

Schülerforschungszentrum Wuppertal am Carl-Fuhlrott-Gymnasium
Projektbetreuer: Bernd Koch

Spektroskopische Untersuchung der Wasserstoffscheibe um den Be-Sterns γ Cas

Arbeit im Rahmen des Wettbewerbs Jugend forscht 2024
Fachgebiet: Geo- und Raumwissenschaften

Projekt-ID #106857

Vorgelegt von:

Erek Stemminger
Am Jacobsberg 25
42349 Wuppertal
Nordrhein-Westfalen

e.stemminger@gmail.com

Abgabedatum:

13. Januar 2024

Kurzfassung

Der Stern γ Cassiopeiae ist wohl einer der bekanntesten Vertreter des Spektraltyps Be. Wie für Be-Sterne typisch weist γ Cas eine ausgedehnte Atmosphäre auf, die sich infolge seiner überhöhten Rotationsgeschwindigkeit zu einer zirkumstellaren Gasscheibe geformt hat. Aufgrund starker UV-Strahlung des Zentralsterns werden die Atome und Ionen der Materialscheibe zum Leuchten angeregt, was sich in Form von starken Wasserstoffemissionslinien im Sternspektrum widerspiegelt. Da die Wasserstoffscheibe mit einer hohen Geschwindigkeit rotiert, treten die Emissionslinien innerhalb des Spektrums verbreitert auf. Im Dezember 2023 wurde γ Cas mit einem hochauflösenden Spaltspektrographen an einem 0,35m-Teleskop spektroskopiert. Nach Analyse des Spektrums und Vermessung der verbreiterten $H\alpha$ Linie wurde unter Zugrundelegung des Dopplereffekts die Rotationsgeschwindigkeit der Gasscheibe ermittelt.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
1 Einleitung	1
2 Grundlagen zu Be-Sternen	1
2.1 Überblick	1
2.2 Eigenschaften	2
2.2.1 Emissionslinien	2
2.2.2 Rotationsgeschwindigkeit	2
2.2.3 Eigenschaften der Gasscheibe	2
2.3 Gestalt der H α Spekten	3
2.3.1 Inklination und optische Tiefe	3
2.3.2 Kinematik	4
3 Modell von γ Cassiopeiae	5
3.1 Übersicht	5
3.2 Chemische Analyse	5
3.3 Strahlungsverteilung	7
3.4 Doppelsternsystem	7
4 Eigene Forschung	8
4.1 Forschungsfrage	8
4.2 Verwendete Instrumente und experimenteller Aufbau	8
4.3 Durchführung der Beobachtung	9
4.4 Nachbearbeitung der Spektren	10
4.5 Vermessung der H α Emissionslinie	11
4.6 Berechnung	12
4.7 Ergebnisse	13
4.7.1 Rotationsgeschwindigkeit	13
4.7.2 EW α Langzeitmonitoring	13
4.8 Diskussion	14
4.9 Fazit und Ausblick	15
Literaturverzeichnis	16
Abbildungsverzeichnis	17
Tabellenverzeichnisverzeichnis	17
Danksagung	18
Selbstständigkeitserklärung	18

1 Einleitung

Im Rahmen des Projektkurses Astronomie am Carl-Fuhlrott-Gymnasiums im Jahr 2022/23 habe ich in Zusammenarbeit mit meinem Partner Noah Menno Aden die Projektarbeit „Spektroskopie des Be-Sterns γ Cassiopeiae“ angefertigt. Wir beschäftigten uns mit den Grundlagen der Spektroskopie, sowie den Eigenschaften von Be-Sternen am Beispiel von γ Cas. Zusammen erstellten wir eine simple Modellvorstellung des untersuchten Sterns, in der wir den Aufbau, die chemische Zusammensetzung und die Strahlungsverteilung erörterten.

Im Rahmen meiner Teilnahme am Wettbewerb Jugend forscht möchte ich mich tiefergehend mit dem spannenden Themenfeld der Be-Stern beschäftigen, indem ich die Rotationsgeschwindigkeit der zirkumstellaren Gasscheibe des Sterns γ Cas bestimme. Als Hilfsmittel dient mir die Spektroskopie, mit der ich die durch den Dopplereffekt bedingte Verbreiterung der $H\alpha$ Linie vermesse und aus den resultierenden Ergebnissen die Geschwindigkeit der zirkulierenden Materialscheibe berechne. Außerdem möchte ich die von mir ermittelte $H\alpha$ Äquivalentbreite in einem Langzeitmonitoring auftragen, um eine mögliche Veränderung der Scheibe nachzuweisen.

Im Laufe der Arbeit habe ich die theoretischen Grundlagen zu Be-Sternen erörtert, anhand eines Übersichtsspektrums den Aufbau von γ Cas beschrieben, sowie meine eigene Forschung dokumentiert. Wie auch im vorherigen Jahr habe ich bei vielen Schritten, wie der Aufnahme und Bearbeitung der Spektren, sowie bei der Spektrenauswertung, Unterstützung von meinem Projektbetreuer Herrn Koch erhalten.

2 Grundlagen zu Be-Sternen

2.1 Überblick

Be-Sterne bilden eine größere Untergruppe der Spektralklasse B und kommen in geringer Zahl auch in der frühen A-Klasse vor. Im HRD stehen Be-Sterne meist auf oder nahe der Hauptreihe. Charakteristisch für Sterne dieser Spektralklasse ist eine hohe Rotationsgeschwindigkeit, sowie die Bildung einer ausgedehnten Gashülle um sich selbst herum. Diese wird durch das Auftreten von ungewöhnlichen Emissionslinien im Sternspektrum erkennbar und ist häufig nur von temporärer Natur. Außerhalb dieser Phase sind Be-Sterne in der einfachen B-Klasse zu verorten.

1866 entdeckte der Italiener Angelo Secchi die ersten Be-Sterne. Secchi fand bei einer 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. [6, 18]

2.2 Eigenschaften

2.2.1 Emissionslinien

Die Besonderheit der Be-Sterne sind die im Spektrum vertretenen Emissionslinien. Sie sind grundsätzlich auf heiße, ausgedehnte Stern-Atmosphären bzw. Hüllen zurückzuführen. Die Atome und Ionen der Hülle werden durch die UV-Strahlung des eingebetteten Sterns angeregt, in ihren Wellenlängen zu emittieren. Daher strahlen die Emissionslinien der Hülle wesentlich heller als das kontinuierliche Spektrum des dahinterliegenden Sterns, wie Secchi 1866 feststellte.

Die Formen der Emissionslinien in Be-Sternen sind vor allem durch den Dopplereffekt der emittierenden Atome bestimmt und spiegeln deshalb die Bewegungen bzw. Radialgeschwindigkeiten des Gases in den zugehörigen Regionen relativ zum Beobachter wider.[17]

Die im Spektrum der Be-Sterne am stärksten auftretenden Emissionslinien sind die ersten Balmer-Linien des Wasserstoffatoms sowie die Linien des einfach ionisierten Eisens, höhere Balmerlinien zeigen nur selten Emission. Die photosphärischen Absorptionslinien sind meist stark verbreitert.

2.2.2 Rotationsgeschwindigkeit

Die deutliche Verbreiterung der photosphärischen Absorptionslinien, besonders in den Heliumlinien erkennbar, deuten auf sehr hohe Rotationsgeschwindigkeiten der Sterne hin. Sie lassen auf Äquatorialgeschwindigkeiten von bis zu 450 km/s schließen, was etwa dem 15-fachen der Erdrotationsgeschwindigkeit entspricht.

Die wahren äquatorialen Rotationsgeschwindigkeiten v_{real} der Be Sterne 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_{real} und dem Sinus der Inklination i .¹ Beträgt die Inklination $i = 90^\circ$, blickt man auf den Äquator eines Sterns, bei $i = 0^\circ$ auf den Pol. Daher spricht man bei $i > 60^\circ$ von „equator-on“ und bei $i < 15^\circ$ von „pole-on“ Sternen. Die wahre Rotationsgeschwindigkeit ist nur bei direkter Sicht auf den Äquator, einer Inklination von $i = 90^\circ$ messbar.

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. Infolgedessen kommt es zu einer deutlichen Abnahme der effektiven Schwerebeschleunigung von Pol zum Äquator, wodurch Be-Sterne eine abgeplattete Form aufweisen. Dieses Phänomen stellt im Zusammenhang mit starken Sternwinden eine mögliche Erklärung für die Bildung der Materialscheiben dar. Der Sternwindtheorie zufolge bläst der Strahlungsdruck, unterstützt von der niedrigen effektiven Schwerebeschleunigung, die äußeren Schichten der Photosphäre weg. Das vom Stern weggeblasene Material sorgt dann für den Aufbau einer zirkumstellaren Hülle.

2.2.3 Eigenschaften der Gasscheibe

Um die physikalischen Eigenschaften der zirkumstellaren 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.

¹Der Winkel zwischen der Orientierung der Rotationsachse des Sterns und der Sehlinie des Beobachters

Durch verschiedene Berechnungen ergibt sich eine Gasscheibe mit Ringradien von 1,5 bis 30 Sternradien und einer Dicke von 1:7 zu ihrer Ausdehnung. Demnach ist die Dicke der Scheibe raltativ gering gegenüber der äquatorialen Ausdehnung, welche mehrere Sternradien betragen kann. [6, 19]

2.3 Gestalt der $H\alpha$ Spekten

Die Emissionslinien der Be-Sterne zeigen vielfältige Formen. Dennoch ist es möglich, die am häufigsten auftretenden Linienprofile in ein Schema einzuordnen. Die Form der Spektrallinien ist von den folgenden Faktoren abhängig:

- Inklination
- Optische Tiefe
- Kinematik

2.3.1 Inklination und optische Tiefe

Das Zustandekommen der für Be-Sterne typischen Linienprofilen kann mit den in Abb. 2.1 beschriebenen Komponenten erklärt werden.

