

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

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

Spektroskopie des Wolf-Rayet-Sterns WR136 und Fotografie des Emissionsnebels NGC 6888

Projekt-ID #106857

Vorgelegt von:

Christian Rakic (srakic72@gmail.com)
Leander Siegels (L.Siegels@web.de)

Abgabedatum:

13.01.2024

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird der Sternwind des Wolf-Rayet-Sterns WR136 im Spektralbereich 400nm bis 700nm anhand eigener Aufnahmen spektroskopisch untersucht. Dabei lässt sich aus der Analyse des Lichts mit Hilfe des Doppler-Effekts die Geschwindigkeit des Sternwindes berechnen. Des Weiteren wird die chemische Zusammensetzung des Sterns bestimmt und eine Klassifizierung vorgenommen. Parallel dazu wird der mit WR136 assoziierte Emissionsnebel NGC 6888 fotografisch im Licht des Wasserstoffs und Sauerstoffs analysiert. Dessen Morphologie wird im Zusammenhang mit der Strahlung von WR136 im Zentrum betrachtet, welche mit dem interstellaren Medium interagiert. Als Grundlage wird zusätzlich auch die Expansionsgeschwindigkeit des Nebels spektroskopisch bestimmt. Die erzielten Ergebnisse werden in Relation zu früheren Forschungsergebnissen gesetzt.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Motivation und Fragestellung | 1 |
| 2 | Hintergrund und theoretische Grundlagen | 1 |
| 2.1 | Wolf-Rayet-Sterne | 1 |
| 2.2 | Forschungsobjekte | 2 |
| 2.3 | Doppler-Effekt | 2 |
| 2.4 | Entstehung von Emissionsnebeln aus Sternhüllen | 2 |
| 2.4.1 | Rayleigh-Taylor Instabilität | 3 |
| 3 | Eigene Forschung | 3 |
| 3.1 | Aufnahme der Spektren | 3 |
| 3.2 | Fotografie von NGC 6888 | 4 |
| 3.3 | Auswertung und Ergebnisse | 5 |
| 3.3.1 | Kalibrierung und Linienidentifikation in den Spektren | 5 |
| 3.3.2 | Chemische Zusammensetzung von WR136 | 5 |
| 3.3.3 | Klassifizierung von WR136 | 6 |
| 3.3.4 | Chemische Zusammensetzung von NGC 6888 | 6 |
| 3.3.5 | Bestimmung der Sternwindgeschwindigkeit von WR136 | 7 |
| 3.3.6 | Abschätzung der Expansionsgeschwindigkeit von NGC 6888 | 8 |
| 3.3.7 | Foto von NGC 6888 | 9 |
| 4 | Vergleiche und Diskussion | 10 |
| 4.1 | WR136 | 10 |
| 4.1.1 | Chemische Zusammensetzung und Klassifizierung | 10 |
| 4.1.2 | Geschwindigkeitsmessung | 10 |
| 4.2 | NGC 6888 | 11 |
| 4.2.1 | Chemische Zusammensetzung | 11 |
| 4.2.2 | Expansionsgeschwindigkeit | 13 |
| 4.3 | Interaktion zwischen WR136 und NGC 6888 - Morphologie | 13 |
| 5 | Fazit und Ausblick | 15 |
| 6 | Danksagung | 20 |
| 7 | Selbstständigkeitserklärung | 20 |

1 Motivation und Fragestellung

Die bunten Emissionsnebel und ihre Mechanismen interessieren uns schon seit vielen Jahren. Aufbauend auf unserer letzten Arbeit [1], die im Allgemeinen die Astrofotografie von Emissionsnebeln thematisiert, in welcher uns ein forschender Teil zu Supernova-Stoßfronten sehr interessiert hatte, wollen wir nun fortführend die Mechanismen in einem Emissionsnebel detaillierter analysieren und trotzdem einen fotografischen Teil beibehalten. Nach langer Recherche ergaben sich die Sterne der Wolf-Rayet Klasse, da diese durch ihren extrem starken Sternwind sehr interessante Objekte sind, welche oftmals von Emissionsnebeln umgeben sind. Letzendlich fielen uns WR134 und WR136 ins Auge. Unsere Entscheidung fiel auf WR136, da dieser mehr Forschungspotenzial bietet, im Hinblick auf den Einfluss des Sternwindes auf den umliegenden Nebel NGC 6888. Somit bildeten wir auch das Hauptthema der Arbeit, nämlich den Einfluss des Sternwindes von WR136 auf NGC 6888. Dabei hat uns interessiert, wie schnell ein solcher Sternwind eines Wolf-Rayet Sterns ist und ob dadurch der umliegende Nebel, falls eine Interaktion mit dem Sternwind besteht, ebenfalls schnell expandiert. Wir haben uns schließlich gefragt, ob es möglich ist, dass NGC 6888 aus WR136 entstanden ist. A. Fernández-Martín *et al.* schlugen 2012 in einer Publikation vor, dass der Wasserstoff und Sauerstoff im Nebel aus der früheren O-Phase und Hyperriesen-Phase von WR136 stammt und der Sternwind nun die Materie aufwirbelt [2]. Unser Ziel ist es, diese Frage anhand Spektroskopie zur Geschwindigkeitsmessung und Fotografie zur Morphologie ebenfalls beantworten zu können.

2 Hintergrund und theoretische Grundlagen

2.1 Wolf-Rayet-Sterne

Alle Sterne mit über $8M_{\odot}$ sterben am Ende ihres Werdegangs in Form einer Supernova. Vorher blähen sie sich aufgrund der langsamer werdenden Kernfusion von Wasserstoff zu Helium, die dem Kern Gravitationsenergie verleiht, auf, da die Gravitation des Sterns an einem Punkt zu schwach wird, um die Sternhüllen zusammenzuhalten. Somit wird das Equilibrium aus Gravitations- und Gasdruck gestört und der Stern expandiert auf ein Vielfaches seiner Größe. Sterne in dieser Phase werden „Red Supergiants“, kurz RSG, genannt. Bei Sternen bis ca. $25M_{\odot}$ kollabiert nach einer Zeit der Kern durch weitere Fusionsprozesse, bei denen der Großteil des Wasserstoffs fusioniert wird, wodurch der Stern in sich zusammenfällt. Die Massen erzeugen eine hohe Energie, welche, wenn das Material auf den Kern prallt, die Sternhüllen in Form einer Supernova nach außen schleudert [1]. Sterne ab $25M_{\odot}$ durchlaufen vor dem Kernkollaps die Wolf-Rayet-Phase. In dieser ist es üblich, dass die Sterne ihren übrigen Wasserstoff in Form eines starken Sternwindes mit Geschwindigkeiten von bis zu $2000 \frac{km}{s}$ abstoßen. Somit haben die meisten WR-Sterne wenig bis gar keinen Wasserstoff mehr. Außerdem bestehen sie zum Großteil aus Helium und zum Teil aus anderen Elementen, wie Stickstoff, Sauerstoff und Kohlenstoff. WR-Sterne haben durch den schnellen Sternwind zudem eine hohe Massenverlustrate, welche oftmals $10^{-5} \frac{M_{\odot}}{yr}$ bis $10^{-4} \frac{M_{\odot}}{yr}$ betragen kann, wobei der größte Anteil des Sternwindes aus Helium besteht. Die Oberflächentemperatur eines WR-Sterns ist mit bis zu 200000 K extrem hoch. Die WR-Phase kann unterschiedlich lange anhalten. In den meisten Fällen ist ein Intervall von 200000 bis 500000 Jahren adäquat. Irgendwann jedoch wird auch das Helium aufgebraucht und der Stern endet ebenfalls durch einen Kernkollaps in einer Supernova [3].

2.2 Forschungsobjekte

Der betrachtete Stern WR136, auch HD 192163, liegt im Sternbild Schwan bei 20h13m05,4s Rektaszension und +38° 25'57,5" Deklination [4]. Für die Distanz werden sehr unterschiedliche Werte angegeben. Oft zitierte Werte liegen zwischen 4100 [2] und 6700 [5] Lichtjahren. Er gehört zu den zuvor erläuterten Wolf-Rayet-Sternen und der Spektralklasse WN6(h)-s. Seine Masse wird je nach Quelle auf 15 [2] bis 23 M_{\odot} [6] geschätzt, sein Alter auf circa 4,7 Millionen Jahre. Für die Temperatur sind Werte rund um 53 kK [7] wissenschaftlicher Konsens [8]. Ein Streitthema ist, ob WR136 ein Doppelsternsystem ist. Da es hier noch keine Einigkeit unter Astronomen gibt, wird in dieser Arbeit von einem einzelnen Stern ausgegangen. Es gilt als unbestritten, dass der umliegende Emissionsnebel NGC6888 aus abgestoßenen Schalen des Sterns aus seiner RSG-Phase besteht. Es wird jedoch vermutet, dass auch interstellare Materie einen großen Teil des Nebels ausmacht [9].

2.3 Doppler-Effekt

Der Doppler-Effekt, 1842 von Christian Doppler entdeckt, beschreibt die Verschiebung von der emittierten zu der gemessenen Wellenlänge, wenn sich Sender und Empfänger aufeinander zu oder voneinander weg bewegen. Bei Licht gibt es eine Blauverschiebung beim Aufeinanderzukommen und eine Rotverschiebung bei Entfernen voneinander. Ein Sternwind, welcher von der Erde aus betrachtet wird, bewegt sich relativ auf diese zu, weshalb zunächst bei jeder Emissionslinie des Spektrums von einer Blauverschiebung auszugehen ist. Da der Stern jedoch als nicht aufgelöste Punktquelle beobachtet wird, wird nicht nur der Sternwind gemessen, der direkt auf die Erde zukommt, sondern grundsätzlich jede radiale Geschwindigkeitskomponente. Durch diese vielen Komponenten erscheinen die Linien nicht unbedingt als stark verschoben, sondern breit. Diese Breite lässt sich am besten über die FWHM (= Full Width at Half Maximum), auch Halbwertsbreite genannt, einschätzen. Diese gibt die Breite einer Emissionslinie auf halber Höhe zwischen Maximum und Linienbasis an. Als gute Annäherung für die Geschwindigkeit von Sternwinden gilt folgende Formel:

$$v_{\infty} = \frac{FWHM}{\lambda_0} \cdot c \quad (2.1)$$

Hierbei ist $c = 299792 \frac{km}{s}$ die Lichtgeschwindigkeit und λ_0 die Ruhewellenlänge.

2.4 Entstehung von Emissionsnebeln aus Sternhüllen

Eines der wichtigsten Modelle dieser Arbeit ist das Entstehen von Emissionsnebeln um massereiche Sterne. In einer Publikation aus 1999 von *Mordecai-Mark Mac Low* [10] wird, wie in Abb. 2.1 dargestellt, solch ein Modell erläutert. Die Entstehung eines solchen Emissionsnebels beginnt bereits im Hauptreihenstadium eines Sterns. In diesem Beispiel wird ein O-Stern gezeigt, welcher für seine energiereiche UV-Strahlung bekannt ist. Genau am Ende seines Aufenthalts auf der Hauptreihe, wie zuvor erläutert, stößt er eine Wasserstoff-Hülle ab und bläht sich zu einem Hyperriesen auf (RSG-Phase). Diese dichte und langsame Hülle breitet sich bis zum Terminations-Schock,

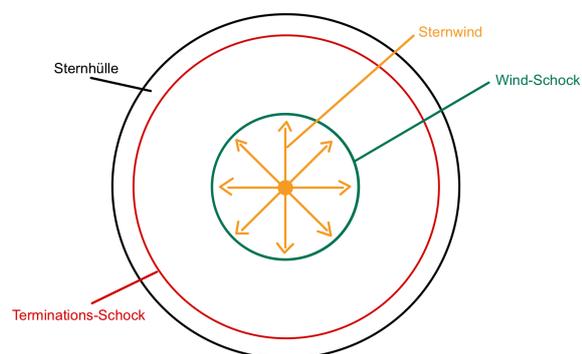


Abbildung 2.1: Entstehung eines blasenförmigen Nebels um einen Stern nach [10]

dem Anfang der Heliosphäre, also dem Bereich, in welchem interstellare Materie vom Sternwind aufgehalten wird, aus. In späteren Phasen, wie der RSG- oder gegebenenfalls Wolf-Rayet-Phase, wird der Sternwind deutlich schneller und erreicht irgendwann in Form eines Windschocks die alte Hülle, die sich am Terminations-Schock befindet.

Beim Zusammentreffen entsteht oftmals ein weiteres Phänomen, die Rayleigh-Taylor Instabilität, welche für das Entstehen der Nebelstrukturen sorgt. Dies wird im Folgenden erläutert.

2.4.1 Rayleigh-Taylor Instabilität

Die Rayleigh-Taylor-Instabilität, kurz R.T. Instabilität, ist ein wichtiges theoretisches Konzept, um die Interaktion von Sternwinden oder expandierenden Hüllen mit umliegenden Massen zu verstehen, wie beispielsweise die Entstehung von Strukturen in Emissionsnebeln. Sie entsteht oftmals bei zwei unterschiedlich dichten Gasen oder Sternwinden. In einer Veranschaulichung soll ein Teil eines dichten Gases die Masse m_1 besitzen, wobei ein anderer Teil eines weniger dichten Gases die Masse m_0 aufweist. Es gilt somit $m_0 < m_1$, wobei beide Teile des jeweiligen Gases das selbe Volumen haben. Nun werden beide Teile jeweils in das andere Gas ausgetauscht und die potenzielle Energie $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$ des Systems betrachtet. Hierbei stellt g die Gravitationsbeschleunigung und h die Höhe zum Nullniveau dar. Im ersten Fall (Abb. 2.2), der die Situation vor dem Austausch illustriert, setzt sich die potenzielle Energie wie folgt zusammen:

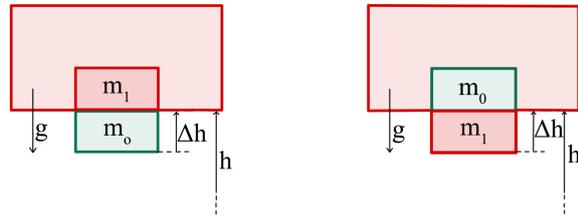


Abbildung 2.2: Rayleigh-Taylor Instabilität nach [10]

Werden nun die beiden Teile getauscht, ergibt sich:

$$E_{pot(1)} = m_1 \cdot g \cdot h + m_0 \cdot g \cdot (h - \Delta h) \quad (2.2)$$

Werden nun die beiden Teile getauscht, ergibt sich:

$$E_{pot(2)} = m_0 \cdot g \cdot h + m_1 \cdot g \cdot (h - \Delta h) \quad (2.3)$$

Da $m_0 < m_1$ und $h > (h - \Delta h)$, gilt ebenfalls $E_{pot(1)} > E_{pot(2)}$. Durch das Reduzieren der potenziellen Energie wächst schließlich das Vermischen und Aufwirbeln der Gase exponentiell [10]. Dies ist insgesamt der Prozess, welcher die Strukturen in Emissionsnebeln erzeugt.

3 Eigene Forschung

3.1 Aufnahme der Spektren

Die Spektroskopie wird allgemein als Zerlegung des Lichts in seine Wellenlängen definiert. Dies kann unter anderem mit einem optischen Gitter erfolgen, wie in dieser Arbeit. Der verwendete Spektrograph ist ein DADOS Spalt-Spektrograph mit einem optischen Gitter von $300 \frac{\text{Linien}}{\text{mm}}$ [11]. Die Aufnahmen erfolgten am Abend des 17.12.2023 ferngesteuert an der Sternwarte von Bernd Koch im Westerwald und wurden über die Software Stellarium geplant [4]. Wie in Abb. 3.1 zu erkennen ist, wurden ein 0,35m Schmidt-Cassegrain Teleskop [12], der DADOS Spaltspektrograph, eine NexImage BurstM Nachführkamera [13] und eine STF-8300M CCD-Kamera verwendet [14].



Abbildung 3.1: Aufbau des Spektrographen in der Sternwarte von Bernd Koch

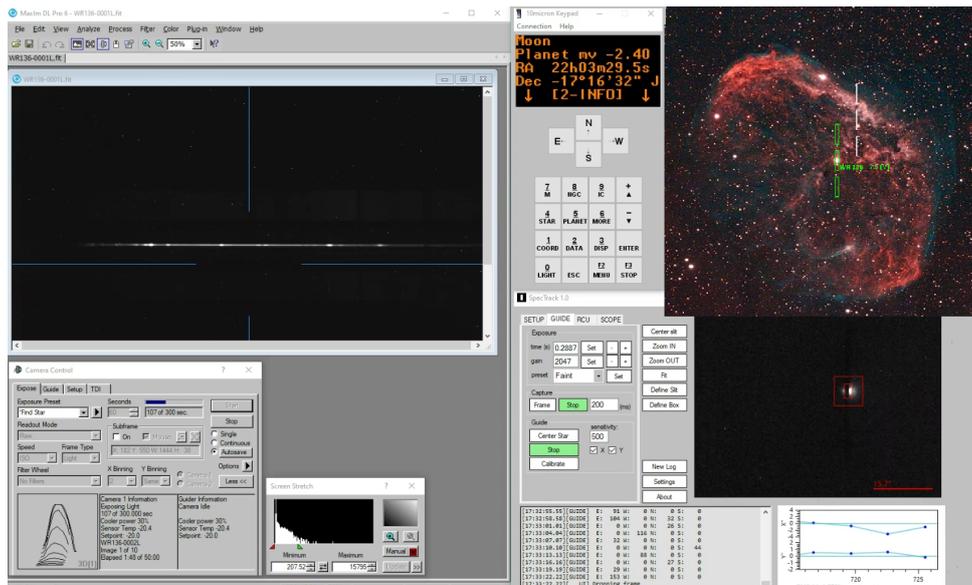


Abbildung 3.2: Ansicht der Aufnahme der Spektren; Von links nach rechts: Aufgenommenes Einzelspektrum in *MaxImDL* [15] | Teleskopsteuerung | Visualisierung zur Position der Spalte des Spektrographen; Dicke der Spalte von oben nach unten: $50\mu\text{m}$, $25\mu\text{m}$ und $35\mu\text{m}$ | Aufnahmesteuerung in *MaxImDL* | Helligkeitshistogramm für die Spektren | Guiding-Software und Spaltansicht in *SpecTrack* [16]

Es wurde ein automatisches Guiding vorgenommen, welches das Teleskop steuern kann, um den Stern genau im Spalt des Spektrographen zu halten. Die Einzelaufnahme des Spektrums von WR136 zeigt bereits sehr breite Emissionslinien. Die durchgehenden Linien oberhalb und unterhalb des Spektrums sind ursächlich der Lichtverschmutzung zuzuschreiben. Da der mittlere, $25\mu\text{m}$ breite, Spalt über den Stern gelegt wurde, wurde auch nur dieser für die Auswertung genutzt. Insgesamt wurden für WR136 zwölf Spektren mit je 300 Sekunden Belichtungszeit und für NGC 6888 18 Spektren mit je 600 Sekunden Belichtungszeit aufgenommen, welche im Anschluss mit zusätzlich aufgenommenen Dark- und Flatframes in *MaxImDL* [15] gestackt wurden. Dark- und Flatframes dienen dazu, das Kamerarauschen zu minimieren und Abschattungen im optischen System zu eliminieren. Stacking bezeichnet den Prozess des Übereinanderlegens der Einzelaufnahmen, wobei die jeweiligen Intensitäten addiert und Fehler dividiert werden.

3.2 Fotografie von NGC 6888

Um besser auf die Morphologie des umliegenden Nebels NGC 6888 schließen zu können, wurde das Objekt zusätzlich fotografisch analysiert. Die Aufnahme der Fotos erfolgte bereits am 25.09.2023 in der Sternwarte des CFG. Verwendet wurden der TEC APO 160 FL Refraktor [17], eine ZWO ASI 2600MC Pro als Farbkamera [18] und zwei Schmalband Nebelfilter von Askar [19]. Einer der Filter lässt $\text{H}\alpha$ + [OIII] - Licht durch, wobei der andere [SII] + [OIII] - Licht durchlässt. Die Durchlassbreite pro Linie beträgt 6mm. Die Filter sorgen außerdem dafür, dass störendes Licht, wie die Lichtverschmutzung oder das Mondlicht, gar nicht erst durchgelassen werden, wodurch die ausgewählten Elemente besser zur Geltung kommen. Insgesamt wurde der Emissionsnebel zwei Stunden belichtet, wobei eine Einzelaufnahme 120 Sekunden belichtet wurde. Nach 30 Aufnahmen, also einer Stunde Belichtung mit dem ersten Filter, wurde auf den zweiten Filter per Filterrad [20] gewechselt. Gesteuert wurden



Abbildung 3.3: Aufbau des Teleskops in der Sternwarte des CFG

die Aufnahmen über die Software *Nighttime Imaging 'N' Astronomy*, kurz *N.I.N.A.* [21]. Anschließend wurden auch hier Dark- und Flatframes aufgenommen, um Hintergrundrauschen und Fehler im optischen System beim Stacking rausrechnen zu können.

3.3 Auswertung und Ergebnisse

3.3.1 Kalibrierung und Linienidentifikation in den Spektren

Das gestackte Spektrum wurde zunächst zurechtgeschnitten und gedreht, um mit der Kalibrierung beginnen zu können. Unter der Kalibrierung lässt sich verstehen, dass die Einheit der X-Achse in Pixel zu einer Wellenlängen-Achse transformiert wird. Dazu werden Referenz-Spektren verwendet, wie beispielsweise ein Tageslichtspektrum, ein Neon-Argon-Spektrum, oder, wie in diesem Fall, ein WR136-Spektrum aus dem Spektral Atlas von Richard Walker [3]. Es wurden die Emissionslinien aus dem aufgenommenen Spektrum mit den Linien aus dem Spektral Atlas verglichen und somit konnten einzelne Linien schließlich benannt werden, woraus das Programm *BASS Project* [22] die X-Achse in der Wellenlängen-Einheit Ångström [Å] kalibriert. Nun können nach dem Entfernen des Kontinuums, welches in Abb. 3.4 grün eingezeichnet ist, die Emissions- und Absorptionslinien identifiziert und benannt werden. Der für NGC 6888 zum Guiding verwendete Stern, der in Abb. 3.2 im mittleren Spalt zu erkennen ist, musste bei der Auswertung herausgeschnitten werden, da dieser sonst das Ergebnis verfälscht hätte.

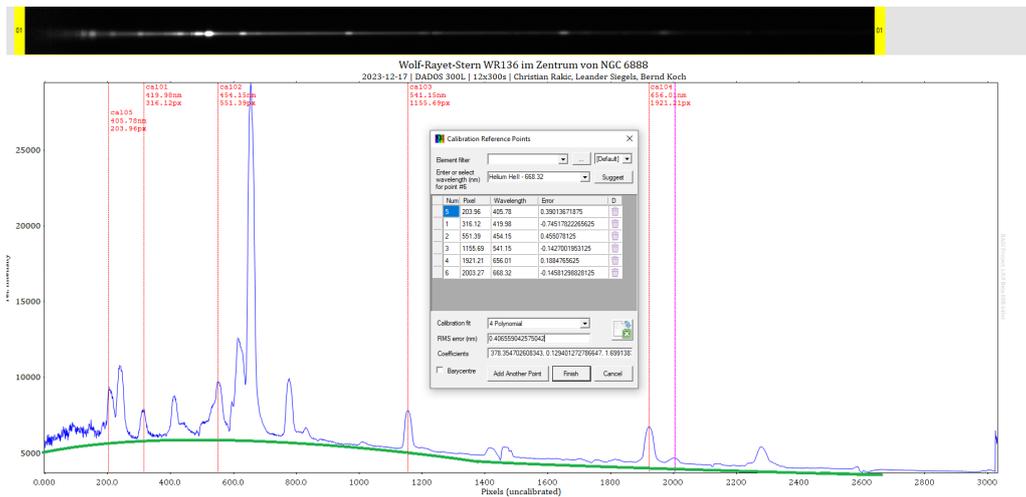


Abbildung 3.4: Wellenlängenkalibrierung des WR136-Spektrums

3.3.2 Chemische Zusammensetzung von WR136

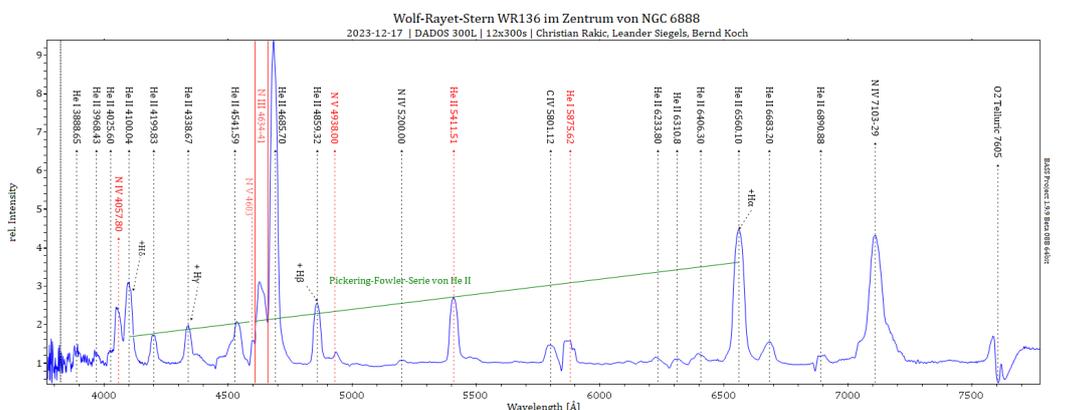


Abbildung 3.5: Endergebnis des Spektrums von WR136 | 12x300s belichtet

Anhand dieses Ergebnisses lässt sich zunächst die chemische Zusammensetzung von WR136 erschließen. Helium ist weitaus das dominanteste Element in dem Stern, wobei die in Abb. 3.5 eingezeichnete Pickering-Fowler-Serie von He II entsteht, die unter anderem zur Klassifizierung von WR136 dient. Außerdem sind einige Emissionen schwerer Gase vorhanden, wie Stickstoff N III, N IV, N V und Kohlenstoff C IV. Der Überhang einzelner Emissions-Intensitäten aus der Pickering-Fowler-Serie beweist, dass im Stern Wasserstoff vorliegen muss. Dies wird jedoch später ausführlicher diskutiert. Die Absorptionslinie bei 7605 Å gehört nicht zu WR136, sondern ist das Produkt der O₂-Moleküle in der Erdatmosphäre, die einen Teil des Lichts absorbieren.

3.3.3 Klassifizierung von WR136

Aufgrund der vorhandenen Stickstoff-Emissionen gehört WR136 eindeutig zur Stickstoffsequenz der Wolf-Rayet-Sterne. Laut einer Arbeit aus 1965, *W. A. Hiltner; R. E. Schild* [23], handelt es sich bei WR136 um einen Stern der Klasse WN6. Als Kriterien werden in dieser Arbeit das Verhältnis $\frac{\text{He I}(\lambda 5875)}{\text{He II}(\lambda 5411)} = 0,5$ und eine hohe Intensität in dem Bereich von 4600 Å bis 4660 Å neben der starken He II-Emission bei 4685.70 Å genannt. Nachgerechnet liegt das Verhältnis dieser bei $\frac{1,5088}{2,8808} \approx 0,524 \approx 0,5$. In aktuelleren Arbeiten häufiger zitiert werden die 1968 von *Lindsey F. Smith* aufgestellten Kriterien [24]. So sollten bei WN6 Sternen die N III-Emission bei 4634-41 Å vorhanden sein. Außerdem sollten die N III- und N IV-Emissionen ungefähr gleich sein, was später revidiert wurde. So sollte bei WN6 gelten: $1 > \frac{\text{N IV}(\lambda 4058)}{\text{N III}(\lambda 4634-41)} > 0,4$ [25]. Bei uns beträgt das Verhältnis $\frac{2,4578}{3,1156} \approx 0,789$. Als drittes Kriterium wird eine schwache aber präsenste N V-Emission genannt. Diese ist bei 4838 Å, aber auch angedeutet bei 4603 Å, zu erkennen. Somit decken sich unsere Nachforschungen mit den professionellen Ergebnissen und auch in dieser Arbeit lässt sich WR136 als WN6 Stern klassifizieren. Damit gehört der Stern noch zu den WNE-Sternen, also zur frühen Phase der Entwicklung von Wolf-Rayet-Sternen. Genauer muss der Stern dank der vergleichsweise starken Emissionslinien als WN6-s Stern eingestuft werden. Das -s steht hier für das englische Wort *strong*. Da nur Emissionslinien im Spektrum enthalten sind, wird auf ein *a* für *absorption* verzichtet [7].

3.3.4 Chemische Zusammensetzung von NGC 6888

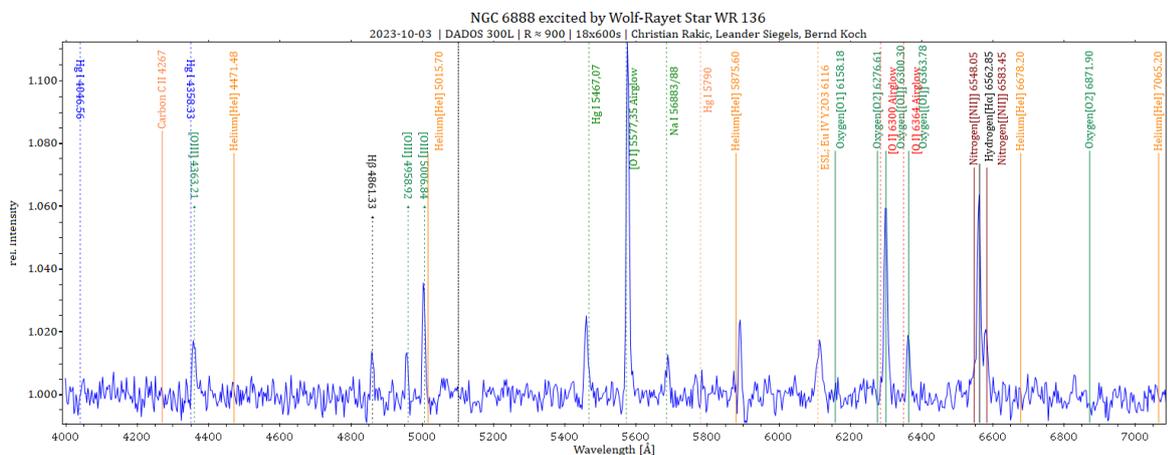


Abbildung 3.6: Endergebnis des Spektrums von NGC 6888 | 18x600s belichtet

Das Spektrum liefert als dominanteste Elemente Sauerstoff O I, O 2, O I, [O II], [O III], Wasserstoff H α , H β , H γ und Stickstoff [N II]. Außerdem sind einige Emissionen von Helium He I zu erkennen. Diese und einige Sauerstoff-Emissionen werden ebenfalls später ausführlicher diskutiert.

3.3.5 Bestimmung der Sternwindgeschwindigkeit von WR136

Die allgemeine Annäherung der Sternwindgeschwindigkeit basiert, wie zuvor erläutert, auf dem Doppler-Effekt und wird mit folgender Formel berechnet:

$$v_{\infty} = \frac{FWHM}{\lambda_0} \cdot c \quad (3.1)$$

Die gemessene Halbwertsbreite (FWHM) einer Linie von WR136 muss um die Halbwertsbreite einer schmalen Linie der Neon-Referenzlampe mit natürlicher Linienbreite mit folgender Formel korrigiert werden:

$$FWHM_{korrigiert} = \sqrt{FWHM_{gemessen}^2 - FWHM_{Spektrograph}^2} \quad (3.2)$$

Um nun die Werte für $FWHM_{Spektrograph}$ bestimmen zu können, wurde ein ruhendes Neon-Argon-, kurz NeAr, Spektrum einer Kalibrierlampe [26] aufgenommen. Auch hier war zur Kalibrierung des Spektrums ein Referenzspektrum aus dem Spektral Atlas vorliegend [3].

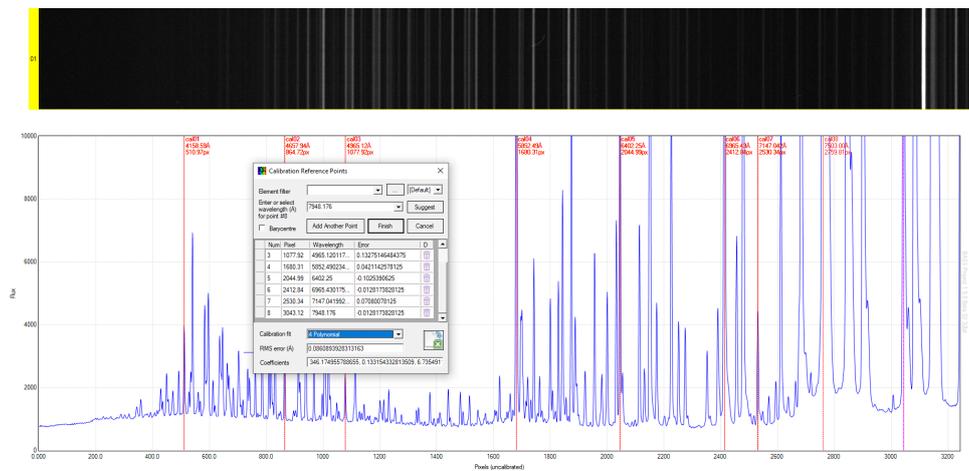


Abbildung 3.7: Wellenlängenkalibrierung des NeAr-Spektrums

| Messung der FWHM-Werte anhand des NeAr-Referenzspektrums | | | |
|--|----------------|-------------|---------|
| NeAr λ/Å | NeAr FWHM/Å | NeAr λ/Å | R |
| 4060,00 | 6,45 | 4060,00 | 629,00 |
| 4120,00 | 6,05 | 4120,00 | 680,00 |
| 4630,00 | 5,89 | 4630,00 | 787,00 |
| 4840,00 | 6,39 | 4840,00 | 758,00 |
| 4900,00 | 5,21 | 4900,00 | 941,00 |
| 5393,00 | 5,34 | 5393,00 | 1010,00 |
| 5550,00 | 5,72 | 5550,00 | 971,00 |
| 6075,00 | 6,51 | 6075,00 | 934,00 |
| 6337,00 | 7,15 | 6337,00 | 887,00 |
| 6560,00 | 7,85 | 6560,00 | 836,00 |
| 6600,00 | 7,43 | 6600,00 | 889,00 |
| 7212,00 | 6,76 | 7212,00 | 1067,00 |
| 7950,00 | 7,46 | 7950,00 | 1066,00 |

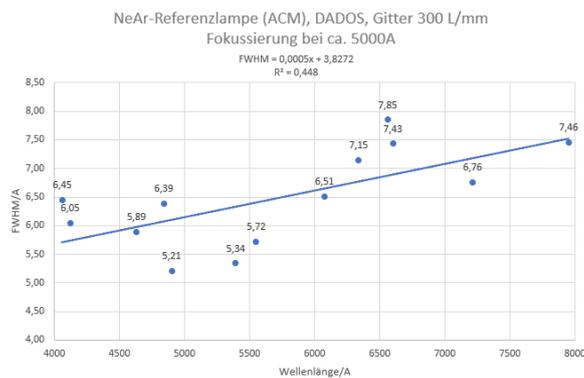


Abbildung 3.8: Messung der FWHM-Werte in Abhängigkeit der Wellenlänge bei der NeAr-Lampe

Ein weiterer Zwischenschritt, der erfolgte, ist das Bestimmen einer linearen Funktion, welche die FWHM-Werte der NeAr-Lampe in Abhängigkeit der Wellenlänge beschreibt (Abb. 3.8). Diese wird benötigt, da die Spektren der NeAr-Lampe und von WR136 nicht dieselben Emissionslinien aufweisen, woran FWHM-Werte gemessen werden können. Somit wurden einzelne Wellenlängen des NeAr-Spektrums ausgewählt, an denen jeweils der FWHM-Wert gemessen wurde. Die bestimmte Funktion lautet also $FWHM_{Spektrograph}(\lambda) = 0,0005\lambda + 3,8272$ [Å].

Nun konnten schließlich mehrere Werte für v_{∞} berechnet werden, indem zunächst einige Emissionslinien von Helium He II ausgewählt wurden. Bei diesen wurde jeweils die dazugehörige Halbwertsbreite mithilfe von *BASS Project* errechnet.

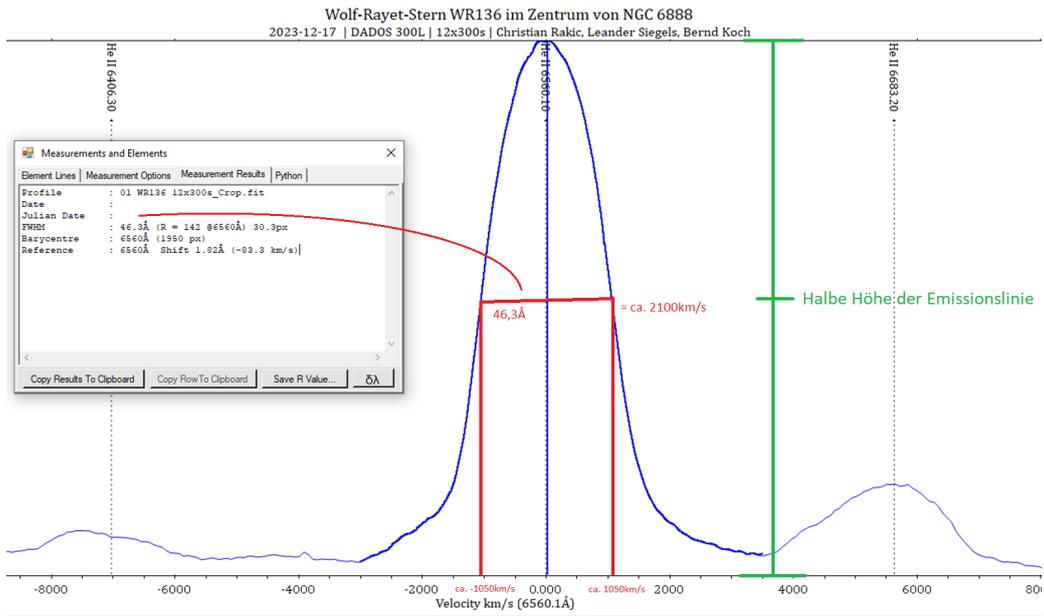


Abbildung 3.9: Halbwertsbreite der He II-Emission bei 6050,10 Å im Spektrum von WR136

Berechnung der Geschwindigkeit des Sternwindes von WR136

| WR136 | WR136 | WR136 | NeAr | WR136 korrigiert | Sternwind v [km/s] | WR136 | WR136 | WR136 | WR136 | NeAr | WR136 korrigiert | Sternwind v [km/s] |
|---------|--------|---------|----------|------------------|--------------------|------------|--------|---------|----------|----------|--------------------|--------------------|
| Element | λ, nm | λ, Å | FWHM [Å] | FWHM [Å] | | Element | λ, nm | λ, Å | FWHM [Å] | FWHM [Å] | | |
| He I | 388,87 | 3888,65 | | 5,77 | | N IV | 520,00 | 5200,00 | | 6,43 | | |
| He II | 396,84 | 3968,43 | | 5,81 | | He II | 541,15 | 5411,51 | 34,70 | 6,53 | 34,08 | 1888 |
| He II | 402,56 | 4025,60 | | 5,84 | | C IV | 580,11 | 5801,12 | | 6,73 | | |
| N IV | 405,78 | 4057,80 | | 5,86 | | He I | 587,56 | 5875,62 | | 6,77 | | |
| He II | 410,00 | 4100,04 | 23,10 | 5,88 | 22,34 | 1633 He II | 623,38 | 6233,80 | | 6,94 | | |
| He II | 419,98 | 4199,83 | 25,80 | 5,93 | 25,11 | 1792 He II | 640,63 | 6406,30 | | 7,03 | | |
| He II | 433,87 | 4338,67 | 25,30 | 6,00 | 24,58 | 1698 He II | 656,01 | 6560,10 | 46,30 | 7,11 | 45,75 | 2091 |
| He II | 454,16 | 4541,59 | | 6,10 | | He II | 668,32 | 6683,20 | 45,30 | 7,17 | 44,73 | 2006 |
| N III | 463,44 | 4634,40 | | 6,14 | | He II | 689,09 | 6890,88 | | 7,27 | | |
| He II | 468,57 | 4685,70 | 29,10 | 6,17 | 28,44 | 1819 | | | | | | |
| He II | 485,93 | 4859,32 | 30,80 | 6,26 | 30,16 | 1861 | | | | | | |
| N V | 493,33 | 4933,30 | | 6,29 | | | | | | | Mittelwert v | 1848 |
| N V | 493,44 | 4934,40 | | 6,29 | | | | | | | Standardabweichung | 141 |
| | | | | | | | | | | | Katalogwert | 1750 |

Abbildung 3.10: Tabelle zur Berechnung des Mittelwerts der Sternwindgeschwindigkeit von WR136

Für jede der neun ausgewählten Linien wurde eine Geschwindigkeit errechnet. Aus diesen Ergebnissen wurde ein Mittelwert von $1848 \frac{km}{s}$ mit einer Standardabweichung von $141 \frac{km}{s}$ ermittelt.

3.3.6 Abschätzung der Expansionsgeschwindigkeit von NGC 6888

Aufgrund der vergleichsweise geringen Auflösung des DADOS - Spektrographen ist es nicht möglich, die Expansionsgeschwindigkeit von NGC 6888 über die Halbwertsbreite zu bestimmen. Genauer gesagt, sind die Emissionslinien der langsamen Expansionsgeschwindigkeit annähernd so breit, wie die Linien der Kalibrierlampe, weshalb die Linien für ein Verfahren, wie bei den Sternwinden, zu schmal sind. Zuvor wurde noch die Geschwindigkeitskomponente der Erde um die Sonne von, zum Zeitpunkt der Aufnahme, ca. $-14 \frac{km}{s}$ herausgerechnet.

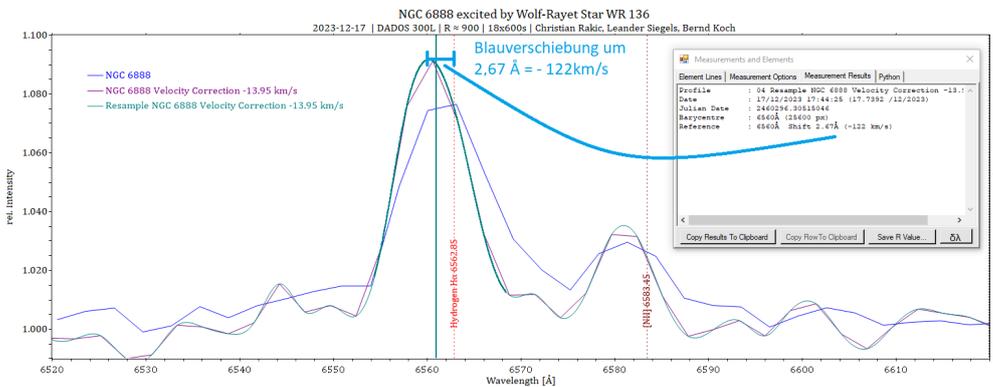


Abbildung 3.11: Radialgeschwindigkeit von NGC 6888 an der H α -Emission bei 6562,85 Å

Es musste eine Annäherung durchgeführt werden, die auf der Radialgeschwindigkeit basiert. In diesem Fall ist, wie in Abb. 3.11 zu sehen ist, das Spektrum an allen Stellen blauverschoben, wobei einzelne Stellen mehr ins Blaue verschoben sind, als andere Stellen. Diese Verschiebung, nach dem Doppler-Effekt, impliziert, dass sich das beobachtete Medium auf den Beobachter zubewegt, kann gemessen werden und anschließend in eine Geschwindigkeit umgerechnet werden. Bei der $H\alpha$ -Emission ist eine Blauverschiebung von $2,67 \text{ \AA}$ zu messen, welche sich zu $-122 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ umrechnen lässt.

| Annäherung der Expansionsgeschwindigkeit von NGC 6888 | | | | | | |
|---|------------------------------|------------------------------|--|---|------------------|----------|
| Element | Wellenlänge [\AA] | Radialgeschwindigkeit [km/s] | Kalibrierfehler $\Delta\text{HRV} = c \cdot \Delta\lambda/\lambda$ [km/s] | HRV - WR136 Radialgeschwindigkeit [km/s] | Expansion [km/s] | NGC 6888 |
| [NII] | 6583,45 | -115 | 4,55 | -100,00 | -15,00 | -15,00 |
| H-alpha | 6562,85 | -122 | 4,57 | -100,00 | -22,00 | -22,00 |
| [OIII] | 5006,84 | -156 | 5,99 | -100,00 | -56,00 | -56,00 |
| [OIII] | 4958,92 | -174 | 6,05 | -100,00 | -74,00 | -74,00 |
| H-beta | 4861,33 | -191 | 6,17 | -100,00 | -91,00 | -91,00 |
| Mittelwert | | -152 | 5,46 | | -52 | -52 |
| Standardabweichung | | 29 | | | 29 | 29 |
| Katalogwert | | | | | | -50 |

Abbildung 3.12: Tabelle zur Abschätzung eines Mittelwerts der Expansionsgeschwindigkeit von NGC 6888

Insgesamt wurden fünf verschiedene Emissionslinien vermessen und somit konnte ein Mittelwert der Radialgeschwindigkeit von $-152 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ mit einer Standardabweichung von $\pm 29 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ errechnet werden. Eine letzte Annäherung basiert auf der Radialgeschwindigkeit von WR136, da sich dieser, und somit auch NGC 6888, mit einer gewissen Geschwindigkeit durch das Universum bewegen. Laut der Datenbank von SIMBAD [27] liegt die Radialgeschwindigkeit von WR136 bei $-100 \frac{\text{km}}{\text{s}}$, bewegt sich also auf die Erde zu. Diese musste lediglich von der gemessenen Radialgeschwindigkeit von NGC 6888 subtrahiert werden, um eine Abschätzung für die Expansionsgeschwindigkeit des Nebels zu erhalten.

3.3.7 Foto von NGC 6888

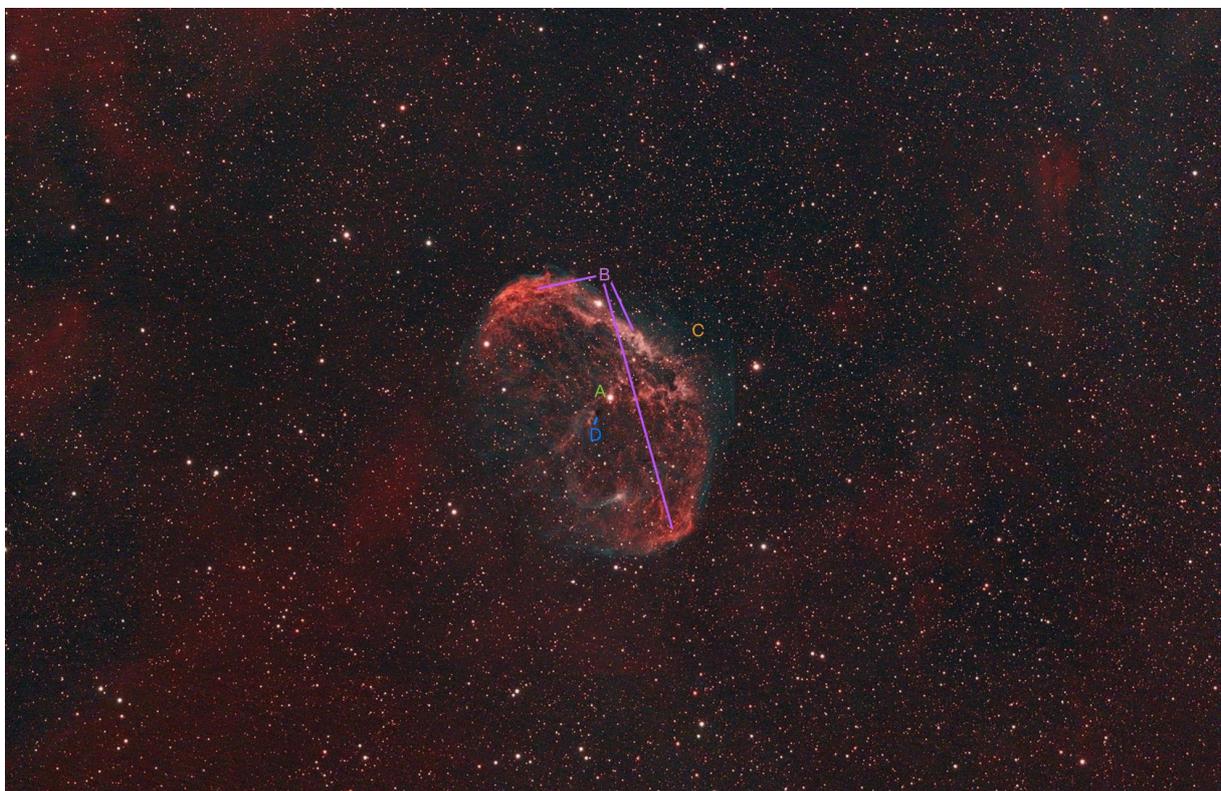


Abbildung 3.13: NGC 6888 Endergebnis | Gesamtbelichtungszeit: 120 Minuten | $H\alpha$ + [OIII] 30x120s | [SII] + [OIII] 30x120s | Die benannten Orte dienen der späteren Diskussion

Die Nachbearbeitung der Aufnahmen erfolgte erneut mit Dark- und Flatframes, die zum Stacking der Einzelaufnahmen hinzugefügt wurden. Für das Stacking wurde die Software *DeepSkyStacker* [28], welche für Astrofotografie spezialisiert ist, genutzt. Das gestackte Bild wurde zur Tonwertkorrektur schließlich mit *Photoshop* [29] angepasst.

4 Vergleiche und Diskussion

4.1 WR136

4.1.1 Chemische Zusammensetzung und Klassifizierung

Grundsätzlich lässt sich mit dem erzielten Spektrum der Beweis für alle benannten, vorhandenen Elemente bringen. Die für die Klassifizierung sehr wichtigen Stickstofflinien, aber auch die Kohlenstofflinien, lassen sich bestimmen. Auch die Pickering-Fowler-Serie der Heliumemissionen ist klar zu erkennen. An den He II-Linien bei $4100,04 \text{ \AA}$, $4338,67 \text{ \AA}$, $4859,32 \text{ \AA}$ und $6560,10 \text{ \AA}$ scheint es als wären die Emissionen im Vergleich zur restlichen Serie zu intensiv. Dieses Phänomen ist jedoch auch in jedem professionellen Spektrum bis zu einer gewissen Auflösung zu sehen.

Der Grund ist erkennbar, wenn die Linien der Pickering-Fowler-Serie von He II mit der Balmer-Serie des Wasserstoffs übereinandergelegt werden. An den zuvor genannten Wellenlängen liegen in unmittelbarer Nähe zur Heliumemission auch Wasserstofflinien. Dies liegt an dem ähnlichen Aufbau von Helium- und Wasserstoffatomen. Bei niedrig aufgelösten Spektren, wie unserem, scheinen diese Linien übereinander zu liegen und addieren sich [30]. Trotzdem wurde sich für die richtige Auflösung entschieden, da aufgrund der Breite des Spektrum eine eindeutige Klassifizierung möglich ist. Diese stimmt sehr genau mit den bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnissen und Vorgaben überein [23][24][25]. Des Weiteren konnte, wie im Folgenden erläutert, eine akkurate Geschwindigkeitsmessung vorgenommen werden.

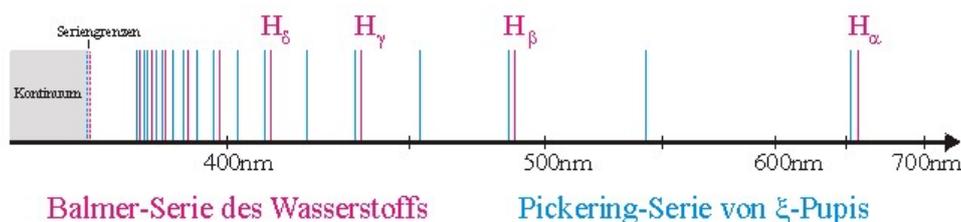


Abbildung 4.1: Pickering-Fowler-He II-Serie und Balmer-H-Serie [31]

4.1.2 Geschwindigkeitsmessung

Für die Geschwindigkeit des Sternwindes von WR136 finden sich in den neusten wissenschaftlichen Arbeiten Werte von 1550 bis $1750 \frac{km}{s}$ [30][32][6]. Mit der Standardabweichung von $141 \frac{km}{s}$ liegt der in dieser Arbeit ermittelte Wert in dem angegebenen Bereich und ist somit zunächst als Erfolg zu werten. Trotzdem lässt sich über den generell vergleichsweise hohen Wert der Geschwindigkeit, aber auch der

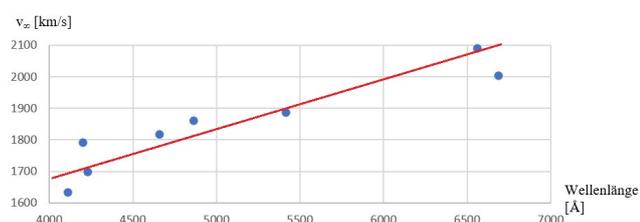


Abbildung 4.2: Sternwindgeschwindigkeit v_{∞} abhängig von WR136 der jeweiligen Wellenlängen

großen Standardabweichung diskutieren. Bei näherer Betrachtung der Ergebnisse einzelner Wellenlängen zeigt sich ein Trend. Bei höheren Wellenlängen wurden auch höhere Sternwindgeschwindigkeiten festgestellt. Am nächsten liegt hier also ein nicht allzu gravierender Messfehler. In Abb 3.8 ist bereits eine relativ große Streuung der FWHM bei der Referenzlampe zu erkennen. Aufgrund dieser Messungenauigkeiten ist davon auszugehen, dass die Ausgleichsgerade ebenfalls leicht ungenau ist, weshalb dieser wenig signifikante, aber auffällige, Fehler im Endergebnis auftaucht. Außerdem lässt sich darüber diskutieren, wie akkurat Messungen an den zuvor erläuterten, kombinierten Linien aus der Balmer- und der Pickering-Serie sind, da diese breiter sein sollten als reine Helium-Emissionen. An diesen Wellenlängen sind jedoch keine ungewöhnlichen Werte der Geschwindigkeit zu erkennen, weshalb der Einfluss minimal ist.

4.2 NGC 6888

4.2.1 Chemische Zusammensetzung

Die gefundenen Elemente aus dem erzielten Ergebnis (Abb. 3.6) decken sich nur in gewisser Hinsicht mit Spektren der professionellen Astronomie. Während auch diese Spektren starke Wasserstoff- und Sauerstoff- und Stickstoff-Emissionen zeigen, gibt es im erzielten Spektrum einige gravierende Ausreißer, wie die dominierende OI-Emission bei $5577,35 \text{ \AA}$, einige andere Sauerstoff-Emissionen im Bereich von 6100 \AA bis 6400 \AA oder die Eu IV-, Europium, Emission bei 6116 \AA .

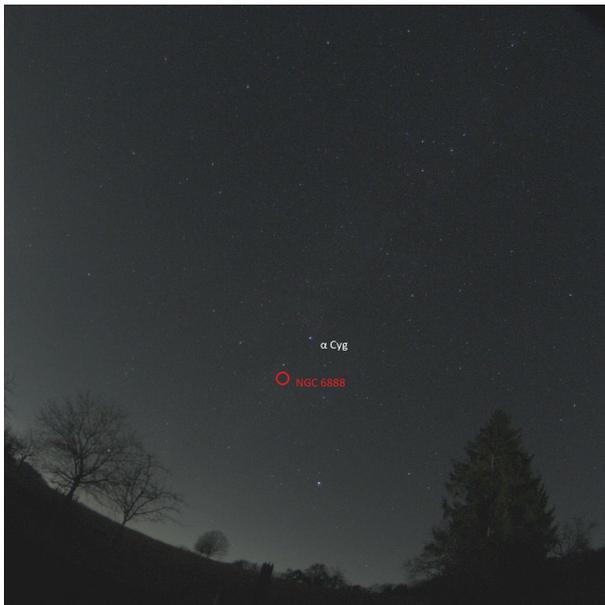


Abbildung 4.3: Position von NGC 6888 zu Beginn der Aufnahme



Abbildung 4.4: Position von NGC 6888 gegen Ende der Aufnahme

Erklären lässt sich dies mit der Lichtverschmutzung und dem atmosphärischen Leuchten des Sauerstoffs. Das sogenannte „Airglow“ bezeichnet das Leuchten von atomarem Sauerstoff in etwa 90 bis 100 km Höhe in der Atmosphäre der Erde, welcher vom UV-Licht der Sonne angeregt wird [33]. So ist unter anderem die starke OI-Emission bei $5577,35 \text{ \AA}$ zu begründen, sowie die OI-Emissionen im Bereich von 6100 \AA bis 6400 \AA . Anschließend ist es wichtig, sich auf die Aufnahmen aus Abb. 4.3 und 4.4 zu beziehen, die mit einer Allsky-Kamera während der Aufnahme der Spektren gemacht wurden. Wie zu erkennen ist, befand sich NGC 6888 zu Beginn der Spektroskopie noch weit über dem Horizont, wodurch die nicht zu vermeidende Lichtverschmutzung, die den Horizont aufhellt, kein Problem darstellte. Jedoch bewegte sich NGC 6888 vor allem in den letzten Aufnahmen nah an den Horizont. Dies erklärt die der Lichtverschmutzung zuzuordnenden Linien von Eu IV bei 6116 \AA , erzeugt durch Energiesparlampen, Hg I, Quecksilber, bei $4046,56 \text{ \AA}$, $4358,33 \text{ \AA}$, $5467,07 \text{ \AA}$, 5790 \AA und Na I, Natrium, bei $5688,3 \text{ \AA}$.

Ein weiteres Element, welches im Spektrum nicht sicher zu identifizieren ist, aber in geringen Mengen im Nebel präsent ist, ist ionisierter Schwefel [SII]. Dieser war bei der Recherche nach geeigneten Forschungsobjekten der ausschlaggebende Faktor zur Filterwahl, jedoch ist dieser im Spektrum nicht klar vom Rauschen zu unterscheiden (Abb. 4.5). Nach einigen Überlegungen wurde klar, dass der Schwefel nicht im gesamten Nebel überall vorhanden und gleichmäßig verteilt ist, sondern in einigen Teilen präsenter ist als in anderen. Abb. 4.6 ist eine Aufnahme, welche den Nebel im Licht von [SII] zeigt. Zuvor wurden jeweils die Einzelaufnahmen, wie zuvor beschrieben, gestackt und somit erhielten wir je eine gestackte Aufnahme zu beiden Filtern heraus. Die Aufnahme im Licht von [OIII] + [SII] wurde in *Photoshop* eingefügt und nur der rote Farbkanal, welcher dem Schwefel zuzuordnen ist, war somit sichtbar. Es zeigt sich, dass zwar Schwefel vorhanden ist, jedoch an den Schockfronten im Nordwesten und Südosten präsenter, als an der spektroskopierten Stelle ist (siehe Abb. 4.6).

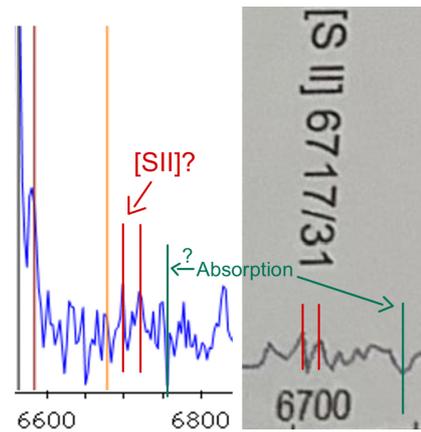


Abbildung 4.5: Angedeuteter Schwefel im NGC 6888 Spektrum im Vergleich mit [3]

Somit hat die Fotografie des Objekts eine wichtige Erkenntnis auf die Morphologie des Nebels enthüllen können, denn sonst hätte nicht genau bestätigt werden können, dass Schwefel vorhanden ist. Wie zuvor erwähnt, sind leichte Emissionen von Helium He I zu erkennen. Diese Entdeckung spielt eine Schlüsselrolle bei der Beantwortung der Frage des Einflusses des Sternwinds von WR136 auf den NGC 6888. Es lässt sich zunächst sicher sagen, dass der Sternwind einen Einfluss auf NGC 6888 hat, da sowohl in WR136 als auch im Nebel Helium vorhanden ist. Eine weitere Frage, die sich beim Vergleichen der Spektren ergab, war das Vorhandensein von größtenteils He II in WR136, jedoch He I in NGC 6888. Die beste Erklärung bietet die Ionisierung von Helium. Tabelle 4.1 zeigt, dass He II mehr als doppelt

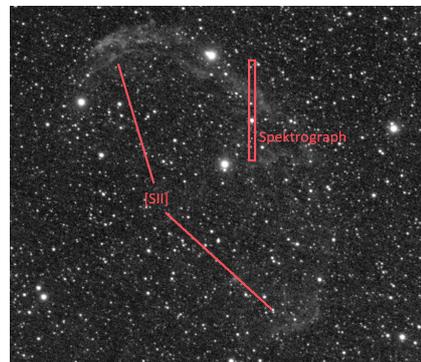


Abbildung 4.6: [SII]-Farbkanal in Photoshop mit eingezeichnetem Schwefel sowie Spalt-Position

| Element | Energie |
|--------------|---------------------|
| He I | 24,587387 eV |
| <i>He II</i> | <i>54,417760 eV</i> |
| N II | 29,6013 eV |
| <i>N III</i> | <i>47,44924 eV</i> |
| <i>N IV</i> | <i>77,4735 eV</i> |
| <i>N V</i> | <i>97,8902 eV</i> |
| C II | 24,38332 eV |
| <i>C IV</i> | <i>64.4939 eV</i> |

Tabelle 4.1: Energie-Anforderungen zur Ionisation von Helium, Stickstoff und Kohlenstoff | kursive Werte stehen für die vorhandenen Elemente in WR136 [34]

so viel Energie benötigt, um ionisiert zu werden, als He I. Bezogen auf WR136 lässt sich also sagen, dass aufgrund der Strahlungsenergie des Sterns und Geschwindigkeit des Sternwindes He II-Ionisierung kein Problem darstellt. NGC 6888 ist mit 7700 bis 10200 K zwar sehr heiß, die Energie ist trotzdem nicht ausreichend, um das vorhandene Helium aus WR136 zu He II zu ionisieren, wodurch die He I-Emissionen zu erklären sind. Selbiges gilt für die Stickstoff- und Kohlenstoffvorkommen. In WR 136 ließen sich N III, N IV und N V, beziehungsweise C IV, nachweisen, während in NGC 6888 nur N II, beziehungsweise C II, zu finden waren. Erklärbar ist dies ebenfalls über die unterschiedlichen Ionisierungsenergien und die geringere Temperatur und Geschwindigkeit des Nebels.

4.2.2 Expansionsgeschwindigkeit

Das erzielte Ergebnis von $52 \frac{km}{s}$ deckt sich gut mit den professionellen Arbeiten. Ein Beispiel ist die Publikation von *Y. P. Geogelin und G. Monnet* aus 1970, welche ein Ergebnis von $50 \frac{km}{s}$ angibt [35]. In der genannten Arbeit wurde, wie auch unter anderem hier, jedoch an $H\alpha$ - und [NII]-Linien gemessen, was Diskussionsbedarf fordert, denn die in dieser Arbeit erzielten $52 \frac{km}{s}$ sind nur ein Mittelwert. Die gemessenen Geschwindigkeiten an $H\alpha$ und [NII] betragen hier jeweils nur $22 \pm 5 \frac{km}{s}$, beziehungsweise $15 \pm 5 \frac{km}{s}$.

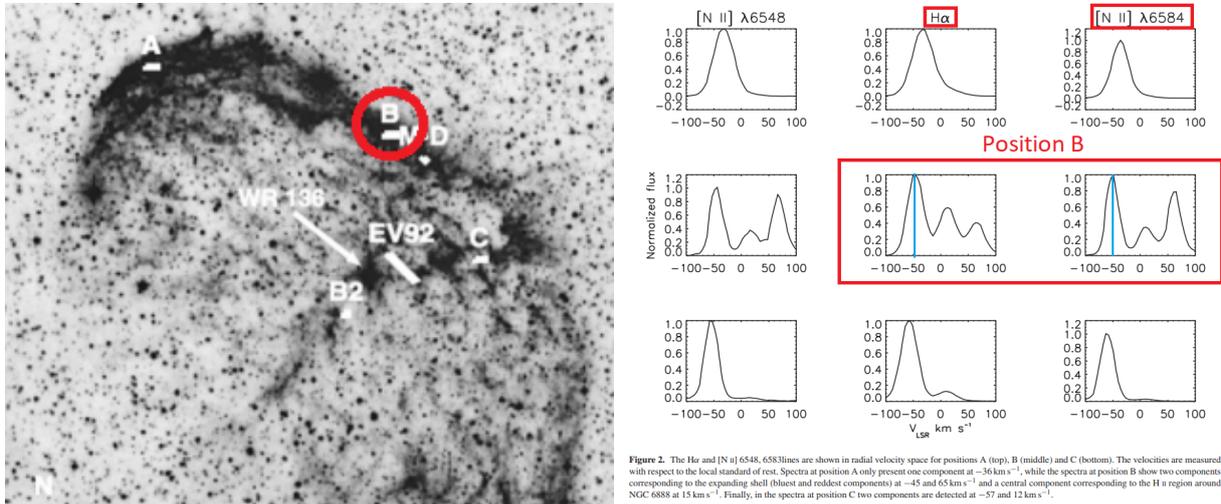


Abbildung 4.7: Position des Spaltes B [36]

Abbildung 4.8: Erzielte Spektren in [36]

In einer anderen Arbeit, *J. Reyes-Pérez et al.*, aus 2015 wurde an mehreren Stellen spektroskopiert [36]. Wie in Abb. 4.7 zu erkennen ist, korrespondiert Position B mit der Spalt Position aus dieser Arbeit. Die in Abb. 4.8 markierten Geschwindigkeitsprofile beziehen sich auf die $H\alpha$ - Linie und die [NII]- Linie bei 6584 \AA in der gemessenen Position B. Es ist zu sehen, dass es sowohl einen Teil gibt, der sich auf die Erde mit $-45 \frac{km}{s}$ zu bewegt, und einen Teil, welcher nach heliozentrischer Korrektur rotverschoben ist. Dieser wurde auf $65 \frac{km}{s}$ gemessen. Der Grund für diese unterschiedlichen Werte von Rot- und Blauverschiebung liegt an der im weiteren Verlauf der Arbeit erklärten starken Fragmentierung des NGC 6888. In dieser Arbeit konnte lediglich der blauverschobene Teil gemessen werden, welcher sich zudem von dem professionellen Wert unterscheidet. Der Grund dafür und dass der rotverschobene Teil nicht zu sehen ist, liegt an der Aufnahme der Spektren. Der verwendete DADOS-Spektrograph kann nur „niedrig“ aufgelöst aufnehmen, jedoch dafür den ganzen sichtbaren Spektralbereich auf einmal darstellen. Ein hochauflösendes Spektrum mit einem anderen Spektrographen müsste aufgenommen werden, da dieser zwar nur einen sehr kurzen Bereich aufnehmen kann, der oftmals nur eine Emissionslinie umfasst, dafür aber in einer hohen Auflösung. Dies war auch zunächst der Plan, jedoch hat schlicht und einfach das Wetter keine optimalen Beobachtungsbedingungen bereitstellen können. Vor der Aufnahme der Spektren, welche vom Wetter her ein Glücksfall war, gab es drei Monate lang nicht eine Gelegenheit, um zu spektroskopieren, da entweder der Mond in der Vollmond-Phase zu sehen war, wessen Licht den Himmel aufhellt, oder zu viele Wolken den Himmel bedeckten. Dazu kommt noch, dass das Objekt mit der Zeit immer früher untergeht, wodurch er schneller verschwindet und somit weniger Beobachtungszeit bietet. Daher müsste weiterführend über diese Arbeit hinaus an ausgewählten Linien, wie der $H\alpha$ - und [NII]-Linie einzeln hochauflösend spektroskopiert werden, um genauere Ergebnisse erhalten zu können. Abgesehen davon lässt sich final trotzdem sagen, dass ein sehr zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden konnte, welches sich, von der Standardabweichung abgesehen, um lediglich $2 \frac{km}{s}$ vom Katalogwert unterscheidet.

4.3 Interaktion zwischen WR136 und NGC 6888 - Morphologie

Zunächst ist es wichtig zu sagen, dass NGC 6888 seine Form durch das interstellare Medium erhalten hat. Während sich die Hüllen ausbreiteten, stießen einige Teile auf interstellare Materie, welche die Hüllen verlangsamt

und aufstaut, wodurch diese relativ unregelmäßige Form entstand. Um die Morphologie von NGC 6888 besser nachvollziehen zu können, wurden in Abb. 3.11 vier wichtige Orte im Nebel benannt. Position A zeigt WR136 im Zentrum des Nebels. Dieser, zusammengefasst, verliert viel Masse in Form eines hochenergetischen, schnellen Sternwindes, wessen Geschwindigkeit insgesamt auf $1550 - 1850 \frac{km}{s}$ bestimmt wurde. Die Massenverlustrate wurde 1970 auf $6,3 \cdot 10^{-6} \frac{M_{\odot}}{yr}$ bestimmt [35]. Dieser Sternwind besteht hauptsächlich aus Helium, Stickstoff und Kohlenstoff, was auch im Nebel vorzufinden ist. Dies beweist, dass es eine klare Interaktion zwischen den beiden Objekten gibt. Wie diese genau aussehen könnte und auch in der Vergangenheit möglicherweise ausgesehen hat, wird im Folgenden an den Positionen B und C erläutert.

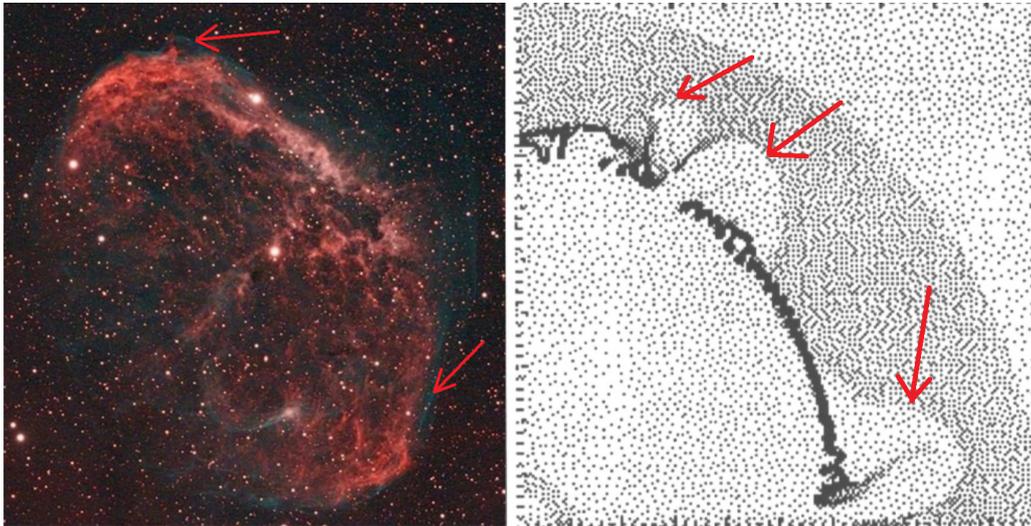


Abbildung 4.9: Eigenes Bild von NGC 6888 | Computersimulation einer Rayleigh-Taylor Instabilität bei einem Sternwind, welcher eine dichte Hülle durchbricht; schwarz repräsentiert die dichte Hülle; weiß steht für den Sternwind [10]

Position B zeigt drei helle Schockfronten im Norden, Nordwesten und Südwesten des Nebels. Die dortige hohe Intensität impliziert hohe Energien, die die Massen zum Leuchten anregen. Der Grund kann das Aufprallen des hochenergetischen Sternwinds auf die alte Wasserstoffhülle aus der Hauptreihen-Phase sein. An der Stoßfront im Norden, welche farblich grünlicher ist als die beiden äußeren Fronten, staut sich das Material, insbesondere Sauerstoff, auf. Dies kann, wie in unserer ersten Projektarbeit erklärt [1], das Auftreffen des Nebelschocks auf dichtes interstellares Medium in Form einer nicht ionisierbaren Dunkelwolke sein. Somit staut sich auch die Energie an der Stelle auf, weswegen sie heller erscheint. Die in Abb. 4.9 mit Pfeilen versehenen Stellen zeigen Fälle von Rayleigh-Taylor Instabilitäten in NGC 6888. *Mordecai-Mark Mac Low* schlug in seiner Publikation vor, dass, wie in der Computersimulation zu sehen ist, ein Wolf-Rayet-Sternwind solch eine R.T. Instabilität hervorruft, wenn er sich über die äußere Front der dichten Hülle hinaus bewegt. Dabei wirbelt er die Gase auf und bringt sie zum Leuchten. Die Computersimulation zeigt zusätzlich, dass der Sternwind oftmals ellipsoid ausbrechen kann [10], was sich mit den Beobachtungen an NGC 6888 deckt, da auch an den markierten Stellen der im Sternwind befindliche Sauerstoff ausbricht.

Abb. 4.10, eine Grafik aus einer von *Brian D. Moore et al.* in 1999 veröffentlichten Arbeit [37], schlägt eine Erklärung der Interaktion der RSG-Hülle mit dem WR-Sternwind vor. Der im Nebel vorhandene Wasserstoff stammt aus der Hauptreihen-Phase, „Main Sequence, MS“, während der Sauerstoff aus der RSG-Phase stammt. Dies lässt sich beispielsweise auch beim RSG-Stern Beteigeuze sehen [38], da dieser hohe Sauerstoffmengen besitzt. Die Interaktion dieser beiden Hüllen löste R.T. Instabilitäten aus, wodurch Verwirbelungen aus Wasser- und Sauerstoff zurückgeblieben sind. Anschließend kollidierten die RSG-Hülle und der schnelle WR-Sternwind, wodurch der Sauerstoff aus der RSG-Hülle von dem WR-Sternwind vorangetrieben wurde. Schließlich interagiert diese, wie in der Computersimulation erklärt wurde, ebenfalls mit der MS-Hülle, wodurch von R.T. Instabilitäten ausgelöste Ausbrecher von Sauerstoff aus der MS-Hülle zu sehen sind.

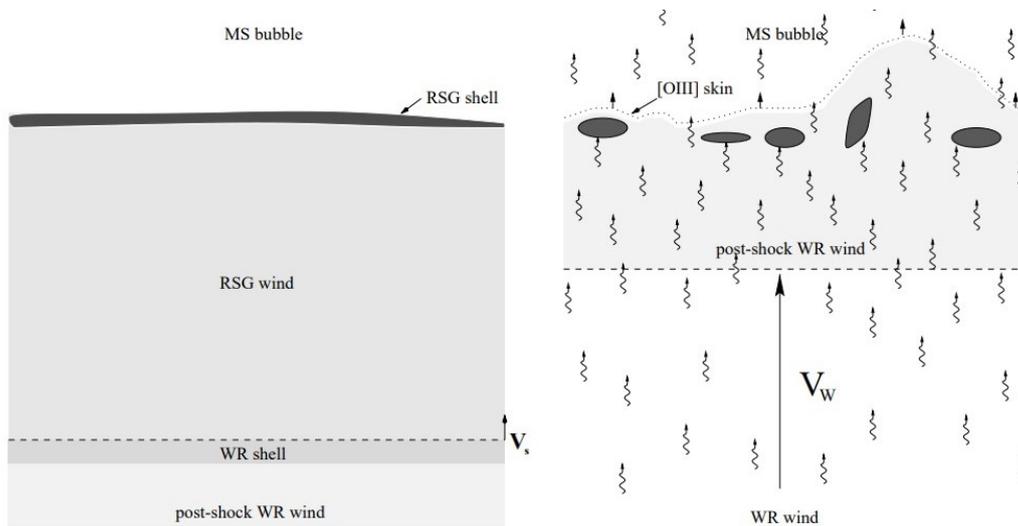


Abbildung 4.10: Modell der Struktur der Materie in NGC 6888 [37] | v_s steht für die Geschwindigkeit der WR-Hülle | v_W steht für die Sternwindgeschwindigkeit von WR136

Position C zeigt einen Teil von der Materie, bestehend aus Sauerstoff, welcher vollständig aus der dichten Wasserstoffhülle ausgebrochen ist und durch eine R.T. Instabilität verwirbelte Strukturen in der Hülle hinterließ. Er breitet sich somit außerhalb der Hülle weiter ins interstellare Medium aus.

Bei Position D ist ein dunkles, ovales Objekt südwestlich von WR136 zu sehen, wofür es mehrere Erklärungsansätze gibt. Eine mögliche Erklärung von A. *Fernández-Martín et al.* ist, dass es ein verklumptes Objekt in der äußersten Hülle des Nebels ist, welches durch WR136 angetrieben wird [2]. Wir denken, dass es sich hierbei um eine Art Dunkelwolke handelt, die aus nicht ionisierbarem Material besteht und dadurch alles Licht absorbiert. Auch die professionellen Publikationen sagen, dass dieses Objekt in Radio- und Infrarot-Wellenlängen untersucht werden müsse, um mehr Informationen zu erhalten.

5 Fazit und Ausblick

Festhalten lässt sich abschließend, dass WR136 durch das aufgenommene Spektrum eindeutig in die Spektralklasse WN6-s eingeordnet werden konnte und alle wichtigen Elemente nachgewiesen wurden. Dazu gehören vor allem Helium, Stickstoff, Kohlenstoff und geringe Mengen an Wasserstoff. Mit $1848 \pm 141 \frac{km}{s}$ wurde eine relativ genaue Messung der Sternwindgeschwindigkeit vorgenommen. Die Spektroskopie von NGC 6888 lieferte eine gute Abschätzung der Expansionsgeschwindigkeit des Nebels von $52 \pm 29 \frac{km}{s}$. Hier muss jedoch gesagt werden, dass, um ähnliche Ergebnisse wie in den professionellen Publikationen zu erhalten, in Zukunft hochauflösende Spektren aufgenommen werden müssen. Abgesehen davon, lieferten die Spektroskopie und Fotografie des Nebels die hinreichenden Beweise für die Theorie, dass NGC 6888 aus WR136 stammt. Unsere Beobachtungen und Messungen ergeben ebenfalls, wie auch professionelle Arbeiten [2], dass NGC 6888 ein Ellipsoid aus zwei Haupthüllen ist. Die innere Hülle besteht hauptsächlich aus Wasserstoff, welcher aus der MS-Phase des Sterns stammt, und Sauerstoff, welcher der Interaktion des RSG- mit dem WR-Sternwind und Rayleigh-Taylor Instabilitäten zuzuschreiben ist. Die äußere Hülle besteht hauptsächlich aus Sauerstoff, welcher ein Produkt des WR-Sternwindes ist, welcher die RSG-Hülle aufgewirbelt hat und den Sauerstoff aus dieser mitgerissen hat. Durch R.T. Instabilitäten brach dieser an vielen Stellen aus der MS-Hülle aus und formte somit eine umgebende Hülle. Neben der hochauflösenden Spektroskopie der Nebel-Emissionslinien gibt es ebenfalls die Möglichkeit, in Zukunft die Dunkelwolke südwestlich von WR136 genauer zu untersuchen.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Entstehung eines blasenförmigen Nebels um einen Stern nach [10] | 2 |
| 2.2 | Rayleigh-Taylor Instabilität nach [10] | 3 |
| 3.1 | Aufbau des Spektrographen in der Sternwarte von Bernd Koch | 3 |
| 3.2 | Ansicht der Aufnahme der Spektren; Von links nach rechts: Aufgenommenes Einzelspektrum in <i>MaxImDL</i> [15] Teleskopsteuerung Visualisierung zur Position der Spalte des Spektrographen; Dicke der Spalte von oben nach unten: $50\mu m$, $25\mu m$ und $35\mu m$ Aufnahmesteuerung in <i>MaxImDL</i> Helligkeitshistogramm für die Spektren Guiding-Software und Spaltansicht in <i>SpecTrack</i> [16] | 4 |
| 3.3 | Aufbau des Teleskops in der Sternwarte des CFG | 4 |
| 3.4 | Wellenlängenkalibrierung des WR136-Spektrums | 5 |
| 3.5 | Endergebnis des Spektrums von WR136 12x300s belichtet | 5 |
| 3.6 | Endergebnis des Spektrums von NGC 6888 18x600s belichtet | 6 |
| 3.7 | Wellenlängenkalibrierung des NeAr-Spektrums | 7 |
| 3.8 | Messung der FWHM-Werte in Abhängigkeit der Wellenlänge bei der NeAr-Lampe | 7 |
| 3.9 | Halbwertsbreite der He II-Emission bei $6050,10 \text{ \AA}$ im Spektrum von WR136 | 8 |
| 3.10 | Tabelle zur Berechnung des Mittelwerts der Sternwindgeschwindigkeit von WR136 | 8 |
| 3.11 | Radialgeschwindigkeit von NGC 6888 an der $H\alpha$ -Emission bei $6562,852 \text{ \AA}$ | 8 |
| 3.12 | Tabelle zur Abschätzung eines Mittelwerts der Expansionsgeschwindigkeit von NGC 6888 | 9 |
| 3.13 | NGC 6888 Endergebnis Gesamtbelichtungszeit: 120 Minuten $H\alpha$ + [OIII] 30x120s [SII] + [OIII] 30x120s Die benannten Orte dienen der späteren Diskussion | 9 |
| 4.1 | Pickering-Fowler-He II-Serie und Balmer-H-Serie [31] | 10 |
| 4.2 | Sternwindgeschwindigkeit v_∞ abhängig von WR136 der jeweiligen Wellenlängen | 10 |
| 4.3 | Position von NGC 6888 zu Beginn der Aufnahme | 11 |
| 4.4 | Position von NGC 6888 gegen Ende der Aufnahme | 11 |
| 4.5 | Angedeuteter Schwefel im NGC 6888 Spektrum im Vergleich mit [3] | 12 |
| 4.6 | [SII]-Farbkanal in Photoshop mit eingezeichnetem Schwefel sowie Spalt-Position | 12 |
| 4.7 | Position des Spaltes B [36] | 13 |
| 4.8 | Erzielte Spektren in [36] | 13 |
| 4.9 | Eigenes Bild von NGC 6888 Computersimulation einer Rayleigh-Taylor Instabilität bei einem Sternwind, welcher eine dichte Hülle durchbricht; schwarz repräsentiert die dichte Hülle; weiß steht für den Sternwind [10] | 14 |
| 4.10 | Modell der Struktur der Materie in NGC 6888 [37] v_s steht für die Geschwindigkeit der WR-Hülle v_W steht für die Sternwindgeschwindigkeit von WR136 | 15 |

Alle nicht mit Quellen gekennzeichnete Bilder wurden eigenständig erstellt.

Tabellenverzeichnis

- 4.1 Energie-Anforderungen zur Ionisation von Helium, Stickstoff und Kohlenstoff | kursive Werte stehen für die vorhandenen Elemente in WR136 [34] 12

Artikel

- [1] Christian Rakic und Leander Siegels. „Emissionsnebel - Der Werdegang der Sterne und Nebelfotografie“. In: (). URL: https://www.schuelerlabor-astronomie.de/wp-content/uploads/2023/06/Rakic_Siegels_Emissionsnebel.pdf.
- [2] A. Fernández-Martín, J. M. Vílchez und E. Pérez Montero. „Ionization structure and chemical abundances of the Wolf-Rayet nebula NGC 6888 with integral field spectroscopy“. In: (Mai 2013). Hrsg. von J. C. Guirado u. a., S. 543–548. URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201118421>.
- [5] K. A. van der Hucht u. a. „The galactic distribution and subtype evolution of Wolf-Rayet stars. III.“ In: 199 (Juni 1988), S. 217–234. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1988A&A...199..217V>.
- [6] W. -R. Hamann u. a. „The Galactic WN stars revisited. Impact of Gaia distances on fundamental stellar parameters“. In: 625, A57 (Mai 2019), S. 4. DOI: 10.1051/0004-6361/201834850. arXiv: 1904.04687 [astro-ph.SR]. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019A&A...625A..57H>.
- [7] W. -R. Hamann, L. Koesterke und U. Wessolowski. „Spectral analyses of the galactic Wolf-Rayet stars : a comprehensive study of the WN class.“ In: 274 (Juli 1993), S. 397–414. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1993A&A...274..397H>.
- [8] W. -R. Hamann, U. Wessolowski und L. Koesterke. „Non-LTE spectral analyses of Wolf-Rayet stars : the nitrogen spectrum of the WN6 prototype HD 192163 (WR 136).“ In: 281 (Jan. 1994), S. 184–198. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1994A&A...281..184H>.
- [9] Cristina E. Cappa u. a. „The Interaction of NGC 6888 and HD 192163 With the Surrounding Interstellar Medium“. In: 112 (Sep. 1996), S. 1113. DOI: 10.1086/118082. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1996AJ...112.1104C>.
- [10] Mordecai-Mark Mac Low. „Wolf-Rayet and LBV Nebulae as the Result of Variable and Non-spherical Stellar Winds“. In: *International Astronomical Union Colloquium* 169 (1999), S. 391–394. DOI: 10.1017/S0252921100072286.
- [23] WA Hiltner und RE Schild. „Spectral classification of Wolf-Rayet stars“. In: *Astrophysical Journal*, vol. 143, p. 770 143 (1966), S. 770. URL: <https://adsabs.harvard.edu/full/1966ApJ...143..770H>.

- [24] Lindsey F. Smith. „A Revised Spectral Classification System and a New Catalogue for Galactic Wolf–Rayet Stars“. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 138.1 (Jan. 1968), S. 109–110. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1093/mnras/138.1.109. eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/138/1/109/8078773/mnras138-0109.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/138.1.109>.
- [25] P. A. Crowther und Luc Dessart. „Quantitative spectroscopy of Wolf–Rayet stars in HD 97950 and R136a — the cores of giant H II regions“. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 296.3 (Mai 1998), S. 622–642. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1046/j.1365-8711.1998.01400.x. eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/296/3/622/18540458/296-3-622.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1998.01400.x>.
- [30] W. -R. Hamann u. a. „Spectral analyses of Wolf-Rayet stars: hydrogen abundances in WN subtypes.“ In: 249 (Sep. 1991), S. 443–454. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1991A&A...249..443H>.
- [32] P. A. Crowther und L. J. Smith. „An infrared spectral analysis of two Cygnus WNE stars.“ In: 305 (Jan. 1996), S. 541–550. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1996A&A...305..541C>.
- [35] Y. P. Georgelin und G. Monnet. „Evidence of Expansion in NGC 6888“. In: 5 (Jan. 1970), S. 239–243. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1970ApL.....5..239G>.
- [36] J. Reyes-Pérez u. a. „A consistent spectral model of WR 136 and its associated bubble NGC 6888“. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 452.2 (Juli 2015), S. 1764–1778. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1093/mnras/stv1423. eprint: <https://academic.oup.com/mnras/article/452/2/1764/1069321?login=false>. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stv1423>.
- [37] Brian D Moore, J Jeff Hester und Paul A Scowen. „Hubble space telescope observations of the Wolf-Rayet nebula NGC 6888“. In: *The Astronomical Journal* 119.6 (2000), S. 2991–3002. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/301389/pdf>.
- [38] David L Lambert u. a. „Carbon, nitrogen, and oxygen abundances in Betelgeuse“. In: *Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X)*, vol. 284, Sept. 1, 1984, p. 223-237. Research supported by the Robert A. Welch Foundation. 284 (1984), S. 223–237. URL: <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1984ApJ...284..223L>.

Buchquellen

- [3] Richard Walker. *Spectral Atlas for Amateur Astronomers: A Guide to the Spectra of Astronomical Objects and Terrestrial Light Sources*. Cambridge University Press, 2017, S. 89–95, 123. ISBN: 9781316694206. URL: <https://www.cambridge.org/core/books/spectral-atlas-for-amateur-astronomers/32126CD730EBA49238F9318C16B90523>.

Onlinequellen

- [27] SIMBAD. *HD 192163 – Wolf-Rayet*. Zugriff am: 27. Dezember 2023. URL: <https://simbad.cds.unistra.fr/simbad/sim-basic?Ident=wrl36&submit=SIMBAD+search>.
- [31] LEIFIPhysik; Joachim Herz Stiftung. *Spektrum von He⁺ – PICKERING – Serie*. Zugriff am: 04. Januar 2024. URL: <https://www.leifiphysik.de/atomphysik/bohrsches-atommodell/ausblick/spektrum-von-rmhe-pickering-serie>.
- [33] Arbeitskreis Meteore e.V. *Airglow*. Zugriff am: 04. Januar 2024. URL: <https://www.meteoros.de/themen/atmos/selbstleuchtend/airglow>.
- [34] Wikipedia contributors. *Ionization energies of the elements (data page) — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Zugriff am 07. Januar 2024. 2023. URL: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ionization_energies_of_the_elements_\(data_page\)&oldid=1178892418](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ionization_energies_of_the_elements_(data_page)&oldid=1178892418).

Soft- und Hardware

- [4] Zotti, Georg; Hoffmann, Susanne M.; Wolf, Alexander; Chéreau, Fabien; Chéreau, Guillaume. *Stellarium*. Version 0.22.2. 7. Juli 2022. URL: <https://stellarium.org/de/>.
- [11] Baader Planetarium GmbH. *DADOS Spalt-Spektrograph*. Zugriff am: 10. Januar 2024. URL: <https://www.baader-planetarium.com/de/instrumente/spektroskopie/dados-spalt-spektrograf-24/dados-spalt-spektrograf.html/>.
- [12] Celestron. *14EdgeHD Tubus (OTA) mit 3SSchiene (76mm)*. Zugriff am: 10. Januar 2024. URL: [https://www.celestron.de/ce_de/astronomie/teleskope-\(otas\)/edgehd-14-ota.html](https://www.celestron.de/ce_de/astronomie/teleskope-(otas)/edgehd-14-ota.html).
- [13] Astroshop. *Kamera NexImage Burst Monochrom*. Zugriff am: 10. Januar 2024. URL: <https://www.astroshop.de/astro-kameras/celestron-kamera-neximage-burst-monochrom/p,45277>.
- [14] Astroshop. *Kamera STF-8300M*. Zugriff am: 10. Januar 2024. URL: <https://www.astroshop.de/astro-kameras/sbig-kamera-stf-8300m/p,47233>.
- [15] Cyanogen Imaging. *MaximDL*. Version 5.24. URL: <http://www.cyanogen.com/product/maxim-dl/>.
- [16] Baader Planetarium GmbH. *SpecTrack Autoguiding Software für Sternspektroskopie*. Version 1.0. URL: <https://www.baader-planetarium.com/de/spectrack-autoguiding-software-f%C3%BCr-sternspektroskopie.html>.
- [17] Baader Planetarium GmbH. Zugriff am 10. Januar 2024. URL: <https://www.baader-planetarium.com/de/tec-apo-160-fluorit-apochromat.html>.
- [18] ZWO. *ASI2600MC Pro (color)*. Zugriff am: 10. Januar 2024. URL: <https://astronomy-imaging-camera.com/product/asi2600mc-pro-color/>.
- [19] Askar. *Colour Magic 6nm D Filter Package*. Zugriff am: 09. Januar 2024. URL: <https://www.askarlens.com/index.php/6nmcolourmagic/308.html>.
- [20] ZWO. *ZWO EFW (7 x 2)*. Zugriff am: 10. Januar 2024. URL: <https://astronomy-imaging-camera.com/product/zwo-efw-5-x-2%e2%80%b3or-7-x-2%e2%80%b3/>.

- [21] Berg, Stefan. *Nighttime Imaging 'N' Astronomy*. Version 2.3. URL: <https://nighttime-imaging.eu/>.
- [22] *BASS Project*. Version 1.9.9. URL: <https://groups.io/g/BassSpectro>.
- [26] Shelyak Instruments. *Calibration module*. Zugriff am: 10. Januar 2024. URL: <https://www.shelyak.com/produit/pf0037-module-detallonnage-alpy/?lang=en>.
- [28] *DeepSkyStacker*. Version 5.1.5. URL: <http://deepskystacker.free.fr/german/index.html>.
- [29] Adobe. *Photoshop*. Version 14.0.0.0. URL: <https://www.adobe.com/de/creativecloud/plans.html?plan=individual&filter=all&promoid=PYPVPZQK&mv=other>.

6 Danksagung

Wir möchten vor allem unserem Projektbetreuer und Astronomielehrer am Carl-Fuhlrott-Gymnasium Bernd Koch (Bernd.Koch@astrofoto.de) unseren Dank aussprechen, welcher stets bei Fragen zur Verfügung stand und uns das nötige Vorwissen vermittelt hat. Auch für die Bereitstellung seines privaten Teleskops, sowie der nötigen Geräte möchten wir ihm danken. Außerdem möchten wir dem Schulzentrum Süd im Allgemeinen danken, dass wir die Möglichkeit des Arbeitens im Schülerlabor Astronomie genießen durften.

7 Selbstständigkeitserklärung

Wir versichern hiermit, dass wir unsere Arbeit

„Spektroskopie des Wolf-Rayet-Sterns WR136 und Fotografie des Emissionsnebels NGC 6888“

selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt haben. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Die in der Arbeit angegebenen Links wurden zum Zeitpunkt des Aufrufs überprüft und enthielten keine illegalen Inhalte. Für jegliche Änderungen der Inhalte übernehmen wir keine Verantwortung.



Christian Rakic, Wuppertal den 11.01.2024



Leander Siegels, Wuppertal den 11.01.2024