

Carl-Fuhlrott Gymnasium



Spektroskopie des Be Sterns γ Cassiopeiae

Erek Stemming, Noah Menno Aden

10. Mai 2023

CFG - Schülerlabor Astronomie
Kursleiter: Bernd Koch
Projektkurs Astronomie 2022/2023

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Theoretische Grundlagen zur Spektroskopie	5
2.1	Was ist Licht?	5
2.1.1	Licht als Welle	5
2.1.2	Eigenschaften einer Welle	6
2.1.3	Licht als Teilchen	7
2.1.4	Licht als Photon	7
2.2	Woher kommt Licht	8
2.2.1	Bohrsches Atommodell	8
2.2.2	Die Balmerreihe	9
2.3	Das Spektrum	9
2.3.1	Was sind Spektren?	9
2.3.2	Wie Entstehen Spektren?	10
2.3.3	Welche Arten von Spektren gibt es?	10
2.4	Das Planck'sche Strahlungsgesetz	12
3	Klassifikationen	13
3.1	Die Harvard Klassifikation	13
3.2	Die Leuchtkraftklassifikation	14
3.2.1	Das Hertzsprung-Russell Diagramm	14
4	Theoretische Grundlagen zu Be-Sternen	16
4.1	Definition der Be-Sterne	16
4.2	Eigenschaften	16
4.2.1	Emissionslinien	16
4.2.2	Rotationsgeschwindigkeit	17
4.2.3	Eigenschaften der Gasscheibe	17
4.3	Gestalt der H α Spekten	17
4.3.1	Inklination und optische Tiefe	18
4.3.2	Kinematik	19
4.4	Be-Stern Modell	19
5	Astronomische Instrumente der Schülersternwarte	20
5.1	SBIG STF-8300M	20
5.2	Dados Spektrograph	21
5.2.1	Strahlengang	21
5.3	TEC APO 160FL Refraktor	22
5.3.1	Funktionsweise	23
5.4	10Micron GM40000-Montierung	23
6	Experimenteller Aufbau	25
7	Durchführung der Aufnahmen	26

8 Kalibrierung der Spektren	28
8.1 Stacking	28
8.2 Wellenlängenkalibrierung	28
8.3 Normierung	29
8.4 Flusskalibrierung	31
9 Auswertung der Spektren	33
9.1 Spektrallinien	33
9.2 Feststellung des Spektraltyps	35
9.3 Strahlungsmaximum	36
9.4 Fehlerdiskussion	36
10 Modell von γ Cas	37
11 Anhang	42
11.1 Danksagung	42
11.2 Abschlusserklärung	42

1 Einleitung

Unsere Motivation

Der Weltraum und seine Objekte faszinieren die Menschheit seit tausenden von Jahren. Auch wir sind von diesen endlosen Weiten begeistert. Besonders spannend finden wir die unzähligen Sterne des Weltalls. So haben wir uns gefragt, wie wir trotz der großen Entfernung der Himmelskörper Informationen über sie sammeln können. Die Antwort bekamen wir von Herrn Koch und Herrn Winkhaus, die Verantwortlichen für das Schülerlabor des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums: Mit Hilfe der Spektroskopie.

Spektroskopie bedeutet das Licht der Sterne zu analysieren. Alleine mit ihr können wir Rückschlüsse über die chemische Zusammensetzung, Strahlungsleistung, Oberflächentemperatur, Rotationsgeschwindigkeit und Klassifikation eines Sterns ziehen. Die Spektroskopie ist unser notwendiges Werkzeug, um mehr über unsere Himmelskörper zu erfahren.

Thema der Projektarbeit

Bei der Entwicklung unseres Themas der Projektarbeit, war uns Herr Koch behilflich, sodass wir ein anspruchsvolles, die Spektroskopie einbeziehendes und für eine erweiterte Lernleistung geeignetes Thema fanden. Für unsere Untersuchungen wählten wir den Stern γ Cassiopeiae, der aufgrund seiner hohen Rotationsgeschwindigkeit einzigartige Eigenschaften besitzt, die besonders unser Interesse weckten. Zudem erfüllt er durch seine Helligkeit und Himmelsposition die geforderten Eigenschaften für die Spektroskopie am Schülerlabor des CFG.

Aus den gegebenen Anforderungen an unsere Projektarbeit und unserem Interesse an der Spektroskopie, entwickelten wir die Fragestellung für unser Thema: „Welche Eigenschaften weist das Spektrum des γ Cassiopeiae auf?“

2 Theoretische Grundlagen zur Spektroskopie

2.1 Was ist Licht?

Um aus Spektren auf die physikalischen und chemischen Eigenschaften eines Objekts zu schließen, muss zuerst verstanden werden, was Licht ist. Diese Frage beschäftigte Physiker jahrhundertlang. Ende des 17. Jhd. stellte erstmals Isaac Newton eine bahnbrechende Theorie auf. Seine Vermutung beinhaltete, dass Licht ein Teilchenphänomen ist.

Dem entgegenetzte 1650 Christiaan Huygens mit seiner Hypothese, dass Licht ein Wellenphänomen ist.

2.1.1 Licht als Welle

Zur Bestätigung der Wellentheorie entwickelte 1802 der englische Augenarzt und Physiker Thomas Young das Doppelspalt Experiment. Hierbei wird eine Platte mit zwei parallel zueinander liegenden Spalten mit Licht bestrahlt, sodass es auf eine dahinter liegende Leinwand trifft.

Wenn Licht aus Teilchen besteht, würde es vom Laser aus gradlinig durch die Spalte fliegen und zwei helle Punkte auf der Leinwand erzeugen. Wenn Licht aber ein Wellenphänomen ist, würde hinter den Spalten eine Überlagerung der Wellen geschehen. Als Resultat würde ein Interferenzmuster auf der Leinwand entstehen.

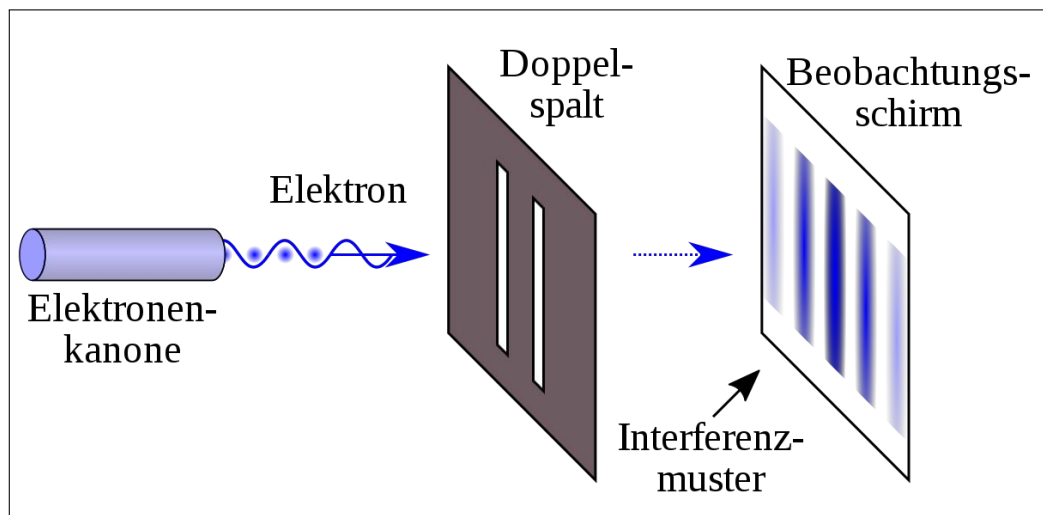


Abbildung 2.1: Doppelspaltexperiment mit Interferenzmuster [1]

Ergebnis: Ein Interferenzmuster entsteht. Damit galt die Wellentheorie von Christiaan Huygens vorerst als bestätigt.

2.1.2 Eigenschaften einer Welle

Als Welle wird eine Änderung des physikalischen Zustandes eines Mediums durch eine sich ausbreitende Schwingung bezeichnet.

Voraussetzung für eine Welle ist ein schwingungsfähiges System (Oszillatoren). Wird ein Oszillator in Schwingung versetzt, so wird die Bewegung zeitverzögert auf die anderen Oszillatoren übertragen.

Dadurch entsteht eine Welle, welche ihre Energie in Form der Amplitude durch den Raum transportiert. [2]

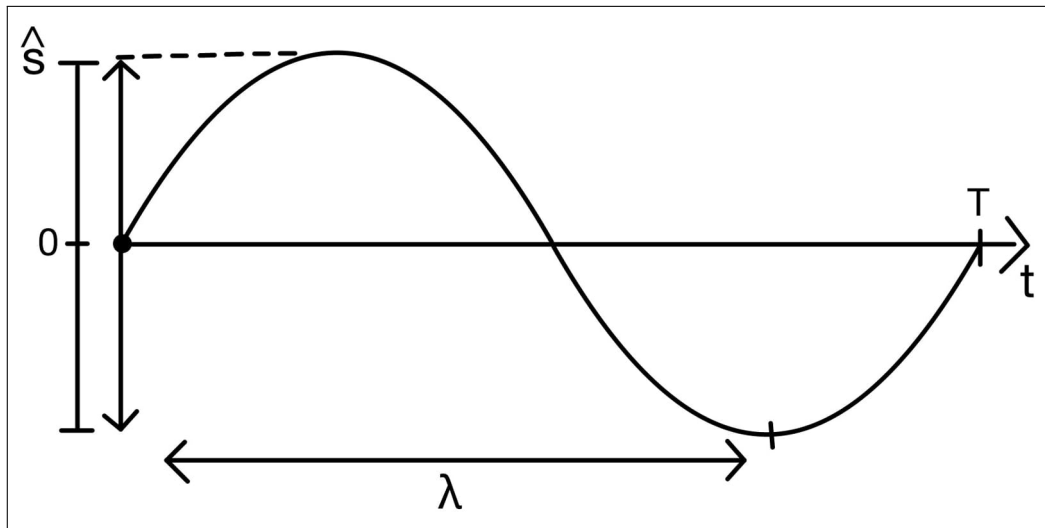


Abbildung 2.2: Modell einer Welle (eigene Grafik nach [3])

Daraus folgt:

$$C = \frac{\text{Strecke}}{\text{Zeit}} = \frac{\lambda}{T} = \lambda * \frac{1}{T} = \lambda * f \quad (2.1)$$

$$C = \lambda * f \quad (2.2)$$

λ = Wellenlänge = Abstand zweier Oszillatoren die genau in Phase schwingen

C = Ausbreitungsgeschwindigkeit = Wellengeschwindigkeit

f = Frequenz der Welle

T = Zeit

\hat{S} = Maximale Auslenkung

2.1.3 Licht als Teilchen

Anfang des 20. Jhr. änderte sich die Vorstellung des Lichtmodells grundlegend. Albert Einstein widerlegte 1905 mit seiner Deutung des Photoeffekts die These, dass Licht ein Wellenphänomen ist.

Der Photoeffekt wird mit dem Hallwachs Experiment nachgewiesen. Dabei wird eine negativ geladene Zinkplatte mit dem Licht einer Quecksilberdampf Lampe bestrahlt. Durch die Energie des Lichts fallen Elektronen von der Platte, sodass ein Ladungsverlust entsteht. Dieser wird mittels einem Elektroskops nachgewiesen.

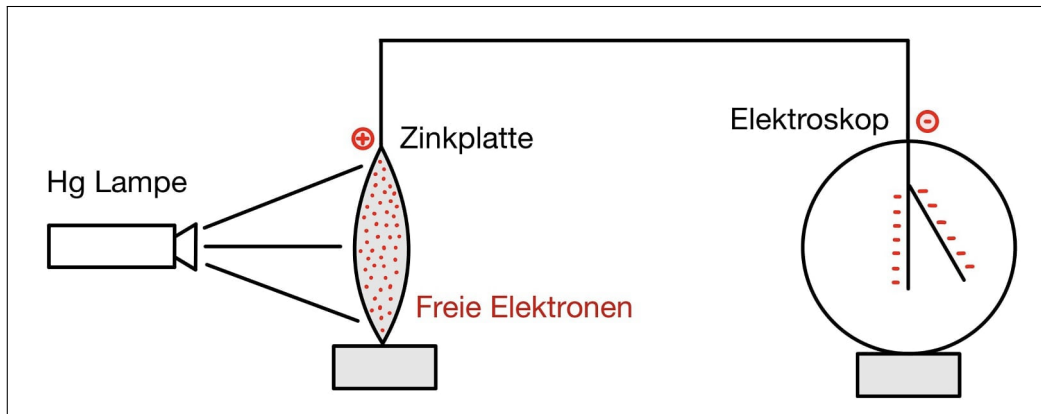


Abbildung 2.3: Hallwachs Experiment (eigene Grafik nach [3])

Fällt Licht der Hg-Lampe auf die negativ geladene Zinkplatte, werden wie erwartet Elektronen von der Platte gelöst und der Ausschlag des Elektroskops geht zurück. Wird die Intensität der Dampfampe erhöht, sollte nach der Wellentheorie von Christiaan Huygens der Ausschlag am Elektroskop stärker zurückgehen, da die Energie mit zunehmender Helligkeit (Amplitude) steigen sollte. Dies kann nicht nachgewiesen werden.

Bei der Verwendung eines Rotfilter ist zu beobachten, dass selbst bei einer hohen Intensität keine Elektronen von der Zinkplatte heruntergeworfen werden. Wird hingegen einen UV-Filter verwendet, werden die Elektronen bereits bei geringer Intensität von der Zinkplatte geworfen.

Ergebnis: Somit ist bewiesen, dass die Energie von Licht nicht in der Intensität (Amplitude) liegt. Wie der Versuch zeigt, muss sie in der Farbe (Wellenlänge bzw. Frequenz) liegen, sodass Licht kein klassisches Wellenphänomen sein kann.

2.1.4 Licht als Photon

1905 erkannte Albert Einstein, dass Licht kein gewöhnliches Teilchen ist. Er entdeckte einen Wellenteilchendualismus, welcher bis dahin ein neues Phänomen war. Seiner Theorie nach liegt die Energie der Photonen in kleinen Paketen, den sogenannten „Quanten“ vor. Einstein eröffnete damit ein neues Gebiet der Physik. [3]

Eigenschaften der Photonen (γ):

$$\text{Energie : } E\gamma = h * f = \frac{h * c}{\lambda} \quad (2.3)$$

$$\text{Impuls : } P\gamma = m * c = \frac{h}{\lambda} \quad (2.4)$$

$$\text{Ausbreitungsgeschwindigkeit : } c = \lambda * f \quad (2.5)$$

$h = 6,62606957 \cdot 10^{-34} Js$ (Plancksches Wirkungsquantum)

2.2 Woher kommt Licht

2.2.1 Bohrsches Atommodell

1913 entwickelte der dänische Physiker Niels Bohr eines der ersten Modelle des Atomaufbaus. 1922 erhielt er für sein Werk den Physiknobelpreis. Nach Bohr kreisen negativ geladenen Elektronen auf festen Bahnen um einen positiv geladenen Kern. Dabei können die Elektronen zwischen den Bahnen wechseln, welche mit einem festen Energieniveau verbunden sind. Energieniveaus (Schalen), welche höher als das Grundniveau sind, werden mit den Quantenzahlen $n=2,3,4,5$ usw. bezeichnet.

Werden die Elektronen nicht von außen angeregt, kreisen sie immer auf dem niedrigsten Energieniveau (Grundniveau). Wird ein Elektron durch Energiezufuhr angeregt, wechselt seinen Energiezustand und somit die Schale. Aufgrund dessen, dass Elektronen immer das niedrigste Energieniveau anstreben, fallen sie direkt auf ihr ursprüngliches Niveau zurück. Dabei strahlen Sie die zuvor aufgenommene Energie in Form eines Photons in eine unbestimmte Richtung ab.

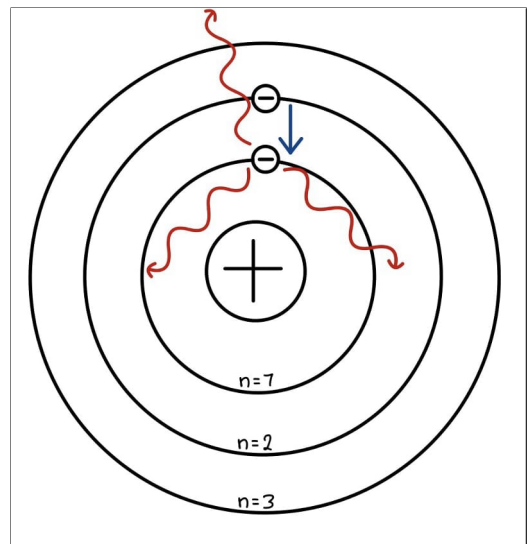


Abbildung 2.4: Bohrsches Atommodell
(eigene Grafik nach [4])

Wenn das Elektron auf das Grundniveau zurück fällt, gilt für die abgegebene Energie:
 $\Delta E = E_n - E_m$. Dabei gibt E_m die Energie des Grundviveaus und E_n die Energie der erreichten Schale an. So ist die Wellenlänge (Energie) des ausgesendeten Lichts antiproportional zu der Energiedifferenz. Das bedeutet, dass umso größer die Energiedifferenz ist, desto kurzwelliger wird das Licht. Umgekehrt heißt es, dass eine niedrige Energiedifferenz langwelligem Licht entspricht. [3]

2.2.2 Die Balmerserie

1882 entdeckte der schweizer Mathematiker und Physiker Johan Jakob Balmer die Spektrallinien der Balmer-Serie. Ihm gelang es erstmals, die Wellenlänge der Serie zu berechnen.

Die Balmer-Serie beschreibt alle Übergänge vom Energieniveau $n=2$ bis $n=\infty$ des Wasserstoffatoms. Besonders an der Balmer-Serie ist, dass sie sich größtenteils im Bereich des sichtbaren Lichts befindet (400nm-780nm), anders als die Paschen- und Lyman-Serie. Benannt sind die Balmer-Linien nach dem griechischen Alphabet. Erste, die langwellige $H\alpha$ (656,3nm) und letzte sichtbare, die kurzwellige $H\zeta$ (388,8) Linie. Weitere Linien befinden sich im ultravioletten Bereich des Lichts. [6]

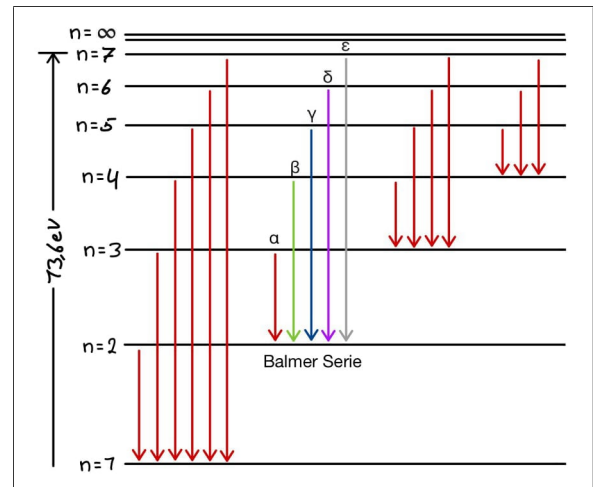


Abbildung 2.5: Balmer-Serie
(eigene Grafik nach [5])

2.3 Das Spektrum

Da nun verdeutlicht ist, wie Licht entsteht und welche Eigenschaften es vorweist, wird folgend das „Spektrum“ erläutert. Es wird erklärt, was Spektren sind, wie sie entstehen, welche Spektren existieren und wie sie zu deuten sind.

2.3.1 Was sind Spektren?

Wird Licht zerlegt, treten unterschiedlichen Wellenlängen hervor. Dies stellt das elektromagnetische Spektrum dar. Wahrnehmbar für das menschliche Auge ist nur ein kleiner Teil des EM-Spektrums, der Bereich von 380 bis 750 nm. So ist kurzwelliges Infrarot-Licht oder langwelliges UV-Licht für den Menschen unsichtbar. Manchen Tierarten ist es gegeben andere Wellenlängen Bereiche des Lichts zu sehen, wie z.B. der Bienen, die Teile des UV-Lichts sieht. [3]

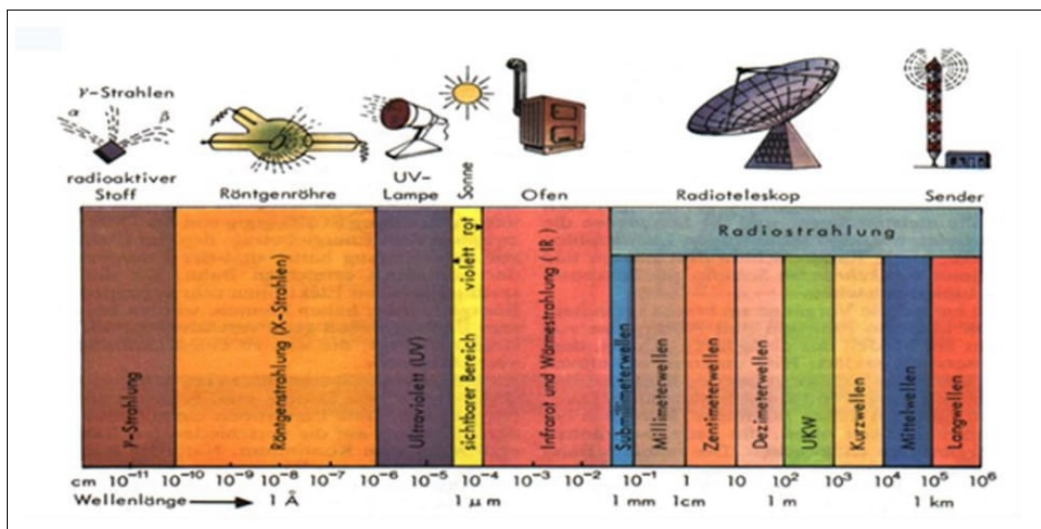
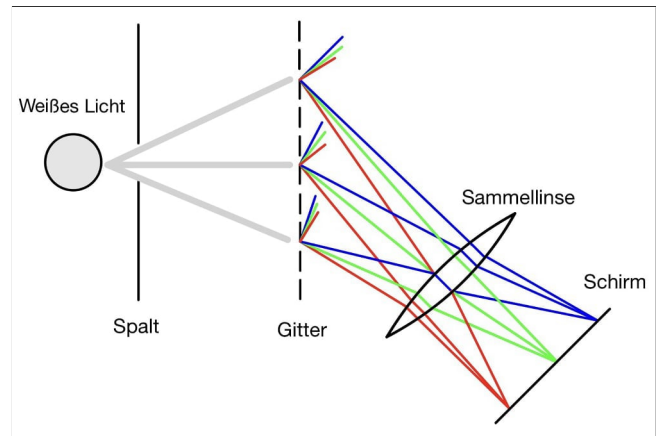


Abbildung 2.6: Das EM-Spektrum [3]

2.3.2 Wie Entstehen Spektren?

Spektren können auf mehreren Wegen erzeugt werden. Zum Einen durch ein Prisma, zum Anderen durch ein Gitter. In der Sternspektroskopie werden meist sogenannte „Gitterspektrografen“ genutzt. Der Vorteil der Gitterspektrografen liegt in der kompakten und leichten Bauweise, die durch das sogenannte „optische Gitter“ realisiert wird. Das erste optische Gitter, auch bekannt als „Beugungsgitter“, erfand 1821 der deutsche Optiker und Physiker Joseph von Fraunhofer.



Wie in Abb.2.7 zu sehen ist, handelt es sich um eine Platte, in die eine Reihe von Spalten mit gleicher Breite und gleichem Abstand zueinander geritzt sind. Fällt Licht auf die Platte, wird es wie bei einem Doppelspalt (siehe Abb. 2.1) gebeugt. Es kommt zur Interferenz und die unterschiedlichen Wellenlängen treten hervor. Licht, welches aus einer Mischung von unterschiedlichen Farben besteht, z.B. weißes Licht, wird in seine einzelnen Farben wie bei einem Prisma aufgefächert. Ein bekanntes Beispiel aus dem Alltag sind Seifenblasen auf deren Oberfläche das einfallende Licht interferiert und ein schillerndes Farbspektrum entsteht. [7]

Abbildung 2.7: Lichtbeugung am optischen Gitter (eigene Grafik nach [7])

2.3.3 Welche Arten von Spektren gibt es?

Je nach den physikalischen Eigenschaften leuchtender Himmelskörper treten bei der spektralen Zerlegung unterschiedliche Phänomene auf. Grundlegend wird zwischen drei Arten von Spektren unterschieden, dem Emissionslinienspektrum, dem Absorptionslinienspektrum und dem kontinuierlichen Spektrum.

Das Emissionslinienspektrum

In Emissionslinienspektren sind einzelne Spektrallinien zu finden. Sie entstehen, wenn Elektronen angeregt werden und ein Photon emittieren. Jedes Atom lässt sich einer charakteristische Wellenlänge zuordnen, weshalb die Spektrallinien als „Fingerabdruck“ der Atome bezeichnet werden.

Als Beispiel der **Emissionslinien** haben wir das Spektrum von Wasserstoff gewählt. Zu erkennen sind die Balmerlinien $H\alpha$ (656,3nm), $H\beta$ (486,3) und $H\gamma$ (424,2).



Abbildung 2.8: Wasserstoffspektrum, aufgenommen und bearbeitet mit Spectral-Explorer Spektrograf/Software von Lukas Hoyer

Das Absorptionslinienspektrum

In Absorptionslinienspektren sind anders als in Emissionslinienspektren, einzelne dunkle Spektrallinien auf einem kontinuierlichen Spektrum zu erkennen. Diese dunklen Linien entstehen, wenn sich zwischen Betrachter und Objekt Atome bzw. Moleküle befinden.

Wird ein Elektron dieser Teilchen von einem in der selben Phase schwingendem Photon getroffen, nimmt es seine gesamte Energie auf und strahlt diese in eine unbestimmte Richtung ab. Im Spektrum ist eine dunkle Linie zu beobachten, da das Teleskop nicht die Wellenlänge des absorbierten Photons eingefangen kann.



Abbildung 2.9: Tageslichtspektrum (Aufgenommen mit DADOS Spektrograph, bearbeitet mit BASS Project)

Die dunklen Linien entsprechen der Wellenlänge, der emitierenden Atome. Durch Absorptionslinien lassen sich so ebenfalls Elemente und Moleküle nachweisen.

Das kontinuierliche Spektrum

Heiße Gase, Flüssigkeiten oder Körper senden kontinuierliche Spektren aus. Diese entstehen, wenn die Elektronen des strahlenden Körpers nicht mehr auf ihren Bahnen gebunden sind und die Energieübergänge der Elektronen beliebig sind. Dies führt dazu, dass die Frequenz und Wellenlänge der Strahlung unbestimmt ist. So ist ein kontinuierliches Spektrum zu beobachten, da Wellen jeder Länge entstehen. Elemente lassen sich in einem kontinuierlichen Spektrum nicht wieder finden. [3][6]

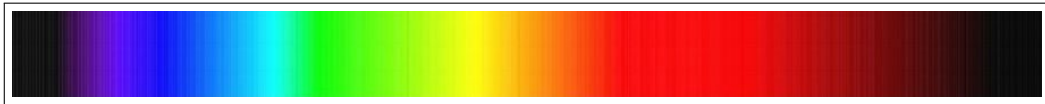


Abbildung 2.10: Kontinuierliches Spektrum [3]

2.4 Das Planck'sche Strahlungsgesetz

1900 untersuchte der deutsche Physiker Max Planck vollständig schwarze Körper. Planck erhitzte diese, sodass sie anfangen, sogenannte „Schwarzkörper-Strahlung“ zu emittieren. Er entdeckte, dass die spektrale Verteilung der Strahlungsintensität abhängig von der Temperatur des Körpers ist. Zur Berechnung der Strahlungsintensität dient die Planck'sche Strahlungsformel. Sie lässt sich ebenfalls auf Sterne anwenden.