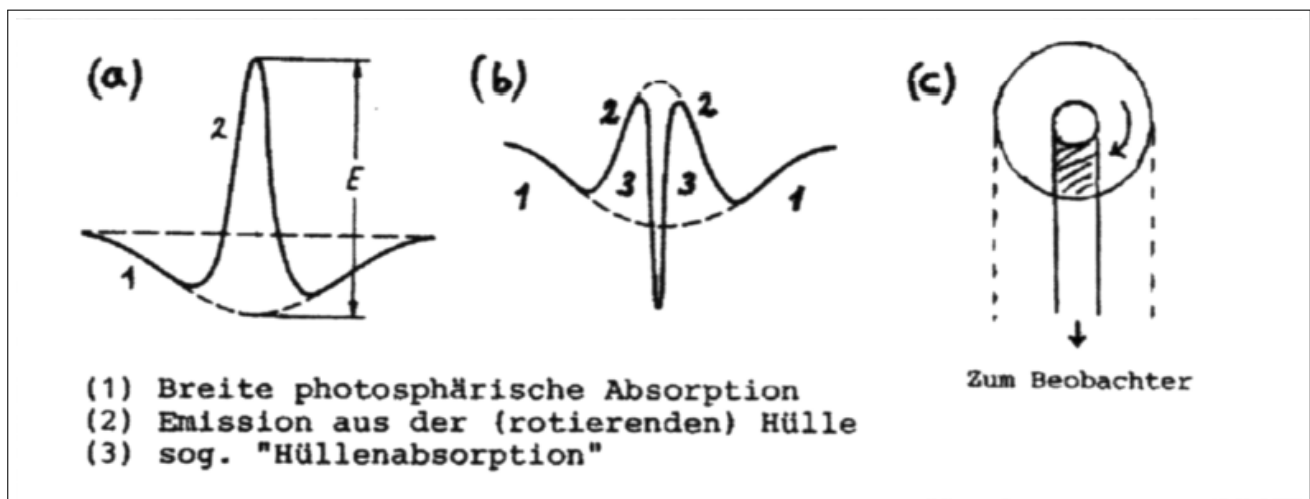


Abbildung 2.1: Die Komponenten der typischen Linienprofilen von Be-Sternen [19]

- **1. Komponente:** Absorption aus der Photosphäre des zentralen Sterns. Durch die hohe Rotationsgeschwindigkeit der Sternoberfläche werden die ausgesendeten Photonen rot- bzw. blau verschoben (Dopplereffekt). Es resultiert eine deutlich verbreiterte Absorptionslinie.
- **2. Komponente:** Emission aus dem Innenbereich der Materialscheibe. Aufgrund der starken UV-Strahlung des zentralen Sterns werden Atome bzw. Ionen in den inneren Radien der Gasscheibe zum emittieren angeregt. Durch die nach Kepler differenzielle Rotationsgeschwindigkeit von Stern und Hülle ($v_{\text{inn.Hülle}} < v_{\text{Stern}}$) entsteht eine etwas schmalere Emissionslinie (siehe Abb. 2.1a).

- 3. Komponente:** Absorption aus dem Außenbereich der Materialscheibe
 Aufgrund der Energiedifferenz zwischen den inneren und äußeren Radien der Gasscheibe ($E_{\text{inn.Hülle}} > E_{\text{auß.Hülle}}$) absorbieren die nicht emittierenden Atome der Außenradien die ausgehende Strahlung in einem schmalen Schlauch, der vom Beobachter gesehen gerade die Sternscheibe verdeckt (siehe Abb. 2.1 c). Da die Umlaufgeschwindigkeit des Gases $v_{\text{inn.Hülle}} > v_{\text{auß.Hülle}}$ entspricht, entsteht keine merkliche Verbreiterung der Hüllenabsorptionslinie (siehe Abb. 2.1 b).

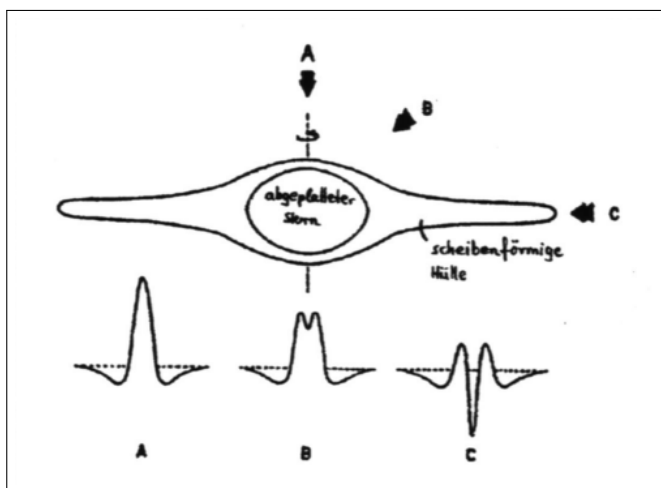


Abbildung 2.2: Emissionslinienprofile bei Inklination $i=0^\circ$ (A) $i=45^\circ$ (B) $i=90^\circ$ (C) [19]

Durch die Überlagerung dieser drei Komponenten ergeben sich die für Be-Sterne typischen Linienprofile (siehe Abb. 2.2), wobei die Ausprägung der Hüllenabsorption wesentlich von der Länge des Lichtwegs durch die Hülle bestimmt wird. Die Länge des Lichtwegs hängt dabei von dem Inklinationswinkel i ab.

Bei hoher Inklination ($i > 80$) wird die Hüllenabsorption des photosphärischen Lichts so stark, dass die zentrale Einsenkung unter das stellare Kontinuum fällt. Das in Abb. 2.2 c beschriebene Linienprofil wird als „shell“-Profil bezeichnet. Die dazugehörigen Be-shell Sterne bilden eine besondere Untergruppe der Be Sterne. Der Unterschied zwischen shell-Sternen und einfachen Be-Sternen liegt lediglich in der Ausdehnung und Dichte der von Beobachter betrachteten Hüllenregion.

2.3.2 Kinematik

Ein weiterer Faktor für die Entstehung des Linienprofils ist die Kinematik. Wird die Hülle betrachtet ($i \neq 0^\circ$), erscheinen die Emissionslinien doppelgipfelig und verbreitert (siehe Abb. 2.3). Dieses Phänomen findet seinen Ursprung in der Rotation der Materialscheibe. Bewegen sich emittierende 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. Dabei rufen die innersten Scheibenbereiche aufgrund der hohen Rotationsgeschwindigkeit die größte Linienverschiebung hervor. Dennoch tragen sie wegen ihres geringen Volumens nur wenig zum Linienprofil bei. Sich quer zur Sichtlinie des Beobachters bewegende Atome erzeugen keine Linienverbreiterung. [19, 6]

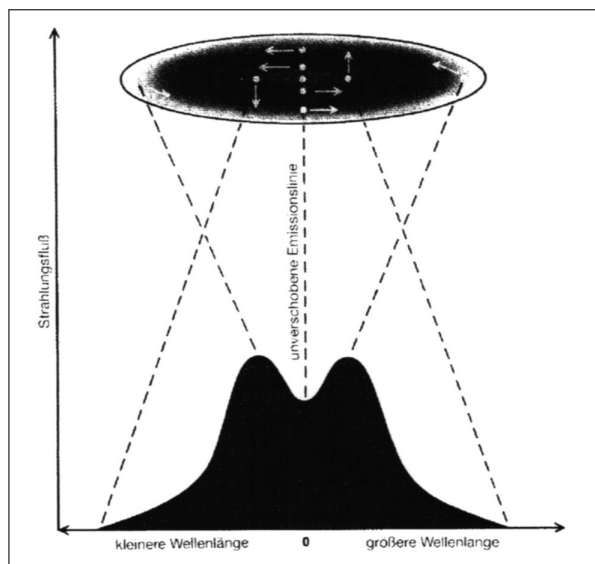


Abbildung 2.3: Kinematische Formung der Emissionslinien durch den Dopplereffekt [19]

3 Modell von γ Cassiopeiae

3.1 Übersicht

Der Stern γ Cas bildet gemeinsam mit seinem Sternbild Kassiopeia ein auffälliges W am Sternenhimmel der Nordhalbkugel. Mit einer Leuchtkraftklasse von IV und dem Spektraltyp B0,5e befindet sich γ Cas auf der Hauptreihe des Hertzsprung-Russell-Diagramms. Wie Angelo Secchi 1866 entdeckte, weist γ Cas ungewöhnlich helle Fraunhofer-Linien auf. Zurückzuführen sind diese auf eine für Be-Sterne typische ausgedehnte Atmosphäre. Starke Verbreiterungen der Spektrallinien, besonders in Wasserstoff und Helium, lassen auf stark überhöhte Radialgeschwindigkeiten schließen. Infolge der Abnahme der effektiven Schwerebeschleunigung auf Äquatorialebene weist γ Cas eine deutlich abgeplattete Form sowie eine zirkumstellare Gasscheibe auf. Das Auftreten periodischer Schwankungen in der Radialgeschwindigkeit sowie Emissionen im Röntgenbereich machen γ Cas zu einem aktuellen Forschungsobjekt.[16]

Parameters	
Spectral type	B0.5IVe
Effective temperature	25000 K
Mass	$16 M_{\odot}$
Radius	$10 R_{\odot}$
Stellar angular diameter	0.45 mas
Luminosity	$3.510^4 L_{\odot}$
Vsin i	230 km^{-1}
Inclination angle i	45°
Photospheric density	$\rho_0 = 2.0 \cdot 10^{-11} \text{ g.cm}^{-3}$

Abbildung 3.1: Parameter von γ Cas [2]

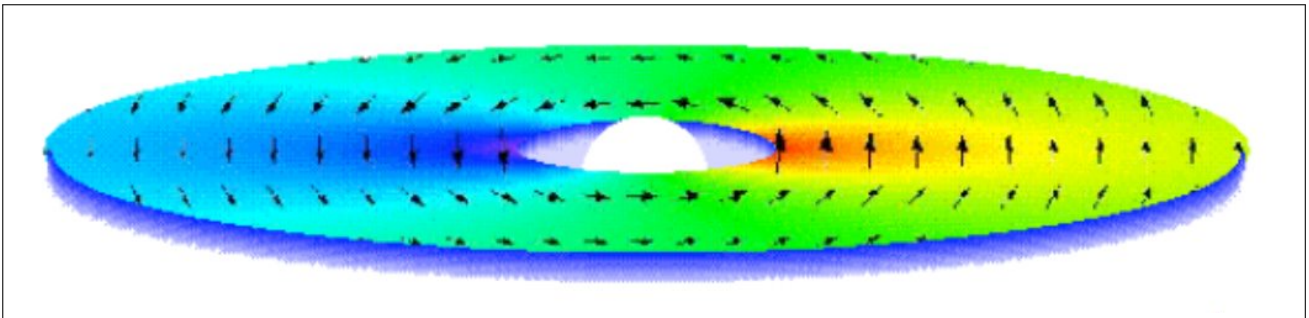


Abbildung 3.2: Zirkumstellare Gasscheibe in der Äquatorebene als Folge der hohen Rotationsgeschwindigkeit & Sternwinde [16]

3.2 Chemische Analyse

Im Rahmen meiner Projektarbeit „Spektroskopie des Be Sterns γ Cassiopeiae“ [10] wurde am 22. März 2023 ein Übersichtsspektrum in einem Wellenlängenbereich von 400 nm und 700 nm mittels eines DADOS-Spektrographen an der Schülersternwarte des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums aufgenommen (siehe Abb. 3.3). Dieses wird im Folgenden zur chemischen Analyse von γ Cas herangezogen.

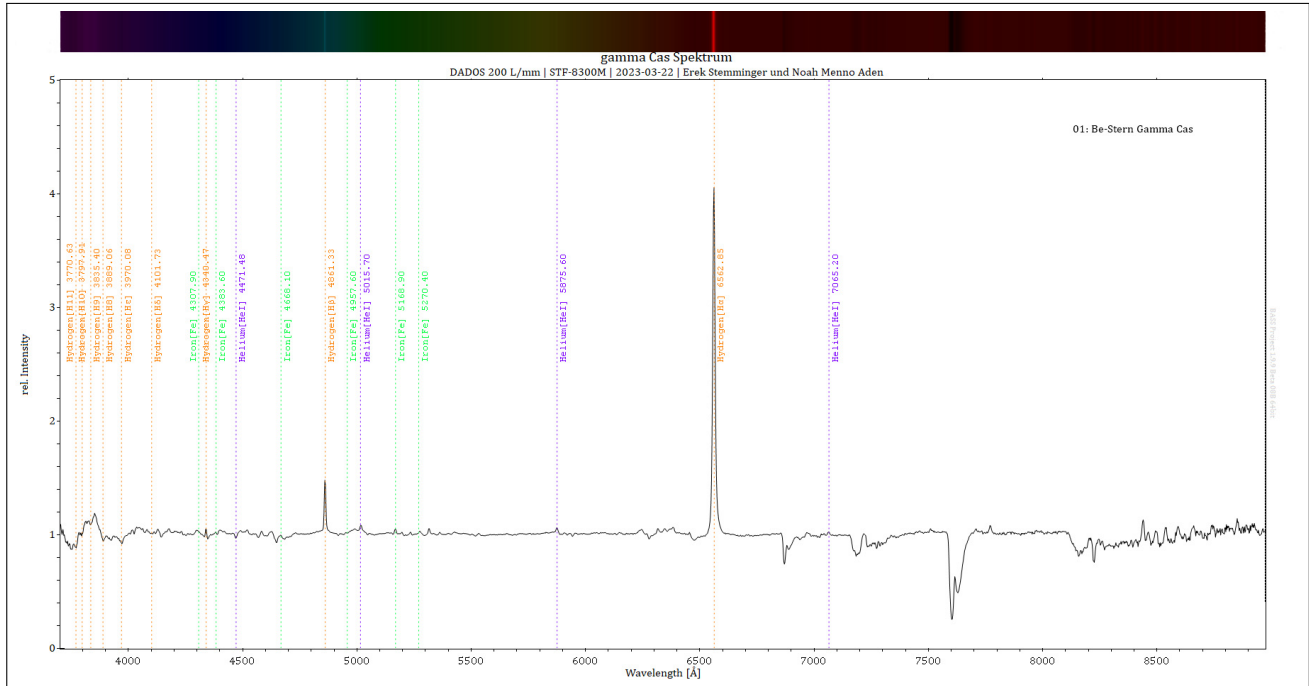


Abbildung 3.3: Übersichtsspektrum von γ Cas im Wellenlängenbereich von 400 nm und 700 nm [10]

Die Spektralanalyse von γ Cas zeigt, dass der Stern hauptsächlich aus den Elementen Wasserstoff (H), Helium (He) und Eisen (Fe) besteht. Auffällig sind die für Be-Sterne charakteristischen Emissionslinien der Balmer-Serie. Dabei liegen $H\alpha$ bis $H\gamma$ als Emissions- und $H\delta$ bis $H11$ in Absorptionslinien vor. Zurückzuführen ist dies auf eine große Energiedifferenz zwischen den inneren und äußeren Radien der Materialscheibe. Aufgrund der starken Ausdehnung besitzt die Gasscheibe in den äußeren Ringen nur eine begrenzte Energie, die lediglich für die Erzeugung von $H\alpha$ -Emissionslinien ausreicht. Hingegen in den inneren Regionen das Energieniveau für die Erzeugung von $H\beta$ - und $H\gamma$ -Emissionslinien genügt.

Ein ähnliches Phänomen lässt sich bei den Spektrallinien des Heliumatoms beobachten. Bis zu einer Wellenlänge von 5015.70\AA tritt He als Emission auf. Im weiteren Verlauf des Spektrums sind die Heliumlinien im kurzwelligen Bereich als Absorptionslinien zu finden. Da Helium sehr hohe Temperaturen benötigen, um zu emittieren, muss die Emission aus der heißen Sternoberfläche stammen.

Im Unterschied zu den Spektrallinien von Wasserstoff und Helium treten die Eisenlinien ausschließlich in Form von Emission auf. Eisen benötigt ähnlich wie Helium große Mengen an Energie, um zu emittieren, wodurch es ebenfalls aus der heißen Photosphäre stammt.

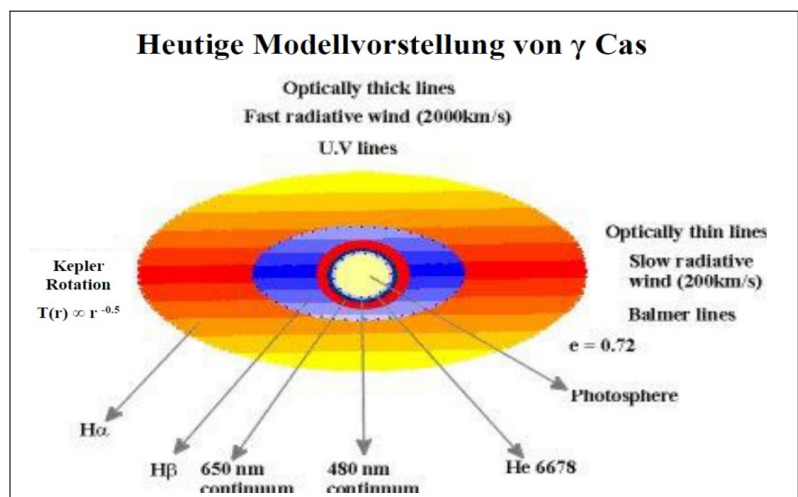


Abbildung 3.4: Elementverteilung in Stern und Scheibe [16]

3.3 Strahlungsverteilung

Bei der Flusskalibration wird das Pseudokontinuum des aufgenommenen Spektrums zu einer sogenannten "Planckschen Strahlungskurve" korrigiert. Das Ergebnis ist ein intensitätskalibriertes Spektrum, bei dem die relative Strahlungsintensität in Abhängigkeit der Wellenlänge korrekt wiedergegeben wird.

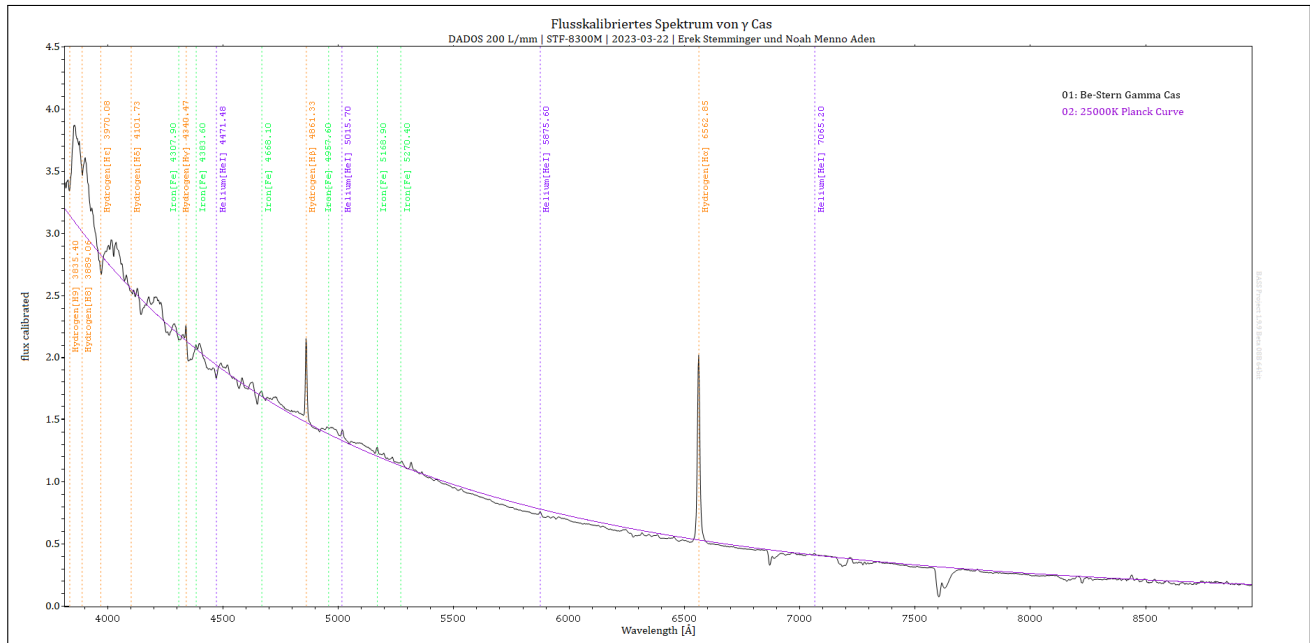


Abbildung 3.5: Flusskalibriertes Spektrum von γ Cas mit eingefügter Planckkurve [10]

Wie in Abb. 3.5 zu erkennen ist, liegt das Strahlungsmaximum von γ Cas weit im kurzwelligen UV-Bereich. Leider verfügt die Schülersternwarte des CFG nicht über die erforderliche Ausstattung, um einen derartigen Wellenlängenbereich untersuchen zu können. Daher wurde eine Planck-Kurve eines schwarzen Strahlers mit der Strahlungsverteilung 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 den angenommenen Werten entspricht.

3.4 Doppelsternsystem

Periodische Schwankungen von etwa 8 km/s in der $H\alpha$ -Radialgeschwindigkeit lassen darauf schließen, dass es sich bei γ Cas um ein Doppelsternsystem handelt, indem ein deutlich kleinerer spektral unidentifizierter Begleitstern γ Cas auf einer Kreisbahn umläuft. Im Fall eines Doppelsternsystems mit einer Inklination von $i = 45^\circ$ und einer Masse des Primärsterns von $M_1 = 13 M_\odot$ kann auf eine Masse von $M_2 = 0,98 M_\odot$ des Sekundärsterns geschlossen werden. Sollte das Sternsystem bereits mit dem Massetransfer abgeschlossen haben, könnte es sich im Fall des Begleitsterns um einen heißen Heliumstern handeln. Ebenfalls könnten die Wechselwirkungen im Doppelsternsystem im Zusammenhang mit der überhöhten Radialgeschwindigkeit die Bildung der zirkumstellaren Gasscheibe erklären, welche noch nicht gänzlich verstanden ist. [3] [16]

4 Eigene Forschung

4.1 Forschungsfrage

Im Rahmen der eigenen Messungen liegt der Schwerpunkt auf der Berechnung der Rotationsgeschwindigkeit der zirkumstellaren Gasscheibe des Be-Sterns γ Cassiopeiae. Dazu wurden hochaufgelöste Spektren der $H\alpha$ Emissionslinie aufgenommen und die durch den Dopplereffekt verursachte Verbreiterung der Spektrallinie gemessen. Die aus den Untersuchungen resultierenden Ergebnisse werden anschließend diskutiert und anhand eines Langzeitmonitorings sowie eines aktuellen Vergleichsspektrums beurteilt.

4.2 Verwendete Instrumente und experimenteller Aufbau

Zur Aufnahme der Spektren wurde das Schmidt-Cassegrain-Teleskop C14 EdgeHD von Celestron auf einer 10Micron GM2000HPS Montierung verwendet. Am Okularauszug des Teleskops wurde ein LHIRES III-Spaltspetrograph sowie die CCD-Kamera STF-8300M von SBIG angeschlossen (siehe Abb. 4.1). Diese Ausstattung gehört zur Privatsternwarte von Herrn Bernd Koch.

Teleskop

Der genutzte Celestron C14 Reflektor besitzt eine Öffnung von 0,35m und eine Brennweite von 3,91m. Während der Aufnahme wurde ein Reducer verwendet, um das Licht des Beobachtungsobjekts stärker auf den Spalt des Spektrographen zu konzentrieren, damit ein schärferes Spektrum entsteht. [12]

Kamera

Bei der STF 8300M handelt es sich um eine monochrome Full Frame Transfer CCD-Kamera des Herstellers SBIG. Mit einer nahezu vollständig lichtaktiven Sensorfläche verfügt die STF 8300M über eine sehr hohe Helligkeitsempfindlichkeit, wodurch sie selbst lichtschwache Objekte abbildet. Ihre sehr kurze Downloadzeit eines Bildes von weniger als 1 Sekunde ermöglicht es ihr, minimale Helligkeitsschwankungen zu erkennen und festzuhalten. Die dauerhafte Luft-Kühlung des Kamera-Chips ermöglicht eine Chiptemperatur von 40°C unterhalb der Umgebungstemperatur, sodass sie ein minimales Hintergrundrauschen erreicht. [15]

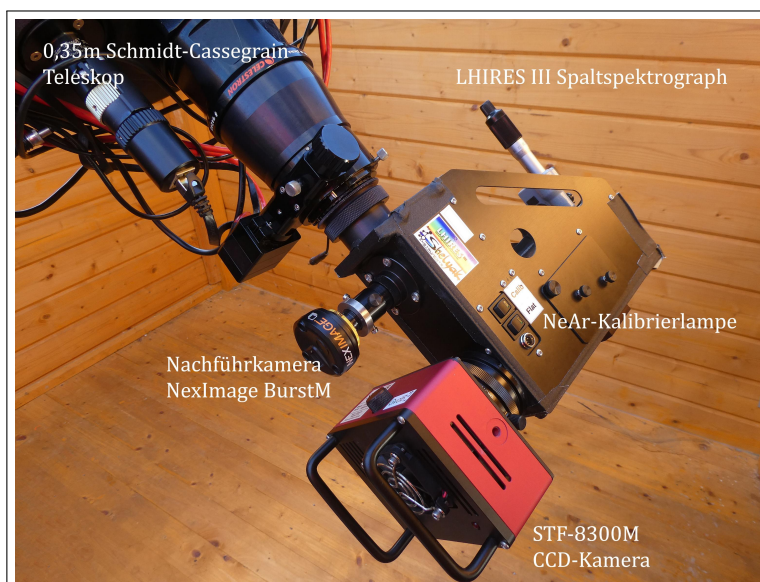


Abbildung 4.1: Celestron C14 Teleskop mit montiertem LHIRES III Spektrographen und STF-8300M CCD-Kamera

Spektrograph

Zur Erzeugung der Spektren wurde der hochauflösende LHIRES III-Spalt spektrograph des Herstellers Shelyak Instruments genutzt. Der LHIRES III ermöglicht mit einer Spaltbreite von $23\mu\text{m}$ ein Auflösungsvermögen von $R \approx 18000$. Zwar ist der beobachtbare Wellenlängenbereich des Spektrographen auf ein Minimum beschränkt, allerdings ist für die Vermessung der $H\alpha$ Linie ($6562,852\text{\AA}$) nur ein kleiner hochaufgelöster Wellenlängenbereich notwendig. [8]

Referenzlampe

Für die spätere Kalibrierung der Spektren kam die im LHIRES III vorinstallierte Referenzlampe zum Einsatz. Im Inneren der Lampe befindet sich ein Neon-Argon-Gasgemisch. Wird das Spektrum des Gasgemischs erfasst, zeichnet sich ein Emissionsspektrum ab, das immer gleich aussieht. Aufgrund des direkten Anschlusses an den Spektrographen ist eine Rot- bzw. Blauverschiebung durch den Dopplereffekt ausgeschlossen, was im späteren Verlauf der Berechnungen eine Rolle spielt. [8]

4.3 Durchführung der Beobachtung

Aufgrund von schlechten Witterungsverhältnissen im Zeitraum von Oktober bis Dezember ergaben sich nur in den Schulferien passende Bedingungen für eine Beobachtung. Durchgeführt wurden die Aufnahmen per remote Control an der Privatsternwarte von Herrn Koch im Westerwald. Herr Koch und ich trafen uns in einer Videokonferenz, wobei wir zusammen Montierung und Kamera steuerten. Die Ausrichtung des Teleskops erfolgte mit der Software „Stellarium“ [14], während die Steuerung der Kamera mit „MaxIm DL“ [9] realisiert wurde.

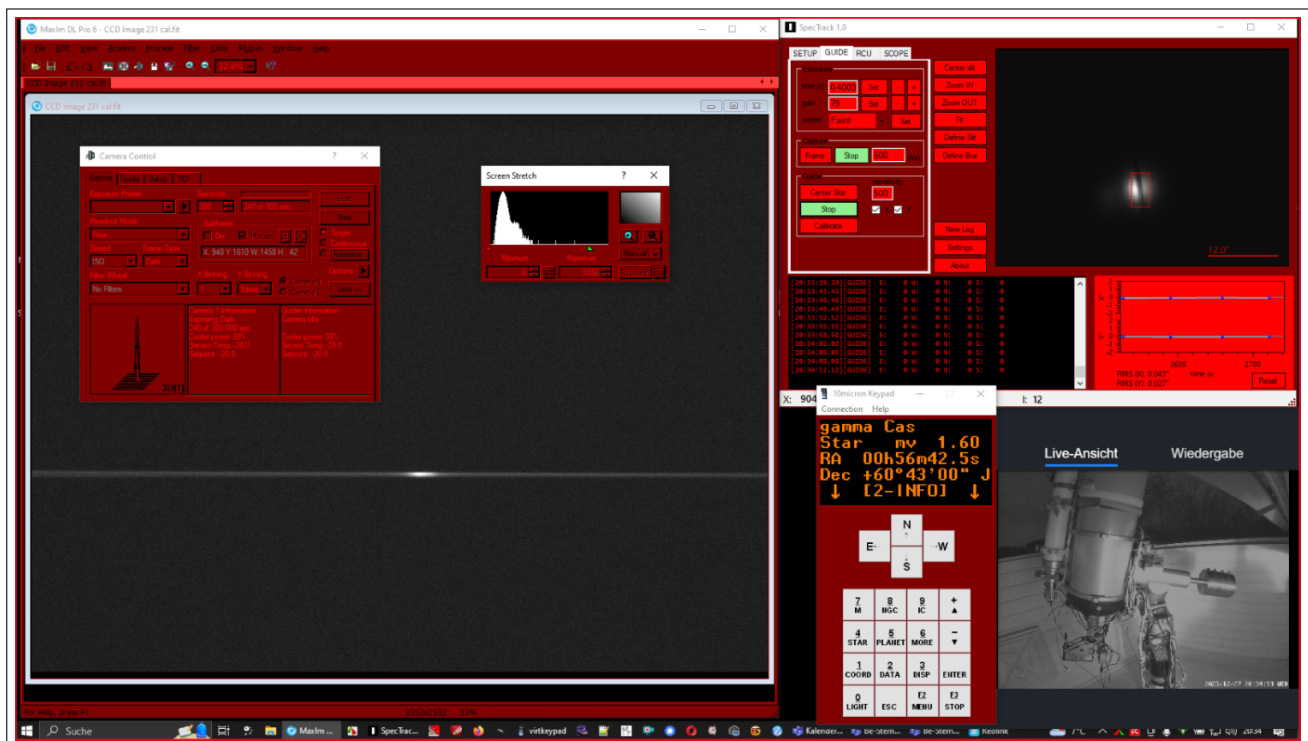


Abbildung 4.2: Aufnahme Fenster mit Kameraeinstellungen, Steuerpad und Livebild der Sternwarte

Zunächst wurde die Zeit von Computer und Montierung synchronisiert. Anschließend wurde der LHIRES III manuell anhand der NeAr-Referenzlampe fokussiert, woraufhin die Scharfstellung der Kamera sowie der Guidingkamera erfolgte. Mit der Software „SpecTrack“ [13] wurde das Beobachtungsobjekt erfasst, sodass eine automatische Nachführung verwendet werden konnte.

Insgesamt wurden 10 γ Cas Spektren von je 120s Belichtungszeit aufgenommen. Für die Aufnahme der Darkframes wurde der Shutter vor dem Kamerasensor geschlossen, sodass 2 Darkframes von ebenfalls 120s Belichtungszeit aufgenommen werden konnten. Das Referenzspektrum der NeAr-Lampe wurde aufgrund der größeren Intensität kürzer belichtet.

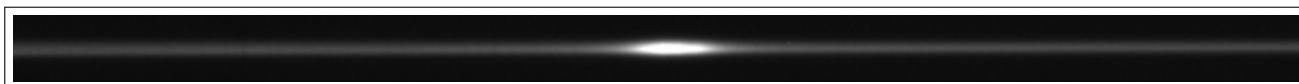


Abbildung 4.3: Hochaufgelöstes Raw-Spektrum der $H\alpha$ Emissionslinie

4.4 Nachbearbeitung der Spektren

Vor der Kalibrierung des Spektrums mit der Software „BASS Project“ [4] wurden die einzelnen Raw-Spektren gestackt, also übereinandergelegt, wobei ein Intensitätsmittelwert jedes einzelnen Pixels aus den Intensitäten desselben Pixels aus allen Aufnahmen berechnet wird. Ergebnis waren zwei einzige, rauschminimierte Summenspektren der Lightframe. Anschließend wurden diejenigen Pixel korrigiert, bei denen es sich um heiße Pixel handelt. Dabei wurden die Intensitäten der Pixel aus dem direkten Umfeld des fehlerhaften Pixels gemittelt und als neue Pixelintensität ersetzt.

Zur Wellenlängenkalibrierung bzw. Normierung wurde das MasterLight in der Software BASS Project geöffnet. Folgend wurde das Spektrum in der Horizontale begradigt, vom Himmelshintergrund subtrahiert und schließlich anhand der $H\alpha$ Emission manuell Wellenlängenkalibriert. Letztlich wurde das Sternspektrum normiert, wobei das aufgenommene Pseudokontinuum entfernt wird, wodurch ein gerader, horizontaler Verlauf bei einer Strahlungsintensität von 1 entsteht (siehe Abb. 4.4).

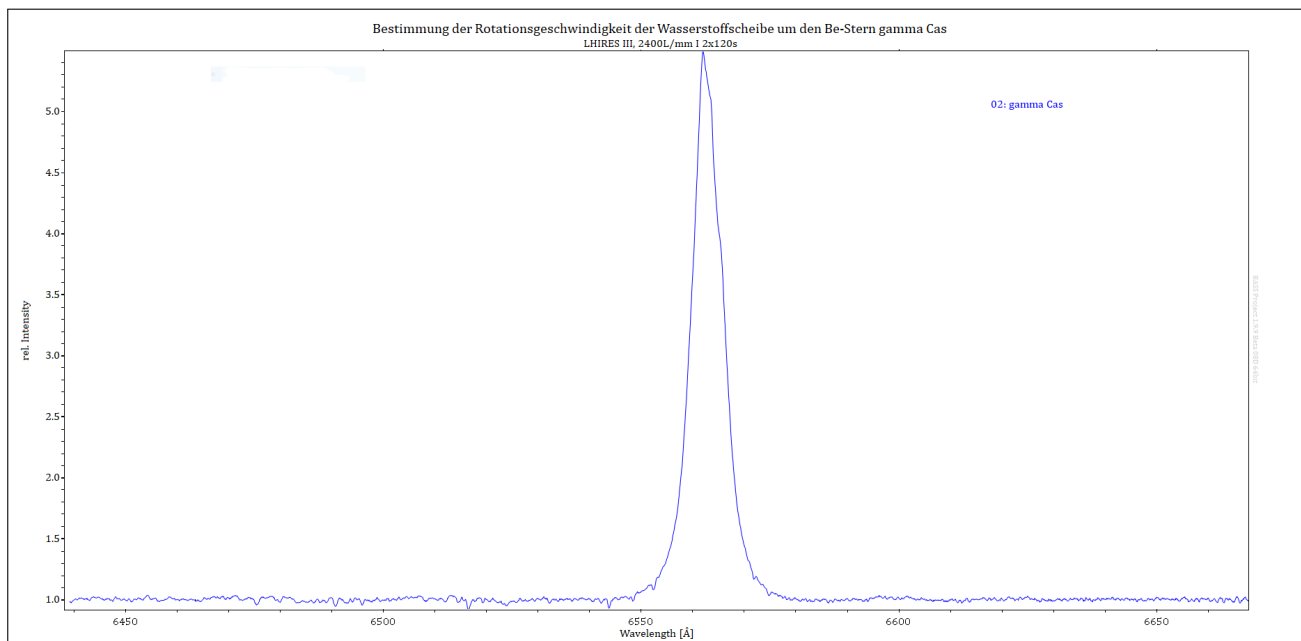


Abbildung 4.4: Normiertes und wellenlängenkalibriertes $H\alpha$ Spektrum

4.5 Vermessung der H α Emissionslinie

Für die Berechnung der Rotationsgeschwindigkeit der zirkumstellaren Gasscheibe von γ Cas wird der Wert Halbwertsbreite ($FWHM$), sowie der Wert der Äquivalentbreite (EW) der H α Emissionslinie benötigt. Dabei ist die Halbwertsbreite die Breite der Spektrallinie auf halber Höhe. Die Äquivalentbreite ist die Breite eines der Fläche der Spektrallinie äquivalenten Rechtecks. Beide Werte werden in der Einheit Ångström [\AA] angegeben.

Für die Bestimmung der gesuchten Werte wurde das Tool „Measurements and Elements“ in der Software BASS Project angewandt. Unter dem Reiter „Measurement Results“ wurden ein zu vermessendes Wellenlängenintervall sowie die gewünschten Messungen ausgewählt, sodass diese automatisch ermittelt wurden (siehe Abb. 4.5). Das Ergebnis der Messung ergab eine Äquivalentbreite von $-33,53\text{\AA}$ und eine Halbwertsbreite von $6,76\text{\AA}$.

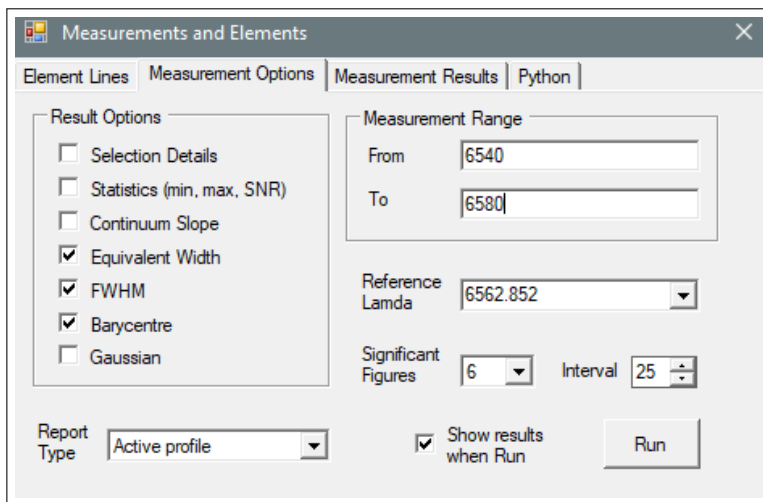


Abbildung 4.5: Einstellungen des „Measurements and Elements“ Tools

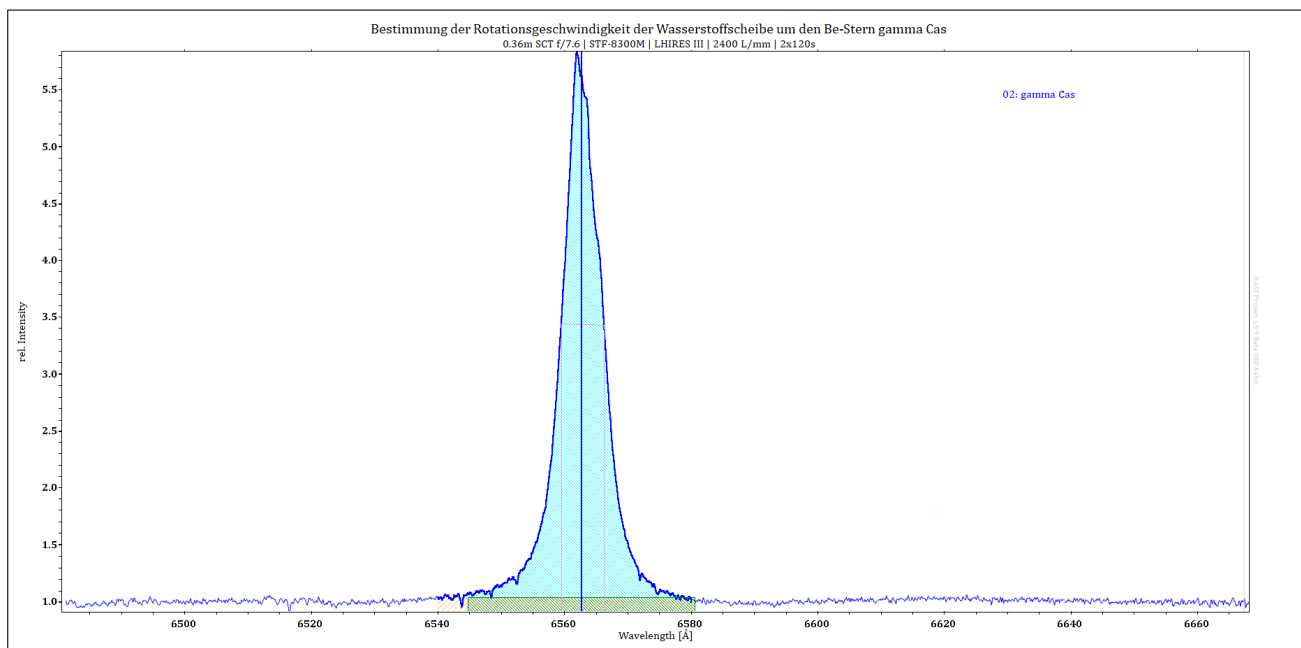


Abbildung 4.6: Messung der Halbwerts- und Äquivalentbreite der H α Emissionslinie

4.6 Berechnung

In der Vergangenheit wurden mehrere Formeln publiziert, mit denen die projizierte Rotationsgeschwindigkeit $v \sin i$ der Materialscheibe von Be-Sternen abgeschätzt werden kann. Diese basieren meist auf dem $FWHM_{\text{korr}}$ -Wert der $H\alpha$ Linie.[17] Eine Annäherung an die Rotationsgeschwindigkeit bietet die Formel von Dr. Joachim Dachs. Diese bestimmt $v \sin i$, basierend auf der korrigierten Halbwertsbreite $FWHM_{\text{korr}}$, kombiniert mit der Äquivalentbreite EW der $H\alpha$ Emissionslinie. Allerdings scheint diese mit einer Abweichung von $\pm 30 \text{ km/s}$ recht ungenau.

$$v \sin i (\pm 30 \text{ km/s}) \approx \frac{FWHM_{\text{korr}H\alpha}}{2} \left[\frac{EW_{H\alpha}}{-3\text{Å}} \right]^{\frac{1}{4}} - 60 \text{ km/s} \quad (4.1)$$

Eine andere Möglichkeit der Geschwindigkeitsbestimmung bietet der Ansatz von Dr. Reinhard Hanuschik. Er zeigt eine einfache lineare Formel, welche $v \sin i$ nur mit der korrigierten Halbwertsbreite der $H\alpha$ Emissionslinie ermittelt.

$$v \sin i \approx \frac{FWHM_{\text{korr}H\alpha} - 50 \text{ km/s}}{1.4} \quad (4.2)$$

Da die aufgeführten Formeln $v \sin i$ auf Basis des $FWHM_{\text{korr}}$ -Werts bestimmen, muss erst die durch den Spektrographen hervorgerufene Verbreiterung der Spektrallinien bereinigt werden. Dafür wurde die Halbwertsbreite einer beliebigen Spektrallinie des NeAr-Referenzspektrums vermessen und nach folgender Formel von der $H\alpha$ Halbwertsbreite subtrahiert.

$$FWHM_{\text{korrigiert}} = \sqrt{FWHM_{\text{gemessen}}^2 - FWHM_{\text{Spektrograph}}^2} \quad (4.3)$$

Nach der Bestimmung von $FWHM_{\text{korr}}$ muss die korrigierte Halbwertsbreite [Å] nach der Dopplerformel in die korrigierte Dopplergeschwindigkeit v_{korr} [km/s] umgerechnet werden.

$$v_{\text{korr}} = c * \frac{\Delta\lambda_{FWHM_{\text{korr}}}}{\lambda_{H\alpha}} \quad (4.4)$$

Die aus den Berechnungen resultierenden Ergebnisse sind in folgender Tabelle aufgelistet.

Formelzeichen	Physikalische Größe	Wert
$EW_{H\alpha}$	Äquivalentbreite $H\alpha$	-33,53Å
$FWHM_{\text{gemessen}}$	Halbwertsbreite $H\alpha$	6,76Å
$FWHM_{\text{Spektrograph}}$	Halbwertsbreite Ne	0,27Å
$FWHM_{\text{korr}H\alpha}$	korrigierte Halbwertsbreite $H\alpha$	6,69Å
C	Lichtgeschwindigkeit	299793km/s
v_{korr}	korrigierte Dopplergeschwindigkeit	305,6 km/s

Tabelle 4.1: Ergebnisse der Berechnungen

4.7 Ergebnisse

4.7.1 Rotationsgeschwindigkeit

Bei Verwendung der Formel nach Dachs (siehe 4.1) ergibt sich eine projizierte Rotationsgeschwindigkeit von $v \sin i = 219 \pm 30$ km/s. Wird hingegen die Formel nach Hanuschik genutzt (siehe 4.2), beträgt $v \sin i = 183$ km/s. Unter Berücksichtigung möglicher Ungenauigkeiten bei der Abschätzung des Wellenlängenintervalls der $H\alpha$ Emissionslinie, ergibt sich eine Fehlerabweichung von ± 1 km/s. Da die Ergebnisse nach Hanuschik genauer erscheinen, wird im Folgenden von einer projizierten Rotationsgeschwindigkeit von 183 ± 1 km/s ausgegangen.

Zur Ermittlung der wahren Rotationsgeschwindigkeit muss der Neigungswinkel i der Gasscheibe zur Sichtlinie des Beobachters berücksichtigt werden. Unter der Annahme, dass die Inklination $i = 45^\circ$ beträgt [2], ergibt sich eine wahre Rotationsgeschwindigkeit von $v_{real} \approx 256$ km/s

$$v_{real} = \frac{v_{projiziert}}{\sin i} \tag{4.5}$$

4.7.2 EW_α Langzeitmonitoring

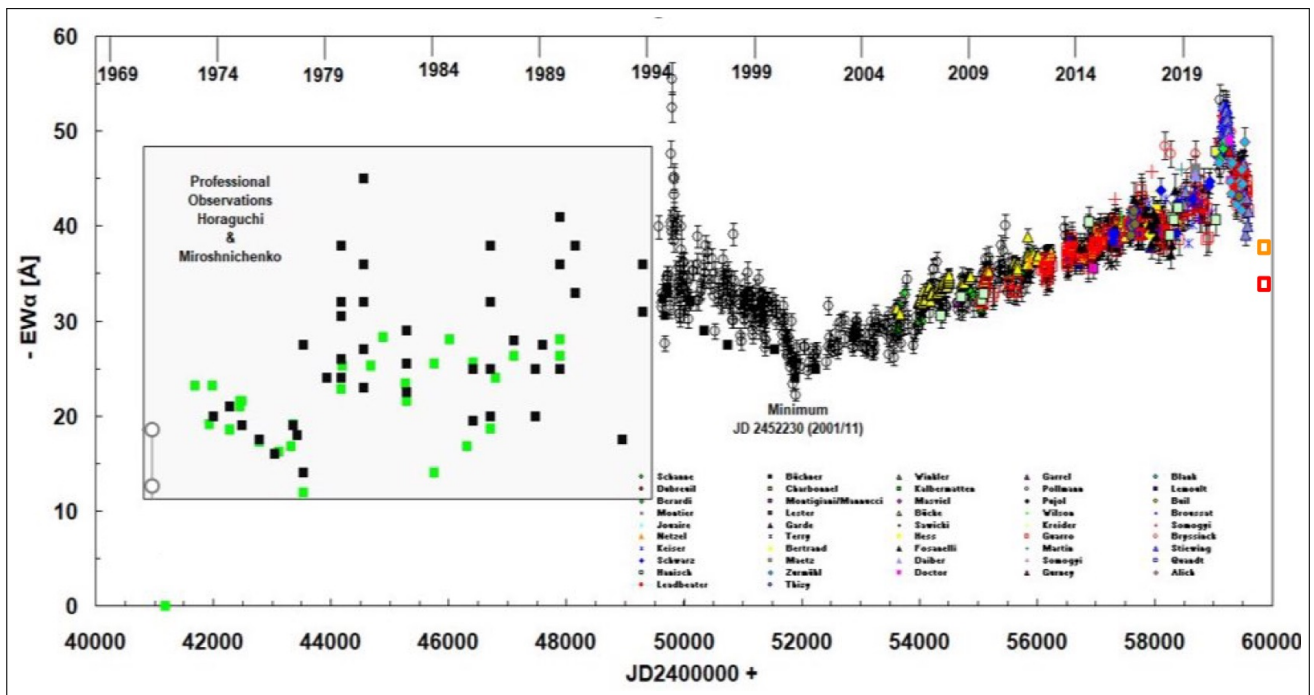


Abbildung 4.7: Langzeitmonitoring der $H\alpha$ Äquivalentbreite | Rot: Erik Stemminger am 27. Dezember 2023 | Orange: A. Stiewing am 5. Dezember 2023 [16]

Aufgetragen in einem EW_α Langzeitmonitoring zeigen meine Daten eine deutliche Abnahme der Äquivalentbreite. Wie von *G. Raww et al.* [1] beschrieben, fand in den letzten Jahrzehnten ein Massenaustausch zwischen γ Cas und seiner Gasscheibe statt, wodurch sie an Materie gewonnen hat. Zu erkennen ist dies an der Zunahme der $H\alpha$ Äquivalentbreite im Zeitraum von ca. 2001 bis 2020. In den Jahren 2020/2021 fand eine Eruption in der Scheibe statt, woraufhin ein Massenverlust folgte. Sichtbar wird dies durch den von mir ermittelten Abfall des EW_α -Werts.

Zurückzuführen ist der verzeichnete Masseverlust auf die Wechselwirkung zwischen γ Cas und seinem Begleitstern, welcher Materie der Materialscheibe entzieht [16]. In Anbetracht des Verlaufs der Äquivalentbreite liegt eine periodische Ab- bzw. Zunahme nahe. Allerdings müssten Beobachtungen aus einem größeren Zeitraum vorliegen, um eine genaue Aussage treffen zu können.

4.8 Diskussion

Zum Vergleich der Messergebnisse wurde ein hochaufgelöstes $H\alpha$ Linienspektrum der BeSS Datenbank herangezogen [5]. Aufgenommen wurde das Vergleichsspektrum am 5. Dezember 2023 von dem Amateurastronomen Albert Stiewing in den USA. Genutzt wurde ein Celestron C14 Teleskop sowie ein LHIRES III Spaltspektrograph.

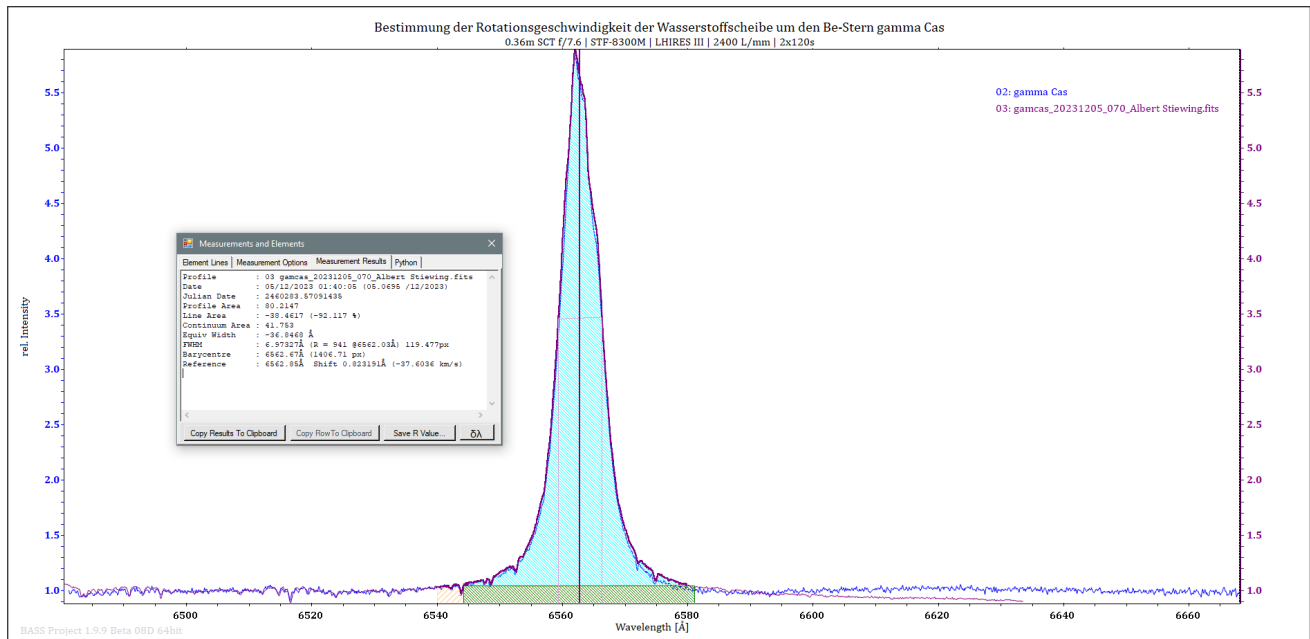


Abbildung 4.8: $H\alpha$ Spektrum von A. Stiewing [5] im Vergleich zu eigenen Ergebnissen | Lila: A. Stiewing | Blau: E. Stemming

Wie Abb. 4.8 zu sehen ist, weist meine Aufnahme nahe zu vollständige Übereinstimmung mit der Aufnahme Stiewings auf. Die Vermessung des Vergleichsspektrums ergibt eine Halbwertsbreite von $6,96\text{\AA}$ (aufgetragen in Abb. 4.7) und eine Äquivalentbreite von $-36,84\text{\AA}$. Nach Hanuschik erschließt sich eine projizierte Rotationsgeschwindigkeit von $v \sin i = 190\text{km/s}$. Die Abweichung von 7 km/s zu meinem Ergebnis ergibt sich vermutlich aus der in Faktor 3. beschriebenen Subjektivität. Dennoch sollte mein Ergebnis in Anbetracht der hohen Übereinstimmung der Spektren recht genau sein.

Der Vergleich mit dem Katalogwert (siehe Abb. 3.1) der projizierten Rotationsgeschwindigkeit zeigt eine starke Abweichung von knapp 43 km/s zu meinem Wert, obwohl keine Aufnahme- bzw. Messfehler vorliegen. Das Zustandekommen der Abweichung kann auf die folgend beschriebenen Faktoren zurückgeführt werden.

- **1. Faktor:** Differentielle Rotationsgeschwindigkeit

Die berechnete Realgeschwindigkeit der zirkumstellaren Gasscheibe stellt nur eine Abschätzung der durchschnittlichen Rotationsgeschwindigkeit der äußeren Scheibenradien dar. Da nach den Keplersgesetzen die Innenradien der Gasscheibe schneller rotieren als die Außenradien, kann eine

Geschwindigkeitsbestimmung anhand der $H\alpha$ Linie nicht auf die Bewegung des Gesamtsystems (Stern + Hülle) schließen. Um die Rotationsgeschwindigkeit der Sternoberfläche bestimmen zu können müssten Spektrallinien von Elementen herangezogen werden, welche von der Photosphäre aus emittieren bzw. absorbieren. Helium würde eine genaue Bestimmung der Rotationsgeschwindigkeit der Sternoberfläche ermöglichen.

- **2. Faktor:** Ansatz der Berechnungen stimmt nur näherungsweise
1989 fand Dr. Reinhard Hanuschik einen Zusammenhang zwischen der Halbwertsbreite von Spektrallinien und der projizierten Rotationsgeschwindigkeit von Be-Sternen und publizierte dies in dem Artikel „*Stellar v sin i and optical emission Line widths in Be Stars*“ [7]. Da er keinen genauen physikalischen Zusammenhang herleiten konnte, stellte Hanuschik eine Formel auf, welche sich dem $v \sin i$ -Medianwert einer stark streuenden Probe von 115 Be-Sternen annähert. Daher stellt die von Hanuschik publizierte Formel keine Möglichkeit der exakten Geschwindigkeitsberechnung dar. [11]
- **3. Faktor:** Subjektivität bei der Vermessung
Während des Prozesses der Vermessung wird das zu vermessende Wellenlängenintervall manuell gewählt. Dabei kann es passieren, dass aufgrund eigener Subjektivität ein Teil von den Flügeln der $H\alpha$ Linie abgeschnitten wird, sodass leicht verfälschte Messergebnisse entstehen.

Natürlich kann eine Veränderung der Rotationsgeschwindigkeit der Materialscheibe nicht ausgeschlossen werden. So ist es durchaus möglich, dass der im Jahr 1997 eingetragene Katalogwert nicht mehr aktuell ist und meine Berechnungen eine gute Annäherung an die reale Rotationsgeschwindigkeit darstellen.

4.9 Fazit und Ausblick

Rückblickend waren meine Untersuchungen am Stern γ Cassiopeiae recht erfolgreich. Der Spektrenvergleich der $H\alpha$ Emissionslinie ist von hoher Übereinstimmung geprägt. Ebenso weisen die aus unseren Aufnahmen resultierenden projizierten Rotationsgeschwindigkeiten keine starke Abweichung auf.

Mein Beitrag zum EW_α Langzeitmonitoring war ebenfalls von Erfolg. Mit meinem Messwert konnte ich nachweisen, dass sich die Äquivalentbreite der $H\alpha$ Linie verkleinert und somit ein Massenverlust der Gasscheibe stattfindet. Zwar weicht mein gemessener EW_α -Wert mit einer Differenz von $3,31\text{\AA}$ zum Vergleichswert ab, diese kann allerdings gut durch eine mögliche Fehleinschätzung gut erklärt werden.

Leider findet sich nur schwer ein aktueller Wert der Rotationsgeschwindigkeit der Gasscheibe von γ Cas. Messungsziel ist in der Regel die relative Schwankung in der Rotationsgeschwindigkeit der Sternoberfläche, weshalb die absolute Rotationsgeschwindigkeit der Materialscheibe meist unerwähnt bleibt. Zudem kann eine Massenzu- bzw. abnahme der zirkumstellaren Materialscheibe nur über einen langen Zeitraum nachgewiesen werden, weshalb Beiträge von Hobbyastronomen zu einem EW_α Langzeitmonitoring für Experten sehr hilfreich sind. Aus diesen Gründen bin ich der Meinung, dass meine Arbeit eine Bereicherung für jeden Astronomen darstellt.

Literaturverzeichnis

Bücher

- [11] Marc F.M. Trypsteen und Richard Walker. *Spectroscopy for amateur Astronomers*. 2017.
- [17] Richard Walker. *Analyse und Interpretation astronomischer Spektren*. 2013.
- [18] Richard Walker. *Spektralatlas für Amateurastronomen 5.0*. 2014.

Diplomarbeiten

- [19] Michael Winkhaus. „Bestimmung der Dichtestruktur oszillierender Be-Stern Scheiben mittels Dopplertomographie“. Astronomisches Institut der Ruhr-Universität Bochum, Feb. 1997.

Artikel

- [1] G. Rauw et al. „The relationship between Cassiopeiae’s X-ray emission and its circumstellar environment“. In: *Astronomy and Astrophysics* (12. Sep. 2012).
- [2] Ph. Stee et al. „On the inner envelope of the Be star gamma Cassiopeiae“. In: *Astronomy and Astrophysics* (19. Nov. 1997).
- [3] Y. Nazé et al. „Velocity monitoring of gamma Cas stars reveals their binarity status“. In: *monthly notices of the royal astronomical society* (3. Jan. 2022).
- [6] J. Dachs. „Kühle Gasringe um heiße veränderliche Sterne Teil.1“. In: *Sterne und Weltraum* (9. Nov. 1995).
- [7] R. Hanuschik. „Stellar V sin i and optical emission line widths in Be stars“. In: *Astrophysics and Space Science* (1. Nov. 1989).

Internetquellen

- [5] *BeSS zu gamma Cassiopeiae*. 2. Jan. 2024. URL: <http://basebe.obspm.fr/basebe/>.
- [8] *LHIRES III-Spaltspektrograph*. 29. Dez. 2023. URL: <https://www.shelyak.com/produit/spectroscope-lhires-iii/?lang=en#specifications-produit>.
- [10] *Meine Projektarbeit: Spektroskopie des Be Sterns gamma Cassiopeiae*. 3. Jan. 2024. URL: https://www.schuelerlabor-astronomie.de/wp-content/uploads/2023/06/Stemminger_Aden_gamma_Cas.pdf.
- [12] *Schmidt-Cassegrain-Teleskop-C14-EdgeHD*. 29. Dez. 2023. URL: https://www.celestron.de/ce_de/edgehd-14-ota.html.
- [15] *STF-8300M CCD-Kamera*. 29. Dez. 2023. URL: https://www.astroshop.eu/astronomical-cameras/sbig-camera-stf-8300m/p,47233#tab_bar_1_select.

Vorträge

- [16] Vortrag „Spektroskopische Portrait des Be-Sterns gamma Cas “ von Ernst Pollmann. 7. Okt. 2022.

Software

- [4] *BASS Project*. 4. Jan. 2024. URL: <https://groups.io/g/BassSpectro>.
- [9] *MaxIM DL*. 4. Jan. 2024. URL: <https://diffractionlimited.com/maxim-dl/>.
- [13] *SpecTrack*. 4. Jan. 2024. URL: <https://www.baader-planetarium.com/de/spectrack-autoguiding-software-f%C3%BCr-sternspektroskopie.html>.
- [14] *Stellarium*. 4. Jan. 2024. URL: <https://stellarium.org/>.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Die Komponenten der typischen Linienprofilen von Be-Sternen [19]	3
2.2	Emissionslinienprofile bei Inklination $i=0^\circ$ (A) $i=45^\circ$ (B) $i=90^\circ$ (C) [19]	4
2.3	Kinematische Formung der Emissionslinien durch den Dopplereffekt [19]	4
3.1	Parameter von γ Cas [2]	5
3.2	Zirkumstellare Gasscheibe in der Äquatorebene als Folge der hohen Rotationsgeschwindigkeit & Sternwinde [16]	5
3.3	Übersichtsspektrum von γ Cas im Wellenlängenbereich von 400 nm und 700 nm [10]	6
3.4	Elementverteilung in Stern und Scheibe [16]	6
3.5	Flusskalibriertes Spektrum von γ Cas mit eingefügter Planckkurve [10]	7
4.1	Celestron C14 Teleskop mit montiertem LHIRES III Spektrographen und STF-8300M CCD-Kamera	8
4.2	Aufnahmefenster mit Kameraeinstellungen, Steuerpad und Livebild der Sternwarte	9
4.3	Hochaufgelöstes Raw-Spektrum der $H\alpha$ Emissionslinie	10
4.4	Normiertes und wellenlängenkalibriertes $H\alpha$ Spektrum	10
4.5	Einstellungen des „Measurements and Elements“ Tools	11
4.6	Messung der Halbwerts- und Äquivalentbreite der $H\alpha$ Emissionslinie	11
4.7	Langzeitmonitoring der $H\alpha$ Äquivalentbreite Rot: Erik Stemming am 27. Dezember 2023 Orange: A. Stiewing am 5. Dezember 2023 [16]	13
4.8	$H\alpha$ Spektrum von A. Stiewing [5] im Vergleich zu eigenen Ergebnissen Lila: A. Stiewing Blau: E. Stemming	14

Tabellenverzeichnis

4.1	Ergebnisse der Berechnungen	12
-----	---------------------------------------	----

Danksagung

Ich möchte zunächst meine 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 möchte ich auch Herrn Winkhaus meinen Dank aussprechen. Er ermöglicht dem CFG eine umfangreiche Ausrüstung für die Astronomie.

Dem größten Dank gilt selbstverständlich Herrn Koch. Sie haben mir im vergangenen Schuljahr durch Ihren Unterricht die Astronomie nähergebracht. Ebenfalls betreuten sie mich, beantworteten Fragen und stellten uns sogar ihre private Sternwarte für Aufnahmen zur Verfügung. Auch ohne Sie wäre das Schülerlabor des CFG in dieser Form nicht denkbar.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Jugend forscht Arbeit, die im Wortlaut oder dem Inhalt nach aus anderen Werken entnommen wurden, in jedem einzelnen Fall mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Ich bin damit einverstanden, dass die von mir verfasste Jugend forscht Arbeit der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Ort, Datum:

Unterschrift:
