregten Zustand eines Atoms, liegen alle Elektronen auf ihren geringstmöglichen Energiezuständen vor. ²

Nun können Elektronen auch ihren Energiezustand wechseln: Wird einem Elektron eine bestimmte diskrete Energiemenge zugeführt, so kann es auf ein höheres Energieniveau aufsteigen. Liegt es auf einem höheren Energielevel, so kann es durch Abgabe von einer diskreten Energiemenge auf ein niedrigeres abgesenkt werden. Diese Energieaufnahme und -abgabe geschieht durch Photonen: Sie als Energieträger ermöglichen den Elektronen zwischen den diskreten Zuständen zu wechseln. Nun ist die Energie eines Photons proportional zu $\frac{1}{\lambda}$, nach der Formel $W = h \cdot \frac{c}{\lambda}$, wobei h als Proportionalitätsfaktor die Planck-Konstante mit $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ darstellt. Bei Absorption oder Emission eines Photons durch ein Elektron wird die gesamte Energie des Photons vom Elektron aufgenommen, beziehungsweise abgegeben. Das bedeutet, dass W nur diskrete Werte abhängig von den Energieniveaus der Elektronen im Atom annehmen kann. Da sich nun aber aus der Formel für W ergibt $\lambda = h \cdot c \cdot W$, bedeutet dies, da dieser Term der Formel sonst nur Konstanten enthält, dass auch λ nur diskrete Werte annehmen kann. ³

Bei der Absorption wie bei der Emission von Licht durch Atome werden also nur bestimmte Wellenlängen absorbiert, beziehungsweise emittiert, diese sind abhängig von der Lage der Energieniveaus der Elektronen im Atom, welche sich durch bestimmte stoffabhängige Eigenschaften des betrachteten Elements oder Moleküls festlegen: Die Wellenlänge ist also element- beziehungsweise molekülabhängig. ⁴

2.2 Sternaufbau und die absorbierende Gasschicht

Sterne an sich emittieren auf der einen Seite durch ihre die Hitze ihrer internen Fusionsvorgänge ein kontinuierliches Spektrum⁵, auf der anderen Seite fungieren es in den äußeren Sternschichten als absorbierendes Medium. Diese äußeren Sternschichten bestehen aus den gleichen Elementen wie der Rest des Sterns, bilden also die Sternkomposition ab. So ist es möglich, durch eine Beobachtung und Spektroskopie des Lichtes, welches vom Stern auf der Erde eintrifft, eine genaue Aussage über die Zusammensetzung des Sterns zu treffen (siehe Abschnitt 2.1).

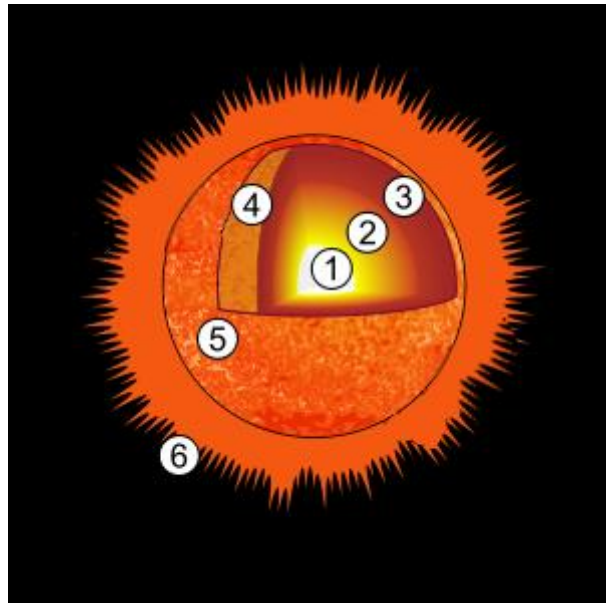
² Vgl. <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/6010> (abgerufen am 10.06.2018)

³ Vgl. <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/6010> (abgerufen am 10.06.2018)

⁴ Vgl. <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/6010> (abgerufen am 10.06.2018)

⁵Vgl. Karttunen, Hannu (Hrsg.): Astronomie – Eine Einführung S. 121

Der Aufbau von Sternen ist nicht ohne weiteres zu beobachten oder zu messen: Um sich die Vorgänge in den riesigen Gaskugeln zu erschließen und herzuleiten, werden einige theoretische Annahmen und Überlegungen gemacht. Aus verschiedenen Näherungen und Annahmen heraus werden Gleichungen erarbeitet, die Kenntnis über die sogenannten Zustandsgrößen von Sternen ermöglichen, wie beispielsweise Radius, Masse, Druck oder Oberflächentemperatur. Auch können Schlüsse über bestimmte Vorgänge wie Energieumwandlung oder Energiefluss gezogen werden. Betrachtet man nun die verschiedenen Werte innerhalb des Sterns, so fällt auf, dass sich durch einige markante Gradienten bestimmte Gebiete im Sterninneren abgrenzen lassen, hier in dieser Darstellung markiert und im Folgenden erläutert⁶:



1. Kern:

Im Kern des Sterns finden die Fusionsreaktionen statt, die durch ihre enorme Energieabgabe das hydrostatische Gleichgewicht zwischen Strahlung und Druck innerhalb des Sterns aufrechterhalten.⁸

2. Strahlungszone:

Dabei erfolgt die Energieabgabe aus dem Inneren des Sterns aufgrund der enorm hohen Dichte des Materials nur sehr langsam, was zu einem starken Temperaturgradienten vom Kern über die Strahlungszone führt.⁹

3. Konvektionszone:

⁶ Vgl. Heise, Matthias: Ausbildungsseminar „Kerne und Sterne“: Grundgleichungen des Sternaufbaus (S.3)

⁷ <http://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/1331208> (abgerufen am 08.06.2018)

⁸ Vgl. <http://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/1303605> (abgerufen am 08.06.2018)

⁹ Vgl. <http://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/1303605> (abgerufen am 08.06.2018)

Der starke Temperaturgradient nach außen hin treibt in der Konvektionszone gewaltige Konvektionsmechanismen an, die in einzelnen Zellen vom Rand der Strahlungszone bis zur Photosphäre enorme Masse- und Energieströme treiben. ¹⁰

4. Photosphäre:

In der Photosphäre nimmt die Massedichte rapide ab, sodass die Opazitätsgrenze unterschritten wird: Die Photonen können nahezu frei entweichen und das Licht dringt aus dem Stern heraus. Diese Schicht wird daher als Sternoberfläche wahrgenommen. ¹¹

5. Chromosphäre:

In der nun folgenden Chromosphäre nimmt die Temperatur dann stark zu, während der Druck stark abnimmt. Hier allerdings werden auch durch all jene Stoffe, welche sich im Stern befinden, die entsprechenden Wellenlängen des ausstrahlenden Lichtes absorbiert: In dieser Schicht entstehen also die Spektrallinien. Gemeinsam mit einem kleinen Absorptionsmaß durch die äußere Photosphäre liefert die Chromosphäre also die relevante Information über die stoffliche Komposition des Sterns. ¹²

6. Corona:

Der Übergang in die weitläufige Corona wird erneut charakterisiert durch einen enormen Druckabfall, allerdings auch durch eine gewaltige Zunahme der Temperatur, die durch Sonnenstrahlung, Stoßwellen und andere mechanische oder Magnetische Effekte verursacht wird. ¹³

So sind diese Schichten nahezu allen Sternen gleich, jedoch gibt es durch verschiedene Zustandsgrößen bei verschiedenen Sternen diverse Diskrepanzen in einigen weiteren Eigenschaften, wie im Folgenden noch erläutert wird (siehe Abschnitt 2.4).

2.3 Spektroskopie

Die Spektroskopie ist eine Methode, um die elektromagnetische Strahlung, die von bestimmten Objekten ausgesandt oder beeinflusst wird, zu untersuchen. Die Kernidee der Vorgehensweise ist, das eintreffende Licht nicht als Verbund der verschiedenen Wellenlängen zu betrachten, sondern es in seine Wellenlängen aufzuspalten, und das so entstehende Spektrum auszuwerten. Die Zerlegung des Lichtes geschieht durch Einsatz eines Spektrographen. Diese werden grundlegend nach ihrem Wirkungsprinzip in zwei verschiedene Gattungen unterschieden: Den Prismen- und den Gitterspektrographen.¹⁴ Da letzterer in dieser Arbeit zum Einsatz kommt, wird hier seine Funktionsweise erläutert:

¹⁰ Vgl. <http://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/1303605> (abgerufen am 08.06.2018)

¹¹ Vgl. <http://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/1303605> (abgerufen am 08.06.2018)

¹² Vgl. <http://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/1303605> (abgerufen am 08.06.2018)

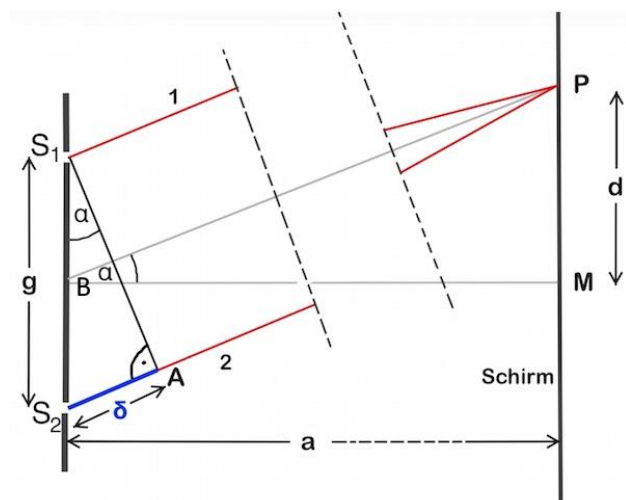
¹³ Vgl. <http://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/1303605> (abgerufen am 08.06.2018)

¹⁴ Vgl. Völker, Stefan: Spektralklassifikation im Unterricht (S. 4.)

Beim Gitterspektographen werden eintreffende Lichtstrahlen zunächst über einen Kollimator parallel gerichtet, um dann auf ein Gitter zu fallen. Bei Kontakt mit dem jeweiligen Element erfolgt dann die Beugung an den Gitterelementen. Dabei unterscheidet man zwischen zwei möglichen Grundprinzipien: Dem des Transmissions- und des Reflexionsgitters.

Betrachten wir nun das Transmissionsgitter. Hier wird das kollimierte Licht auf eine Ebene gelenkt, die in regelmäßigen Abständen mit dünnen Spalten durchsetzt ist. So lässt sich in der Schnittansicht auf der lichtabgewandten Seite jeder Spalt als punktförmige Lichtquelle interpretieren. Dieses Licht interferiert auf der Seite so, dass sich als Interferenzmuster eine Spektralzerlegung des eingegangenen Lichtes ergibt.

Um diesen Effekt zu verstehen wird zunächst nur ein Doppelspalt betrachtet:



15

In dieser Darstellung sind die Dimensionen von Spaltabstand (g) und Abstand zur Bildschirmebene (a) nicht maßstabsgerecht, a ist sehr viel größer als g .

Jeder Spalt soll jeweils nur einen einzigen Strahl hindurchlassen, hier Teilstrahl 1 (S_1) und Teilstrahl 2 (S_2)

Da $a \gg g$ lässt sich vereinfacht annehmen, dass die beiden Strahlen parallel zueinander verlaufen, obwohl sie sich am Bildschirm im Punkt P treffen.

Nun legt allerdings S_2 einen längeren Weg zu P zurück als S_1 , wie in der Skizze ersichtlich wird. Bei dieser Wegdifferenz handelt es sich um den Gangunterschied (δ).

Liegt P genau am ersten Intensitätsmaximum, dem Maximum erster Ordnung, so muss gelten $\delta = \lambda$, da eine konstruktive Interferenz nur für den Gangunterschied $\delta = \lambda \cdot k$ auftritt.

¹⁵ <http://physikunterricht-online.de/jahrgang-11/wellenlaengenbestimmung-von-licht/> (abgerufen am 13.05.2018) (Leicht editiert)

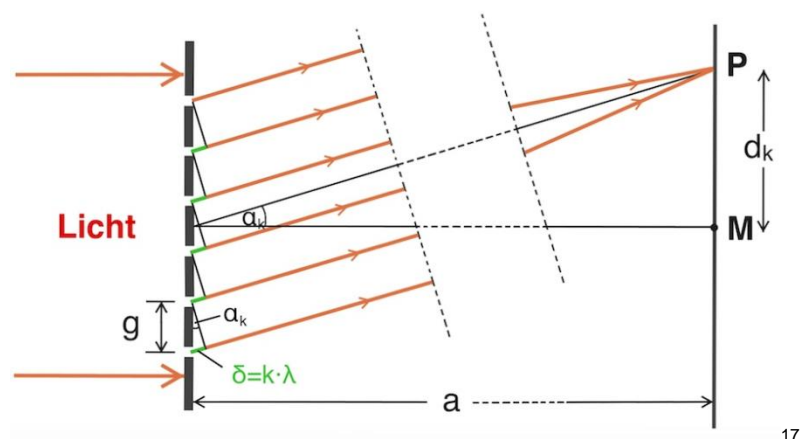
Wie in der Skizze ersichtlich lassen sich mit den benannten Punkten und dem Mittelpunkt von g (B) nun zwei Dreiecke konstruieren: ΔS_1S_2A und ΔBPM . Es ergibt sich also $\frac{\delta}{g} = \sin(\alpha)$, also auch $\frac{\lambda}{g} = \sin(\alpha)$ Dreieck ΔS_1S_2A , und $\frac{d}{a} = \tan(\alpha)$.

Der Winkel α ist sehr klein, daher kann man annehmen $\sin(\alpha) \approx \tan(\alpha)$, ergo $\frac{\lambda}{g} = \frac{d}{a}$.

Umgestellt ergibt sich $\frac{\lambda \cdot a}{g} = d$. Das heißt $\lambda \sim d$. Intensitätsmaxima verschiedener Wellenlängen werden also an verschiedenen Stellen auf dem Bildschirm auftreten: Desto niedriger die Wellenlänge, desto näher liegt die Stelle an M. ¹⁶

Es ergeben sich auch Maxima höherer Ordnungen durch die Interferenz der Strahlen bei noch höheren Winkeln.

So erklärt sich der Effekt am Doppelspalt. Dieser ist jedoch zur astronomischen Beobachtung nicht geeignet: Durch die geringe Lichtdurchlässigkeit der beiden Spalte werden die Spektren der ohnehin schon sehr lichtschwachen Beobachtungsobjekte (zb. Sterne) noch lichtschwächer. Auch sind die Intensitätsmaxima der jeweiligen Wellenlängen sehr unscharf, was eine genaue Auswertung eines solchen Spektrums sehr erschweren würde. Daher arbeitet man in der Astronomie nicht mit einem Doppelspalt, sondern mit einem Mehrfachspalt, oder auch Gitter genannt.



Geht man auch hier nach den gleichen Annahmen vor, so ergibt sich für die Teilstrahlen zweier benachbarter Spalte jeweils wieder ein Gangunterschied von $\delta = \lambda$. Damit interferieren die beiden Strahlen an ihrem Treffpunkt konstruktiv, da $\delta = \lambda \cdot k$. Allerdings treffen in der Modellannahme auch Teilstrahlen aus den anderen Spalten auf P. Da sich für zwei benachbarte Strahlen gilt $\delta = \lambda$, muss für den nächstweitere Spalt gelten $\delta = \lambda \cdot 2$, für den nächsten $\delta = \lambda \cdot 3$, usw.: Es findet also aufgrund von $\delta = \lambda \cdot k$ mit jedem Teilstrahl aus dem gesamten Gitter eine konstruktive Interferenz statt. Durch diese

¹⁶ Vgl. <http://physikunterricht-online.de/jahrgang-11/wellenlaengenbestimmung-von-licht/> (abgerufen am 13.05.2018)

¹⁷ <http://physikunterricht-online.de/jahrgang-11/das-optische-gitter/> (abgerufen am 13.05.2018)

immer größere Menge an Teilstrahlen, die auf der gleichen Stelle am Bildschirm miteinander interferieren, ergibt sich ein deutlich lichtstärkeres Bild. ¹⁸

Ein weiterer Vorteil eines optischen Gitters ist die Schärfe des entstehenden Spektrums: Betrachtet man einen Punkt auf dem Bildschirm mit einer geringen Entfernung zu P, so wird man feststellen, dass $\delta = \lambda$ nicht mehr genau gilt. Bei zwei benachbarten Teilstrahlen wäre δ am Punkt auf dem Bildschirm mit kleiner Distanz zu P jedoch nur minimal. Zu einer Auslöschung dieser in der Analyse störenden Strahlen würde es erst bei einem Gangunterschied von $\delta = 1,5 \cdot \lambda$ kommen. Betrachtet man nun allerdings die Teilstrahlen anderer Spalte, so wird man feststellen, dass bei weiter entfernten Spalten, beispielsweise zwischen dem 1. und 3., oder dem 1. und 4. Spalt andere Gangunterschiede zustande kommen, die eine Auslöschung ermöglichen. Ein optisches Gitter bietet somit aufgrund der höheren Anzahl an Spalten eher die Möglichkeit der Auslöschung von Teilstrahlen (s.o.) im Spektrum als ein Doppeltspalt: Dies führt zu schärferen Maxima beim optischen Gitter. ¹⁹

2.4 Einordnung in den Wissenschaftlichen Kontext

2.4.1 Geschichte der Spektroskopie und Spektralklassifizierung:

Zentral für die Spektroskopie war wohl die Entdeckung der „Fraunhoferlinien“ im Sonnenspektrum durch Joseph von Fraunhofer um 1814. Es gelang ihm durch Anwendung eigens entwickelter optischer Geräte das Licht der Sonne in ein Spektrum zu zerlegen und darin bestimmte schwarze Linien zu erkennen und zu vermessen. ²⁰

Die Deutung dieser Linien gelang allerdings erst Gustav Kirchhoff und Robert Bunsen um 1859 nach ihren Untersuchungen des von verschiedenen angeregten Stoffen ausgesendeten Lichtes. ²¹

Die erste Einteilung der Sterne in verschiedene Spektralklassen erfolgte in den 1860er Jahren, als der italienische Jesuitenpriester und Professor Angelo Secchi, einer der Pioniere der frühen Sonnenbeobachtung, ²² nach Entwicklung entsprechender Instrumente die Sterne nach dem von ihnen ausgesendeten Spektrum erstmals in vier verschiedene Spektralklassen unterteilte. ²³

Danach wurde am Harvard College Observatory in den 1880er Jahren der „Henry Draper Catalogue“ von Williamina Fleming, Antonia Maury und Annie Cannon erstellt²⁴. Er unterteilte die vier Klassen des Angelo Secchi noch weiter in Unterklassen: So wurde Klasse eins in die Unterklassen A bis D unterteilt. Klasse zwei wurde unterteilt in die Unterklassen E, F, G, H, I, K und L. Klasse 3 wurde mit M

¹⁸ Vgl. <http://physikunterricht-online.de/jahrgang-11/das-optische-gitter/> (abgerufen am 13.05.2018)

¹⁹ Vgl. <http://physikunterricht-online.de/jahrgang-11/das-optische-gitter/> (abgerufen am 13.05.2018)

²⁰ <http://www.mybude.com/weltall/1843-sterntypen.html> (abgerufen am 08.06.2018)

²¹ <http://www.mybude.com/weltall/1843-sterntypen.html> (abgerufen am 08.06.2018)

²² Vgl. <http://www.newadvent.org/cathen/13669a.htm> (abgerufen am 07.06.2018)

²³ Vgl. https://www.youtube.com/watch?v=e8RH_YhQ6Ag (abgerufen am 07.06.2018)

²⁴ Vgl. <https://www.britannica.com/science/stellar-classification#ref288665> (abgerufen am 07.06.2018)

benannt, Klasse 4 mit N. Es wurde auch eine neue Klasse eingeführt. Sie wurde mit O bezeichnet und enthält die Wolf-Rayet Sterne.²⁵

Im Jahre 1901 wurde eine neue Reihenfolge für die Spektraltypen implementiert: Annie Cannon ordnete die Sterntypen ihrer Schwarzkörpertemperatur nach an und entfernte ein paar Klassen, welche nun nicht mehr notwendig waren.²⁶

In die nun aktuelle Folge O, B, A, F, G, K, M wurden zur genaueren Unterscheidung nun noch weitere Unterklassen eingesetzt: So wurde durch eine Zahl von 0 bis 9 hinter dem Typ noch ein Untertyp, abhängig von der Oberflächentemperatur angegeben: Ein G0 Stern wäre also der heißeste Typ, während ein G1 Stern etwas kälter wäre. So ziehen sich die Untertypen immer weiter, von G0 bis G9, über B0 bis B9 und so weiter bis hin zur M-Oberklasse. Da sich mit neueren, leistungsstärkeren Teleskopen jedoch immer mehr noch kältere und lichtschwächere Sterne ausmachen ließen, wurden in der M-Klasse immer höhere Zahlen nötig, über die gewöhnliche Reihe von M0 bis M9 hinaus.²⁷

Um dies zu beheben wurden im Jahre 1999 von J. Davy Kirkpatrick die neuen Oberklassen L und T für Braune Zwerge vorgeschlagen.²⁸

Zusätzlich zu der Haupt- und Unterklassifizierung durch einen Buchstaben und eine arabische Ziffer werden heutzutage auch noch hinter diesen Klassifizierungen Angaben gemacht: Durch eine römische Ziffer wird die absolute Helligkeit des Sterns angegeben, dabei steht eine kleinere Zahl für eine größere Helligkeit, die Ziffern gehen von VII über II und I bis 0. Auch können in Spezialfällen noch Zusatzangaben zu besonders markanten Linien im Spektrum gegeben werden, dies geschieht durch das Hinzufügen des entsprechenden Elementsymbols am Ende der Linie.²⁹

2.4.2 Das Hertzsprung-Russell Diagramm:

Eine weitere bekannte Verwertung der Idee, Sterne in bestimmte Kategorien einzuordnen, stellt wohl das Hertzsprung-Russell-Diagramm dar, welches erstmals von Ejnar Hertzsprung und Norris Russell unabhängig voneinander in den frühen 1900er Jahren erarbeitet wurde. Jeder Stern wird entweder auf den zwei Achsen Temperatur und Leuchtkraft (Theoretisches Hertzsprung-Russell Diagramm), oder Spektraltyp und absolute Helligkeit (Farben-Helligkeits-Diagramm) eingeordnet. Ordnet man genügend Mengen an Sternen ihren Eigenschaften nach ein, ergeben sich in der Betrachtung der Sternendichte bestimmte Bereiche, darunter die Sterne der Hauptreihe, zu welcher auch die Sonne gehört, oder auch (Über-)Riesen und Zwergsterne³⁰.

²⁵ Vgl. https://www.youtube.com/watch?v=e8RH_YhQ6Ag (abgerufen am 07.06.2018)

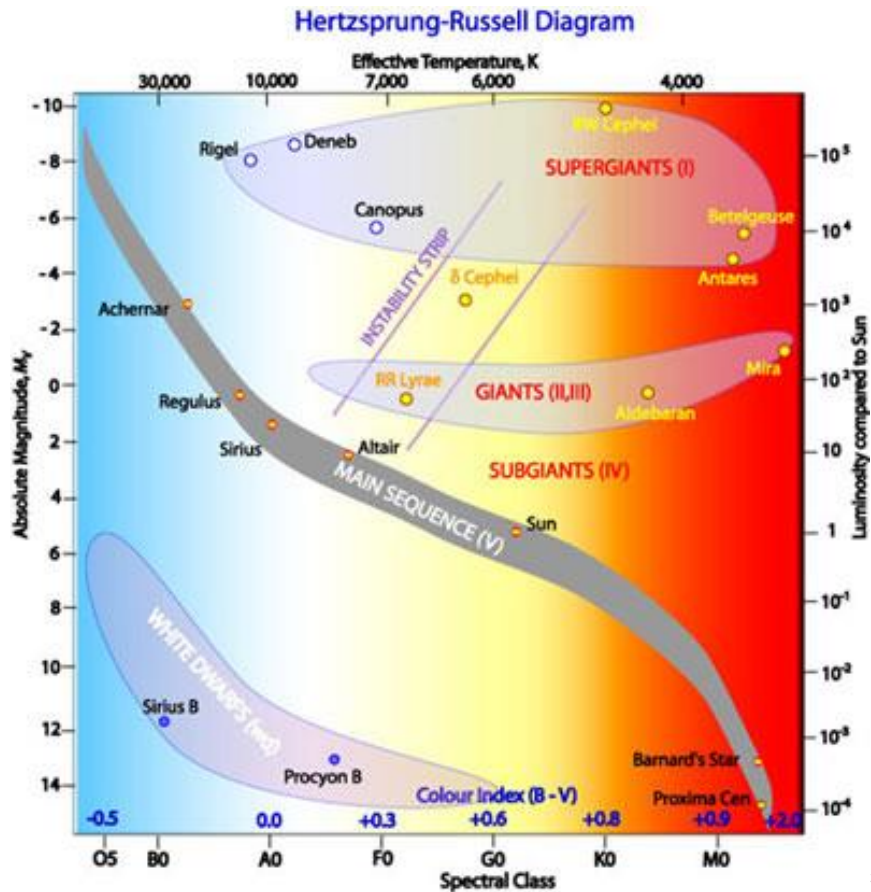
²⁶ Vgl. https://www.youtube.com/watch?v=e8RH_YhQ6Ag (abgerufen am 07.06.2018)

²⁷ Vgl. https://www.youtube.com/watch?v=e8RH_YhQ6Ag (abgerufen am 08.06.2018)

²⁸ Vgl. https://www.youtube.com/watch?v=e8RH_YhQ6Ag (abgerufen am 08.06.2018)

²⁹ Vgl. https://www.youtube.com/watch?v=e8RH_YhQ6Ag (abgerufen am 08.06.2018)

³⁰ Vgl. <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/H/Hertzsprung-Russell+Diagram> (abgerufen am 11.5.2018).



Nun durchläuft ein Stern im Laufe seiner Entwicklung bestimmte Stufen, die von seiner Anfangsmasse abhängig sind. Mit jeder Stufe bewegt sich der Stern in bestimmte Bereiche im Hertzsprung-Russell Diagramm. So kann man aufgrund seiner Position im Hertzsprung-Russell Diagramm Aussagen über die innere Struktur und Entwicklungsstufe eines Sternes machen³²:

Beispielsweise lässt sich über die Hauptreihe aussagen, welche sich von oben links (heiß und hell) bis nach unten rechts (kälter und dunkler) erstreckt, dass ihre Sterne den etwa 90% ihrer Entwicklung damit verbringen, in ihren Kernen Wasserstoff zu Helium zu fusionieren, wobei sie sich im Diagramm etwas nach oben links bewegen, um am Ende ihrer Entwicklung recht rasant nach oben rechts auszubrechen.

33

Rote Riesen und Überriesen hingegen liegen im Bereich über der Hauptreihe. Sie haben niedrige Oberflächentemperaturen, aber hohe Leuchtstärken. Sie haben sehr hohe Sternradien. Massereichere Sterne, die ihren Wasserstoffvorrat in den Kernen verbraucht haben treten in diese Reihe ein und beginnen damit, Helium und andere schwerere Elemente zu fusionieren.³⁴

³¹ <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/H/Hertzsprung-Russell+Diagram> (abgerufen am 11.5.2018).

³² Vgl. <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/H/Hertzsprung-Russell+Diagram> (abgerufen am 08.06.2018)

³³ Vgl. <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/H/Hertzsprung-Russell+Diagram> (abgerufen am 08.06.2018)

³⁴ Vgl. <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/H/Hertzsprung-Russell+Diagram> (abgerufen am 08.06.2018)

Die weißen Zwerge unten Links im Diagramm stellen die letzte Entwicklungsstufe von niedrig- bis mittelmassereichen Sternen dar. Sie sind sehr heiß, aber haben aufgrund ihrer geringen Größe eine schwache Leuchtkraft.³⁵

2.5 Korrektur auf das Plancksche Strahlungsgesetz

Jeder Körper strahlt abhängig von seiner Temperatur mit wellenlängenabhängiger Intensität auf dem gesamten elektromagnetischen Spektrum. Diese Wärmestrahlung, für den idealisierten Fall eines schwarzen Körpers, also eines Körpers, der alles eintreffende Licht vollständig absorbiert, lässt sich durch das Plancksche Strahlungsgesetz bestimmen.³⁶

Es gilt

$$M_{\lambda}^{\circ}(\lambda, T) dA d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1} dA d\lambda \quad 37$$

als die sogenannte Wellenlängendarstellung des Planckschen Strahlungsgesetzes. Sie liefert abhängig von einer bestimmten Temperatur und einer bestimmten Wellenlänge eine bestimmte Strahlungsleistung, die ein schwarzer Körper unter diesen Bedingungen aussendet.³⁸

Graphisch über die Wellenlänge und die Strahlungsleistung ergeben sich verschiedene Temperaturkurven³⁹:

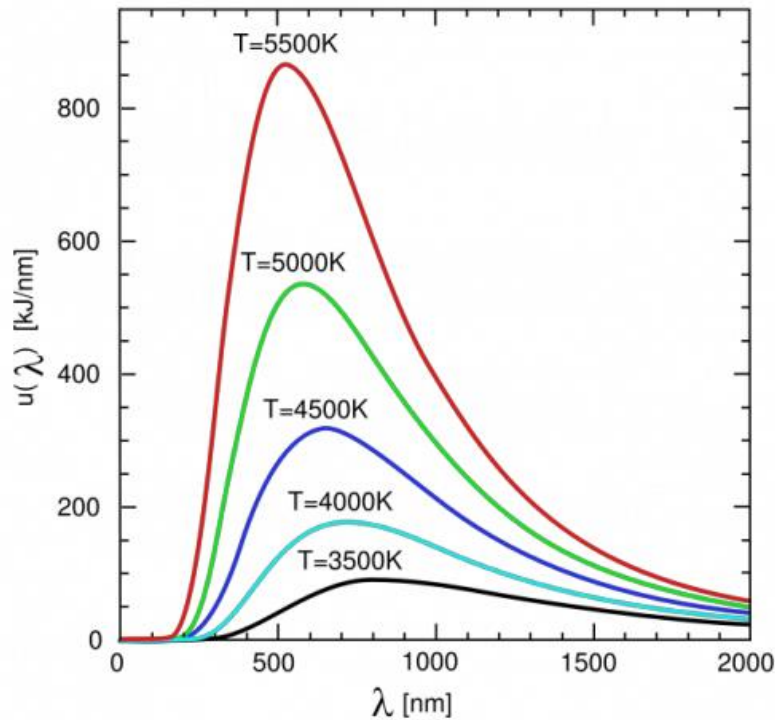
³⁵ <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/H/Hertzprung-Russell+Diagram> (abgerufen am 08.06.2018)

³⁶ Vgl. http://www.chemie.de/lexikon/Plancksches_Strahlungsgesetz.html (abgerufen am 13.06.2018)

³⁷ http://www.chemie.de/lexikon/Plancksches_Strahlungsgesetz.html (abgerufen am 13.06.2018)

³⁸ Vgl. http://www.chemie.de/lexikon/Plancksches_Strahlungsgesetz.html (abgerufen am 13.06.2018)

³⁹ Vgl. http://www.chemie.de/lexikon/Plancksches_Strahlungsgesetz.html (abgerufen am 13.06.2018)



40

Auch Sterne strahlen aufgrund ihrer Temperatur einer gewissen Kurve entlang mit verschiedenen Intensitäten. Dabei ist der Verlauf der Kurve abhängig von der Temperatur des Sterns, welche sich aus seinen Zustandsgrößen ableiten lässt. Diese Intensitätskurve finden sich auch im observierten Spektrum wieder: Sie überlagert sich mit den Intensitätseinbrüchen an den Stellen der Spektrallinien. Um nun eine Auswertung der Lage der Spektrallinien durchzuführen, muss also zunächst diese Unregelmäßigkeit aus der beobachteten Intensitätskurve herausgerechnet werden. Dazu zieht man eine Planckkurve heran, die nach dem Planckschen Strahlungsgesetz abhängig von der Temperatur des beobachteten Sternes berechnet wurde. Dividiert man nun das beobachtete Spektrum durch diese Kurve, erhält man einen neuen Graphen, der recht gerade verläuft, und nur noch Unregelmäßigkeiten an den Stellen der zu beobachtenden Intensitätseinbrüche zeigt.⁴¹

Umgekehrt bietet die Strahlungskurve auch die Möglichkeit durch den Vergleich mit einer instrumentenkalibrierten Messkurve die Temperatur des Sterns zu ermitteln: Findet man eine auf den Messkurvenverlauf passende Planckkurve, lässt sich aus ihren Parametern direkt die Sterntemperatur ablesen.⁴²

⁴⁰ http://www.chemie.de/lexikon/Plancksches_Strahlungsgesetz.html (abgerufen am 13.06.2018)

⁴¹ Vgl. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Starlog/staspe.html> (abgerufen am 13.06.2018)

⁴² Vgl. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Starlog/staspe.html> (abgerufen am 13.06.2018)

3 Arbeitsprozess:

3.1 Beobachtungsprozess und verwendetes Material

Die hier ausgewerteten Beobachtungen wurden am 18.04.2018 auf der Sternwarte Trier Irsch ($49^{\circ} 43' 10,66''$ N / $6^{\circ} 41' 26,27''$ E)⁴³ bei klaren Sichtverhältnissen gemacht.

Der Beobachtungsprozess folgt einem immer gleichen Muster: Zunächst werden Teleskop und weitere Optik wie gewöhnlich eingerichtet. In diesem Fall wurde das Teleskopmodell „TSA 102“ des Herstellers Takahashi mit 816mm Brennweite verwendet. Daraufhin erfolgt eine Kalibrierung der Ausrichtungsautomatik über manuelles Einstellen eines Referenzsterns. Nun wird das System mit Hilfe der Automatik auf das zu beobachtende Objekt eingestellt und die Okularoptik wird durch die Aufnahmeapparatur ersetzt, in diesem Fall durch die Amateurastronomiekamera „Atik-314L“, diese hat eine Pixelgröße von $6,45 \mu\text{m}$ und eine Graustufenanzahl von 16 Bit. Es handelt sich um einen CCD-Chip, der direkt in die Optik eingesetzt werden kann, um Störungen durch weitere Linsen oder Adapter zu vermeiden. Vor der Kamera wird das Spektralgitter installiert. Hier genutzt wird das Gitter „Star-Analyzer 100“, mit einer Dispersion von 100 Linien pro mm. Über das Programm „Artemis“ desselben Herstellers wird am Rechner ein Livefeed der Kamera sichtbar gemacht. Um Ungenauigkeiten durch Bildunschärfe zu vermeiden wird die Aufnahme unter Zuhilfenahme einer Bahtinovmaske auf die optimale Schärfe eingestellt. Es handelt sich um eine Aufsatz für das Teleskopobjektiv, der im beobachteten Bild einige Hilfslinien erzeugt, welche bei richtiger Ausrichtung die maximale Bildschärfe garantieren. Nach Abnahme der Maske wird der Zielstern auf der richtigen Stelle im Bild platziert. Da sich das scheibenförmige Liniengitter relativ frei um die Mittelachse des Kameraobjektivs drehen kann, wird nun zunächst das Gitter manuell so zurechtgedreht, dass das Spektrum im Bild parallel zum Bildrand verläuft, um Ungenauigkeiten durch die Belichtung verschiedener Bereiche des CCD-Chips in verschiedenen Aufnahmereihen zu verhindern. Nun wird im gleichen Moment, in dem die mehrsekündig belichtete Aufnahme über das Computerprogramm gestartet wird auch die Nachführautomatik gegengesteuert, sodass das Objekt mitsamt Spektrum durch die natürliche Bewegung des Nachthimmels und die lange Belichtungszeit eine Breite Linie durch die Aufnahme zieht: Dies verhindert sowohl eine Überbelichtung und Überblendung auf den angesprochenen Kamerapixeln, ermöglicht jedoch auch eine Evaluation der Aufnahme auf Luftunruhen und Qualität der Darstellung der Spektrallinien noch durch das bloße Auge am Echtzeitmonitor des Rechners.⁴⁴

⁴³ Vgl. <https://www.sternwarte-trier.de/> (abgerufen am 12.02.2018).

⁴⁴ Die Beobachtungen wurden mit Unterstützung und Aufsicht durch den Gerätewart der Sternwarte Herrn Markus Weber durchgeführt

4 Evaluation:

4.1 Auswertung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse dargestellt und mit Literaturwerten verglichen. Um den Arbeitsprozess darzustellen werden im Beispiel „4.1.1 Beta Leonis“ die einzelnen Schritte der Auswertung genau geschildert, die Auswertung der weiteren Objekte folgt diesem Beispiel.

4.1.1 Beta Leonis

1) Einlesen und ausrichten:

Das aufgenommene Bild wird in das Programm eingelesen, die Ausrichtung des Spektrums genau orthogonal zu den vertikalen Aufsummierungslinien wird durch eine Rotationsanpassung sichergestellt.

(Abb. 1: Ausgerichtete Aufnahme von Beta Leonis nach 1))

2) Wellenlängenkalibrierung:

Das Bild wird durch Aufsummierung der Intensitäten bei gleicher vertikaler Pixelposition in ein eindimensionales Spektrum überführt. Das Spektrum wird auf die richtigen Wellenlängen kalibriert: Zur Initialkalibrierung werden dem Programm zwei Punkte und deren Wellenlängen vorgegeben, in diesem Fall die Wellenlänge 0 \AA beim Spektrum nullter Ordnung, die Wellenlänge 4861 \AA bei der H_{β} -Linie im Spektrum Erster Ordnung. Durch die lineare Dispersion des Gitters können alle Wellenlängen entlang der horizontalen Achse berechnet werden. Es wird ein Umrechnungsfaktor errechnet, der das Verhältnis von aufgenommenen Pixeln zur Wellenlänge beschreibt. Dieser ist bei Verwendung eines gleichen Aufbaus konstant. In den folgenden Kalibrierungsprozessen werden die Wellenlängen durch Angabe der Lage des Spektrums nullter Ordnung sowie dieses Faktors die Wellenlängen angelegt (siehe Abschnitt 2.3).

(Abb. 2: Rohkurve von Beta Leonis nach 2))

3) Instrumentenkalibration:

Das wellenlängenkalibrierte Spektrum wird nun auf Instrumentenfehler korrigiert. Dies geschieht durch die Division durch die Instrumentenkorrekturkurve. Zur Erstellung dieser wird ein, mit der Optik für die die Kurve erstellt werden soll, aufgenommenes Rohspektrum durch ein von der programminternen Bibliothek „Pickles“ bereitgestelltes Idealspektrum für den entsprechenden Sternentyp dividiert, aus dem zuvor die Minima Spektrallinien entfernt wurden. Die nun erhaltene Kurve enthält die gesamten Informationen über die Fehler, die die Aufnahmeoptik auf den verschiedenen Wellenlängen macht. Um die aufgrund von kleinen Artefakten in den Aufnahmen existenten Störeffekt zu entfernen, die sich intervallweise durch einen sehr chaotischen Verlauf der Korrekturkurve bemerkbar machen, kann die Kurve programmintern geglättet werden: Es kommt bei der Korrektur nur auf den gröberen Verlauf der

Kurve an. Dividiert man nun die Kurve einer beliebigen Aufnahme aus der entsprechenden Optik durch die Instrumentenkorrekturkurve, werden die Fehler entfernt, die durch die wellenlängenabhängige Empfindlichkeit des CCD-Chips verursacht wurden.⁴⁵

(Abb. 3: Instrumentenkorrekturkurve nach 3))

(Abb. 4: Instrumentenkalibrierte Kurve nach 3))

4) Korrektur auf das Plancksche Strahlungsgesetz:

Die instrumentenkalibrierte Kurve wird nun auf das Plancksche Strahlungsgesetz (siehe Abschnitt 2.5) korrigiert, indem das Spektrum durch die Schwarzkörperstrahlungskurve für die entsprechende Temperatur dividiert wird. Die Bibliothek „Pickles“ bietet die entsprechenden Kurven. Die Temperatur für Beta Leonis beträgt etwa 8500K.⁴⁶

(Abb. 5: Planckkorrigierte Kurve nach 4))

4.1.2 Alpha Canis Minoris

Die Ausrichtung in Schritt 1) erfolgt wie bereits beschrieben. Die Wellenlängenkalibrierung in Schritt 2) erfolgt über das nun bekannte Kalibrierungsverhältnis und die Angabe der Wellenlänge null auf dem Spektrum nullter Ordnung (siehe 4.1.1, 2)). Schritt 3) erfolgt durch Verwendung der nun vorhandenen Instrumentenkorrekturkurve (siehe 4.1.1, 2)). Schritt 4) erfolgt durch die Division durch die entsprechende Planckkurve, die Temperatur dafür liegt bei etwa 6530K⁴⁷.

(Abb. 9: Ausgerichtete Aufnahme von Alpha Canis Minoris nach 1))

(Abb. 10: Rohkurve von Alpha Canis Minoris nach 2))

(Abb. 11: Instrumentenkalibrierte Kurve nach 3))

(Abb. 12: Planckkorrigierte Kurve nach 4))

4.2 Interpretation und Literaturvergleich

Die zum Literaturvergleich genutzten Werte ergeben sich aus der programminternen „Pickles“ – Bibliothek. Die Messwerte werden durch Einblenden der Referenzlinien aus der Bibliothek in die instrumenten- und planckkalibrierte Kurve des entsprechenden Objektes abgenommen. Die Wellenlängen der Minima werden immer am niedrigsten Punkt des jeweiligen Intensitätsbereiches gemessen. Sind zwei Literaturlinien sehr nahe am gleichen Minimum in der Messkurve, so wird aufgrund der Intensität der Messlinie und den erwarteten Intensitäten der beiden in Frage kommenden Referenzlinien (siehe Abschnitt 2.1) entschieden. Es wird auch über die Intensität verschiedener Linien

⁴⁵ Vgl. <https://www.youtube.com/watch?v=6MrFuNGLsUE> (abgerufen am 13.06.2018)

⁴⁶ Vgl. <https://www.universeguide.com/star/denebola> (abgerufen am 13.06.2018)

⁴⁷ Vgl. <http://w.astro.berkeley.edu/~dperley/procyon.html> (abgerufen am 13.06.2018)

bei verschiedenen Sterntypen argumentiert, was allerdings problematisch ist, da es das Ziel, einen Spektraltypen ohne vorhergehende Kenntnis über diesen zu bestimmen eigentlich verfehlt.

4.2.1 Beta Leonis

Der Stern Beta Leonis hat den Spektraltyp A3V⁴⁸. Legt man die entsprechenden Linien die für A-Sterne charakteristisch sind über die korrigierte Kurve, so stimmen die Wellenlängen der Balmer-Linien zwar mit den markantesten Minima überein, jedoch lassen sich die anderen Linien des A-Typs nicht in der Kurve wiederfinden.

(Abb. 6: Korrigierte Kurve mit eingeblendeten Linien des A-Typs)

| Spektrallinie | Messwert λ_{Exp} [Å] | Literaturwert λ_{Lit} [Å] | Differenz $\Delta\lambda$ [Å] | Relative Abweichung $\Delta\lambda \setminus \lambda_{Lit}$ (Näherungswert) |
|---------------|---------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--|
| Ca II (K) | - | 3933,7 | - | - |
| Ca II (H) | - | 3968,5 | - | - |
| H ϵ | 3964,4 | 3970,1 | -5,7 | -0,0014 |
| H δ | 4095,3 | 4101,7 | -6,4 | -0,0016 |
| He I | - | 4121,0 | - | - |
| Si II | - | 4128,0 | - | - |
| Si II | - | 4131,0 | - | - |
| Fe I | - | 4299,0 | - | - |
| Fe I/Ti II | - | 4303,0 | - | - |
| H γ | 4338,4 | 4340,5 | -2,1 | -0,0005 |
| Mg II | - | 4481,0 | - | - |
| H β | 4862,0 | 4861,3 | 0,7 | 0,0001 |
| H α | 6563,7 | 6562,7 | 1 | 0,0002 |

4.2.2 Alpha Canis Minoris

Der Stern Alpha Canis Minoris hat den Spektraltyp F5IV⁴⁹. Legt man die für F-Sterne typischen Linien über die Kurve, so stimmen die Wellenlängen einiger Balmer-Linien auch hier wieder mit markanten Minima überein. Es gibt sogar eine mögliche Übereinstimmung mit einer Calcium-Linie, sowie eine,

⁴⁸ Vgl. <http://solstation.com/stars2/denebola.htm> (abgerufen am 13.06.2018)

⁴⁹ Vgl. <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0309148> (abgerufen am 13.06.2018)

wenn doch eher sehr kritisch zu betrachtende, Übereinstimmungsmöglichkeit mit einer Magnesium-Linie.

(Abb. 13: Korrigierte Kurve mit eingeblendeten Linien des F-Typs)

| Spektrallinie | Messwert $\lambda_{\text{Exp}} [\text{Å}]$ | Literaturwert $\lambda_{\text{Lit}} [\text{Å}]$ | Differenz $\Delta\lambda [\text{Å}]$ | Relative Abweichung $\Delta\lambda \setminus \lambda_{\text{Lit}}$ (Näherungswert) |
|---------------|---|--|---|---|
| Ca II (K) | 3945,7* | 3933,7 | 12 | 0,0031 |
| Ca II (H) | - | 3968,5 | - | - |
| H ϵ | - | 3970,1 | - | - |
| H δ | 4095,3 | 4101,7 | -6,4 | -0,0016 |
| He I | - | 4121,0 | - | - |
| Si II | - | 4128,0 | - | - |
| Si II | - | 4131,0 | - | - |
| Ca I | - | 4722,0 | - | - |
| Fe I | - | 4299,0 | - | - |
| Fe I | - | 4303,0 | - | - |
| H γ | 4319,7 | 4340,5 | -20,8 | -0,0048 |
| Mg II | 4581,5** | 4481,0 | 100,5 | 0,0224 |
| H β *** | 4862,0 | 4861,3 | 0,7 | 0,0001 |
| H α | 6545,0 | 6562,7 | -17,7 | 0,0027 |

* Es ist eher davon auszugehen, dass es sich bei dem Minimum auf 3945,7 Å um eine Calcium Linie handelt, als um eine Wasserstofflinie, da Calcium im Spektrum von F-Sterntypen prominenter ist als Wasserstoff. ⁵⁰

** Dieses Minimum kommt aufgrund der relativ großen Entfernung zur erwarteten Wellenlänge und des relativ geringen Intensitätsabfalls eventuell als Artefakt in Frage.

*** H β ist die Wellenlänge, die als zweiter Referenzpunkt bei der Wellenlängenkalibrierung genutzt wurde. Es ist zu beachten, dass es trotzdem eine geringe Abweichung gibt, die sich aber exakt gleich wiederholt (siehe Abschnitt von 4.1.1).

⁵⁰ Vgl. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Starlog/staspe.html> (abgerufen am 13.06.2018)

4.3 Anmerkung:

Da die Software die Einheit Ångström verwendet, wurde sie hier aus Übersichtlichkeitsgründen stellenweise übernommen. Dabei ist Ångström keine SI-Einheit und sollte daher auch eher nicht verwendet werden. $1\text{Å} = 10^{-10}\text{m}$.

4.4 Fazit

Im Allgemeinen fällt auf, dass die Balmer-Serie zwar in den Daten sehr markant hervortritt. Dies alleine ist jedoch für eine zuverlässige Auswertung auf die Spektralklasse nicht ausreichend: Die Spektralklassen unterscheiden sich hauptsächlich durch die verschiedenen Metalllinien⁵¹, eine zuverlässige Zuordnung könnte nur bei Erkennbarkeit dieser erfolgen. Sollte im Beispiel Alpha Canis Minoris doch auch eine Calcium-Linie zu erkennen sein (siehe Abschnitt 4.2.2), ist dies immer noch nicht ausreichend.

4.5 Fehlerbetrachtung

4.5.1 Auswertung auf die Kernfrage

Um eine Auswertbarkeit der Aufnahmen auf die verschiedenen Spektraltypen zu erreichen hätten die Spektren auf den Aufnahmen besser nach ihrer Wellenlänge aufgelöst sein müssen. Dies wäre durch eine höhere Dispersion des Spektrographen zu erreichen gewesen (siehe Abschnitt 2.3), beispielsweise durch Verwendung des „Star Analyzer 200“. Dies gestaltete sich jedoch unter Beachtung der Aufnahmegenaugigkeit sehr schwierig (siehe Abschnitt 4.6.1).

Eine Möglichkeit jedoch, einen groben Eindruck über die in Frage kommenden Sterntypen für eine Messkurve zu erhalten ist ein Vergleich der instrumentenkalibrierten Messkurve mit der Literaturkurve. Es handelt sich bei der instrumentenkalibrierten Messkurve um den Verlauf, der dem real empfangenen Strahlungsverlauf am genauesten entspricht. Daher sollte, bei ausreichender Beobachtungsgenauigkeit, eine Ähnlichkeit der instrumentenkalibrierten Messkurve zur Literaturkurve erkennbar sein. Diese Methode ist nicht unbedingt genau und beruht vor allem auf dem Augenmaß, daher ist sie kein Ersatz für die genaue Messung an der planckkorrigierten Kurve. Jedoch kann hierdurch gezeigt werden, dass der Fehler mit hoher Wahrscheinlichkeit in der Genauigkeit der Auflösung, nicht etwa in einem größeren Schritt des Beobachtungs- oder Auswertungsprozesses liegt.

So fällt etwa eine besonders hohe Übereinstimmung mit der entsprechenden Referenzkurve für den Typ A3V im Beispiel von Beta Leonis auf, der beobachtete Sterntyp ist dem Literaturwert im Vergleich zu den anderen Kurven am ähnlichsten.

(Abb. 7: Vergleich der instrumentenkalibrierten Realstrahlungskurve mit der Referenzkurve für den entsprechenden Sterntyp)

Anmerkung:

⁵¹ Vgl. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Starlog/staspe.html> (abgerufen am 13.06.2018)

Dass der Referenzkurvenvergleich im Beispiel Beta Leonis sehr gute Übereinstimmung zeigt ist nicht unbedingt repräsentativ, da die Instrumentenkalibrierungskurve mithilfe der Rohaufnahme von Beta Leonis erstellt wurde (siehe 4.1.1, 1)). Es folgt also aus $K_{\text{Kalibriert}} = K_{\text{Roh}} \setminus K_{\text{Instrumentenkalibrierung}}$ und $K_{\text{Instrumentenkalibrierung}} = K_{\text{Roh}} \setminus K_{\text{Referenz}}$ dass $K_{\text{Roh}} \setminus (K_{\text{Roh}} \setminus K_{\text{Referenz}}) = K_{\text{Kalibriert}} = K_{\text{Referenz}}$. Das instrumentenkalibrierte Spektrum entspricht also, abgesehen von ein kleineren Abweichungen durch die Glättung während des Prozesses, dem Referenzspektrum.

Doch auch wenn man die Auswertung eines Sternes anderen Typs, wie Alpha Canis Minoris mit dem Typen F5IV betrachtet, fällt auf, dass auch hier wieder die höchste Übereinstimmung bei der entsprechenden F5IV-Referenzkurve vorliegt:

(Abb. 14: Vergleich der instrumentenkalibrierten Realstrahlungskurve mit der Referenzkurve für den F5IV Sterntyp)

Kommt aber auch in der planckkalibrierten Kurve in dieses Beispiels eine Linie in auf, die sich als Calcium-Linie interpretieren lässt, so ist das zwar immer noch keine Möglichkeit eine wirkliche Interpretation zu machen, allerdings zeigt dies die Richtigkeit der Vorgehensweise und die Machbarkeit einer aussagekräftigeren Untersuchung mit entsprechend optimierter Ausführung.

4.5.2 Weiteres zur Genauigkeit

Das Liniengitter hätte an der Kamera festgestellt und so die Rotation des Gitters um die Achse des Objektivs verhindert werden müssen, um die Aufnahmen immer auf den gleichen Kamerapixeln zu machen, und nicht in Randbereichen der Kamera, da es bei manchen CCD-Chips Varianzen in der Aufnahmeleistung an verschiedenen Punkten des Chips gibt. Und der Stern hätte immer am gleichen Ort auf dem CCD-Chip platziert gewesen sein müssen, um gleiche Bedingungen für alle Beobachtungen zu schaffen.

Alle ausgewerteten Beobachtungen hätten am gleichen Tag in einer Serie gemacht werden müssen, um mit möglichst gleichen Luft- und Umgebungsbedingungen zu arbeiten.

Um einige Probleme die die Luftunruhe mit sich bringt zu umgehen hätte auch ein Teleskop mit geringerem Durchmesser verwendet werden können, da Aufnahmen durch diese aufgrund des günstigeren Öffnungsverhältnisses weniger von Luftunruhen beeinflusst werden. In Frage gekommen wäre etwa das dem Verein zur Verfügung stehende „C8“ mit einem Durchmesser von 20 cm.

Um noch weiter Fehler durch das Bildrauschen zu verhindern, hätte man die Methode der Dark- und Flatkorrektur anwenden können: Für die Dunkelbilder wird, sobald die Kamera auf Betriebstemperatur ist, eine Reihe von Bildern mit der zu korrigierenden Optik aufgenommen, jedoch mit verschlossenem Objektiv. Diese Dunkelbilder werden dann mithilfe von entsprechender Software gemittelt, um ein sogenanntes „Masterdark“ zu erhalten. Um Flataufnahmen zu machen, wird die zu korrigierende Optik am Objektiv mit einer milchigen Folie verdeckt und belichtet, was im Endeffekt zu einer Aufnahme führen sollte, die an jeder Stelle voll belichtet ist. Auch aus den Flataufnahmen wird über den gleichen Prozess ein „Masterflat“ erstellt. Die ISO-Zahl der Kamera sollte dabei auf beiden Aufnahmen gleich sein.

Daraufhin kann durch weitere Verarbeitung mithilfe von entsprechender Software eine Korrektur durch Entfernung von Rauscheffekten im Bild erfolgen.⁵²

Eine weitere mögliche Verbesserung wäre in der Erstellung der Instrumentenkorrekturkurve anzusetzen: Die Kurve, die hier erstellt wurde, basierte auf der Division einer Sternaufnahme durch die entsprechende Spektralkurve. Solche aufnahmen sind allerdings im Vergleich zu anderen möglichen Kalibrierungsaufnahmen, wie zum Beispiel einer Glühlampe mit kontinuierlichem Spektrum recht fehleranfällig, beispielsweise wegen der geringen Lichtstärke und der daraus resultierenden höheren relativen Intensität der Artefakte. Hätte man nun statt mit Sternspektren die Korrekturkurve über die Aufnahme einer Glühlampe erstellt, und durch die entsprechende Planckkurve dividiert, so wäre die Korrekturkurve noch genauer geworden.

4.6 Aufgetretene Probleme bei der Durchführung:

4.6.1 Hardwareprobleme:

Das zu Beginn verwendete Material wurde nicht bis zum Ende hin verwendet, so wurde zur Spektroskopie beispielsweise zu Beginn nicht der „Star Analyzer 100“, sondern der „Star Analyzer 200“ mit einer Dispersion von 200 Linien pro Millimeter eingesetzt. Die hohe Dispersion des „Star Analyzer 200“ war nicht für die zur Verfügung stehende Optik geeignet, die Bilder wiesen eine zu geringe Linienintensität auf.

Auch erwies sich das zu Beginn verwendete Cassegrain-Teleskop der Firma „Lichtenknecker Optics“ als nicht optimal: Mit einem Durchmesser von 300 mm und einer Brennweite von 5400 mm ergibt sich ein Öffnungsverhältnis von 1:18, was das Teleskop für die Photographie lichtschwächer macht. Auch ist eine größere Optik immer Luftunruheanfälliger als eine kleinere. Daher wurde sich für das Takahashi TSA 102 mit 816mm Brennweite entschieden. Es bietet also bessere Bedingungen für die Kamera, sowie eine geringere Anfälligkeit für Luftunruhen. Auch war es durch die Verwendung dieses Gerätes möglich, die Kamera „Atik-314L“ ohne weitere Adaptermechanismen einzusetzen, was die Fehleranfälligkeit während dem Aufbau senkte. Das Takahashi-Teleskop zeigte außerdem eine geringere Eigenüberblendung des Spektrums in den Aufnahmen, was die Genauigkeit der Intensitätsbestimmung für die verschiedenen Wellenlängen erhöht. Dies ist wohl auf die Spiegelkonstruktion des Cassegrain-Teleskops zurückzuführen: Bei ihm liegt im Lichtweg ein der Optik zugehöriger Spiegel. Man hätte der Überblendung durch kürzere Belichtungszeiten entgegenwirken können, jedoch bringt die höhere Belichtungszeit den Vorteil mit sich, dass sich Ungenauigkeiten wie zum Beispiel Unschärfen durch Luftflimmern und ähnliches durch die erhöhte „Samplemenge“ im Mittel quasi ausgleichen.

Die zunächst verwendeten Kameras „Canon EOS600D“ und „Pentax K5“ mit jeweils einem CMOS-Farbsensor und Bayermatrix und einer ungefähren Pixelgröße von 4,29 µm, aber nur 14 Bit Farbtiefe, wurden im Optimierungsprozess durch die Astronomiekamera „Atik-314L“ ersetzt, zugute von höherer Aufnahmeschärfe und genauerer Lichtintensitätswerte, besonders im infraroten Bereich. Auch kühlt die

⁵² Vgl. <https://www.youtube.com/watch?v=39I3233MBCU> (abgerufen am 11.06.2018)

„Atik-314L“ mit ihrem integrierten Kühlsystem auf etwa 27K unter der Umgebungstemperatur, was das Bildrauschen, besonders bei wärmeren Verhältnissen, wesentlich verringert.

4.6.2 Softwareprobleme

Die zunächst verwendeten Programme „VSpec“ und „CLEA“ waren leider nicht geeignet: Nachdem das von der Quelle „Wallis, Eckhard: Spektroskopie von Sternen“ empfohlene Programm „CLEA – Classification of Stellar Spectra“ nicht lauffähig gemacht werden konnte, wurde ein Versuch mit dem Programm „VSpec“, empfohlen von der Quelle „Zborowska, Constantin: Klassifizierung von Sternspektren in Theorie und Praxis“ unternommen. Als dieses nach langer Anpassung lauffähig gemacht werden konnte, stellte sich heraus, dass die Umgebung enorm unpraktisch und teilweise nicht mit den gebrauchten Dateiformaten kompatibel war. Nach weiterer Suche wurde das Programm „RSpec“ ausgewählt: In der Zeitspanne der 30-tägigen Testversion standen die finalen, optimierten Aufnahmen leider noch nicht zur Verfügung, jedoch fiel die Wahl trotzdem auf das kostenpflichtige Programm, da es zur Auswertung des verwendeten .fit-Formates fähig ist, sowie bereits programmintern eine entsprechende Referenzbibliothek beinhaltet.

Nachdem eine entsprechende Version des Programms bestellt und eingerichtet wurde, zeigten sich jedoch bei der Auswertung der weiteren Versuchsreihe einige weitere Probleme: Nach dem Auswertungsprozess haben die Ergebnisse in nicht auf die Literaturwerte gepasst, alle aufgenommenen Linien waren etwas zu den Literaturwerten verschoben. Eine Hypothese für die Fehlerursache war ein Fehler in der initialen linearen Wellenlängenkalibrierung (siehe Abschnitt 4.1.1, 1)), da die Wellenlängenverschiebung linear auftrat. Diese konnte dadurch bestätigt werden, dass zunächst die Differenz der Pixelposition der angegebenen Null-Wellenlänge und der Pixelposition der vermuteten H_{β} -Wellenlänge gebildet wurde. Durch diesen Wert wurde die Differenz der beiden Wellenlängen geteilt, der so erhaltene Dispersionsfaktor wurde mit der Pixelposition der vermuteten H_{α} -Wellenlänge multipliziert. Das Ergebnis entsprach allerdings nicht der nun erwarteten H_{α} -Wellenlänge: Das Problem musste in der Wellenlängenkalibrierung liegen. Nun wurde nach einer weiteren Literaturrecherche der Referenzpunkt für die H_{β} -Wellenlänge im Graphen neuangesetzt (siehe Abb. 8). Die folgenden Auswertungsschritte waren darauf erfolgreich.⁵³

5 Literatur- und Quellenverzeichnis

5.1 Literaturverzeichnis

- Karttunen, Hannu (Hrsg.): Astronomie – Eine Einführung
- Heise, Matthias: Ausbildungsseminar „Kerne und Sterne“: Grundgleichungen des Sternaufbaus
- Völker, Stefan: Spektralklassifikation im Unterricht
- Wallis, Eckhard: Spektroskopie von Sternen
- Zborowska, Constantin: Klassifizierung von Sternspektren in Theorie und Praxis

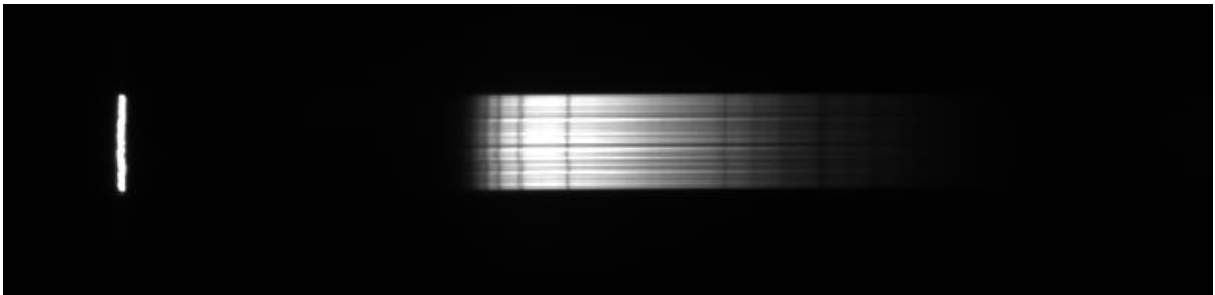
⁵³ Der Korrekturprozess sowie eine anschließenden Begutachtung und Beratung der Arbeit wurden von Herrn Dr. rer. nat. Stephan Westermann begleitet

5.2 Quellenverzeichnis

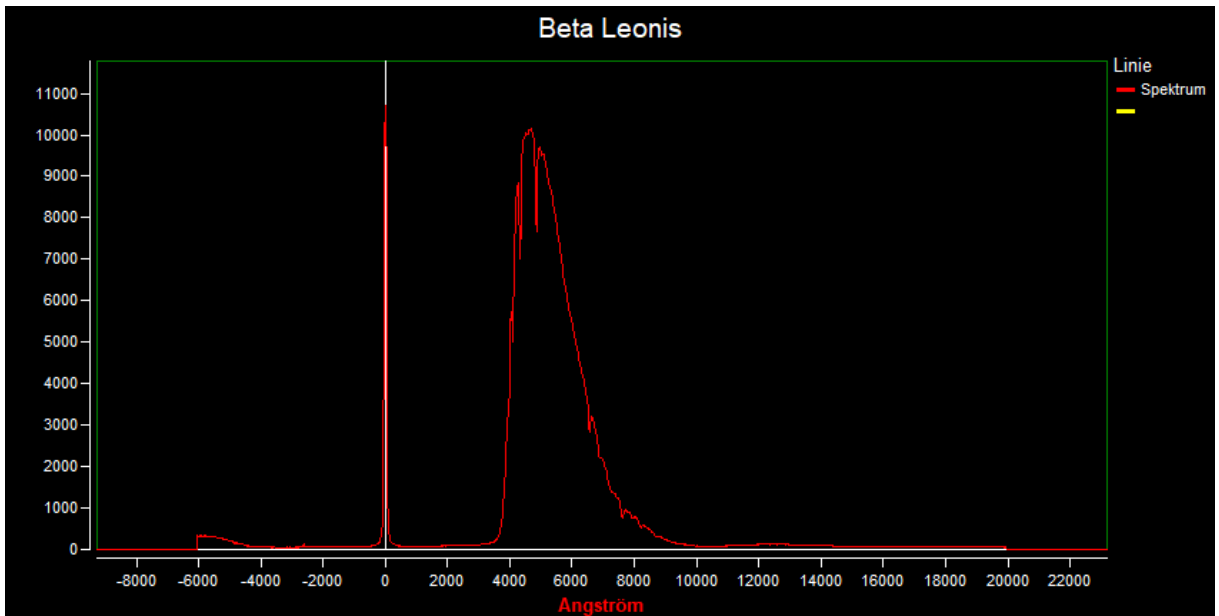
- <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/6010>
- <http://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/1331208>
- <http://physikunterricht-online.de/jahrgang-11/wellenlaengenbestimmung-von-licht/>
- <http://physikunterricht-online.de/jahrgang-11/das-optische-gitter/>
- <http://www.mybude.com/weltall/1843-sterntypen.html>
- <http://www.newadvent.org/cathen/13669a.htm>
- https://www.youtube.com/watch?v=e8RH_YhQ6Ag
- <https://www.britannica.com/science/stellar-classification#ref288665#>
- https://www.youtube.com/watch?v=e8RH_YhQ6Ag
- <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/H/Hertzprung-Russell+Diagram>
- http://www.chemie.de/lexikon/Plancksches_Strahlungsgesetz.html
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Starlog/staspe.html>
- <https://www.sternwarte-trier.de/>
- <https://www.youtube.com/watch?v=6MrFuNGLsUE>
- <https://www.universeguide.com/star/denebola>
- <http://w.astro.berkeley.edu/~dperley/procyon.html>
- <http://solstation.com/stars2/denebola.htm>
- <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0309148>
- <https://www.youtube.com/watch?v=39I3233MBCU>

6 Anhang

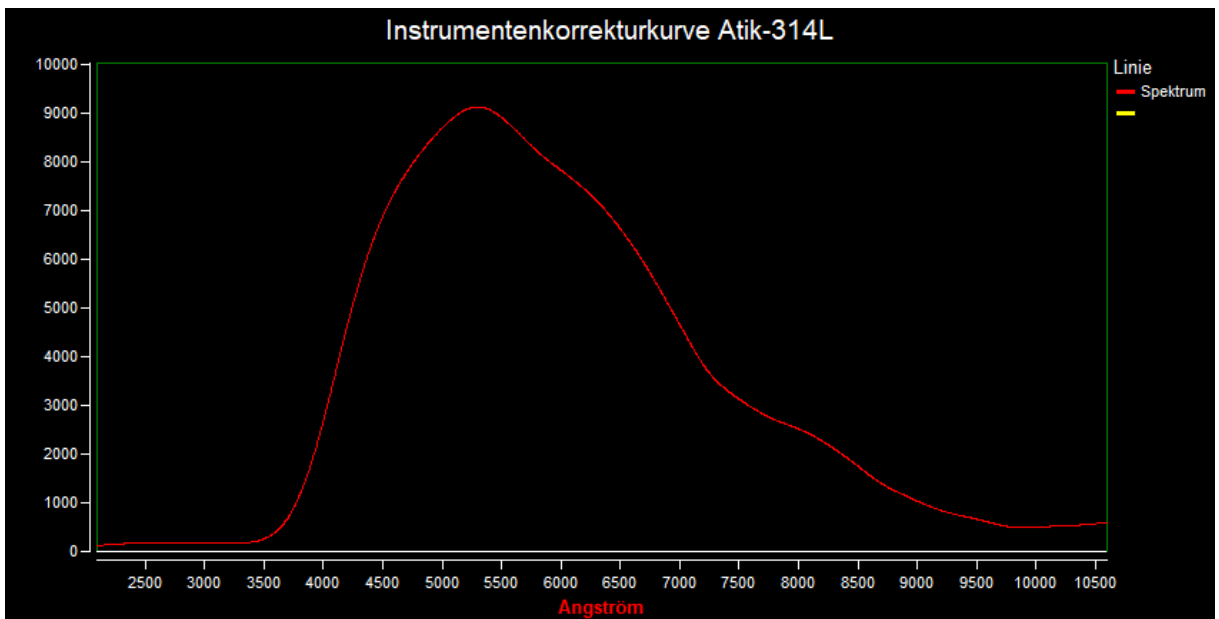
6.1 Beta Leonis



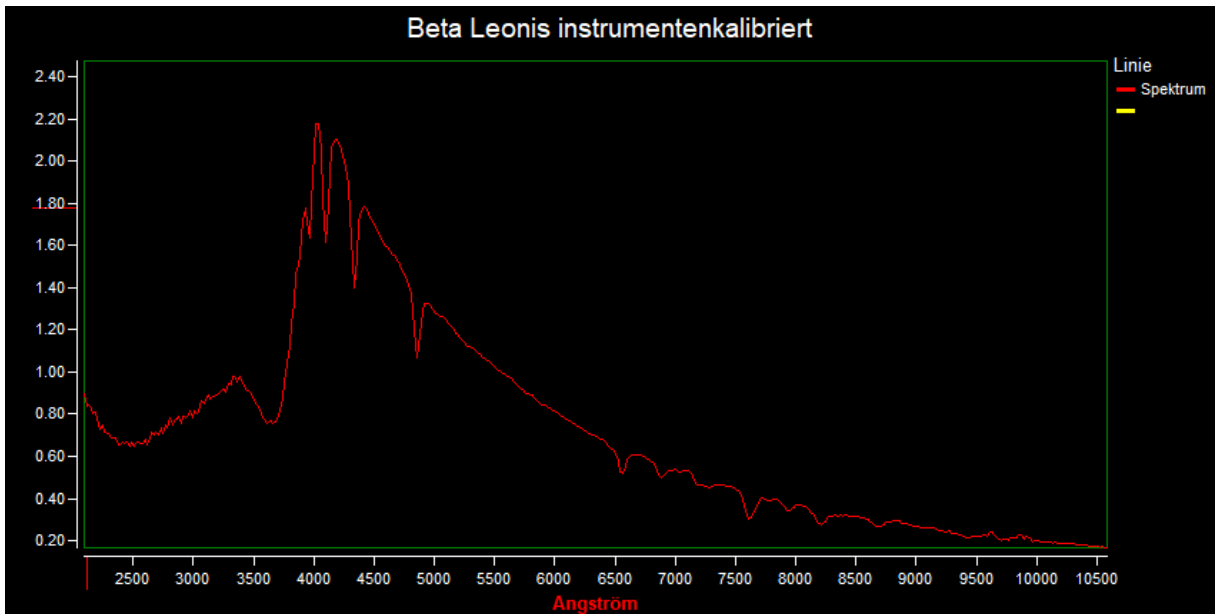
(Abb. 1: Ausgerichtete Aufnahme von Beta Leonis nach 1))



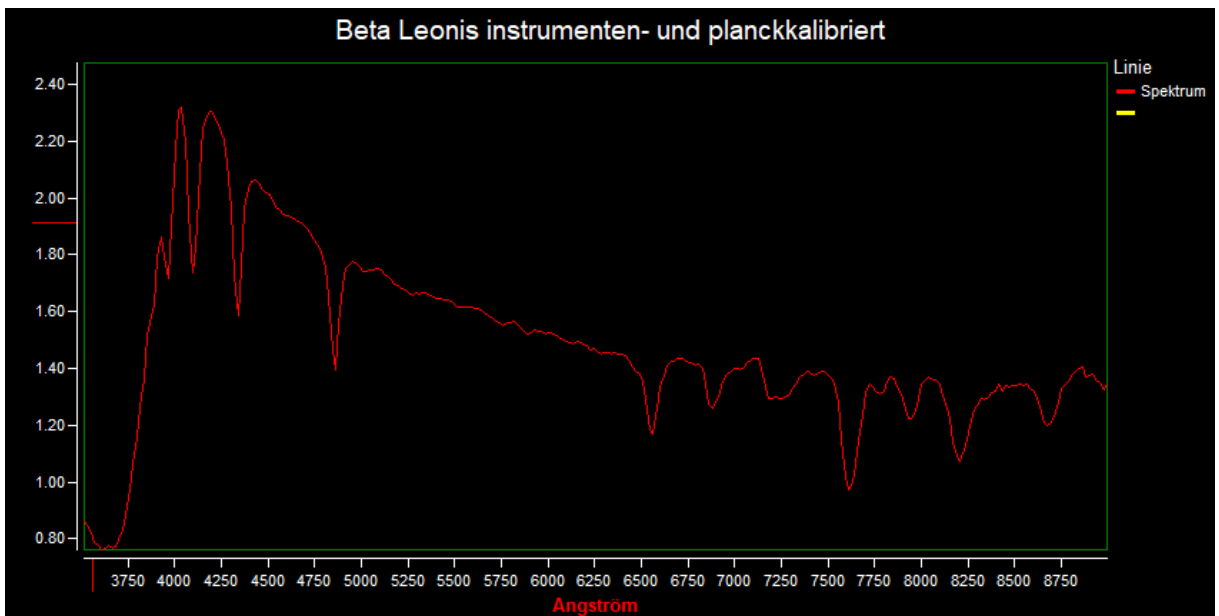
(Abb. 2: Rohkurve von Beta Leonis nach 2))



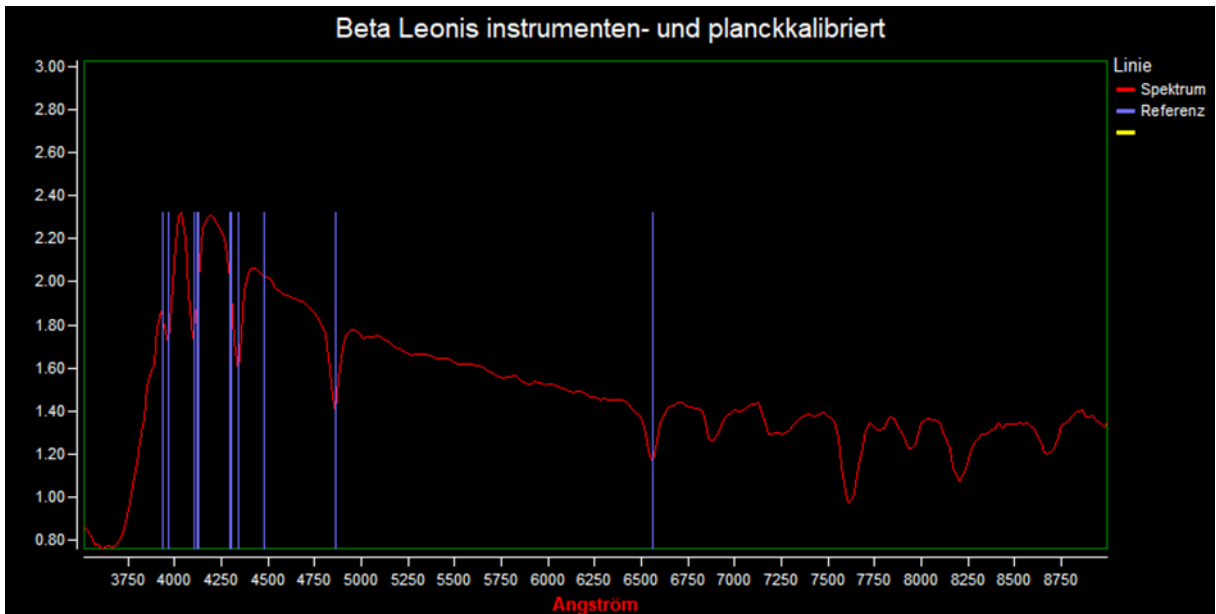
(Abb. 3: Instrumentenkorrekturkurve nach 3))



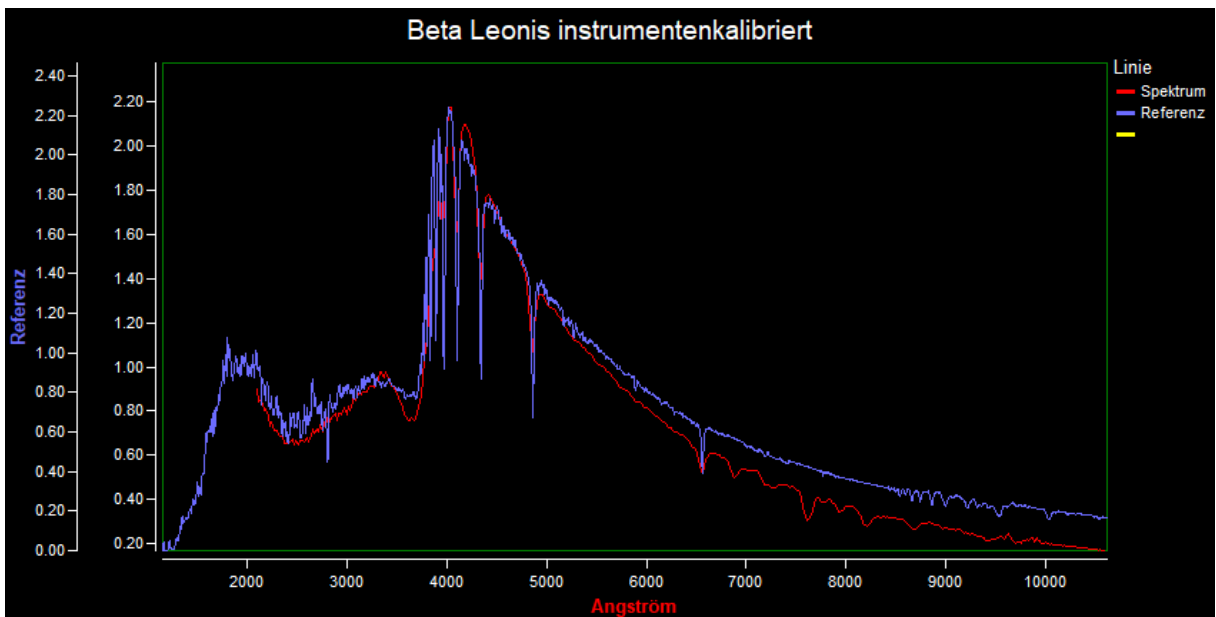
(Abb. 4: Instrumentenkalibrierte Kurve nach 3))



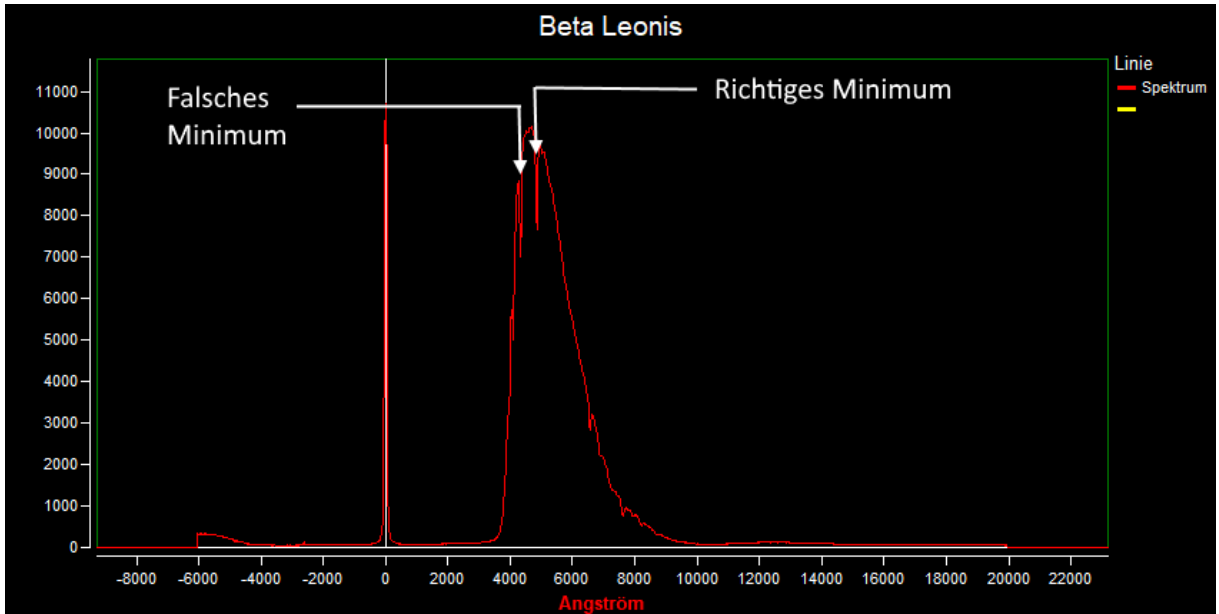
(Abb. 5: Planckkorrigierte Kurve nach 4))



(Abb. 6: Korrigierte Kurve mit eingeblendeten Linien des A-Typs)

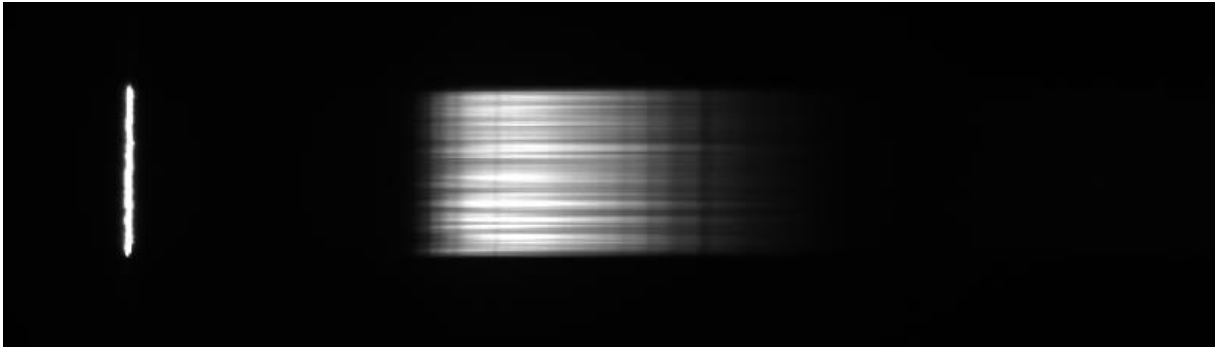


(Abb. 7: Vergleich der instrumentenkalibrierten Realstrahlungskurve mit der Referenzkurve für den A3V Sterntyp)

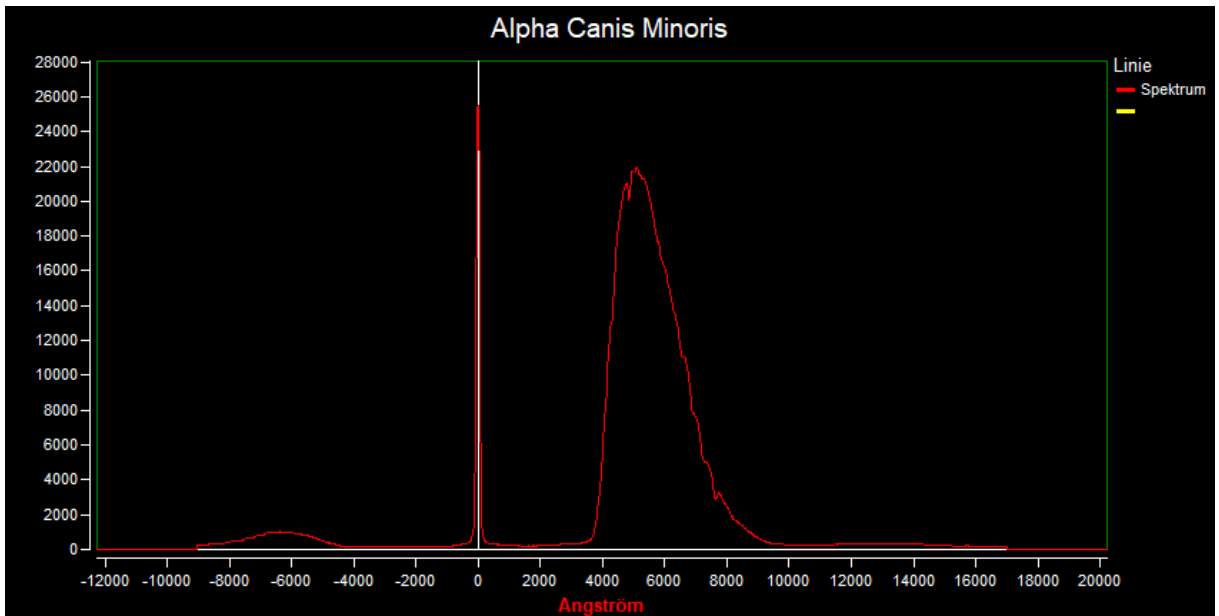


(Abb. 8: Falsch angenommenes und reales H_{β} -Minimum)

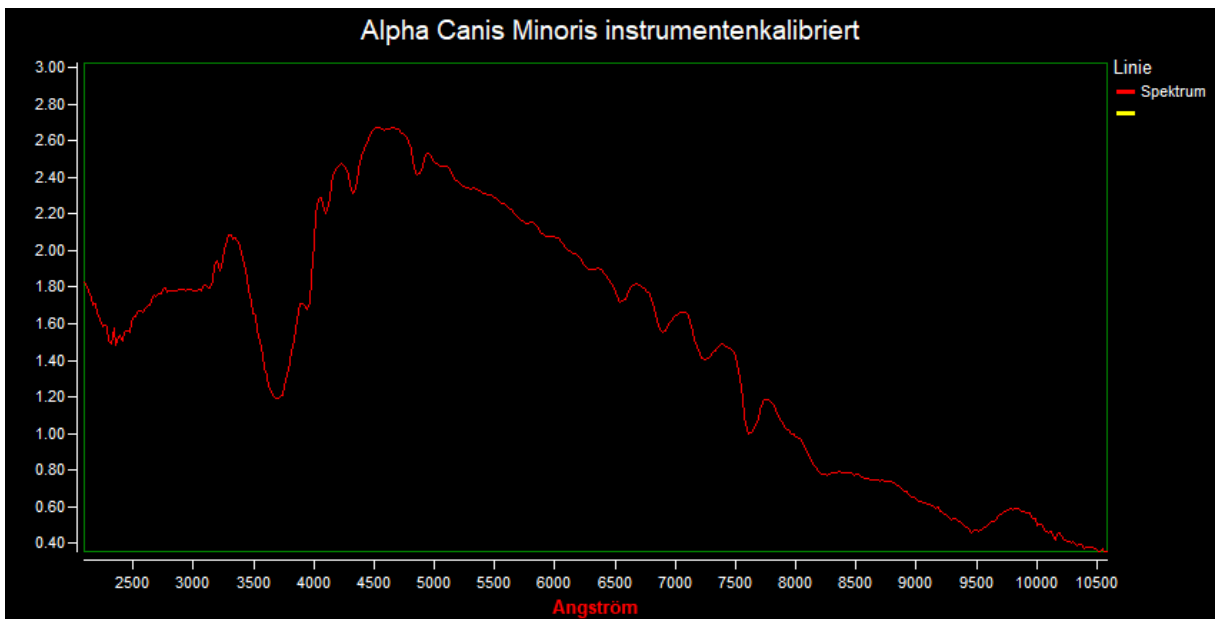
6.2 Alpha Canis Minoris



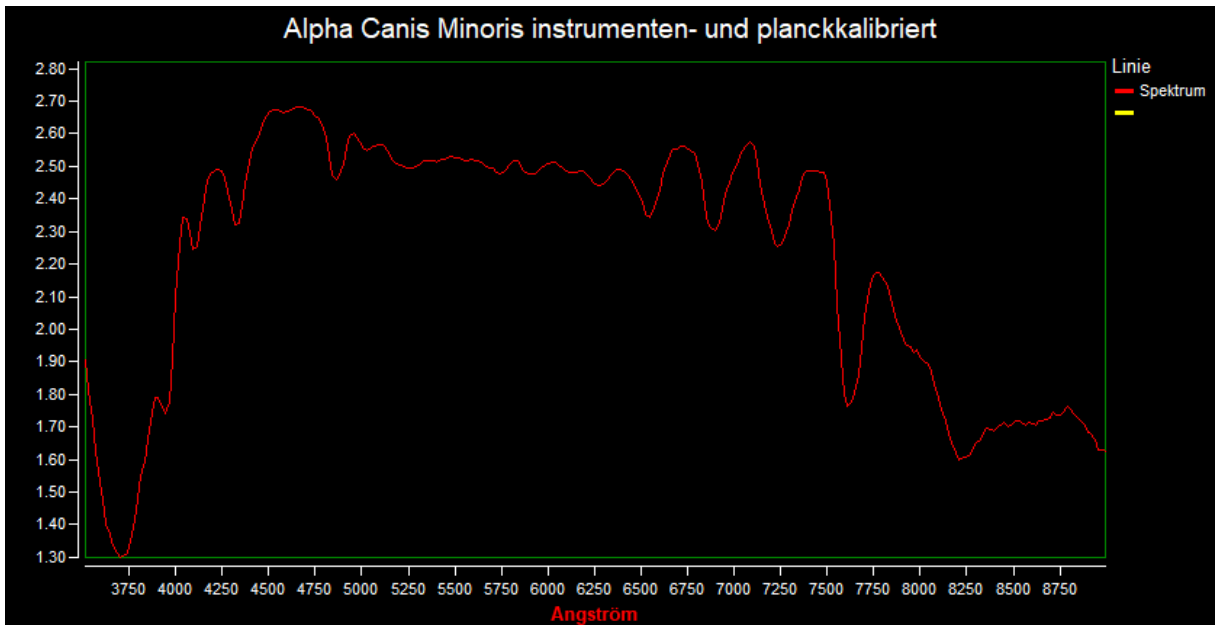
(Abb. 9: Ausgerichtete Aufnahme von Alpha Canis Minoris nach 1))



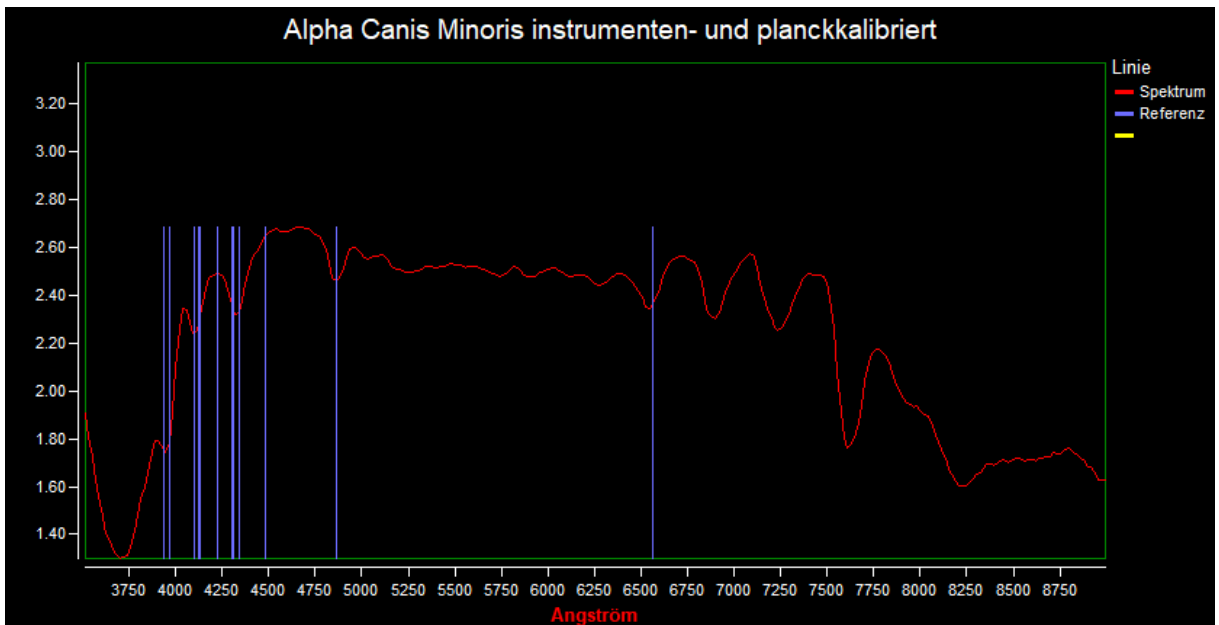
(Abb. 10: Rohkurve von Alpha Canis Minoris nach 2))



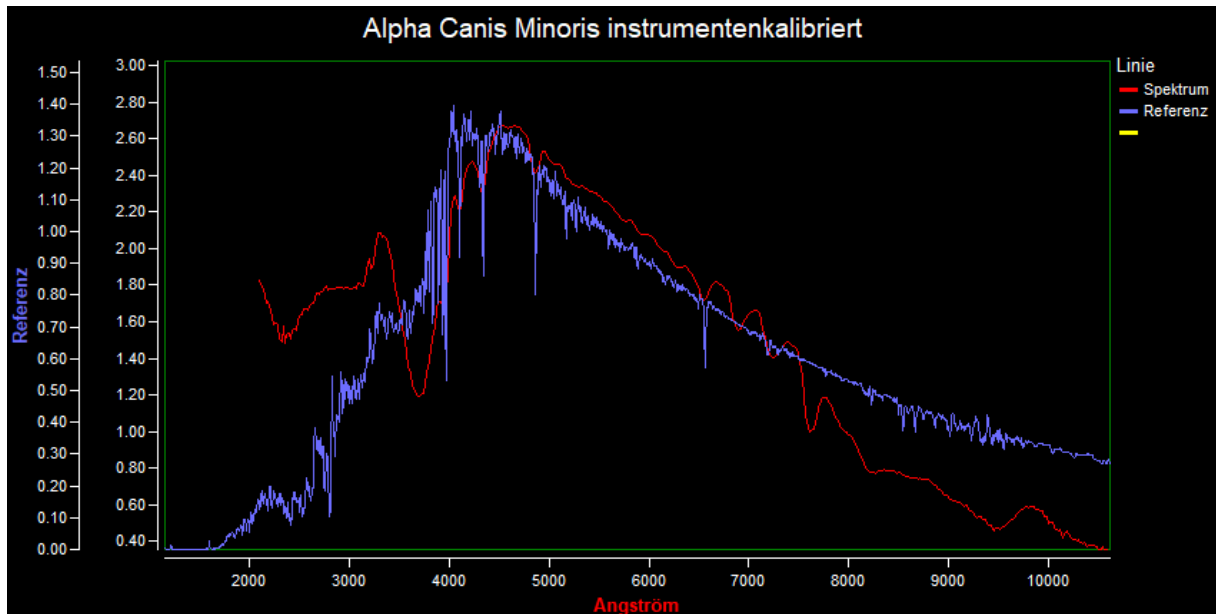
(Abb. 11: Instrumentenkalibrierte Kurve nach 3))



(Abb. 12: Planckkorrigierte Kurve nach 4))



(Abb. 13: Korrigierte Kurve mit eingeblendeten Linien des F-Typs)



(Abb. 14: Vergleich der instrumentenkalibrierten Realstrahlungskurve mit der Referenzkurve für den F5IV Sterntyp)

7 Erklärung des Autors

Hiermit bestätige ich, dass diese Arbeit mithilfe der angegebenen Quellen und Literatur, und Unterstützung durch die angegebenen Personen und Institutionen, von mir, Lucas Eekhof, geschaffen worden ist.