Es gilt: Umso heißer der schwarze Strahler ist, desto mehr ist das Strahlungsmaximum zu kurzen Wellenlängen hin verschoben. [8]

Planck'sche Strahlungsformel:

$$S(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1} \quad (2.6)$$

S : Spezifische Ausstrahlung (Strahlungsleistung [$W/m^2/m$])
 $h = 6,62606957 \cdot 10^{-34} Js$ (Plancksches Wirkungsquantum)
 $c = 2,99792458 \cdot 10^8 m/s$ (Lichtgeschwindigkeit im Vakuum)
 $k = 1,3806488 \cdot 10^{-23} J/K$ (Boltzmannkonstante)
 T : Absolute Temperatur [K]
 λ : Wellenlänge [m]

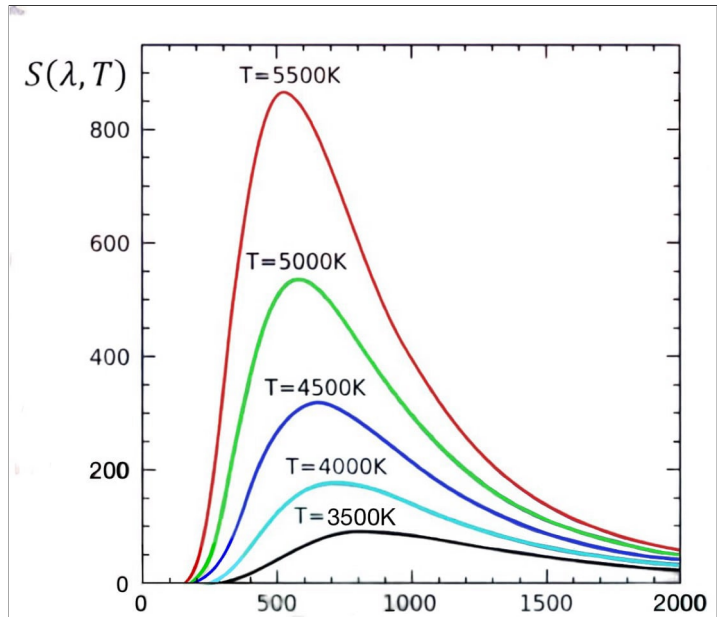


Abbildung 2.11: Strahlungsleistung in Abhängigkeit der Wellenlänge eines schwarzen Strahlers [3]

Die Wellenlänge (λ) bei der, der schwarze Strahler sein Strahlungsmaximum aufweist, kann in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur (T) durch das Wiensche Verschiebungsgesetz berechnet werden. [3]

Wiensches Verschiebungsgesetz:

$$\lambda_{max} = \frac{2897,8 \mu m \cdot K}{T} \quad (2.7)$$

$$T = \frac{28978 \cdot 10^3 \text{ \AA} \cdot K}{\lambda_{max}} \quad (2.8)$$

T : Absolute Temperatur [K]
 λ : Wellenlänge [\AA]
 $K = 2,897772917 \cdot 10^{-3} K/m$ (Wien'sche Verschiebungskonstante)

3 Klassifikationen

Um eine grobe Übersicht über die verschiedenen Stern-Klassen zu bekommen, werden in diesem Kapitel folgend drei Klassifikationen erläutert:

- Die Harvardklassifikation
- Die Leuchtkraftklassifikation
- Das Hertzsprung-Russell Diagramm

3.1 Die Harvard Klassifikation

Werden Spektren verschiedener Sterne betrachtet, fallen gemeinschaftliche Eigenschaften auf. Gemäß ihrer Gemeinsamkeiten, werden die Spektren in sieben Grundklassen eingeteilt. Sie werden mit den Buschtaben O, B, A, F, G, K und M benannt. Als Eselsbrücke hilft der Merksatz „Oh be a fine girl, kiss me“. Desweiteren gibt es noch Sonderklassen, die für diese Arbeit allerdings eine untergeordnete Rolle spielen, da sich 99 % der Sterne in die Grundklassen einordnen lassen.

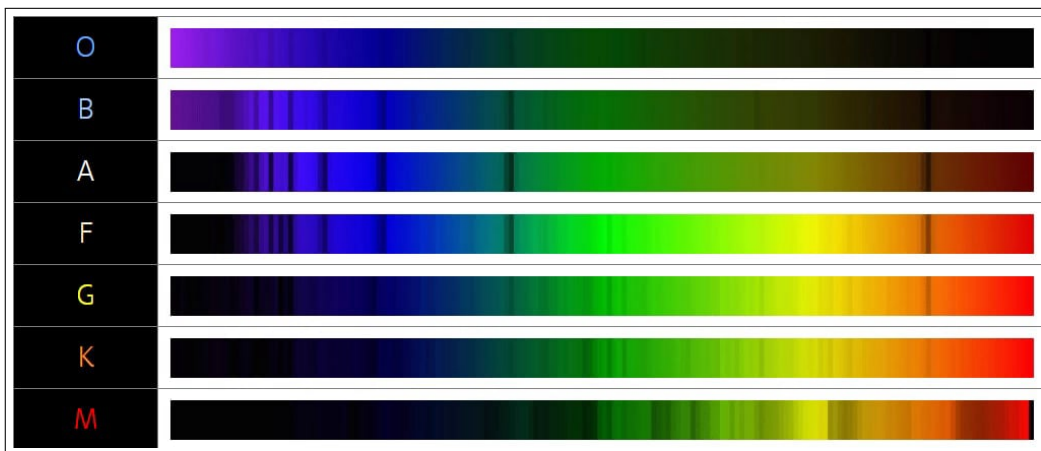


Abbildung 3.1: Die Spektraltypen der sieben Grundklassen [9]

Für eine feinere Einteilung der Spektralklassen werden Zwischenklassen genutzt. Jede Spektralklasse lässt sich in Abhängigkeit ihrer Temperatur einer Unterkategorie zuordnen. Von 0 (heiß) bis 10 (kalt). So ist die Sonne z.B. ein Stern der Spektralklasse G2 [9]

3.2 Die Leuchtkraftklassifikation

Innerhalb einer Spektralklasse haben Sterne oft eine ähnliche Oberflächentemperatur. Ein erkennbarer Unterschied der Sterne einer Spektralklassen, lässt sich in der Stärke und Schärfe ihrer Spektrallinien wahrnehmen. Je kleiner und schärfer eine Linie ist, desto leuchtkräftiger ist der Stern. Dementsprechend werden alle Sterne in acht Leuchtkraftklassen unterteilt, von O bis VII.

- Leuchtkraftklasse O
- Leuchtkraftklasse I
- Leuchtkraftklasse II
- Leuchtkraftklasse III
- Leuchtkraftklasse IV
- Leuchtkraftklasse V
- Leuchtkraftklasse VI
- Leuchtkraftklasse VII

Aus den Leuchtkraftklasse lassen sich im Zusammenhang mit den Spektraltypen grob alle Zustandsgrößen der Sterne ableiten. [10]

3.2.1 Das Hertzsprung-Russell Diagramm

Vereinfacht zeigt das Hertzsprung-Russell-Diagramm (HDR) die verschiedenen Lebens- bzw. Entwicklungsstadien der Sterne. Dabei kann das Entwicklungsstadium in Abhängigkeit des Spektraltyps und der Leuchtkraft abgelesen werden.

Das HDR weist eine charakteristische linienartige Häufungen von Sternen auf. Diese Ansammlung der meisten Sterne wird als „Hauptreihe“ bezeichnet. Desweiteren gibt es die Bereiche der Zwerge und Risen Sterne. Dabei durchlaufe die Sterne je nach Masse unterschiedliche Stadien.

Die Sonne als Beispiel, ist mit der Spektralklasse G und einer Leuchtkraft von V ein Stern der Hauptreihe. [11]

Abbildung: Hertzsprung-Russell Diagramm

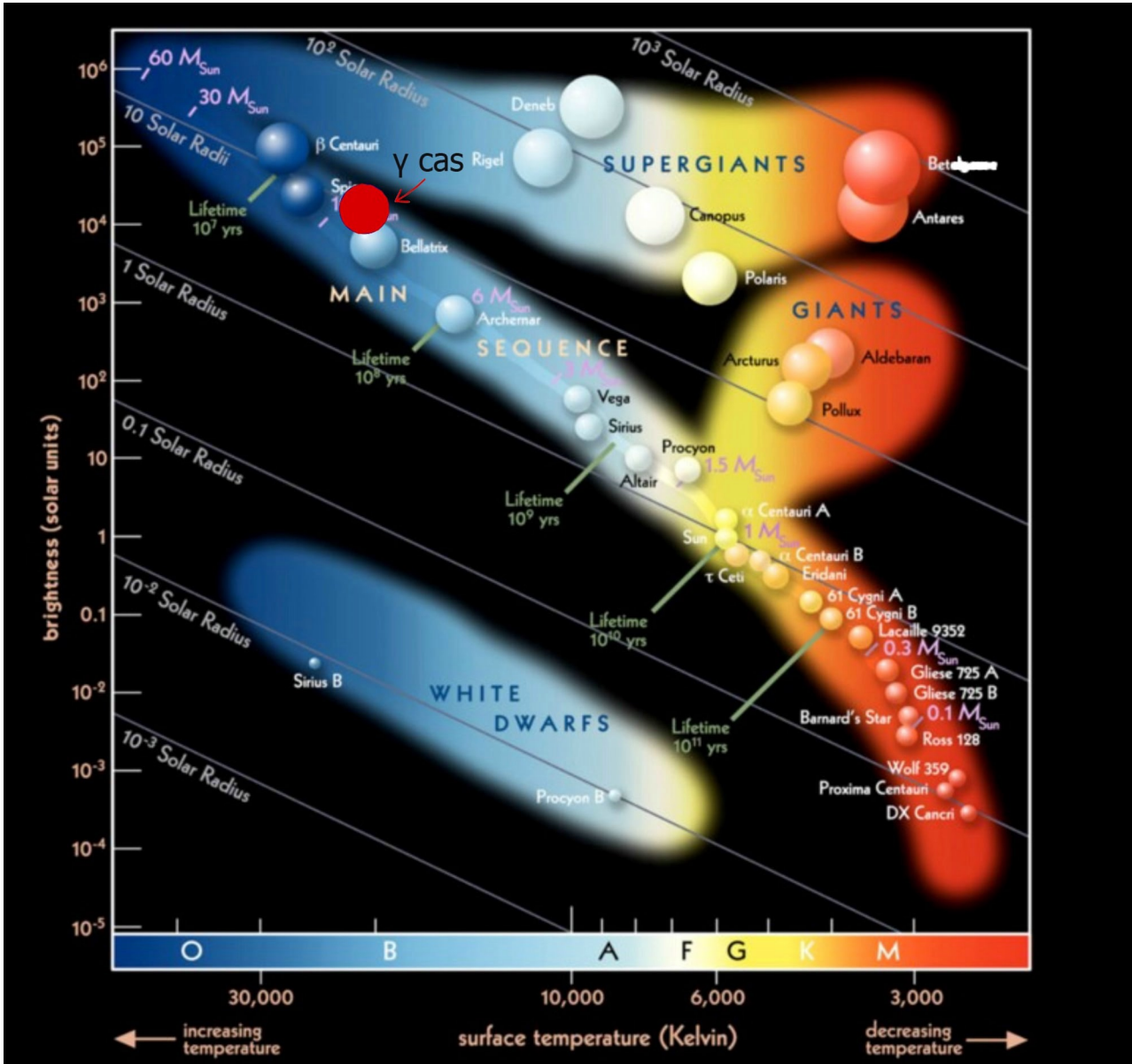


Abbildung 3.2: Hertzsprung-Russel Diagramm mit γ Cas verortet, eigene Bearbeitung [12]

4 Theoretische Grundlagen zu Be-Sternen

4.1 Definition der Be-Sterne

Be-Sterne gehören zu einer Untergruppe der Spektralklasse B. Die blauen Sterne besitzen eine Oberflächentemperatur von circa 20 000 bis 30 000 Kelvin. Sie weisen in ihrem Spektrum Balmer- und Helium-Linien auf. Charakteristisch für die Be-Sterne ist die Bildung einer ausgedehnten Gashülle um sich selbst herum. Diese wird durch das Auftreten von ungewöhnlichen Emissionslinien im Sternspektrum bemerkbar.

1866 entdeckte der Italiener Angelo Secchi die Be-Sterne. Secchi fand bei der ersten systematischen Untersuchung von über 500 Sternspektren ungewöhnlich helle Fraunhofer-Linien in den Spektren der Sterne γ Cas und β Lyr. Seit 1922 werden alle Sterne mit solchen für Be-Sterne typischen Emissionslinien als Emissionsliniensterne vom Spektraltyp B bzw. Be-Sterne bezeichnet.

Kurzgefasst ist ein Be-Stern, ein Stern des Spektraltyps B, der auf oder nahe der Hauptreihe liegt. Durch seine Gashülle weist er Emissionslinien auf. Allerdings kann er seine Hülle verlieren, wodurch er zwischenzeitlich in das Stadium eines B Sterns zurückfällt.

4.2 Eigenschaften

4.2.1 Emissionslinien

Die Besonderheit der Be-Sterne sind die im Spektrum vertretenen Emissionslinien. Sie sind grundsätzlich auf heiße, ausgedehnte Stern-Atmosphären bzw. Hüllen zurückzuführen. Diese werden durch das UV-Licht des zentralen Sterns angeregt, in ihren jeweiligen Farben zu leuchten. Daher strahlen die Emissionslinien der Hülle wesentlich heller als das kontinuierliche Spektrum des dahinter liegenden Sterns, wie 1866 Angelo Secchi feststellte.

Die Form der **Emissionslinien** wird wesentlich von den rotierenden Atomen Scheibe beeinflusst. Durch den Dopplereffekt werden die ausgesendeten Photonen der emittierenden Atome beeinflusst, sodass die Emissionslinien im Spektrum leicht verbreitert auftreten. Deshalb spiegeln die Emissionslinien die Bewegung des Gases in den dazugehörigen Regionen (Dopplerverteilung) und die Gesamtgeschwindigkeit des Gesamtsystems (Stern + Hülle) relativ zum Beobachter wieder.

Die stärksten **Emissionslinien** in den Spektren der Be-Sterne sind die ersten Balmer-Linien $H\alpha$ und $H\beta$ des Wasserstoffatoms sowie die Linien des einfach ionisierten Eisens FeII. Die höheren Balmerlinien $H8$ ff. liegen meist als **Absorptionslinien** vor.

4.2.2 Rotationsgeschwindigkeit

In den photosphärischen¹ Absorptionslinien der Be-Sterne ist eine deutliche Verbreiterung der Spektrallinien vorzufinden, besonders in HeI Linien. Dies kommt durch eine stark überhöhte Rotationsgeschwindigkeit zustande. Dabei sind äquatorial Geschwindigkeiten von bis zu 450 km/s möglich, was dem 15-fachen der Erdrotationsgeschwindigkeit entspricht.

Die wahren äquatorialen Rotationsgeschwindigkeiten v sind nicht messbar, da die Rotationsachsen in unbekanntem Winkel zur Blickrichtung des Beobachters geneigt sind. Spektroskopisch messbar ist nur die auf die Beobachtungsrichtung projizierte Rotationsgeschwindigkeit. Das Produkt aus der wahren Rotationsgeschwindigkeit v und dem Sinus der Inklination i .² Die wahre Rotationsgeschwindigkeit kann nur bei direkter Sicht auf den Äquator, einer Inklination von $i=90^\circ$ berechnet werden, da $\sin(90)=1$ beträgt.

Festzuhalten ist, dass Be-Sterne ca. 80% der kritischen Rotationsgeschwindigkeit erreichen. D.h. bei Überschreitung, übersteigt die Fliehkraft am Äquator die Gravitationsbeschleunigung, sodass Materie nicht länger am Stern gehalten wird. In Folge dessen, sind Be-Sterne deutlich abgeplattet. Durch diese Abplattung kommt es zu einer deutlichen Abnahme der effektiven Gravitationsbeschleunigung vom Pol zum Äquator.

4.2.3 Eigenschaften der Gasscheibe

Um die physikalischen Eigenschaften der Gasscheibe (Abmessungen, Form, Temperatur, Gasdichte usw.) zu ermitteln, müssen sowohl die Eigenschaften des Zentralsterns (Masse, Radius, Oberflächentemperatur, Inklinationswinkel i und äquatoriale Geschwindigkeit) als auch einige Annahmen über den Gasring (Innenradius, Umlaufgeschwindigkeit) berücksichtigt werden.

Durch verschiedene Rechnungen ergibt sich eine Gasscheibe mit Ringradien von 1,5 bis 30 Sternradien und einer Dicke von 1:7 zu ihrer Ausdehnung. Somit ist sie relativ dünn, besitzt aber eine sehr große Ausdehnung.

4.3 Gestalt der $H\alpha$ Spekten

Die Emissionslinien der Be-Sterne haben individuelle Strukturen. Dennoch ist es möglich, die am häufigsten auftretenden Linienprofile in ein Schema einzuordnen. Die Form der Profile ist von drei Faktoren abhängig:

- Inklination
- Optische Tiefe
- Kinematik

¹Photosphäre: die sichtbare Oberfläche eines Sterns

²Der Winkel zwischen der Orientierung der Rotationsachse des Sterns und des Blickwinkels des Beobachters

4.3.1 Inklination und optische Tiefe

Spektrallinien von Be-Sternspektren können durch den Strahlentransport besondere Formen annehmen. Diese kommen durch drei verschiedenen Faktoren zustande wie folgend erläutert wird.

1. Durch die hohe Rotationsgeschwindigkeit verbreitert sich die Absorptionslinien aus der Photosphäre (Dopplereffekt).
2. Durch die hohe UV-Strahlung des Stern werden Atome im inneren Bereich des Gasrings zum strahlen angeregt. Durch die unterschiedliche Rotationsgeschwindigkeit des Sterns und der Gasscheibe entsteht eine leicht schmalere Emissionslinie (siehe Abb. 4.1a).
3. Aufgrund der im Außenbereich deutlich kühlere Gashülle des Sterns, wird ein Teil der vom Stern stammenden Energie absorbiert, wodurch eine schmale Absorptionslinie entsteht (siehe Abb. 4.1b). Diese Absorptionslinie bildet sich an der vom Beobachter betrachteten Stelle zwischen Scheibenrand und Stern (siehe Abb. 4.1c).

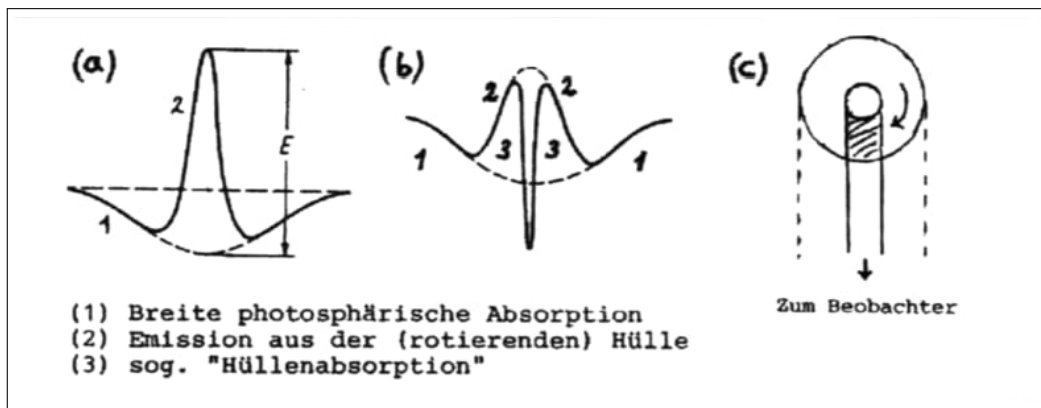


Abbildung 4.1: Die Komponenten der typischen Linienprofilen von Be-Sternen [13]

Zu bemerken ist, dass die Form des Hüllenspektrum in Abhängigkeit zu dem Weg des Lichts durch die Hülle steht, da sie Strahlung absorbiert. Es gilt: Je länger der Weg durch die Hülle ist, desto mehr Strahlung wird absorbiert, desto deutlicher werden die Absorptionslinien.

Dadurch ist der Blickwinkel i auf die Gasscheibe zu beachten. Wird der Stern mit einem Winkel von $i=90^\circ$ betrachtet, ist der Weg deutlich kürzer als bei einem Winkel von $i=0^\circ$. Dies hat zur Folge, dass bei dem betrachtungswinkel A eine Emissionlinie der Photosphäre entsteht. Hingegen der Betrachtungswinkel C eine Absorption des Photosphärischen Lichts durch die Gas-scheibe verursacht (siehe Abb.4.2).

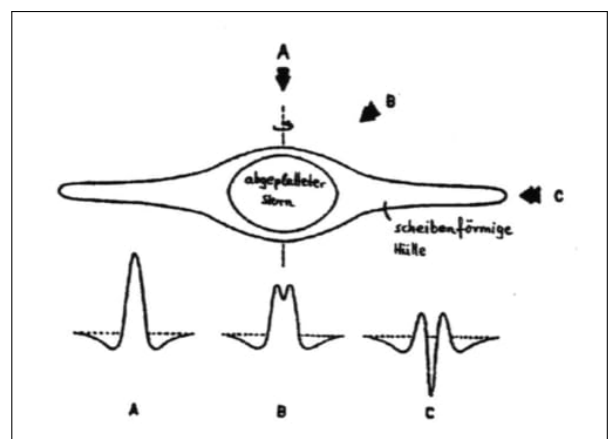


Abbildung 4.2: Emissionslinienprofile bei Inklination $i=0^\circ$ (A) $i=45^\circ$ (B) $i=90^\circ$ (C) [13]

4.3.2 Kinematik

Ein weiterer Faktor für die Entstehung der Linienprofil-Formen ist die Kinematik. Wird die Gasscheibe betrachtet ($i > 80$), erscheinen Emissionslinien Doppelgipfelig wie in Abb. 4.3 verdeutlicht. Dies begründet sich in der Scheibenrotation (Dopplereffekt). Bewegen sich emittierenden Atome der Scheibe auf den Betrachter zu, so wird die emittierte Wellenlänge in einen kleineren Bereich verschoben. Bewegen sich hingegen die Atome vom Betrachter weg, so wird die Wellenlänge in einen größeren Bereich versetzt.

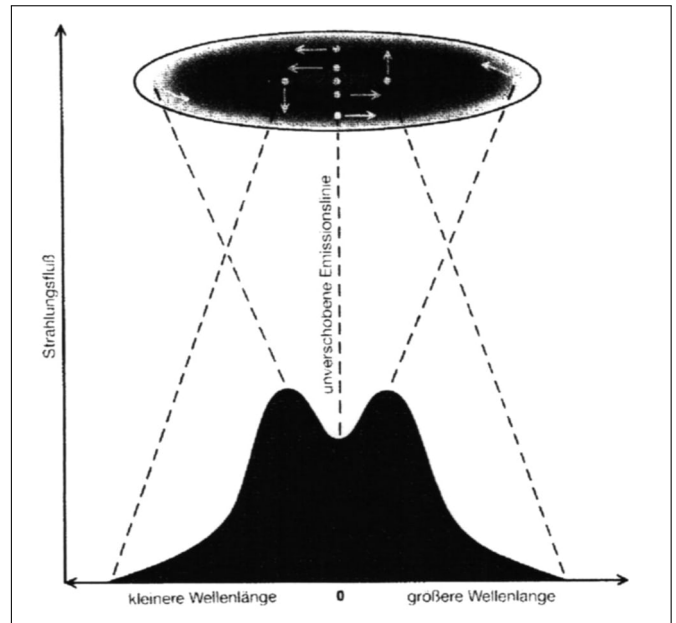


Abbildung 4.3: Kinematische Formung der Emissionslinien durch den Dopplereffekt [13]

4.4 Be-Stern Modell

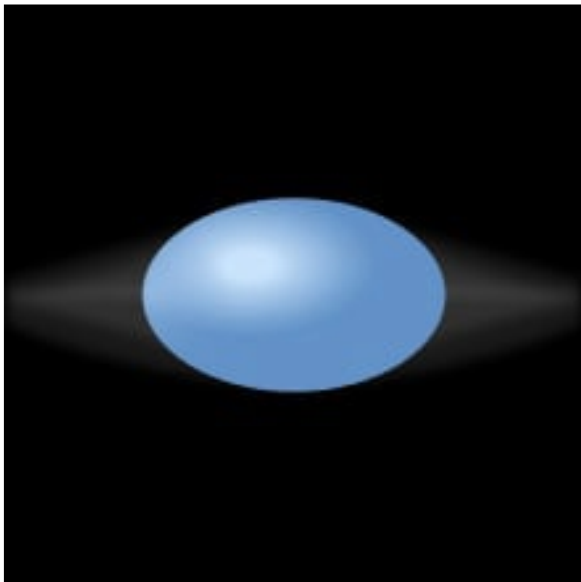


Abbildung 4.4: Be-Stern Modellvorstellung [14]

Zusammengefasst ergibt sich ein Bild von einem Stern mit einer Oberflächentemperatur von circa 20 000 bis 30 000 Kelvin, welcher aufgrund seiner hohen Rotationsgeschwindigkeit abgeplattet ist. Im HDR lassen sich die Be-Sterne in der Hauptreihe verorten. Umgeben ist der Stern von einer deutlich kühleren Gashülle. Aufgrund der Sternrotation hat diese eine geringe Ausdehnung an den Polen und eine große an der Äquatorialebene, sodass sich eine dünne Gasscheibe ausbildet. Der Radius der Gasscheibe, übersteigt den des eingebetteten Planeten um ein vielfaches.

Durch die Emission der Scheibe sind im Be-Stern Spektrum markant Balmerlinien vorzufinden. Dabei hängt die Form stark vom Strahlungstransport, der Inklination und der Kinematik des Gases ab. [13]

5 Astronomische Instrumente der Schülersternwarte

Alle Bilder und Spektren wurden mit dem Equipment der Schülersternwarte des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums aufgenommen.

5.1 SBIG STF-8300M

Zur Aufnahme der Spektren wurde die STF 8300M Videokamera des Herstellers SBIG eingesetzt. Es handelt sich um eine monochrome Full Frame Transfer CCD-Kamera, mit einer nahezu vollständig lichtaktiven Sensorfläche. Dies führt zu einer sehr hohen Helligkeitsempfindlichkeit, wodurch sie selbst lichtschwache Objekte abbildet. Ihre sehr kurze Downloadzeit eines Bildes von weniger als 1 Sekunde ermöglicht es ihr kleine Helligkeitsunterschiede zu erkennen und festzuhalten. Die dauerhafte Luft-Kühlung des Kamera-Chips ermöglicht eine Chiptemperatur von 40°C unterhalb der Umgebungstemperatur, sodass sie damit ein minimales Hintergrundrauschen erreicht. [15]

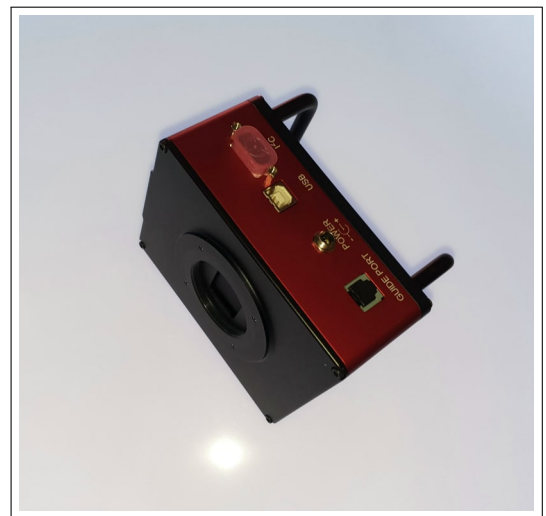


Abbildung 5.1: SBIG STF-8300M CCD-Kamera

Chip	Full Frame Transfer Kodak KAF 8300 Chip mit Anti Blooming Funktion und Mikrolinsentechnik
Anzahl der Pixel	3.326 x 2504 Pixel (8.3 M)
Full Frame Downloadzeit	weniger als 1 Sekunde
Pixelgröße	5.4 μ x 5.4 μ
Quanteneffektivität	bei 540 nm - 54%
Dunkelstrom	extrem gering, typisch 0.02e /pixel /sek bei - 10 Grad Celsius
AD Konverte	16 bit Auflösung
Kühlung	bis 40°C < Umgebungstemperatur
Binning Modes	1x1 bis 15x15

Tabelle 5.1: Technische Daten zur SBIG STF-8300M Kamera (kopiert aus [15])

5.2 Dados Spektrograph

Für die Erzeugung der Spektren wurde der Dados-Spektrograph des Herstellers Baader-Planetarium verwendet. Dieser wird für die Untersuchung von Spektren im sichtbaren Licht, von Teilen des Infrarot-, und des UV-Lichts genutzt. Sein kompakter und einfacher Aufbau eignet ihn gut für die Schul-Spektrografie.

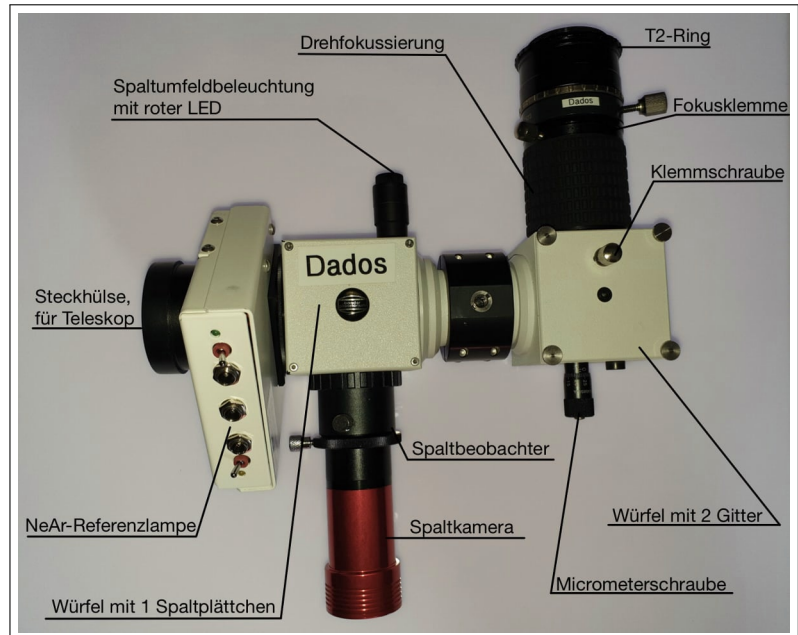


Abbildung 5.2: Dados Spektrograph mit Beschriftung

5.2.1 Strahlengang

Das einfallende Licht trifft (in der Abb. 5.3 rot eingezeichnet) auf das Spaltplättchen des ersten Würfels. Im Dados Spektrographen sind drei Spalte mit verschiedenen Breiten enthalten: 25 μm , 35 μm und 50 μm . Sie sind ausschlaggebend für die Auflösung des erzeugten Spektrums. Dabei gilt: Um so schmaler der Spalt, desto höher ist die Auflösung.

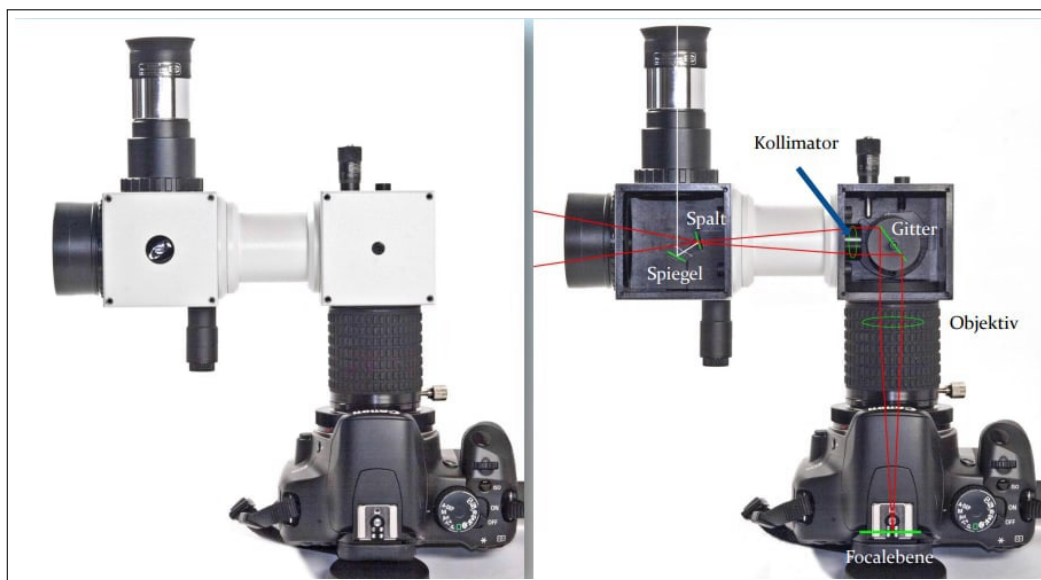


Abbildung 5.3: Strahlengang im Dados Spektrograph [16]

Für die Aufnahme wurde die slit-view Kamera „ASI 120MM Mini Planeten- und Guiding-Kamera von ZWO“ verwendet. Sie wird genutzt um das gewünschte Objekt auf den richtigen Spalt manövrieren zu können. Dabei wird die Spaltbeleuchtung benötigt, um die Spalte vor dem dunkeltem Hintergrund des Nachthimmels zu erkennen.

Das aus dem Spalt tretende Licht fällt durch eine Kollimatorlinse und trifft als paralleles Lichtbündel auf ein sogenanntes „Blazegitter“ im zweiten Würfel. Dort wird es gebrochen und reflektiert, sodass es durch das Objektiv gebündelt auf den Sensor trifft.

Blazegitter haben dieselbe Funktion wie herkömmliche optische Gitter (siehe Abb. 2.7). Ihre Besonderheit ist ihre Beugungseffizienz, die für eine bestimmte Beugungsordnung maximal ist. Das bedeutet, dass die Intensität einer bestimmten Ordnung der erzeugten Interferenzmaxima besonders hoch ist. Aufgrund der hohen Intensität, lässt sich dieses Maxima besonders gut untersuchen. Bei der Lichtbrechung gilt: Je höher die Frequenz, desto kleiner der Brechungswinkel. [17]

Der DADOS Spektrograph ist in der Lage drei verschiedene optische Gitter mit jeweils 200, 900 und 1200 Linien pro mm zu fassen. Mit zunehmender Linienanzahl/mm steigt die Auflösung des Spektrums. Dabei ist zu beachten, dass mit einer höheren Auflösung das abgebildete Wellenlängenintervall kleiner wird. Während das Gitter mit 200 Linien/mm den gesamten sichtbaren Bereich des Spektrums abbildet (380-780nm), so erreicht das Gitter mit 1800 Linien/mm lediglich den Spektralbereich des nahen UV-Bereichs bis ca. 500 nm. [16]

5.3 TEC APO 160FL Refraktor

Das Refraktor Teleskop TEC Apo 160FL ist eines der Haupt-Teleskope der Schülersternwarte des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums.



Abbildung 5.4: TEC APO 160FL Refraktor montiert mit CDK20 Teleskop

Bauart	Apochromatischer Refraktor
Öffnung	160mm
Brennweite	1120mm
Öffnungsverhältnis	f/7
Abbildungsmaßstab	3,1 Bogenminuten/mm
Theoretisches Auflösungsvermögen	0,75 Bogensekunden
Backfokus	180mm
Tubuslänge	1000 mm
Tubusdurchmesser	163 mm
Tubusgewicht	11 kg

Tabelle 5.2: Technische Daten zum TEC APO 160FL Refraktor (kopiert aus[18])

5.3.1 Funktionsweise

Zur Aufnahme der Spektren wurde der Refraktor APO 160FL des amerikanischen Herstellers Telescope Engineering Company genutzt. Refraktoren bzw. Linsenteleskope basieren auf der Bauweise der ersten Teleskope. Sie nutzen keine Spiegel, sondern Linsen, um das gewünschte Objekt zu vergrößern. Dabei wird das einfallende Licht durch die Objektivlinse eingefangen bzw. gebrochen und am Ende des Tubus durch ein Okular in das Auge des Betrachters geleitet. [19]

5.4 10Micron GM4000-Montierung

Die Schülersternwarte des Carl-Fuhlrott Gymnasiums verfügt über eine GM4000 HPS II Teleskop-Montierung des italienischen Herstellers COMEC Technology. Als klassische „parallaktische“ Montierung ist eine Achse parallel zur Erdachse ausgerichtet. Zudem sind „Absolut-Encode“ Winkelmessgeräte an beiden Achsen verbaut. Somit wird eine besonders präzise Ausrichtung auf Himmelskörper ermöglicht und die Teleskop Orientierung während eines Stromausfalls gewährleistet. [20]



Abbildung 5.5: Die 10Micron GM4000 Teleskop-Montierung der Station sieben

Montierung	Parallaktische Montierung deutscher Typ
Gewicht (kg)	ca. 125 kg (ohne Zubehör)
Instrumentenlast	max. Tragkraft 150 kg
Breitengradbereich	20° – 70°
Azimut Feineinstellungsbereich	-10°
Gegengewichtsstange	60 mm Durchmesser, Edelstahl, Gewicht 13 kg
Achsen Radius	85mm / Dek. 80mm Durchmesser, legierter Stahl
Lagerung	vorgespannte Kegelrollenlager
Schneckenräder Radius	430 Zähne, 330 mm Durchmesser, B14 Bronze Dek. 315 Zähne, 244 mm Durchmesser, B14 Bronze
Schnecke Durchmesser	32mm, vergüteter legierter Stahl, gerieben und geläppt
Motoren	2 Achsen AC Servo bürstenlos
Stromversorgung	24 V DC
Strombedarf	ca. 1,5 A Nachführung ca. 5 A max. Geschwindigkeit 6 A Peak
GoTo Geschwindigkeit	Einstellbar von 2°/s bis 8°/s.
Kraftübertragung	Backlash-freies System mit Zahnriemen und automatischer Backlash Korrektur
Pointierungsgenauigkeit	< 508mm
Mittlere Nachführgenauigkeit	ca 25mm typisch für 15 Minuten

Tabelle 5.3: Technische Daten zur 10Micron GM40000 Teleskop-Montierung (kopiert aus [20])

6 Experimenteller Aufbau

Die Spektren wurden am 9.12.2022 bei guten Wetterverhältnissen mit den beschriebenen astronomischen Instrumente aufgenommen.

Montiert ist der TEC APO 160FL Refraktor in Station sieben, der größten Station der Schülersternwarte. Das CDK20 Teleskop mit Refraktor ist dort das ganze Jahr in einem überdachten Raum montiert. Dies hat den Vorteil, dass es witterungsgeschützt ist und zur Beobachtung nur wenige Handgriffe nötig sind.

Vor dem Betrieb des Teleskops ist es erforderlich, die Überdachung manuell zu öffnen und den Spektrografen sowie die Kamera anzubringen. Vorab wird der DADOS mit einem Gitter von 200 Linien/mm bestückt und der gewünschte Spektralbereich mithilfe einer Neon-Argon-Lampe ausgewählt. Anschließend werden die Kameras mit dem für die Steuerung zuständigen Computer verbunden. Währenddessen können sich die Instrumente an die Umgebungstemperatur anpassen.



Abbildung 6.1: DADOS Spektrograph mit montierter guiding- und CCD-Kamera

7 Durchführung der Aufnahmen

Zur Durchführung der Aufnahmen wird das Teleskop mit der digitalen Sternkarte „Stellarium“ synchronisiert und die Position von γ Cas angesteuert. Dabei wird über das Programm „10Micron Keypad“, welches mit der Montierung verbunden ist manuell nachjustiert

Damit die Ergebnisse der Aufnahmen wissenschaftlich verwertbar sind, ist die Uhrzeit des Computers mit der Weltzeit synchronisiert. Über das Fenster „Camera Control“ wird die Kamera mit dem Programm „MaxIm DL“ verbunden. Die MaxIm DL Software ermöglicht die Aufnahme und Speicherung von Spektren. Dort werden verschiedene Aufnahmeeinstellungen wie die Belichtungszeit nach Bedarf angepasst. Vor Beginn der Aufnahme, muss die Chiptemperatur der Kamera auf $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ heruntergekühlt werden, die Einstellungen „Exposure Preset“ auf „find star“ und X- bzw. Y- „Binnig“ auf „1“ eingestellt werden.

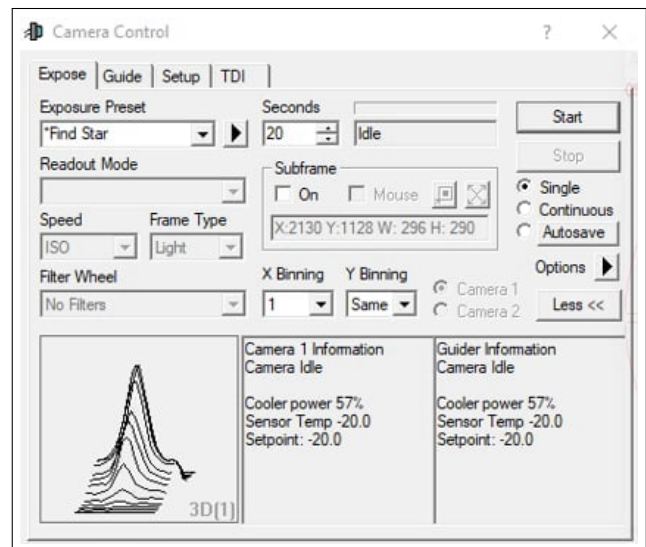


Abbildung 7.1: Camera Control Fenster in MaxIm DL

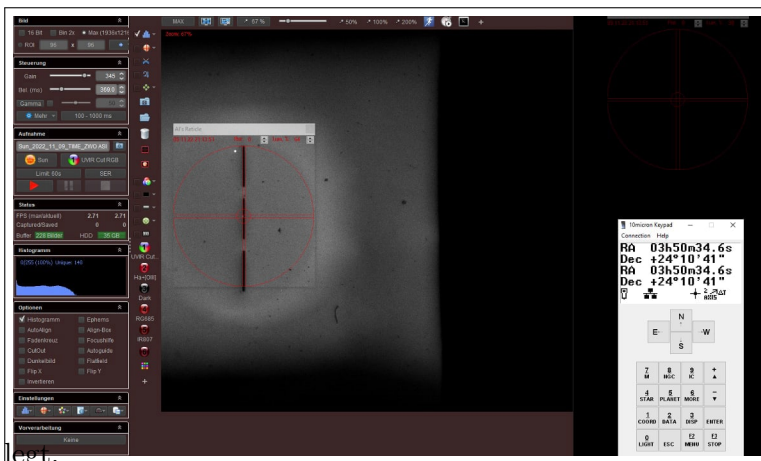


Abbildung 7.2: Aufnahme Fenster der Slit-View Kamera in FireCapture

Mit der Slit-view Kamera und dem Programm „FireCapture“ wird ein Livebild der drei Spalte und des Nachthimmels aufgenommen. Dabei wird dem 10Micron Keypad das Teleskop justiert, dass γ Cas im mittleren Spalt fast vollständig verschwindet. Aufgrund der Erdrotation muss durch leichtes manövrieren mit dem Keypad γ Cas im mittleren Spalt gehalten werden. Als Hilfe wird ein Fadenkreuz auf die gewünschte Position im Spalt gelegt.

Um ein Spektrum von höchster Qualität zu erhalten, wird vorab ein Referenzspektrum aufgenommen und die Fokussierung des DADOS Spektrographen eingestellt. Hierfür wird die NeAr-Referenzlampe des DADOS Spektrographen aktiviert und das Spektrum für 60 Sekunden belichtet. Anschließend wird an eine der Spektrallinien herangezoomt und die Drehfokussierung des DADOS Spektrographen justiert. Dabei wird eine möglichst hohe optische Schärfe angestrebt.

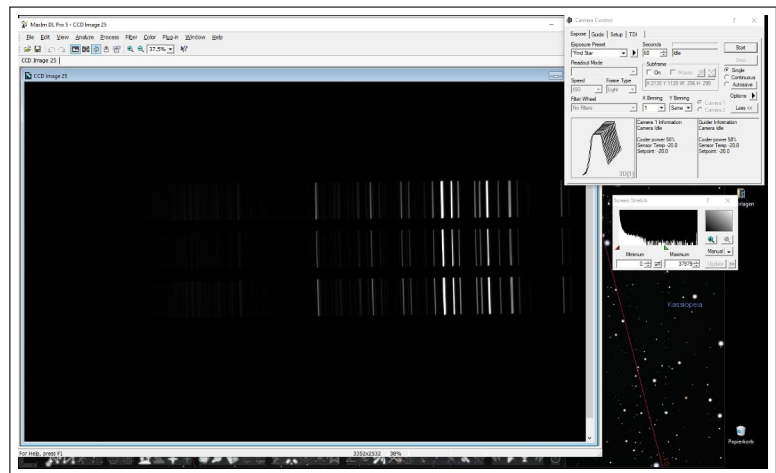


Abbildung 7.3: NeAr-Referenzspektrum

Für die Aufnahmen von γ Cas wurde eine Aufnahmenreihe mit einer jeweiligen 20-sek. Belichtungszeit eingestellt. Gleichzeitig wurden so genannte „Dark Frames“ aufgenommen. Sie werden zur Minimierung des Rauschens durch den Kamerasensor genutzt, indem ein vollständig dunkles Bild mit denselben Kameraeinstellungen aufgenommen wird und von dem Bild mit dem Objekt subtrahiert wird. Das Ergebnis sind 10 Spektren von γ Cas, mit einer Gesamtbelichtungszeit von 200 Sekunden. Zum Schluss werden ein zweites mal Referenzspektren der NeAr-Lampe aufgenommen.



Abbildung 7.4: Raw Spektrum von γ Cas

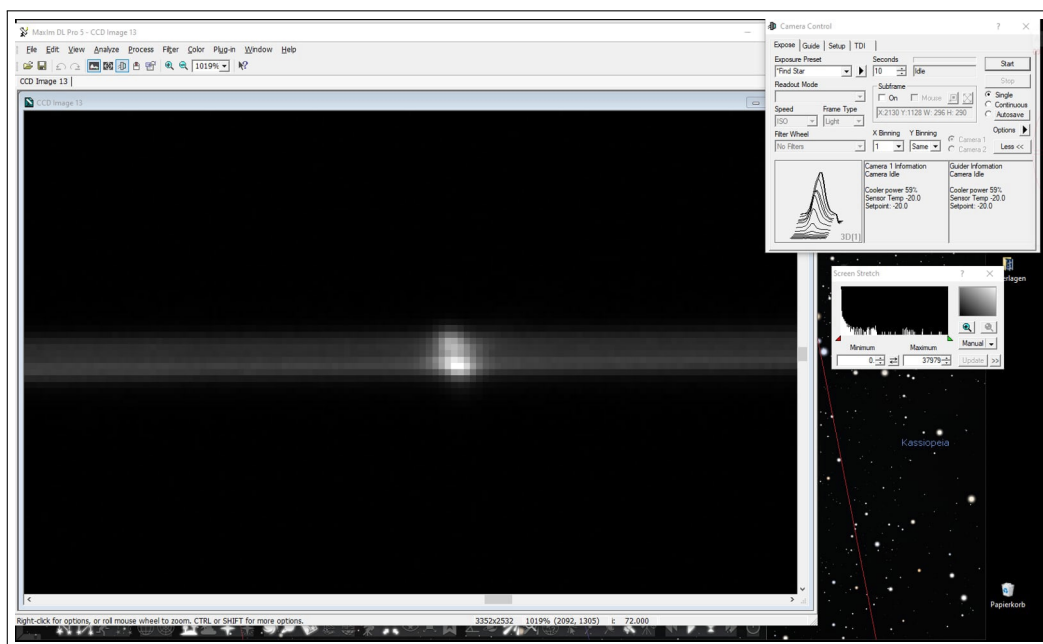


Abbildung 7.5: Stark vergrößerte H α -Emissionslinie im Raw Spektrum von γ Cas

8 Kalibrierung der Spektren

8.1 Stacking

Vor der Kalibrierung der Spektren mit der Software „BASS Project“ müssen die einzelnen Raw Spektren „gestackt“ werden. Beim sogenannten Stacken werden die aufgenommenen Spektren zu einem einzigen, rauschärmeren Bild zusammengefasst, dem Summenspektrum. Im voraus werden alle über- und unterbelichteten Einzelspektren aussortiert, um die Qualität des Summenspektrums zu garantieren.

Denselben Prozess durchlaufen die Referenzspektren. Da sich die Spektrallinien während der Aufnahme durch die Temperaturveränderung verschieben können, wird durch das Stacking der Mittelwert der Veränderung berechnet und fortlaufend verwendet.

8.2 Wellenlängenkalibrierung

Zur Wellenlängenkalibrierung wird das Summenspektren von γ Cas und das NeAr-Referenzspektrums in der Software BASS Project geöffnet. Da das Programm die Intensität des Spektrums entlang der X-Achse abliest, müssen alle Spektrallinien aufgerichtet sein. Dazu wird entlang einer markanten Absorptionslinie eine Markierung gezogen, sodass die Software den Neigungswinkel des Spektrums berechnet und es automatisch dreht. Eine zweite Markierung wird entlang des Spektren-Verlaufs gezogen und nach demselben Verfahren gedreht. Das Ergebnis ist ein horizontales ausgerichtetes Spektrum mit waagerechten Spektrallinien. Anschließend wird das Spektrum vom Himmelshintergrund subtrahiert, indem es mit dem Tool „Region select“ ausgeschnitten wird.

Da die X-Achse die Pixelposition der Spektrallinien wiedergibt, muss jedem Pixel eine Wellenlänge zugeordnet werden. Dazu wird ein Spektrum mit bereits bekannten Wellenlängen benötigt. In diesem Fall werden die Spektrallinien des Referenz- und γ Cas-Spektrums miteinander abgeglichen, da zuvor Wasserdampf in die Referenzlampe eingedrungen ist und das NeAr-Spektrum wellenlängenbekannte Balmerlinien aufweist. Durch die markierung der überlagernden Spektrallinien wird berechnet wie viele Pixel ein Ångström (Å^1) beträgt.

¹1Å= 0,1nm = $10^{-10}m$

8.3 Normierung

Nach der Kalibrierung der X-Achse wird das Spektrum „normiert“. Dabei wird das Pseudokontinuum des aufgenommenen Sterns entfernt. Es bezeichnet den verfälschten Intensitätsverlauf, der nicht mit der tatsächlichen Intensitätsverteilung der Sternstrahlung übereinstimmt. Das Pseudokontinuum entsteht aufgrund verschiedener Faktoren, wie z.B. durch Staubpartikel in der Erdatmosphäre oder durch die verwendeten Instrumenten.

Um das Pseudokontinuum zu entfernen, wird das wellenlängenkalibrierte Spektrum in die Software BASS Project geladen. Dort wird das Tool „Kontinuum & Response Shaper“ verwendet, um das Pseudokontinuum abzuschätzen und zu markieren. Anschließend wird das Spektrum durch den markierten Verlauf dividiert. Das Ergebnis ist ein gerader, horizontaler Verlauf bei einer Strahlungsintensität von 1 (siehe Abb. 8.2).

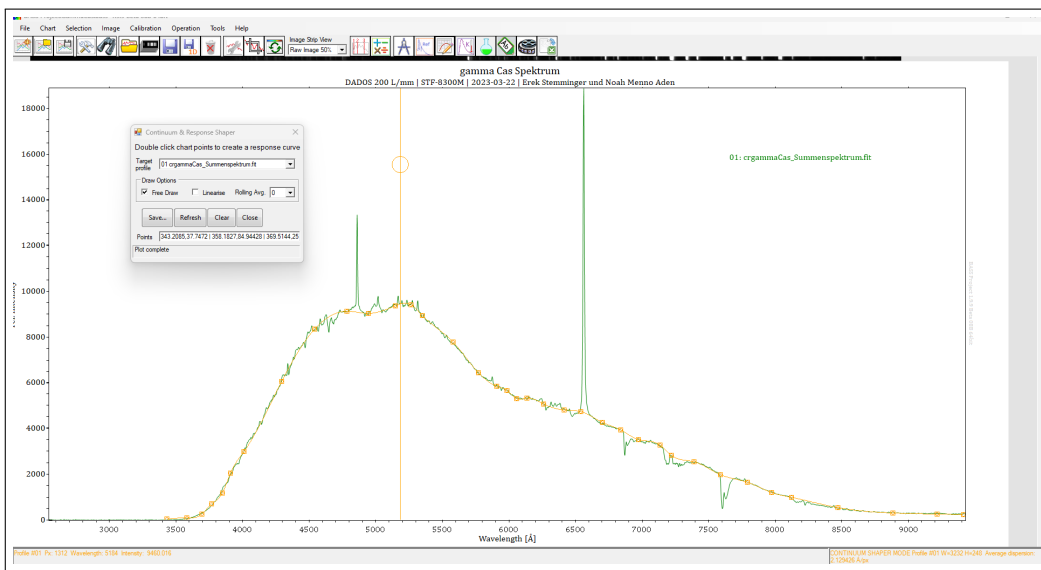


Abbildung 8.1: Abschätzung des Pseudokontinuums

Zu beachten ist, dass die Nachverfolgung des Pseudokontinuums manuell geschieht, weshalb in der Normierung ein hoher subjektiver Teil vorhanden ist. Auf diese Weise können zwei verschieden normierte Spektren von der ursprünglich selben Aufnahme trotzdem voneinander abweichen.

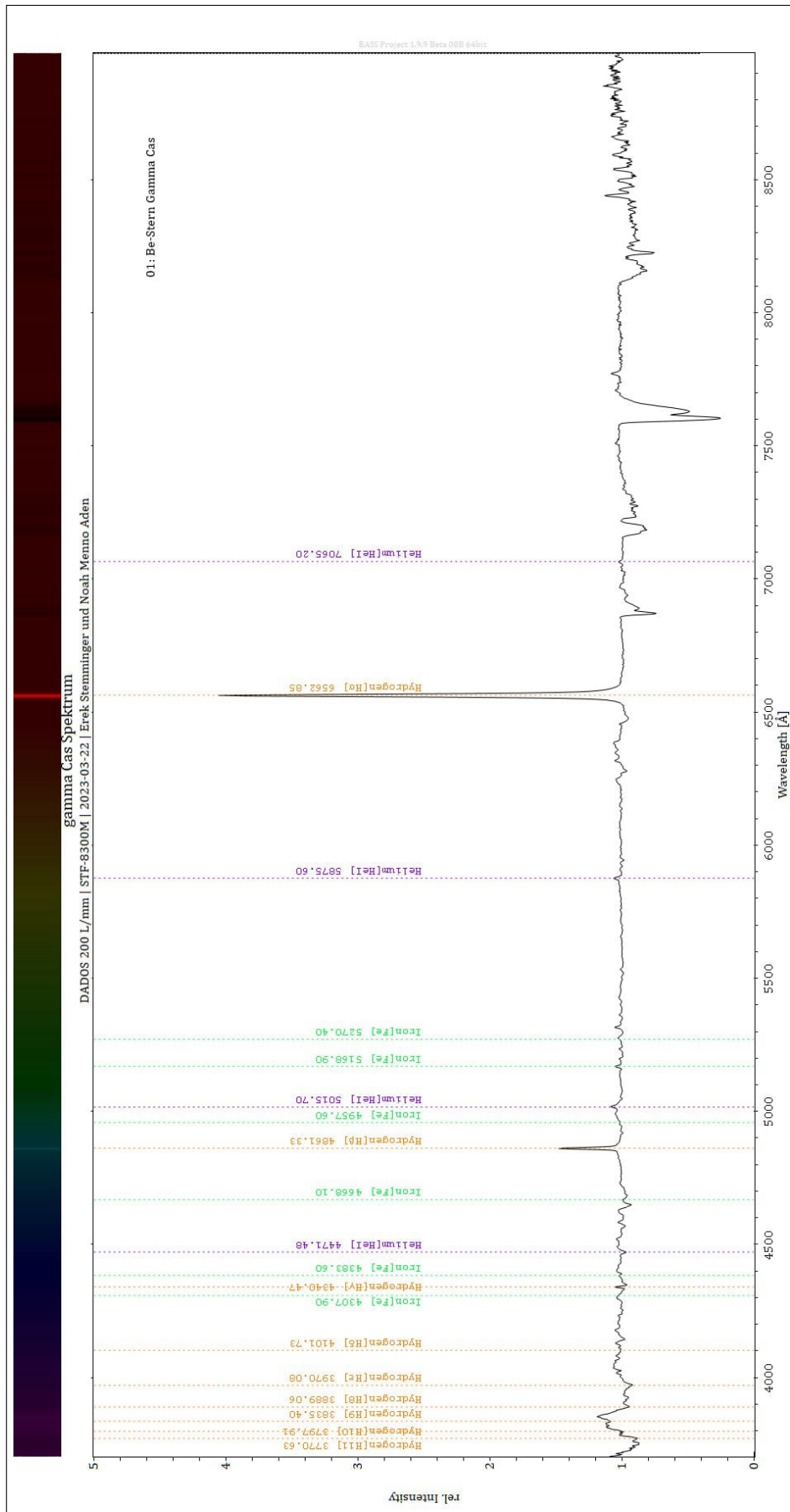


Abbildung 8.2: Vollständig normiertes Spektrum von γ Cas

8.4 Flusskalibrierung

Ausgangspunkt für die Flusskalibrierung ist das wellenlängenkalibrierte Spektrum. Hierbei wird das Pseudokontinuum zu einer sogenannten „Plankschen Strahlungskurve“ korrigiert. Das Ergebnis ist ein intensitätskalibriertes Spektrum, bei dem die relative Strahlungsintensität in Abhängigkeit der Wellenlänge korrekt wiedergegeben wird.

Für die Intensitätskalibrierung wird ein flusskalibriertes Referenzspektrum eines Sterns mit dem selben Spektraltyp (Be 0,5) benötigt, welches der „Pickelsdatenbank“ zu entnehmen ist.

Zunächst wird das Spektrum von γ Cas in die Software BASS Project geladen und durch das neue Referenzspektrum dividiert. Das Ergebnis ist die Verfälschungskurve des Kontinuumverlaufs von γ Cas. Anschließend wird sie mit dem Tool „Kontinuum & Response shaper“ abgeschätzt und auf den Kontinuumsverlauf von γ Cas angewandt. Schließlich wird die Intensität bei der Wellenlänge 5550 Å auf 1 normiert, damit das Ergebnis international vergleichbar ist.

Zum Vergleich der Strahlungsverteilung von γ Cas wurde eine Planckkurve eines Körpers mit einer Oberflächentemperatur von 25000K bei einem Intensitätsmaximum von 110 Å eingefügt (siehe Abb. 8.3).

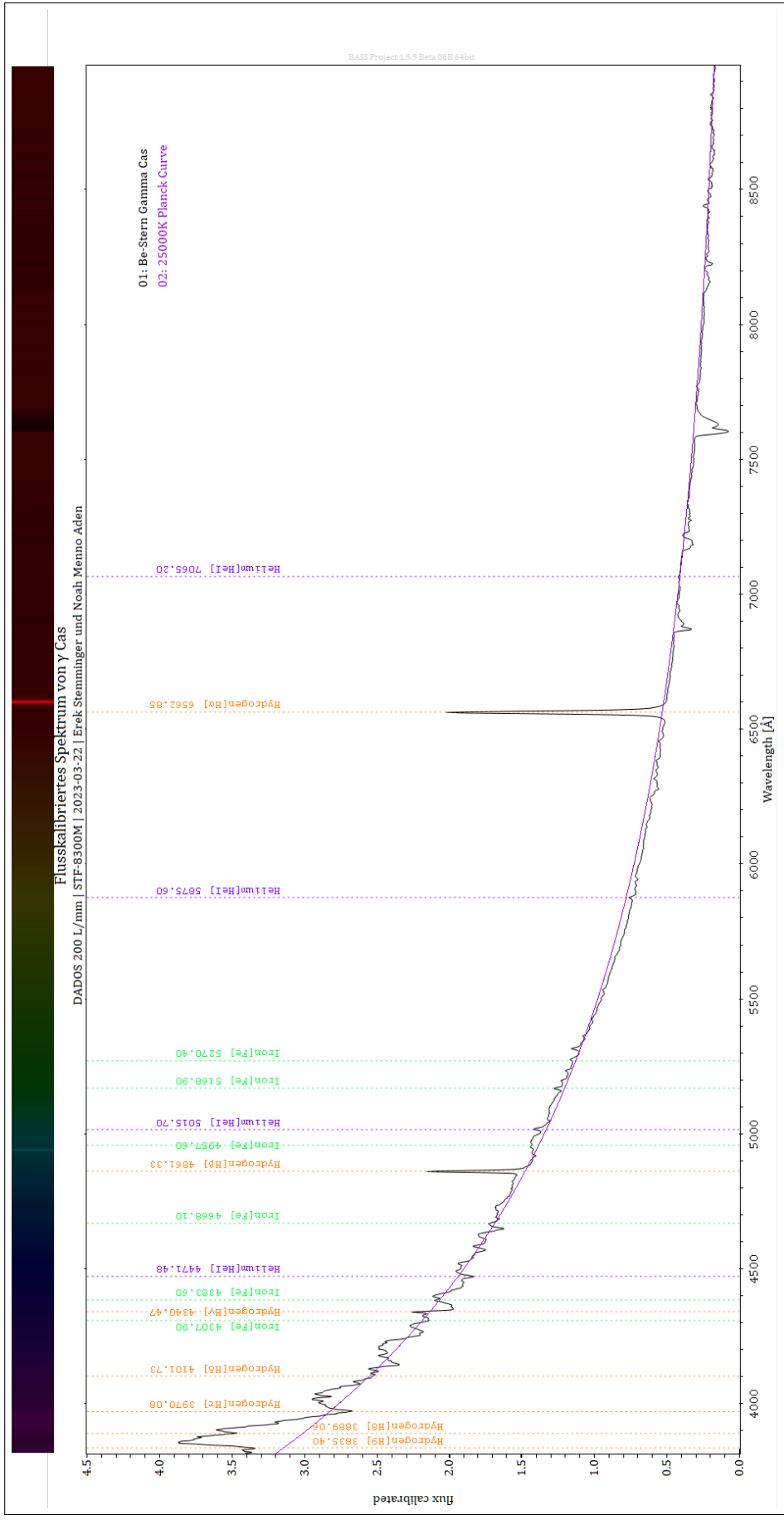


Abbildung 8.3: Vollständig flusskalibriertes Spektrum von γ Cas

Auffällig sind die für Be-Sterne charakteristischen Emissionslinien der Balmer-Serie. Dabei sind $H\alpha$ bis H_{11} zu erkennen, die auf einen hohen Wasserstoffanteil der emittierenden Materialscheibe zurückzuführen sind. Aufgrund der starken Ausdehnung der Gasscheibe, besitzt sie in den äußeren Ringen nur eine begrenzte Energie, die lediglich für die Erzeugung von $H\alpha$ -Emissionslinien ausreicht. In der inneren Region der Scheibe hingegen ist die Energie höher, sodass $H\beta$ - und $H\gamma$ -Emissionslinien erzeugt werden.

Die restlichen Balmer-Linien des Spektrums ($H\delta$ bis H_{11}) treten als Absorptionslinien auf. Das bedeutet, dass die Gasscheibe nicht genug Energie aufbringt, um die Elektronen des Wasserstoffatoms auf die fünfte Bahn zu heben (siehe Abb. 9.2).

Ein ähnliches Phänomen lässt sich bei den Spektrallinien des Heliumatoms beobachten. Bis zu einer Wellenlänge von 5015.70 \AA treten diese als Emissionslinien auf. Im weiteren Verlauf des Spektrums sind die He-Linien im kurzwelligen Bereich als Absorptionslinien zu finden.

Beeindruckend dabei ist, dass γ Cas genügend Energie aufbringt, um sogenannte "mehr Elektronensysteme" wie wie Helium zum emittieren anzuregen. Diese benötigen sehr hohe Temperaturen, um angeregt zu werden, weshalb sie aus der heißen Photosphäre stammen.

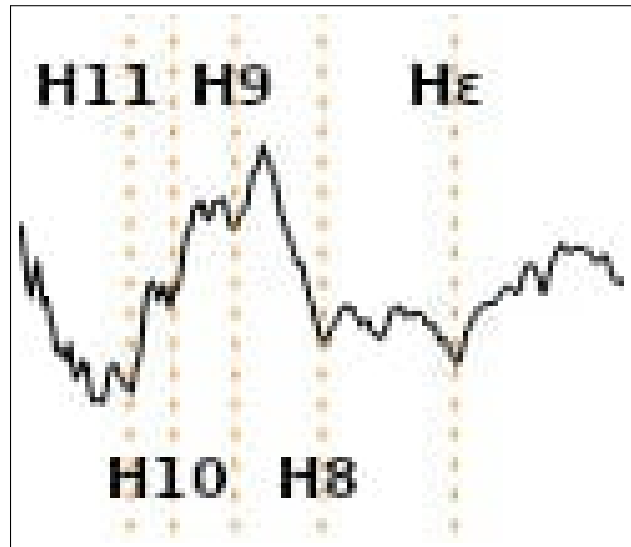


Abbildung 9.2: Absorption von Wasserstoff

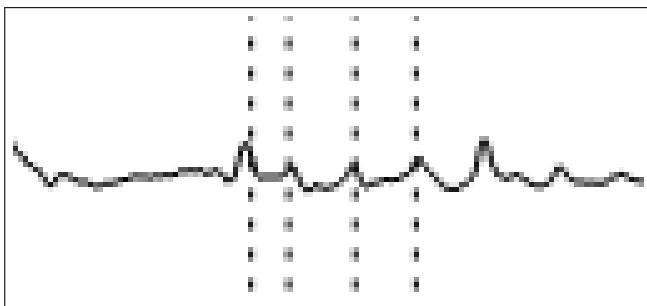


Abbildung 9.3: Emission von Eisen

Im Unterschied zu den Spektrallinien von Wasserstoff und Helium treten die Eisen-Spektrallinien ausschließlich in Form von Emissionslinien auf. Eisen benötigt ebenfalls große Mengen an Energie, um emittieren zu können, weshalb die Absorption aus heißen Photosphäre stammt (siehe Abb. 9.3).

Auffällig sind die Absorptionslinien im Wellenlängenintervall von etwa 6800 bis 7800 \AA . Diese werden durch Gase in der Atmosphäre wie Wasserdampf (H_2O) und Sauerstoff (O_2) verursacht, weshalb sie als atmosphärische Absorption bezeichnet werden. Die Absorptionslinien treten dabei immer in charakteristischer Form und Reihenfolge auf, erst O_2 , dann H_2O und erneut O_2 . Dabei erreicht O_2 seine Absorptionsmaxima bei 6871 \AA und 7605 \AA , während H_2O sein Maximum bei 7186 \AA aufweist (siehe Abb. 9.4).

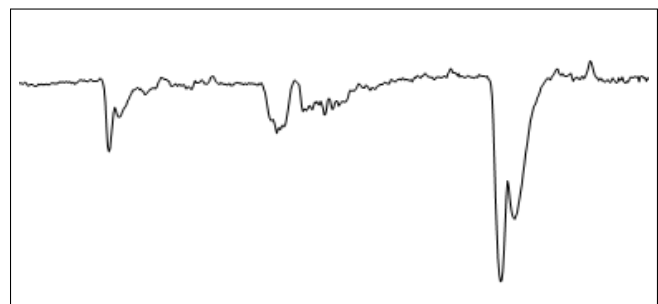


Abbildung 9.4: Atmosphärische Absorption

9.2 Feststellung des Spektraltyps

Im Folgenden wird angenommen, dass der Spektraltyp von γ Cas unbekannt ist. Eine Möglichkeit der Ermittlung eines Spektraltyps, bietet das von Richard Walker erstellte Flussdiagramm. Die Richtung der Lesbarkeit des Diagramms ist durch Pfeile gekennzeichnet.

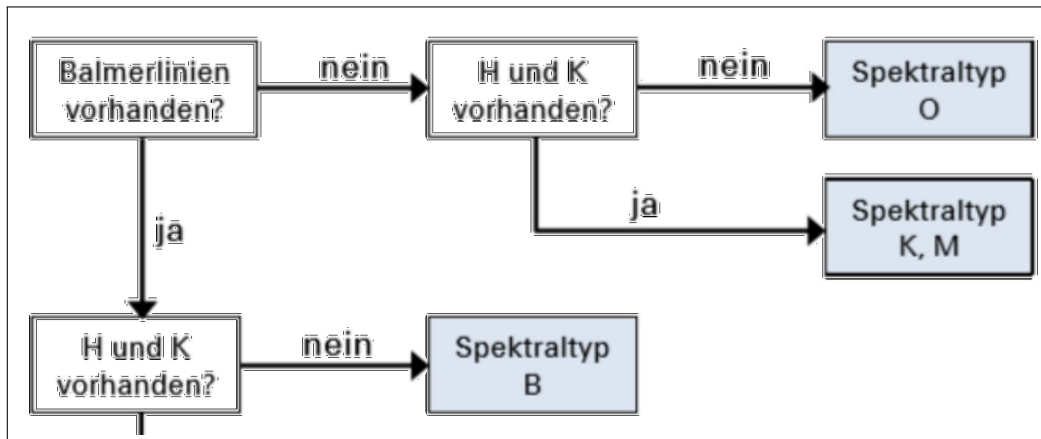


Abbildung 9.5: Bestimmung des Spektraltyps [22]

Um den Spektraltyp von γ Cas zu bestimmen, werden zunächst die Balmerlinien untersucht. Dabei ist wichtig, dass die ersten Balmerlinien ($H\alpha$, $H\beta$ usw.) als Absorptionslinien vorliegen. γ Cas zeigt starke Balmerlinien in Emissionsform auf. Somit sind die Spektralklassen O bzw. K,M möglich. Im weiteren Verlauf wird nach der H/K-Doppellinie der Fraunhoferlinien gesucht, die ebenfalls bei γ Cas nicht vorhanden ist. Daher wird schlußgefolgert, dass es sich um einen Stern vom Spektraltyp O handelt.

Interessanterweise wird γ Cas in vielen Quellen als Be-Stern klassifiziert, obwohl er unseren Untersuchungen nach der Spektralklasse O angehört. Dies liegt an dem genutzten Schema, welches zur Bestimmung einfacher Spektralklassen dient.

Be-Sterne überlagern mit ihrer starken Emission die Absorptionslinien der Balmer-Serie, sodass γ Cas sich doch in der Spektralklasse B verorten lässt. Zusätzlich erfüllt er durch seine starke Emission die Voraussetzungen für einen Be-Stern.

9.3 Strahlungsmaximum

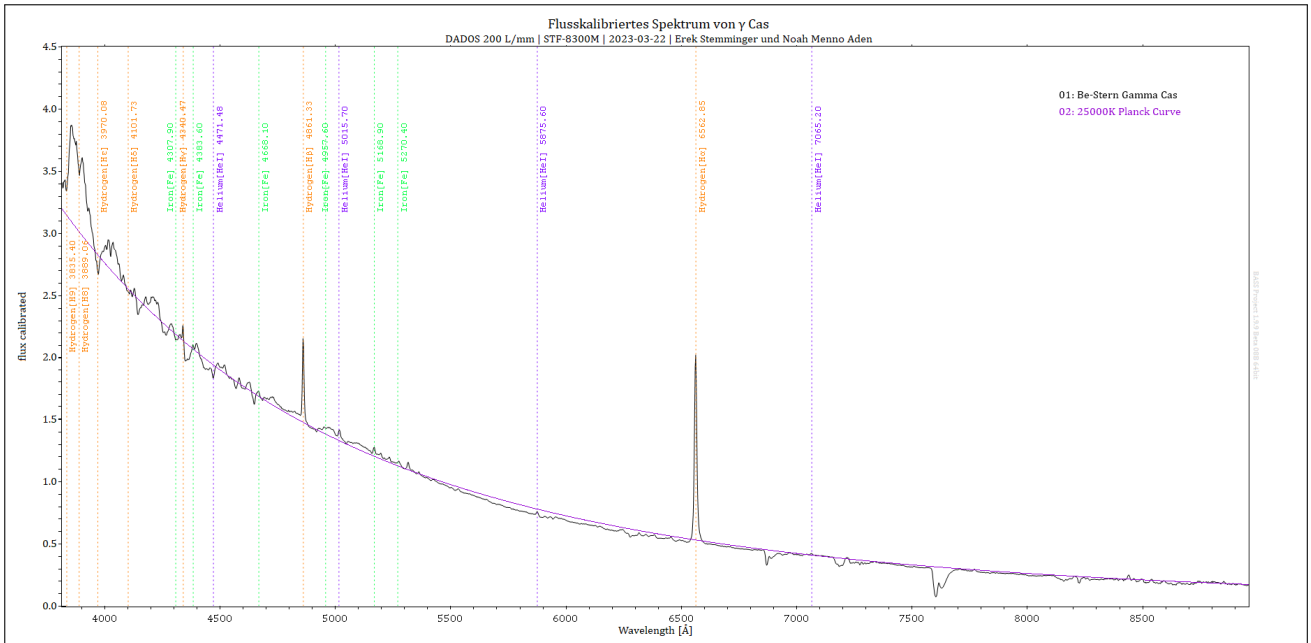


Abbildung 9.6: Flusskalibriertes Spektrum von γ Cas mit eingefügter Planckkurve

Zu erkennen ist, dass das Strahlungsmaximum von γ Cas im UV-Bereich liegt. Die Schülersternwarte des CFG verfügt nicht über die erforderliche Ausstattung, um das Strahlungsmaximum in diesem spektralen Bereich zu untersuchen. Daher wird im Folgenden eine Planck Kurve eines schwarzen Strahlers mit der von γ Cas verglichen. Angenommen wird von einem Strahler mit einer Oberflächentemperatur von 25000 Kelvin und einem Intensitätsmaximum bei einer Wellenlänge von 110 \AA . Da der Strahlungsverlauf mit dem von γ Cas übereinstimmt, wird daraus geschlossen, dass γ Cas diesen Werten entspricht. [23]

9.4 Fehlerdiskussion

Ungenauigkeiten im Spektrum, die sich in Form von geringen Abweichungen von der Planck-Kurve zeigen, können auf unterschiedliche Faktoren zurückzuführen sein. Dazu gehören zum Beispiel Witterungsverhältnisse, atmosphärische Bedingungen und Fehler bei der Kalibrierung.

Auffälligkeiten zeigt der Wellenlängenbereich von ca. 4100 bis 4300 \AA und 8250 bis 9000 \AA . Hier besteht die Möglichkeit, dass das Spektrum durch eine ungenaue Abschätzung des Kontinuumverlaufs verfälscht wurde. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Spektrallinien in den genannten Intervallen real sind.

10 Modell von γ Cas

Der Stern γ Cas bildet gemeinsam mit seinem Sternbild Kassiopeia ein auffälliges W am Himmel der Nordhalbkugel. Er gehört zur Leuchtkraftklasse IV und hat einen Spektraltyp der Klasse B, was bedeutet, dass er sich auf der Hauptreihe im Hertzsprung-Russell-Diagramm befindet. Mit einer Masse von $16 M_{\odot}$ und einer Oberflächentemperatur von 25.000 K handelt es sich um einen relativ heißen Hauptreihenstern des Spektraltyps B0,5e.

γ Cas benötigt ungefähr 1,21 Tage für eine vollständige Umdrehung um seine eigene Achse, was darauf hinweist, dass er knapp unterhalb seiner kritischen Geschwindigkeit rotiert und daher eine abgeplattete Form aufweist. Aufgrund seiner hohen Rotationsgeschwindigkeit hat der Stern γ Cas eine Materialscheibe auf seiner Äquatorialebene gebildet. Dabei übersteigt der Radius der Scheibe den des Sterns um ein vielfaches. [23]

Die Spektralanalyse hat gezeigt, dass γ Cas hauptsächlich aus den Elementen Wasserstoff, Helium und Eisen besteht. In seiner Gasscheibe emittiert er Wasserstoff, was sich in deutlichen Emissionslinien des Balmer-Spektrums widerspiegelt. In seiner Photosphäre emittiert γ Cas Eisen das Molekül Helium.

Es besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass es sich bei γ Cas um ein Doppelsternsystem handelt. Durch eine Langzeitbeobachtung wurde festgestellt, dass sich die Geschwindigkeit des Sterns periodisch verändert. Dies deutet darauf hin, dass eine andere Sternkomponente vorhanden ist, welche für die periodische Wechselwirkung verantwortlich ist. Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtungen ist die Anziehungskraft eines zweiten Sterns, beispielsweise ein Neutronenstern, der in einer kreisförmigen Umlaufbahn um γ Cas kreist. Dies kann ebenfalls eine Erklärung für die Bildung der Gasscheibe um den Stern herum sein, da die Entstehung nicht gänzlich verstanden ist. [25]

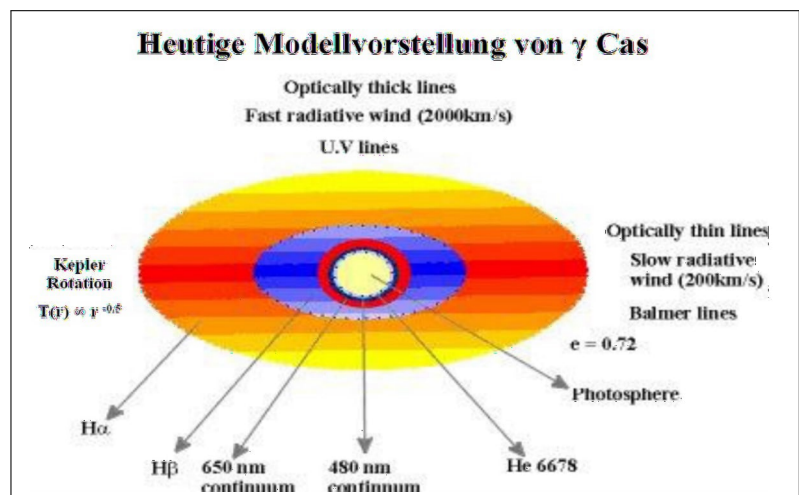


Abbildung 10.1: Modellvorstellung von Stern und Materialscheibe [24]

Abbildungsverzeichnis

2.1	Doppelspaltexperiment mit Interferenzmuster [1]	5
2.2	Modell einer Welle (eigene Grafik nach [3])	6
2.3	Hallwachs Experiment (eigene Grafik nach [3])	7
2.4	Bohrsches Atommodell (eigene Grafik nach [4])	8
2.5	Balmer-Serie (eigene Grafik nach [5])	9
2.6	Das EM-Spektrum [3]	9
2.7	Lichtbeugung am optischen Gitter (eigene Grafik nach [7])	10
2.8	Wasserstoffspektrum, aufgenommen und bearbeitet mit Spectral-Explorer Spektrograph/Software von Lukas Hoyer	10
2.9	Tageslichtspektrum (Aufgenommen mit Dados Spektrograph, bearbeitet mit BASS Project)	11
2.10	Kontinuierliches Spektrum [3]	11
2.11	Strahlungsleistung in Abhängigkeit der Wellenlänge eines schwarzen Strahlers [3]	12
3.1	Die Spektraltypen der sieben Grundklassen [9]	13
3.2	Hertzsprung-Russel Diagramm mit γ Cas verortet, eigene Bearbeitung [12]	15
4.1	Die Komponenten der typischen Linienprofilen von Be-Sternen [13]	18
4.2	Emissionslinienprofile bei Inklination $i=0^\circ$ (A) $i=45^\circ$ (B) $i=90^\circ$ (C) [13]	18
4.3	Kinematische Formung der Emissionslinien durch den Dopplereffekt [13]	19
4.4	Be-Stern Modellvorstellung [14]	19
5.1	SBIG STF-8300M CCD-Kamera	20
5.2	Dados Spektrograph mit Beschriftung	21
5.3	Strahlengang im Dados Spektrograph [16]	21
5.4	TEC APO 160FL Refraktor montiert mit CDK20 Teleskop	22
5.5	Die 10Micron GM40000 Teleskop-Montierung der Station sieben	23
6.1	Dados Spektrograph mit montierter guiding- und CCD-Kamera	25
7.1	Camera Control Fenster in MaxIm DL	26
7.2	Aufnahme Fenster der Slit-View Kamera in FireCapture	26
7.3	NeAr-Referenzspektrum	27
7.4	Raw Spektrum von γ Cas	27
7.5	Stark vergrößerte $H\alpha$ -Emissionslinie im Raw Spektrum von γ Cas	27
8.1	Abschätzung des Pseudokontinuums	29
8.2	Vollständig normiertes Spektrum von γ Cas	30
8.3	Vollständig flusskalibriertes Spektrum von γ Cas	32
9.1	normiertes Spektrum von γ Cas	33
9.2	Absorption von Wasserstoff	34
9.3	Emission von Eisen	34
9.4	Atmosphärische Absorption	34

9.5	Bestimmung des Spektraltyps [22]	35
9.6	Flusskalibriertes Spektrum von γ Cas mit eingefügter Planckkurve	36
10.1	Modellvorstellung von Stern und Materialscheibe [24]	37

Titelbild: eigene Aufnahme mit Canon EOS RPa und angebrachtem Difusor

Alle Abbildungen ohne Referenzquelle sind eigene Aufnahmen bzw. eigene Grafiken.

Quellen

- ¹ *Wikipedia-Doppelspalt-Experiment*, <https://de.wikipedia.org/wiki/Doppelspaltexperiment>, 11.01.23.
- ² *Studysmarter-Eigenschaften-von-Wellen*, <https://www.studysmarter.de/schule/physik/mechanik/eigenschaften-von-wellen/>, 18.01.23.
- ³ M. Winkhaus, „Vortrag-zur-Theorie-und-Praxis-von-Laborspektroskopie“, Vortrag (Astronomie Labor, Carl-Fuhlrott Gymnasium).
- ⁴ *Wikipedia-Bohrsches-Atommodell*, https://de.wikipedia.org/wiki/Bohrsches_Atommodell, 11.01.23.
- ⁵ *Wikipedia-Balmer-Serie*, <https://de.wikipedia.org/wiki/Balmer-Serie>, 05.05.23.
- ⁶ E. Wischnewski, *Astronomie In Theorie Und Praxis*, Bd. 6 (Selbstverlag, 2013).
- ⁷ *Abi-Physik-Optisches-Gitter*, <http://www.abi-physik.de/buch/wellen/optisches-gitter/>, 16.01.23.
- ⁸ *Leifiphysik-Plancksches-Strahlungsgesetz*, <https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-photon/ausblick/schwarzer-strahler>, 28.04.23.
- ⁹ *Leifiphysik-Spektralklassen*, <https://www.leifiphysik.de/astronomie/fixsterne/grundwissen/spektralklassen>, 29.04.23.
- ¹⁰ *Uni-Göttingen-Leuchtkraftklassen-Uni-Goettingen*, <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7004>, 29.04.23.
- ¹¹ *Leifi-Physik-Hertzsprung-Russell-Diagramm*, <https://www.leifiphysik.de/astronomie/fixsterne/grundwissen/hertzsprung-russell-diagramm>, 23.01.23.
- ¹² *Eso-Hertzsprung-Russell-Diagramm*, <https://www.eso.org/public/images/eso0728c/>, 29.04.23.
- ¹³ M. Winkhaus, „Diplomarbeit-Michael-Winkhaus“, Diplomarbeit (Astronomisches Institut der Ruhr-Universität Bochum).
- ¹⁴ *Wikipedia-Modellvorstellung-Be-Stern*, <https://de.wikipedia.org/wiki/Be-Stern>, 05.05.23.
- ¹⁵ *SBIG-STF-8300M-Kamera*, <http://www.sbig.de/stf-8300/stf-8300.htm>, 13.04.23.
- ¹⁶ *Baader-Planetarium-Dados-Spektrograf*, https://www.baader-planetarium.com/de/downloads/dl/file/id/188/product/0/dados_spalt_spektrograf_tutorial_110_seiten.pdf, 13.04.23.
- ¹⁷ *cosmos-indirekt-Blazegitter*, <https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Blazegitter>, 06.05.23.
- ¹⁸ *Baader-Planetarium-TEC-APO-160FL-Refraktor*, <https://www.baader-planetarium.com/de/teleskope/tec/tec-apo-160-fluorit-apochromat.html>, 13.04.23.
- ¹⁹ *Astronomieschule-Funktionsweise-Refraktor*, <https://www.astronomieschule.de/teleskopberatung/teleskop-grundlagen-2/das-linsenteleskop/>, 03.05.23.
- ²⁰ *10Micron.Eu-10Micron-GM40000-Montierung*, <https://10micron.eu/montierungen/aequatoriale-montierungen/gm4000-hps-ii-goto-montierung>, 13.04.23.
- ²¹ R. Walker, *Spectralatlas For Amateur Astronomers* (Cambridge University Press, 2013).

²²*Kursunterlagen-Sternspektroskopie* (16.04.2023).

²³*Wikipedia-gamma-Cas*, https://de.wikipedia.org/wiki/Gamma_Cassiopeiae, 06.05.23.

²⁴E. Pollmann, *Spektrum Mitteilungsblatt Über Astro Spektroskopie Für Amateure Ausgabe 51* (Selbstverlag, 2017).

²⁵*researchgate-gamma-Cas-als-Doppelsternsystem*, https://www.researchgate.net/publication/221660769_The_relationship_between_g_Cassiopeiae's_X-ray_emission_and_its_circumstellar_environment, 07.05.23.

11 Anhang

11.1 Danksagung

Wir möchten zunächst unsere Dankbarkeit gegenüber der Schulleitung des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums zum Ausdruck bringen. Ohne ihr Engagement und ihre Unterstützung wäre das Schülerlabor des CFG nicht möglich gewesen. So möchten wir auch Herrn Winkhaus unseren Dank aussprechen. Er ermöglicht dem CFG eine umfangreiche Ausrüstung für die Astronomie.

Selbstverständlich danken wir auch Herrn Koch. Durch Ihren Unterricht und Ihre umfangreiche Hilfe haben Sie uns die Astronomie näher gebracht. Auch ohne Sie wäre das Schülerlabor des CFG in dieser Form nicht denkbar.

Zuletzt möchten wir uns bei unseren Familien, Lehrern und Freunden bedanken. Ohne Ihre Unterstützung wäre dieser Kurs nicht so unvergesslich geworden.

11.2 Abschlusserklärung

Hiermit versichern wir, dass wir diese Arbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die von uns angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder dem Inhalt nach aus anderen Werken entnommen wurden, in jedem einzelnen Fall mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht haben.

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

Ort, Datum:

Unterschrift:

Unterschrift:
