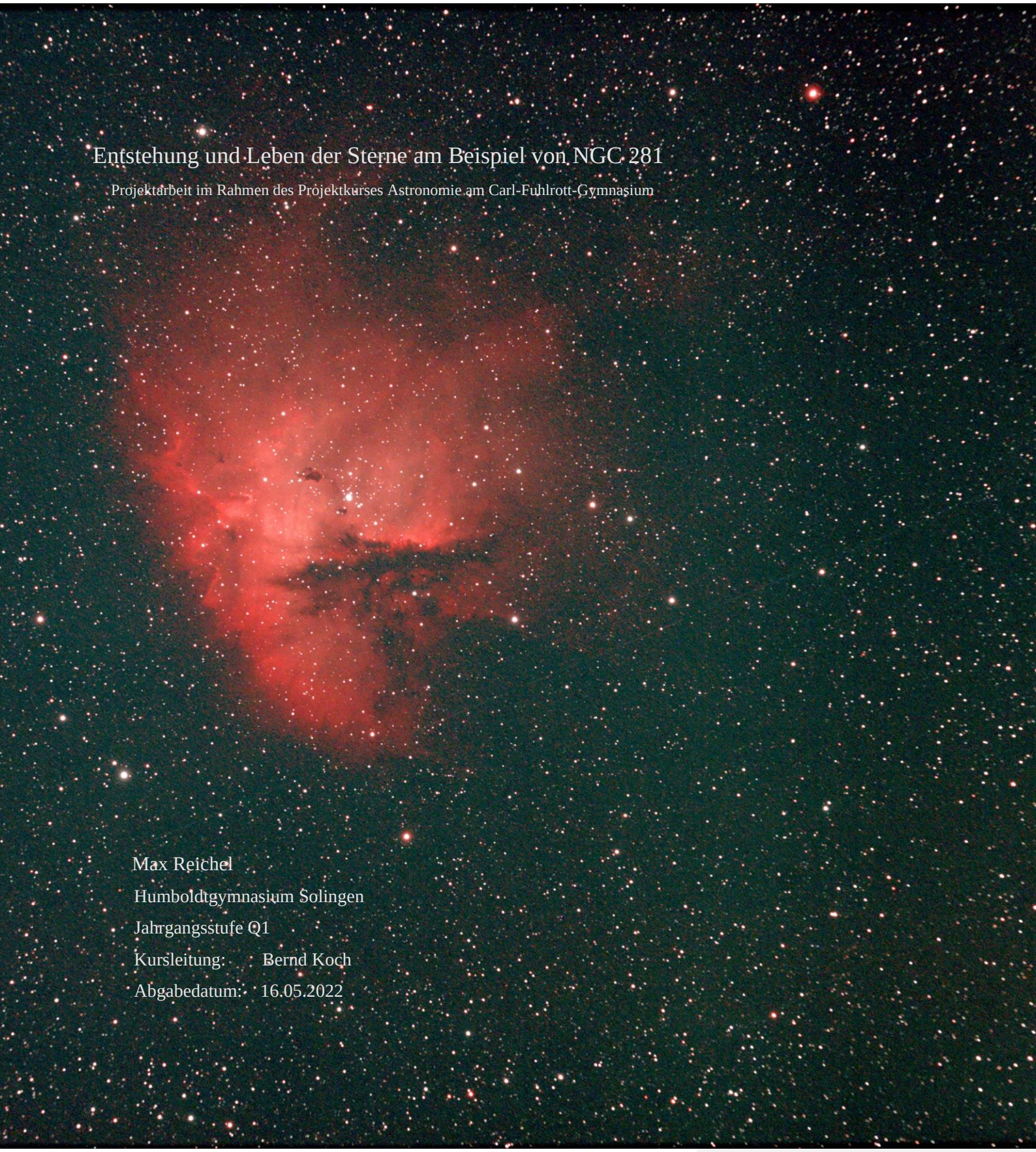


Entstehung und Leben der Sterne am Beispiel von NGC 281

Projektarbeit im Rahmen des Projektkurses Astronomie am Carl-Fuhlrott-Gymnasium

Max Reichel

Humboldtgymnasium Solingen

Jahrgangsstufe Q1

Kursleitung: Bernd Koch

Abgabedatum: 16.05.2022

1 Inhaltverzeichnis
2 Motivationsschreiben ... 3
3 Was ist ein Stern? ... 4
4 Wie ist ein Stern aufgebaut? ... 4
4.1 Kern ... 4
4.2 Strahlungszone ... 5
4.3 Konvektionszone ... 6
4.4 Photosphäre ... 6
4.5 Chromosphäre ... 6
4.6 Korona ... 6
5 Kernfusion ... 6
6 Klassifizierung der Sterne ... 7
6.1 Spektralklassen ... 7
6.2 Leuchtkraft Klassifikation ... 8
6.3 Absolute Helligkeit ... 8
7 Die Sternklassen ... 8
7.1 Zwergsterne ... 8
7.2 Riesensterne ... 10
8 Entstehung eines Sterns ... 10
8.1 Erster Kollaps ... 10
8.2 Protosterne ... 11
8.3 Vorhauptreihensterne ... 12
8.4 T-Tauri -Sterne ... 12
9 Hauptreihe ... 12
9.1 Was ist ein Hauptreihen Stern? ... 12
10 Endstadien ... 12
10.1 Supernova Typ 1a ... 13
10.1.1 Supernova Typ 1b und Typ 1c ... 13
10.2 Supernova Typ 2 ... 14
11 Praktische Arbeit: Nebelfotografie am Beispiel von NGC 281 ... 14
11.1 Welches Objekt wurde beobachtet? ... 14
11.2 Technisches Equipment ... 15
11.2.1 Kamera ... 15

11.2.2 Teleskop 16
11.2.3 Montierung 16
11.2.4 Filter 17
12 Experimenteller Aufbau und Durchführung 18
12.1 Bildbearbeitung mit DeepSkyStacker 19
12.2 Nachbearbeitung der Aufnahmen mit Photoshop 21
12.3 Ergebnis der Aufnahmen 22
12.4 Besonderheiten des Nebels 23
13 Danksagung 25
14 Abschlusserklärung 25
15 Abbildungsverzeichnis 26
16 Internetquellen 27

2 Motivationsschreiben

Ich war schon immer von dem Nachthimmel fasziniert, von den Sternen und Galaxien, allem Unbekanntem in unserem Universum. Schon als Grundschüler habe ich mit Begeisterung Star Wars und Star Trek geschaut und mir vorgestellt, wie es sein muss zu anderen Sternen und Galaxien zu reisen. Und ich habe mir die Frage gestellt, wie die vielen Sterne entstehen und was es dort alles zu entdecken gibt. Vor ein paar Jahren ergab sich die Möglichkeit für mich, an einer ganztägigen Exkursion am Carl-Fuhlrott-Gymnasium teilzunehmen. Auf dieser Exkursion habe ich zum ersten Mal die Instrumente für die Abendaufnahmen erklärt bekommen und konnte einen ersten Blick in die Tiefe des Nachthimmels werfen. Und ich habe die Menschen kennengelernt, mit denen ich nun die Projektarbeit erarbeiten würde. Somit war es keine Frage für mich, ob ich eine Facharbeit in der Schule schreibe, oder eine spannende Projektarbeit im Astronomie Kurs zu einem Thema, was mir nahesteht. Das Thema der Projektarbeit war mir am Anfang zwar nicht klar, aber einen Grundgedanken hatte ich bereits: ich wollte auf jeden Fall Astrofotographie mit hereinbringen. Die Bilder aus der Astrofotographie haben etwas ganz Besonderes: sie sehen so unnatürlich aus, zeigen aber unser Universum in der Realität.

Schließlich habe ich mich mit Herrn Koch auf ein Thema geeinigt: Die Entstehung und das Leben der Sterne, am Beispiel von NGC 281. Dieses Thema gab mir die Möglichkeit, intensiv mit verschiedenen Beobachtungsinstrumenten zu arbeiten und mehr über die Entstehung von Sternen zu lernen.

Abbildung 1 Bild von mir vor dem CDK 20 Teleskop

3 Was ist ein Stern?

Ein Stern ist ein selbstleuchtender massereicher Körper, bestehend aus heißem Gas und Plasma. Im Inneren eines Sterns findet thermonukleare Fusion statt, die meisten Sterne fusionieren dabei Wasserstoff. Über den Verlauf ihrer Existenz fusionieren Sterne verschiedene Elemente, wie zum Beispiel Helium, Silizium bis hin zu Eisen. Die meisten Sterne können Eisen nicht in ein anderes Element mehr weiter fusionieren, sodass durch den langsamen Aufbau von Eisen der Stern stirbt. Sterne können allein oder in einem Doppelstern- oder sogar Mehrfachsternsystem auftreten. Unser Sonnensystem besitzt nur einen Stern, jedoch sind 3/4 der bekannten Sonnensysteme ein Doppelsternsystem. Eine Gruppe von nah aneinander liegenden Sternen nennt man einen Sternhaufen. Sterne sind sehr heiß. Unsere Sonne hat eine Oberflächentemperatur von 6.000 Kelvin und eine Kerntemperatur von 16.000 Kelvin, andere Sterne können jedoch noch viel heißer werden, ein Weißer Zwerg, zum Beispiel, hat eine Oberflächentemperatur von bis zu 100.00 Kelvin. [1] [2] [3] [4] [22] [23]

4 Wie ist ein Stern aufgebaut?

4.1 Kern

Im Kern dem heißesten Punkt eines Sterns, wird Energie durch Kernfusion freigesetzt. Für Sterne wie unsere Sonne beginnt diese Kernfusion mit Wasserstoff, während ihrer Lebensdauer fusioniert sie Elemente bis hin zu Eisen, welches zu schwer ist, um von der Sonne fusioniert zu werden. Größere Sterne, wie Rote Riesen können auch noch Elemente nach Eisen fusionieren. Der Kern eines Roten Riesen, das Endstadium der meisten Hauptreihensterne, ist aus verschiedenen Schichten aufgebaut. Diese verschiedenen Abschnitte haben den Grund, dass der Stern während seines Lebenszyklus als Hauptreihenstern verschiedene Elemente fusioniert hatte und sich so Schichten gebildet haben. Ein Eisenkern bildet das Zentrum des Kerns, dieser ist umgeben von Schichten von Silizium, Magnesium, Neon, Sauerstoff, Kohlenstoff, Helium, Wasserstoff und nicht fusioniertem Wasserstoff. [5] [6] [7] [8]

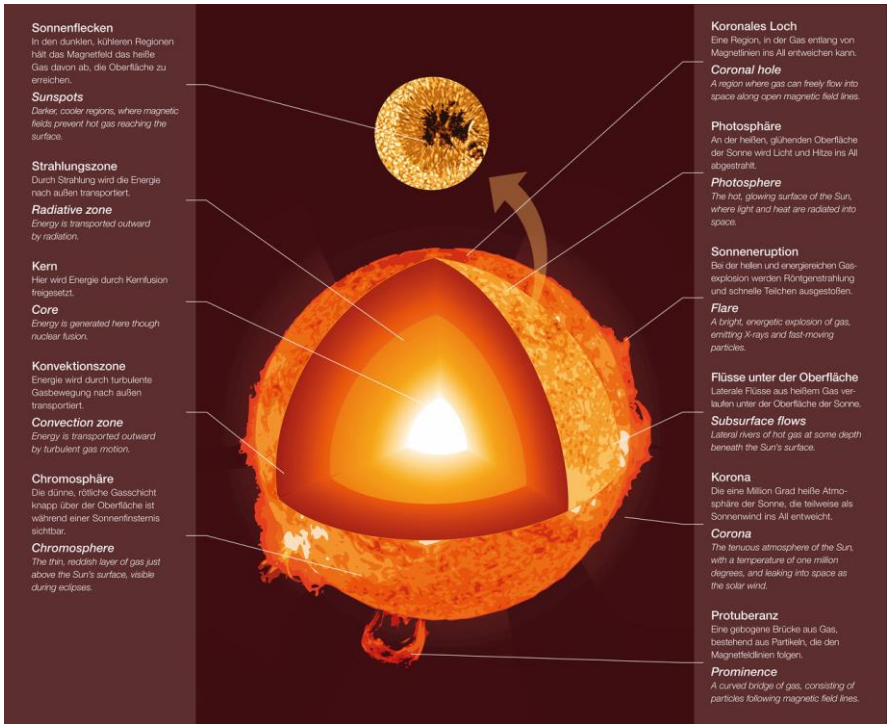


Abbildung 2 Aufbau unserer Sonne

4.2 Strahlungszone

In der Strahlungszone wird die Energie, die im Kern erzeugt wird, zum Äußeren des Sterns transportiert und diese Energie gelangt jedoch erst nach mehreren Millionen von Jahren aus der Strahlungszone heraus. Das liegt daran, dass die Strahlungszone sehr dicht ist, sodass die Photonen mit Plasmateilchen kollidieren und somit abgelenkt oder auch absorbiert werden. Die Strahlungszone nimmt bei unserer Sonne ungefähr 70% des Gesamtradius ein. Bei einem sonnenähnlichen Stern ist die Strahlungszone, die Zone nach dem Kern. In besonderen Fällen, wie in einem Blauen Riesen, ist die Strahlungszone jedoch nicht am Kern, sondern an der Photosphäre und die Konvektionszone am Kern. In einem Roten Zwerg gibt es keine Strahlungszone, nur einen Kern und die Konvektionszone im Inneren des Sterns. [7] [8]

4.3 Konvektionszone

In der Konvektionszone wird Strahlung durch Gasströmungen weitergegeben. Heiße Materie aus dem Kern steigt durch diese auf, während kalte Materie absinkt, und wird im Inneren erhitzt wird. [5]

4.4 Photosphäre

Die Photosphäre ist die Schicht eines Sterns, in der die Energie des Kerns ins All abgegeben wird. Sie ist außerdem die hellste Schicht eines Sternes und die Temperatur beträgt etwa 6.300 Kelvin bei einem sonnenähnlichen Stern. Exemplarisch hier die chemische Zusammensetzung der Photosphäre unserer Sonne: 73,46% Wasserstoff, 24,86% Helium, 0,77% Sauerstoff, 0,29% Kohlenstoff, 0,16% Eisen, 0,12% Neon, 0,09% Stickstoff, 0,07% Silizium, 0,05% Magnesium, 0,04% Schwefel und 0,10% restliche Elemente. [9]

4.5 Chromosphäre

Die Chromosphäre ist die Übergangsschicht zwischen Photosphäre und Korona. Sie ist mit dem bloßen Auge nur während einer totalen Sonnenfinsternis sichtbar. Um sie zu beobachten, müssen spezielle Filter genutzt werden 4.000 - 10.000 Kelvin. [5]

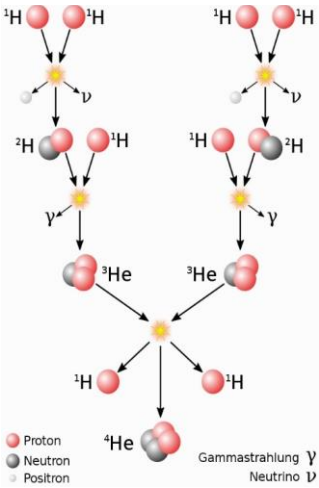
4.6 Korona

Die Korona ist die äußerste Schicht eines Sterns, die Korona besteht aus fast vollständig ionisiertem Plasma. Wie die Chromosphäre ist die Korona unserer Sonne nur bei totaler Sonnenfinsternis sichtbar. Dabei beträgt die Temperatur zwischen 1 und 2 Million Grad Celsius [10]

5 Kernfusion

Sterne erzeugen eine große Menge an Energie innerhalb ihres Kerns durch die sogenannte Kernfusion und der häufigste Fusionsprozesse ist der des Wasserstoff-brennens. Im Kern des Sterns werden Protonen miteinander fusioniert. Dies fängt mit dem Wasserstoff oder auch Proton in dieser Reaktion genannt an, zwei Protonen fusionieren zu einem Deuterium Atom. Deuterium hat ein Proton und ein Neutron im Kern und da kein Neutron zu vergeben ist, muss ein Proton zu einem Neutron umgewandelt werden. Dies geschieht durch Freilassen eines Positrons und eines Elektronen-Neutrinos. Daraufhin wird ein Deuterium Atom und ein Proton miteinander zu Helium 3 fusioniert, bei dieser Reaktion wird ein Gammaquant als Energie freigegeben. Schließlich werden zwei Helium 3 Atome miteinander zu

Abbildung 3 Proton-Proton Reaktion



Helium 4 reagiert, wobei zwei Protonen abgegeben werden. Neben dem Wasserstoffbrennen fusionieren Sterne über ihren Lebenszyklus verschiedene Elemente, bis hin zu Eisen. Es gibt noch das Heliumbrennen, das Kohlenstoffbrennen, das Neonbrennen, das Sauerstoffbrennen und das Siliziumbrennen. Diese anderen Fusionsprozesse finden gleichzeitig in Roten Riesen statt, da sie das Wasserstoffbrennen in ihrem Kern nicht mehr unterstützen können, wird der Wasserstoff nur noch in den äußeren Schalen des Sternes fusioniert. Im Stern bilden sich verschiedene sogenannte Schalen, wo die einzelnen Prozesse der Kernfusion stattfinden. [11] [12] [13] [14]

6 Klassifizierung der Sterne

6.1 Spektralklassen

Jeder Stern ist einzigartig, jedoch gibt es Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Sternen. Die Ähnlichkeiten können die Oberflächentemperatur, Masse oder auch der Radius sein. So ist es kein Wunder, dass man Sterne in Gruppen einteilt oder genauer gesagt, klassifiziert. Die Klassifikation der Sterne nennt man Spektralklassen, da sie anhand ihres Lichtspektrums klassifiziert werden. Die wichtigsten Spektralklassen sind die der Hauptreihe und der des Riesenast. Es gibt jedoch auch Spektralklassen der Braunen Zwerge, welche die Grenze zwischen Sternen und Planeten bilden, sowie der Kohlenstoffsterne, Rote Riesen am Ende ihres Lebenszyklus. Die Spektralklassen der Hauptreihe sind O, B, A, F, G, K, M. So sind massereiche Sterne mit einer hohen Oberflächentemperatur in den Spektralklassen O und B zu finden sind, während kleinere Sterne wie unsere Sonne sich in der Spektralklasse G befinden. Die Spektralklassen, Leuchtkraft und absolute Helligkeit werden in dem Hertzsprung-Russel-Diagramm dargestellt. [15] [17]

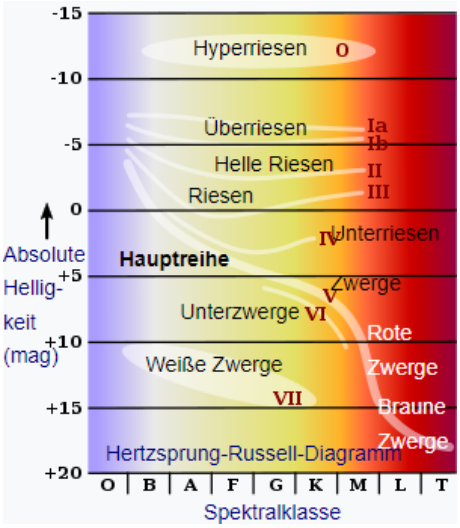


Abbildung 4 Hertzsprung-Russel-Diagramm

Neben der Spektralklasse der Hauptreihe gibt es auch die der Braunen Zwerge L, T, Y. Die Spektralklasse Y ist im Vergleich zu den anderen Spektralklassen besonders. Sterne in dieser Spektralklasse geben ihr Licht im Infrarotbereich ab, was es für das menschliche Auge unsichtbar macht. Dies hat den Grund, dass die Braunen Zwerge dieser Spektralklasse eine sehr geringe Oberflächen-temperatur von maximal 600 Kelvin besitzen. Die letzten Spektralklassen sind die der Kohlenstoffsterne, oder auch Rote Riesen, R, N, S. [15]

Sterne können für eine genauere Beschreibung des Weiteren auch in die Unterklassen 0 bis 9 eingeteilt werden, so gibt es Sterne der Spektralklasse A1 oder A6. Die Spektralklasse oder das Farbspektrum kann durch die Spektroskopie des Sternenlichtes ermittelt werden. Die

verschiedenen Spektralklassen hängen primär von der Oberflächentemperatur ab, andere Faktoren wie deren chemische Zusammensetzung, Masse oder Metallizität sind dabei eher nebensächlich. [15]

6.2 Leuchtkraft Klassifikation

Diese Klassifikation dient der Darstellung der verschiedenen Entwicklungsphasen eines Sterns. Je kleiner die Leuchtkraftklasse desto intensiver scheint er und ist näher am Ende seines Lebenszyklus. Die Leuchtkraftklasse beginnt bei 0, was einem Hyperriesen entspricht und darauf folgt I, II, III, IV, V, VI, VII. Die Leuchtkraftklassen hängen von den Breiten und den Höhen, also der Stärke der Spektrallinien der jeweiligen Sterne ab. [18]

6.3 Absolute Helligkeit

Um die absolute Helligkeit zu messen, muss der Stern mit einem speziellen Filterband aufgenommen werden, jedoch muss vorher die scheinbare Helligkeit gemessen werden. Dies wird meist durch das visuelle V-Band, welches dem menschlichen Helligkeitsempfinden ähnelt, gemessen. Wenn mit mehreren Filterbändern gemessen wird und man diese Werte kalibriert und gegeneinanderstellt, und zusätzlich dazu noch die Entfernung gegeben ist, kann man mittels der Entfernung und der scheinbaren Helligkeit die absolute Helligkeit ermitteln. Die absolute Helligkeit hängt von der Masse und dem Entwicklungstand des Sterns ab, da ältere Sterne immer heller werden und junge Sterne zunächst nicht so stark leuchten. [16]

7 Die Sternklassen

7.1 Zwergsterne

Etwa ¾ aller Sterne sin unserem Universum sind Rote Zwerge, jedoch kann man nur wenige dieser Roten Zwerge von der Erde aus betrachten. Dies hat den Grund, dass Rote Zwerge kleine und leuchtschwache Sterne sind. Ein Roter Zwerg der Spektralklasse M hat nur 10% der Masse unserer Sonne sowie einen Radius von nur 15% des Sonnenradius. Aber auch die

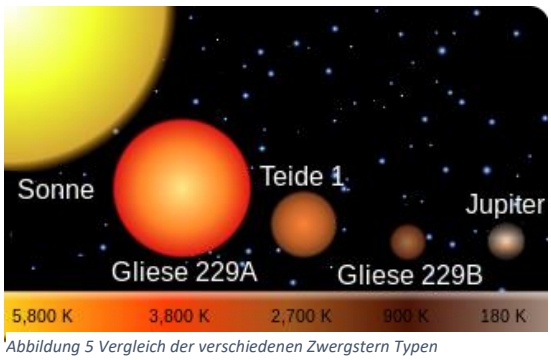


Abbildung 5 Vergleich der verschiedenen Zwergstern Typen

Oberflächentemperatur eines solchen Sternes ist geringer als die der Sonne mit nur 2.500 bis 4.000 Kelvin. Diese Temperatur reicht gerade noch aus, dass Wasserstoff im Kern verbrannt wird, aber auch durch diese geringe Temperatur hat ein Roter Zwerg eine Leuchtkraft, von nur 0,01% bis 5%. [29]

Braune Zwerge nehmen einen besonderen Platz zwischen Sternen und Planeten ein. Mit einer Masse von mindestens 13 und maximal 75 Jupitermassen, kann ein Brauner Zwerg nicht wie ein Roter Zwerg Wasserstoff im Kern zu Helium fusionieren. Anstelle des Wasserstoffes fusioniert ein Brauner Zwerg Deuterium oder Lithium. Im Hertzsprung-Russel-Diagramm nehmen Braune Zwerge die Spektralklassen L und T ein. [19] [20] [25]

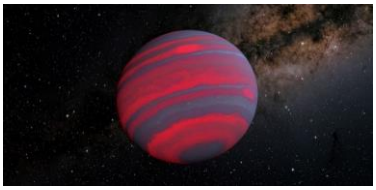


Abbildung 6 Illustration eines Braunen Zwerges

Weiße Zwerge sind die übriggebliebenen Kerne von Roten Riesen. Weiße Zwerge sind wie Rote Zwerge leuchtschwach, da ein Weißer Zwerg etwa einen Radius in der Größe von der Erde hat. Selbst mit diesem kleinen Radius hat ein Weißer Zwerg eine Masse von etwa unserer Sonne und eine Oberflächen Temperatur von 10.000 bis 100.000 Kelvin, was ungefähr dem 6-fachen unserer Sonne entspricht. Trotz dieser enormen Oberflächentemperatur ist ein Weißer Zwerg leuchtschwach, wegen der geringen Oberfläche. [21] [22] [23]

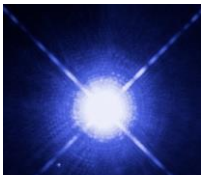


Abbildung 7 Sirius B, ein Weißer Zwerg

Gelbe Zwerge sind vergleichbar mit roten Zwergen, sie sind zwar etwas größer und leuchtintensiver als Rote Zwerge, brennen jedoch auch Wasserstoff im Kern. Unsere Sonne ist ein Gelber Zwerg. Gelbe Zwerge haben die Spektralklasse G. [24]

Abbildung 8 Die Sonne

7.2 Riesensterne

Riesensterne sind die Überlaufstadien zum Sternentod. Sie entstehen, wenn der eigentliche Stern, meist ein Roter Zwerg, keinen Wasserstoff mehr fusionieren kann, und sich deshalb ausdehnt. Die Roten Riesen sind am meisten verbreitet, da diese direkt von Zwergsternen entstehen. Ein Roter Riese ist um ein Vielfaches größer als ein Zwergstern und ebenfalls leuchtintensiver. Ihre Größe beträgt zwischen 10 und 100 Sonnenradien und sie sind bis zu 100-fach heller als ein Zwergstern. Durch die erhöhten Kräfte in ihrem Inneren fusionieren Rote Riesen anstelle von Wasserstoff zu Helium, Helium zu Kohlenstoff. Riesensterne können fast allen Spektralklassen angehören, von O bis M. Es gibt jedoch auch Ausnahmen, sogenannte Überriesen und Hyperriesen, enorm große Sterne, die einen Radius von mehreren Hundert oder sogar Tausend Sonnen haben können. Der größte dieser Überriesen ist Stephenson 2-18 mit etwa 2.158 Sonnenradien. Würde sich dieser Stern in unserem Sonnensystem anstelle unserer Sonne befinden, würde er sich bis hin zur Umlaufbahn Saturns erstrecken. [26] [27]

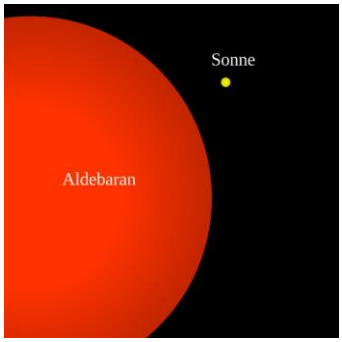


Abbildung 9 Größenvergleich zwischen Aldebaran und der Sonne

Kommentiert [o1]: Du schreibst von Stephenson, zeigst aber ein Bild von Aldeberan?

8 Entstehung eines Sterns

8.1 Erster Kollaps

Ein Hauptreihenstern beginnt seinen Lebenszyklus als kollabierender Kern einer Molekülwolke. In dessen Kern verdichtet sich die interstellare Materie (80% Wasserstoff und 20% Helium, die Überbleibsel des Urknalls) um einen Faktor von 10^18 bis 10^20. Massenarme Sterne können in kleinen Molekülwolken entstehen, während massenreiche Sterne sich in sogenannten Sternentstehungsgebieten bilden. Es gibt drei Stadien vor der eigentlichen Sternentstehung. [30] [35]

Abbildung 10 Bok-Globule in NGC 281, eigen Aufnahme

Die prästellaren Kerne sind die erste dieser Phasen. Sie sind die dichten, aber jedoch noch nicht ausreichend heißen und massereichen Kerne einer riesigen Molekülwolke und die größten von ihnen können sich bis zu 150 Lichtjahre ausdehnen. Die Molekülwolken bestehen aus mehreren Schichten, dem Kern und den Hüllen, welche verschiedene Dichten haben. Der Kern ist der dichteste Ort einer Molekülwolke. Diese Kerne kollabieren, wenn die thermische Energie der Teilchenbewegung von der Gravitationsenergie überwältigt wird und somit das Gleichgewicht im Kern nicht mehr besteht. Bei einem solchen Kollaps fallen

die äußeren Schichten der Molekülwolke ins Zentrum. Der Kollaps breitet sich daraufhin von innen nach außen mit Schallgeschwindigkeit aus, einen sogenannten „Inside-Out Collapse“. Während so einem Kollaps wird die Gravitationsenergie in thermische Energie und mm-Wellen umgewandelt, elektromagnetische Wellen mit 1-10 Millimeter Länge. Da jedoch die äußeren Hüllen für diese Wellenlängen durchlässig sind, wird die gravitative Bindungsenergie fast völlig ins All abgestrahlt. Aus diesem Grund ist der Kollaps des Kerns isotherm, das heißt das sich die Temperatur im Kern nicht ändert. Im weiteren Verlauf des Kollapses steigt die Dichte weiter an, die äußeren Hüllen werden für die Strahlung „optisch dick“ und lassen die Wellen nicht mehr durch, was so zu einer Aufheizung der Molekülwolke führt. Der Kollaps endet erst, wenn sich ein hydrostatisches Gleichgewicht im Zentrum gebildet hat, dies geschieht, wenn die Gravitation von der thermischen Energie ausgeglichen wird. Der hinterbliebene Kern wird auch als „First Hydrostatic Core“ bezeichnet, dieser Kern hat einen Radius von etwa 10-20 AE. Im Zentrum der Molekülwolke ist der Kollaps gestoppt, jedoch fallen die außen liegenden Hüllen weiterhin auf diesen ersten Kern. Durch das Fallen der äußeren Hüllen auf den Kern, erhitzt sich dieser weiter. Insgesamt kann der Zyklus vom ersten Kollaps bis hin zur Bildung eines hydrostatischen Kerns etwa 10.000 Jahre dauern. [30] [31] [35] [36]

8.2 Protosterne

Die erste Phase der Entstehung eines Protosterns ist der zweite Kollaps. Der zweite Kollaps wird durch das Aufheizens des Kerns verursacht, wenn die Temperatur erreicht wird, um Wasserstoffmoleküle zu spalten. Die freigesetzte Energie wird nicht für die Stabilisierung des Kerns genutzt, was zu einem zweiten Kollaps führt, welcher erst stoppt, wenn sich erneut ein hydrostatisches Gleichgewicht gebildet hat. Der Kern besteht nun hauptsächlich aus Wasserstoffatomen, hat jedoch nur noch eine Ausdehnung von etwa eineinhalb Sonnenradien. Damit ist ein Protostern entstanden, dessen Kern noch an Masse gewinnt und seine Leuchtkraft vor allem aus der Akkretion von außen auf das Objekt fallender Materie bezieht. Dieser Protostern strahlt mit 1.000 Kelvin, ist jedoch noch von einer dichten Hülle umgeben. Die Strahlung sorgt für das weitere Aufheizen der Molekülwolke. Im Kern des Protosterns beträgt die Temperatur schon 1.500 Kelvin, bei dieser Temperatur verdampfen alle „heißen Staubteilchen“. Die äußeren Hüllen fallen weiterhin auf den Kern und geben somit einen stetigen Massezuwachs. Trotz dem ständigem Massezuwachs befinden sich in dieser Phase nur etwa 1% der Gesamtmasse der Molekülwolke im Kern. Diese Phase der Massezunahme nennt man die Hauptakkretionsphase. [34]

8.3 Vorhauptreihensterne

Ein Vorhauptreihenstern ist die letzte Entwicklungsphase eines Sterns. Der Stern bezieht seine Leuchtkraft nicht mehr aus der Akkretion von dem Material aus seiner Hülle, da diese im Verlauf immer schwächer wird. Der Stern bezieht seine Leuchtkraft nun aus der Eigenkontraktion des Kerns. So ist der Protostern zu einem Vorhauptreihenstern geworden. Diese jungen Sterne sind aufgrund starker Magnetfelder von Sonnenflecken bedeckt. [33]

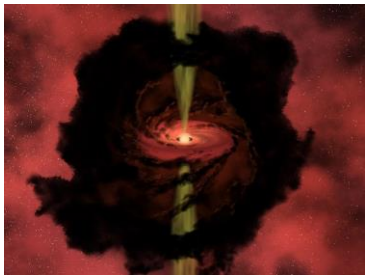


Abbildung 11 Illustration eines Vorhauptreihensterns

8.4 T-Tauri -Sterne

Bei T-TauriSternen, die eine Masse von weniger als zwei Sonnenmassen besitzen und eine besondere Form der Vorhauptreihensternen darstellen, ist die Hülle zum großen Teil ausgedünnt, wodurch man den Kern und die ihn umgebende Scheibe erkennen kann. Auf T-Tauri-Sternen toben enorme Stürme, welche die Akkretion verstärken. Innerhalb von etwa 2 Millionen Jahren löst sich diese protoplanetarische Scheibe aufgrund von Prozessen der Akkretion, Jets und Photovaporation auf. Die T-Tauri-Sterne fusionieren zunächst primordiales Deuterium und Lithium. Der Stern wird daraufhin optisch dick. Durch die von der Konvektion nach außen gelangte Gravitationsenergie, bildet Energie sich erstmals eine kompakte Kernzone. Diese Kernzone verhindert die weitere Konvektion des Gravitationsenergie nach außen, wodurch sich der Stern allmählich erhitzt. Wenn dies geschehen ist, kann der Stern im Kern Wasserstoff fusionieren. Der Stern hat nun die Hauptreihe erreicht. [34]

9 Hauptreihe

9.1 Was ist ein Hauptreihen Stern?

Der Begriff Hauptreihen Stern beschreibt den Zustand, während Sterne ihre Energie durch Wasserstoffbrennen in ihrem Kern beziehen. Die meisten Sterne im Universum befinden sich in der Hauptreihe und verbringen die längste Zeit ihres Lebenszyklus in dieser Phase. Hauptreihen Sterne können jede mögliche Spektralklasse haben, da es irrelevant ist welche Masse und Leuchtkraft der Stern besitzt, solange dieser Wasserstoff im Kern brennt. Sterne in der Hauptreihe bewegen sich während ihres Lebenszyklus aus der Hauptreihe heraus und enden als Weißer Zwerg oder Roter Riese. Die durchschnittliche Masse eines Hauptreihen Sterns beträgt 0,6 Sonnenmassen. Sterne in der Hauptreihe haben ein stabiles hydrostatisches Gleichgewicht.

10 Endstadien

Eine Supernova ist „ist das kurzzeitige, helle Aufleuchten eines massereichen Sterns am Ende seiner Lebenszeit durch eine Explosion, bei welcher der ursprüngliche Stern selbst vernichtet wird. Während einer Supernova leuchtet der Stern für eine kurze Zeit mit der

millionen- bis milliardenfachen seiner eigentlichen Leuchtkraft. Es gibt grundsätzlich zwei verschiedene Supernova Arten. Diese unterschiedlichen Typen von Supernovae die sich im Vorhanden-sein bzw. Abwesenheit von Wasserstoff im Spektrum unterscheiden. Diese sind Supernova Typ 1, enthält wenig, bis kein Wasserstoff und SN Typ 2 welcher Wasserstoff enthält. [37] [43]

10.1 Supernova Typ 1a

Dieser Typ Supernova wird auch thermonukleare Supernova genannt. Diese entsteht in einem Doppelsternsystem mit einem Weißen Zwerg und einem Begleitstern, meist einem Roter Riesen. Der Weiße Zwerg nimmt Masse von seinem Begleitstern auf, diese Aufnahme von Masse nennt man Akkretion. Zur Supernova kommt es, wenn der Weiße Zwerg die Chandrasekhar-Masse von etwa 1.38 bis 1.457 Sonnenmassen überschreitet. Der Stern wird instabil und wird förmlich zerrissen. Ab diesem Zeitpunkt ist der weitere Verlauf des Sternzerfalles umstritten, eine mögliche Erklärung ist die „subsonische Deflagration''. Es ist bekannt, dass Silizium eine große Rolle der Massezunahme spielt, und zur Supernova entsteht Silizium von der einer Sonnenmasse im Stern. Die Supernovae Typ 1a ist die wichtigsten Supernovae für die Astronomen, da diese als allseits bekannte „Standardkerzen" für die Entfernungsbestimmung von Galaxien und Sonnensystemen dient. Diese Eigenschaft liegt daran, dass jede Supernova des Typs 1a die gleiche Masse hat. Wenn man die Helligkeit einer Supernova kennt, kennt man die Helligkeit aller anderen Supernovae des Typs 1a. Sodass es möglich ist die Entfernung jeder anderen Supernova des Typs 1a zu berechnen und so auch die Entfernung von den umliegenden Objekten. [37] [38]

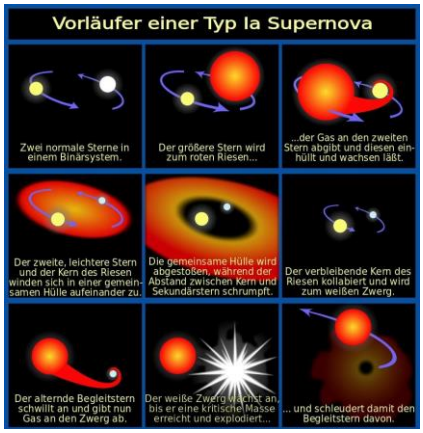


Abbildung 12 Veranschaulichung der Prozesse einer Supernova Typ 1a

10.1.1 Supernova Typ 1b und Typ 1c

Die Supernova des Typs 1b ist fast identisch zum Typ 1a, jedoch gibt es kleine Unterschiede. Der Stern produziert kein Silizium während dem Untergehen zur Supernova, jedoch entsteht mehr Helium. Während eine Supernova des Typ 1a und 1b einen Weißen Zwerg als Vorläuferstern besitzen, hat die Supernova des Typs 1c einen sehr massereichen Stern als Vorläuferstern, einen sogenannten Wolf-Rayet-Stern. Der Stern stößt bei der Massezunahme Helium und Wasserstoff nach außen ab. Supernovae des Typs 1c werden mit Gamma Ray Burst in Verbindung gebracht wegen ihrer langen Explosionsdauer. [37]

10.2 Supernova Typ 2

Die Supernova des Typ 2 ist wesentlich bekannter als die des Typ 1. Dies hat den Grund, da bei einer Supernova Typ 2 ein Schwarzes Loch oder ein Neutronenstern entsteht. Die Supernova des Typs 2 verläuft nach dem Schema des Gravitationskollaps, der durch die Fusion von schweren Elementen am Ende der Lebensspanne eines Sterns hervorgerufen wird. Da diese schwereren Elemente wie Eisen und Nickel nicht vom Stern fusioniert werden können, hält die thermonukleare Fusion im Stern an, sodass das hydrostatische Gleichgewicht gestört wird und der Stern instabil wird. Der Druck von Gas und Strahlung sinken im Kern des Sterns ab, sodass diese nicht dem Gravitationsdruck mehr entgegenstehen können. Die äußeren Schichten des Sterns fallen ins Zentrum und treffen auf den Eisen-Nickel Kern. Die Schockwelle, die von diesem Aufprall erzeugt wird, reflektiert und treibt mit sich die restlichen Bestandteile des Sterns ins All in einer riesigen Explosion. Die Größe dieser Explosion hängt von der Masse des Sterns ab, je größer die Masse desto intensiver ist die Explosion. Eine weitere Option zur Entstehung einer Supernova Typ 2 ist, die Kollision zwischen zwei Neutronensterne in einem Doppelsternsystem. Die Überreste einer solchen Supernova sind ebenfalls abhängig von der Masse des Vorläufersterns. Auch die Überreste einer solchen Supernova sind abhängig von der Masse des Vorläufersterns. Bei bis zu einer Sonnenmasse bleibt ein Weißer Zwerg übrig, bei mehr als einer und bis zu 1,5 Sonnenmassen entsteht ein Neutronen Stern. Wenn der Vorläuferstern jedoch eine Masse von über 3 Sonnenmassen hatte, könnte ein Schwarzes Loch entstehen. Es gibt neben der Supernovae Typ 2 auch noch weiter Typen von Supernovae. Supernova Typ 2P besitz eine plateauartige Lichtkurve und eine Sternenhülle mit rund 10 Sonnenmassen Wasserstoff. Weitere Typen sind Typ 2L und Typ 2n, welche sich in der Lichtkurve und dem Wasserstoffanteil ebenfalls unterscheiden, Typ 2L hat eine linear abfallende Lichtkurve und besitzt weniger als eine halbe Sonnenmasse an Wasserstoff in der Sternenhülle. Typ 2n zeigt etwas Wasserstoff im Spektrum auf. [37] [39]

11 Praktische Arbeit: Nebelfotografie am Beispiel von NGC 281

11.1 Welches Objekt wurde beobachtet?

NGC 281 oder auch Pacman Nebel ist ein Emissionsnebel in der Milchstraße. Er ist etwa 9500 Lichtjahre von unserem Sonnensystem entfernt. Den Nebel kann man im Sternbild Kassiopeia unter der Deklination von +56°34‘ und Rekszension von 00h 52m 25s am Himmel finden. Der nächste gelegene Stern ist Alpha Cassiopeia oder auch Shedar genannt. Der Nebel ist von der Erde aus nicht mit dem bloßen Auge zu sehen, wegen seiner schwachen Scheinbaren Helligkeit von 7,3 Magnituden. Der Nebel umgibt den Sternhaufen IC 1590, einen sehr jungen Sternhaufen, grade mal 4 Millionen Jahre alt. Der Nebel wird gerne von Hobby Astronomen als Beobachtung Objekt genutzt, wegen seiner geringen Entfernung zu uns hier auf der Erde. Der Nebel besteht hauptsächlich aus Wasserstoff. Im Nebel sind mehrere Bok-Globulen zu erkennen, aktive Sternentstehung Gebiete. Die Globulen, sowie der Nebel wurden von E.E.Barnard am 16.November 1881 entdeckt. E.E.Barnard war ein US-amerikanischer Astronom, welcher einer der Pioniere der

Astrofotografie. Im Verlauf seiner Karriere machte er viele Aufnahmen von Emissionsnebel und Dunkelwolken, eine davon war NGC 281. [40] [41]

11.2 Technisches Equipment

11.2.1 Kamera

Canon EOS Rpa
Die Kamera wurde astromodifiziert zur Erhöhung der H-alpha-Rotempfindlichkeit von Markus Meel
https://www.canon.de/cameras/eos-rp/
http://www.astro-modifikationen.de/

Abbildung 13 Canon EOS RPa

Wichtige Technische Daten der Kamera

26,2 Megapixel CMOS Vollformatsensor
Seitenverhältnis 3:2
Farbfilter RGB-Primärfarben
Bildfeldabdeckung 88 % horizontale und 100 % vertikale Bildfeldabdeckung
Helligkeits-Messbereich LW -3 – 20
ISO-Empfindlichkeit Auto 100-40000
Vergrößerung Ca. 0,7fach

Die Kamera, welche bei der Beobachtung benutzt wurde, wurde durch die Astro Modifikation von Markus Mell verändert. Bei dieser Modifikation wird die Kamera debayert. Bei diesem Vorgang wird die Bayer-Matrix aus der Kamera entfernt. Durch diese Modifikation kann der Kamera Sensor nur noch Schwarz-Weiß-Bilder aufnehmen. Jedoch kann man nun Schmalbandaufnahmen mit einem Linienfilter machen. Eine weitere Modifikation ist der Filter Ausbau. Dieser Filter Ausbau ist nötig, weil dieser die Wellenlinien von 656nm ausschneidet. Dies ist ein Problem für die Astrophotographie, da in diesem Bereich der Wellenlinien die höchsten Spektrallinien von Wasserstoff dargestellt werden.

11.2.2 Teleskop

Planewave CDK 20, 0,51m Öffnung, 3417mm Brennweite.
https://www.planewave.eu/produkte/teleskope/cdk20-astrograph-f/68-mit-quarzglas-optik

Abbildung 14 Foto des TEC160FL Teleskops

Technische Daten	
Optische Bauart	CDK
Corrected Dall-Kirkham	
Öffnung	20“ (508 mm)
Brennweite	3.454 mm
Öffnungsverhältnis	f/6.8
Bildfeld	52 mm
Backfokus hinter der Fokussiereinheit	5.8“ (147 mm)
Obstruktion	39% (Durchmesser HS)
Substrat	Quarzglas
Optische Baulänge	1.194 mm
Tubusgewicht	64 kg

11.2.3 Montierung

10Micron GM4000HPSII. Montierung mit Absolutencodern.

https://10micron.eu/montierungen/aequatoriale-montierungen/gm4000-hps-ii-goto-montierung

https://www.baader-planetarium.com/de/blog/first-light-am-neuen-50cm-teleskop-planewave-cdk-20-des-cfg-wuppertal/

Abbildung 15 10Micron GM4000HPSII Montierung

Technische Daten	
Montierung	Parallaktische Montierung deutscher Typ
Gewicht (kg)	125 kg (ohne Zubehör)
Instrumentenlast max.	150 kg
Tragkraft	20° – 70°
Breitengradbereich	+/− 10°
Azimut	60 mm Durchmesser, Edelstahl, Gewicht 13 kg
Feineinstellungsbereich	Ra. 85mm / Dek. 80mm Durchmesser, legierter Stahl
Gegengewichtsstange	vorgespannte Kegelrollenlager
Achsen	Ra. 430 Zähne, 330 mm Durchmesser, B14 Bronze Dek. 315
Lagerung	Zähne, 244 mm Durchmesser, B14 Bronze
Schneckenräder	Durchmesser 32mm, vergüteter legierter Stahl, gerieben und
Schnecke	geläppt
Motoren	2 Achsen AC Servo bürstenlos
Stromversorgung	24 V DC
Strombedarf	1,5 A Nachführung ~ 5 A max. Geschwindigkeit ~ 6 A Peak
GoTo Geschwindigkeit	
	Einstellbar von 2°/s bis 8°/s.

11.2.4 Filter

Optolong L-eNhance

https://www.teleskop-express.de/shop/product_info.php/info/p11238_Optolong-2--L-eNhance-Nebelfilter-fuer-DSLR-und-Color-Astro-Kameras.html

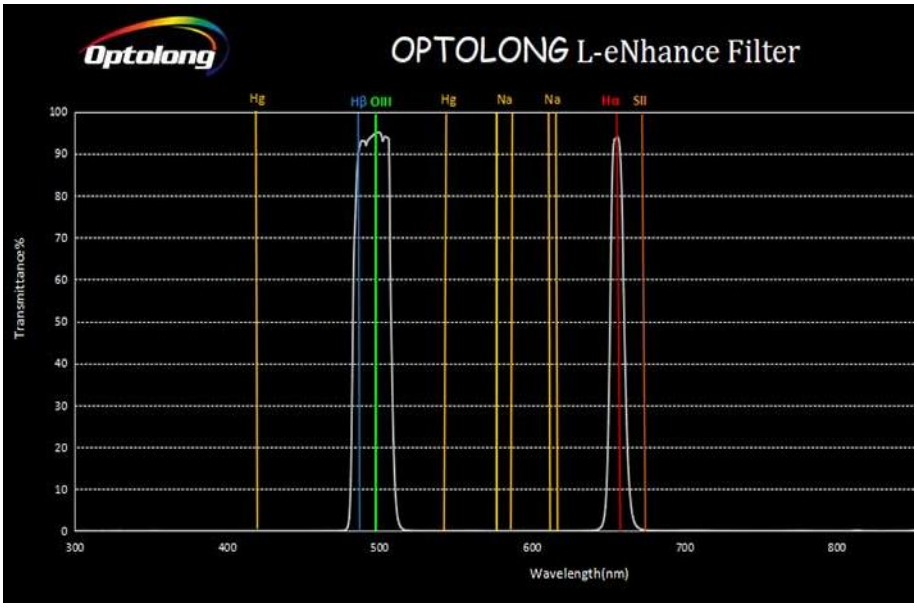


Abbildung 16 Wellenlänge Durchlass Bereiche des L-eNhance Filters

Dieser Dualbandfassfilter wurde genutzt, da dieser nur die Wasserstoff- und Sauerstoff-Spektrallinien durchlässt und Elemente wie Quecksilber, Natrium und Silizium ausblendend.

Abbildung 17 Abbildung des Filters

12 Experimenteller Aufbau und Durchführung

Ich habe die Aufnahmen von NGC 281, auch Pacman Nebel genannt, am 29.11.2021 durchgeführt. An diesem Tag hatten wir uns zuvor die Wettervorhersage angesehen, es sollte ein nicht als zu bewölkter Abend werden. Aus diesem Grund hatten wir als Gruppe den Jupiter mit dem großen Teleskop auf Station 7 beobachtet. Die eigentliche Beobachtung kam deshalb spontan, Herr Koch hatte mich angesprochen, ob ich Zeit hätte, noch an diesem Abend meine Beobachtung durchzuführen. Ich stimmte zu, sodass wir etwa um 17:30 Uhr angefangen haben den Nebel zu fotografieren. Bevor man ein Objekt am Nachthimmel beobachten kann, muss man überprüfen, ob dieses Objekt überhaupt sichtbar ist. Dies habe ich per Stellarium überprüft. Für die Aufnahmen habe ich das Planewave CDK 20 Teleskop, montiert auf eine 10Micron GM4000HPSII Montierung mit Absolutencodern, nutzte ich. Für das Aufnehmen der Bilder war die Canon EOS RPa, welche eingestellt wurde, um Raw Bilder aufzunehmen. Um ein besseres Bild zu erhalten, nutze ich außerdem noch einen speziellen Nebelfilter, den Optolong L-eNhance. Herr Koch brachte mir bei wie ich die einzelnen Geräte und Programme bedienen musste, damit ein gutes Ergebnis entsteht. Ich habe 39 Lightframes aufgenommen, 3 von ihnen wurden zu kurz belichtet, weshalb ich diese aus dem Prozess des Stackings ausgelassen habe. 12 von diesen Lightframes wurden 2 Minuten belichtet, während die restlichen nur 1 Minute belichtet wurden. Ich habe außerdem noch 11 Darkframes aufgenommen, um mit ihnen Bildfehler zu entfernen.

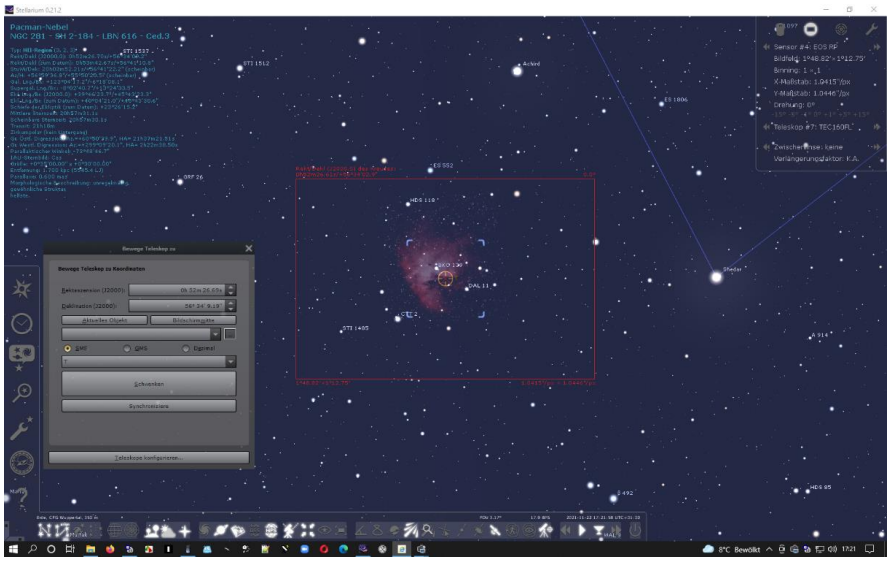


Abbildung 18 Anvisierung von NGC 281 mit Stellarium, rotes Rechteck zeigt den aufzunehmenden Nachthimmel ausschnitt

12.1 Bildbearbeitung mit DeepSkyStacker

Für die Bearbeitung der einzelnen Bilder wurde das Programm DeepSkyStacker benutzt. Mit diesem Programm können viele Bilder auf eins gestackt werden, um die Qualität und die Sichtbarkeit zu verbessern.

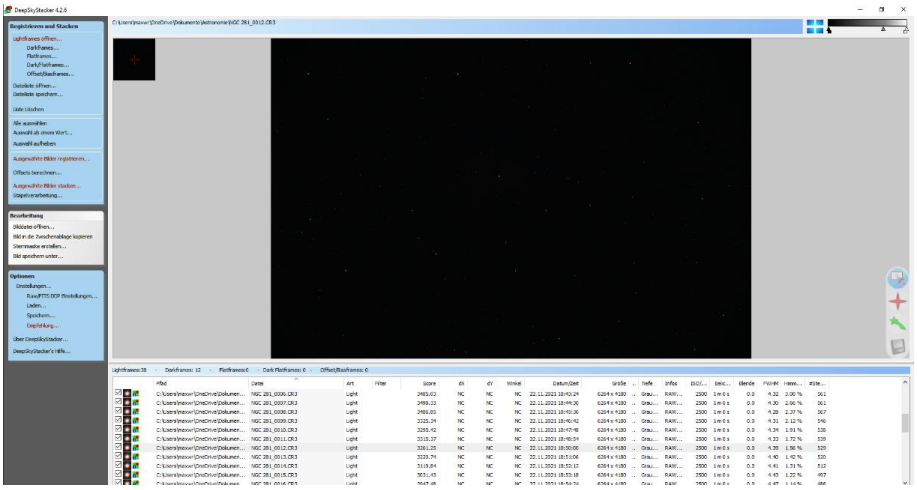


Abbildung 19 Stacking der einzelnen Raw Bilder via DeepSkyStacker

Daraufhin wurde ein Bild als Referenzbild ausgewählt, auf dem die anderen Bilder gestackt werden. Der Stacking Modus und die Parameter wurden auf Standard gestellt.

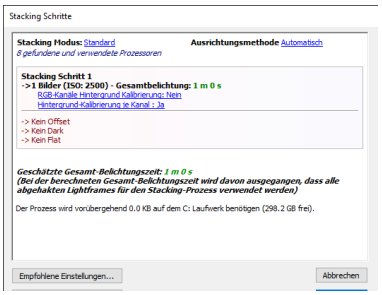


Abbildung 20 Modus für das Stacken der Bilder

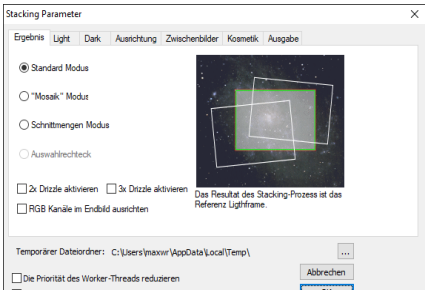
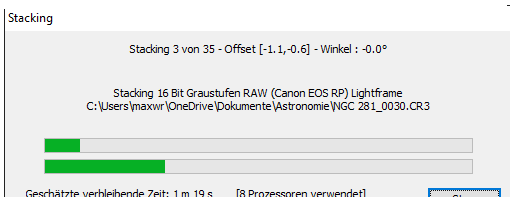


Abbildung 21 Stacking Parameter

Daraufhin wurde der Stacking Prozess gestartet.

Abbildung 22 Prozess des Stackings



Als Produkt aus dem Stacking habe ich ein leicht bläuliches Bild erhalten. Diese habe ich mit einer Farbkorrektur verbessert.

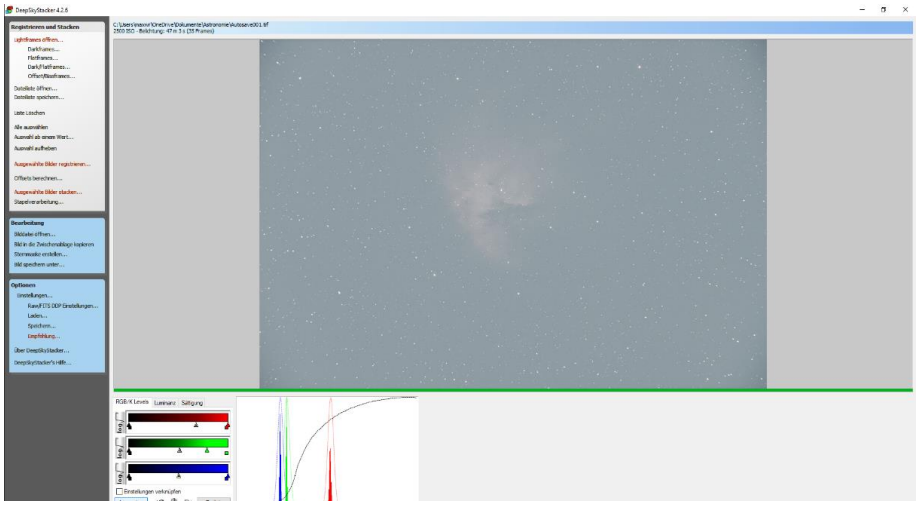


Abbildung 23 Produkt aus dem Stacking verfahren

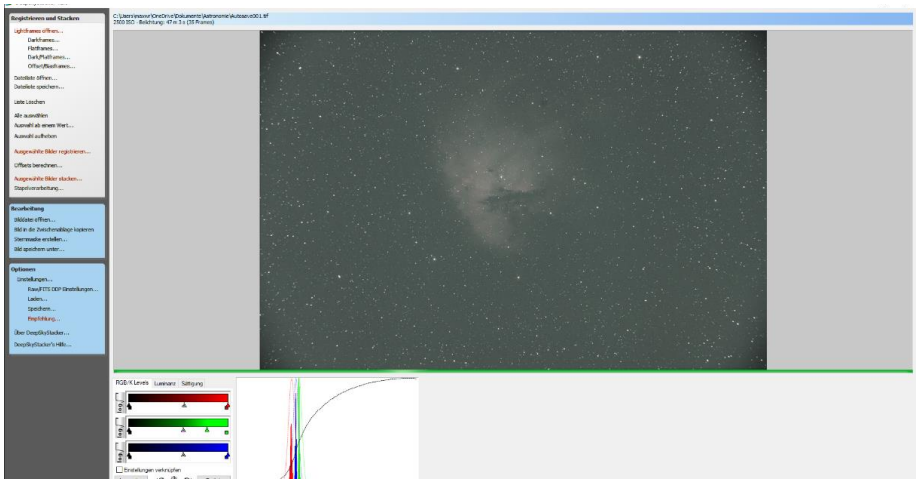


Abbildung 24 Durch eine Farbkorrektur verbessertes Endprodukt

12.2 Nachbearbeitung der Aufnahmen mit Photoshop

Das zuvor mit DeepSkyStacker bearbeitete Bild wurde in Photoshop nur sehr schwach dargestellt, weshalb der Prozess der Tonwertkorrektur genutzt werden musste um wieder den Nebel sichtbar zu machen.

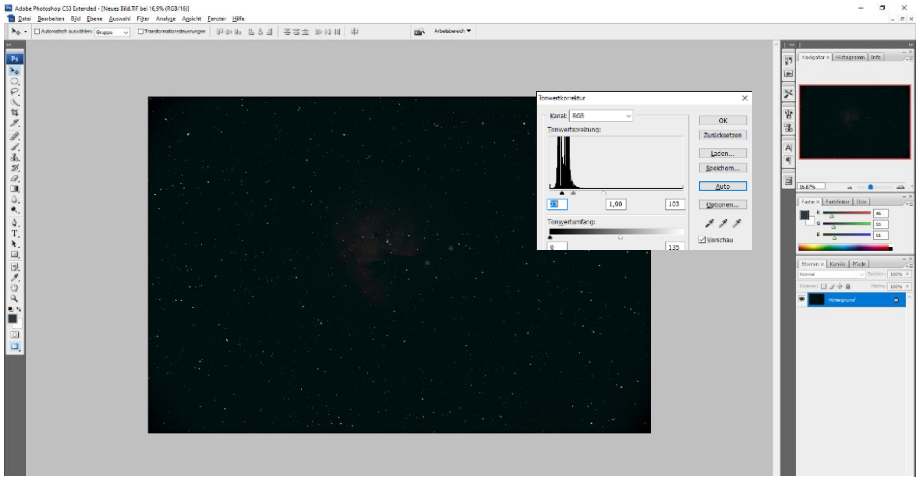


Abbildung 25 Nachbearbeitung der Aufnahmen mit Photoshop

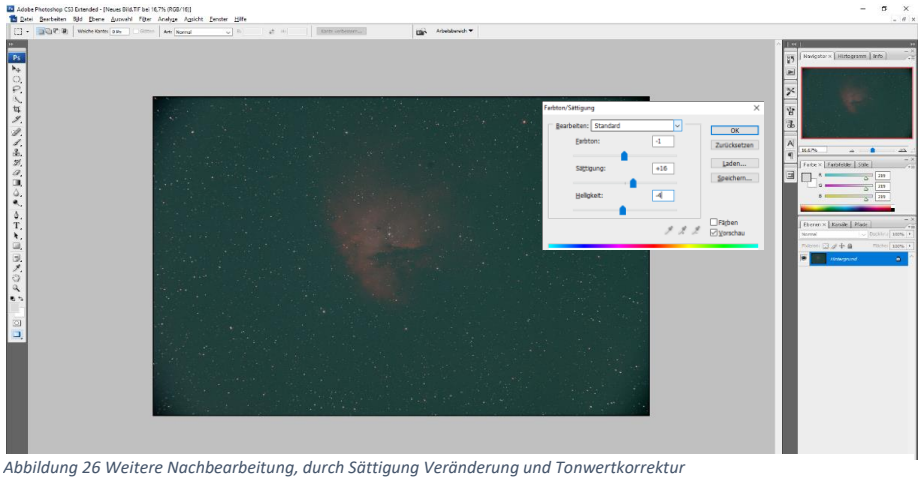


Abbildung 26 Weitere Nachbearbeitung, durch Sättigung Veränderung und Tonwertkorrektur

Nach der Tonwertkorrektur habe ich die Sättigung verändert, damit man den Nebel besser erkennen kann.

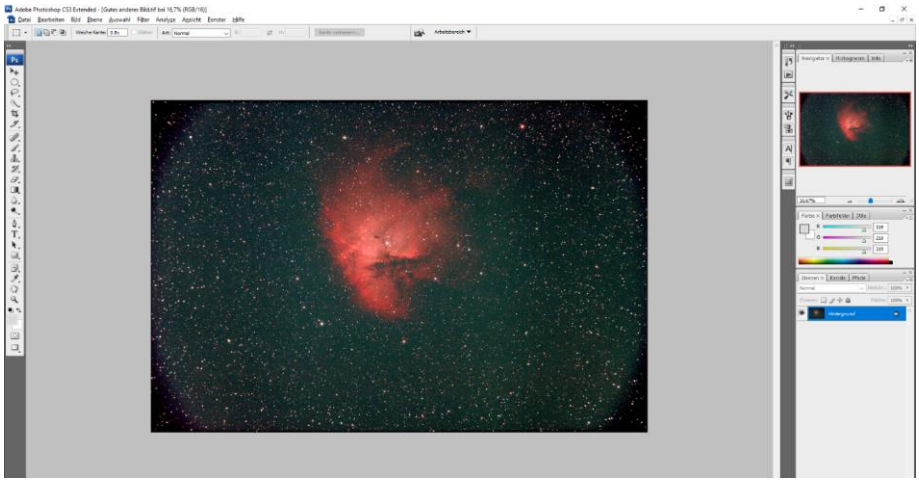


Abbildung 27 Endprodukt der Bearbeitung durch Photoshop

12.3 Ergebnis der Aufnahmen

Abbildung 27 Endprodukt meiner Aufnahmen

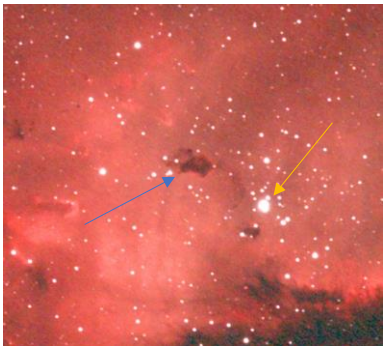


Abbildung 28 Bok-Globule im inneren von NGC 281 von blauem Pfeil markiert und HD 5005 vom gelben Pfeil

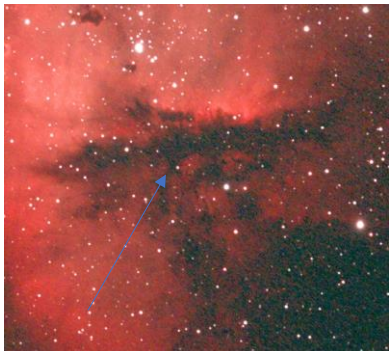


Abbildung 29 H-II-Gebiet in NGC 281 von einem blauen Pfeil markiert

12.4 Besonderheiten des Nebels

Der Nebel ist ein perfektes Beispiel für das Thema meiner Projektarbeit, da im Nebel aktive Sternentstehung Gebiete vorliegen und der Nebel selbst ein Beispiel für eine Supernova ist. Diese aktiven Sternentstehung Gebiete sind einerseits die Bok-Globulen oder auch Dunkelwolken genannt und auch die H-II-Region im Nebel. Diese Bok-Globulen wurden

Abbildung 30 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NGC281NBHunterWilson.jpg Aufnahme von NGC 281 von User Hewholooks Die Gelben Pfeile kennzeichnen weite Globulen in NGC 281

nach ihrem Entdecker Bart Bok benannt, sie sind dichtere Molekülwolken in Nebeln in denen Protosterne heranwachsen, bis die Protosterne das Material von der Globule aufgebraucht haben. Eine durchschnittliche Globule enthält Material in der Masse von 10 Sonnenmassen. Mit dieser großen Menge an Material werden in Bok-Globulen nicht nur einzelne Sterne erschaffen, sondern auch Doppelsternsysteme oder Mehrfachsternsysteme. Bok-Globulen erstrecken sich im Durchschnitt ein Lichtjahr lang in einer H-II-Region aus. Anhand meiner Aufnahmen kann man eine Bok-Globule erkennen, welche sich in der Nähe des Zentrums des Nebels geformt hat. Jedoch ist dies nicht die einzige Globule in NGC 281. Auf hochauflösenden Aufnahmen kann man weitere Globulen im Nebel erkennen. [40] [41]

Was aber dennoch deutlich wird ist welches Objekt NGC 281 ionisiert. Für diesen Vorgang ist der offene Sternhaufen IC 1590 verantwortlich. IC 1590 ist eine Ansammlung von rund 279 Sternen, die sich in der Nebelzone von NGC 281 befinden. Dieser Sternhaufen wird um die 3,5 Million Jahre alt geschätzt. Dieses Alter besagt, dass in diesem Haufen nur junge Sterne anzufinden sind, was auch der Fall ist. Die meisten der Sterne haben die Spektralklasse O, was sie zu sehr heißen und massereichen Sternen macht. Doch das hellste Mitglied dieses offenen Sternenhaufens ist HD 5005 ein Mehrfachsternsystem der Spektralklasse O5.5, und es ist auch der wichtigste Energielieferant für das Ionisieren des Nebels. Außerdem sieht es dem Anschein nach danach aus, dass alle Objekte in NGC 281 radial symmetrisch zu HD 5005 sind. Dies erkennt man anhand des stärkeren Leuchtens der Seite, welche auf HD 5005 gerichtet ist. [42]

Abbildung 31 Darstellung der Radialsymmetrie zu HD 5005 mithilfe von blauen Linien

13 Danksagung

Ich möchte mich am Ende meiner Projektarbeit gewisslich bedanken, dass ich am Carl-Fuhlrott-Gymnasium meine Projektarbeit zu einem Thema meiner Wahl verfassen durfte, sowie meinem Kurslehrer, Herrn Bernd Koch, welcher mich von Anfang an unterstütze, sei es die Themenwahl oder bei dem Bedienen von den verschiedenen Instrumenten und Software.

14 Abschlusserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig angefertigt habe. Keine Quellen oder Hilfsmittel genutzt habe, welche nicht angeben wurden. Außerdem versichere ich, dass ich nicht den Inhalt aus anderen Werken oder Arbeiten entnommen und für mein eigenes genommen habe. Ich bin damit einverstanden, dass meine Projektarbeit von der Schule genutzt und zugänglich gemacht wird.

14.5.2022 Max Wilhelm Reichel

15 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Bild von mir vor dem CDK 20 Teleskop 3
Abbildung 2 Quelle https://supernova.eso.org/germany/exhibition/images/0406_2_DUM/ ESO Kalvinsong 5
Abbildung 3 Proton-Proton Reaktion Quelle https://de.wikipedia.org/wiki/Proton-Proton-Reaktion#/media/Datei:Fusion_in_the_Sun.svg ……6

Abbildung 4 Hertzsprung-Russel-Diagramm Quelle https://de.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung-Russell-Diagramm 7
Abbildung 5 Vergleich der verschiedenen Zwergstern Typen Quelle https://de.wikipedia.org/wiki/Roter_Zwerg#/media/Datei:Relative_star%20sizes_DE.svg 8
Abbildung 6 Illustration eines Braunen Zwerges Quelle https://www.scinexx.de/news/kosmos/braune-zwerge-am-tempolimit/ ……..9

Abbildung 7 Sirius B, ein Weißer Zwerg Quelle https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sirius_A_and_B_Hubble_photo.jpg ……9

Abbildung 8 Die Sonne Quelle https://de.wikipedia.org/wiki/Sonne#/media/Datei:Sun920607.jpg.....9

Abbildung 9 Größenvergleich zwischen Aldebaran und der Sonne Quelle https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c8/Aldebaran-Sun_comparison_de.svg 10
Abbildung 10 Bok-Globule in NGC 281, eigen Aufnahme 10
Abbildung 11 Illustration eines Vorhauptreihensterns Quelle https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Witness_the_Birth_of_a_Star.jpg ……12

Abbildung 12 Veranschaulichung der Prozesse einer Supernova Typ 1a Quelle https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Progenitor_IA_supernova-de.svg 13
Abbildung 13 Canon EOS Rpa Quelle https://www.canon.de/cameras/eos-rp/ 15
Abbildung 14 Foto des TEC160FL Teleskops Eigene Anfertigung 16
Abbildung 15 10Micron GM4000HPSII Montierung Quelle https://10micron.eu/montierungen/aequatoriale-montierungen/gm4000-hps-ii-goto-montierung.....16
Abbildung 16 Wellenlänge Durchlass Bereiche des L-eNhance Filters Quelle https://www.teleskop-express.de/shop/product_info.php/info/p11238_Optolong-2--L-eNhance-Nebelfilter-fuer-DSLR-und-Color-Astro-Kameras.html.....17
Abbildung 17 Bild des Filters Quelle https://www.teleskop-express.de/shop/product_info.php/info/p11238_Optolong-2--L-eNhance-Nebelfilter-fuer-DSLR-und-Color-Astro-Kameras.html.....17
Abbildung 18 Anvisierung von NGC 281 mit Stellarium, rotes Rechteck zeigt den aufzunehmenden Nachthimmel ausschnitt Eigene Anfertigung 18
Abbildung 19 Stacking der einzelnen Raw Bilder via DeepSkyStacker Eigene Anfertigung. 19
Abbildung 20 Modus für das Stacken der Bilder……..……19
Abbildung 21 Stacking Parameter……19
Abbildung 22 Prozess des Stackings……..……..19
Abbildung 23 Produkt aus dem Stacking verfahren……...……..20

Abbildung 24 Durch eine Farbkorrektur verbessertes Endprodukt……..……20
Abbildung 25 Nachbearbeitung der Aufnahmen mit Photoshop……..21
Abbildung 26 Endprodukt der Bearbeitung durch Photoshop……..……21
Abbildung 27 Endprodukt meiner Aufnahmen……22
Abbildung 28 Bok-Globule im inneren von NGC 281 von blauem Pfeil markiert und HD 5005 vom gelben Pfeil……..22
Abbildung 29 H-II-Gebiet in NGC 281 von einem blauen Pfeil markiert……..…..22
Abbildung 30 Aufnahme von NGC 281 von User Hewholooks Die Gelben Pfeile kennzeichnen weite Globulen in NGC 281 Quelle https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1b/NGC281NBHunterWilson.jpg 23
Abbildung 31 Darstellung der Radialsymmetrie zu HD 5005 mithilfe von blauen Linien….24

16 Internetquellen

Was ist ein Stern

[1] https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_massereichsten_Sterne

[2] https://de.wikipedia.org/wiki/Stern

[3] https://www.spektrum.de/lexikon/physik/sterne/13840

[4] https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/stern/458

Wie ist ein Stern aufgebaut

[5] https://supernova.eso.org/germany/exhibition/0406/

[6] https://astrokramkiste.de/sonne-aufbau#:~:text=Der%20Kern,Wasserstoffkerne%20verschmelzen%20zu%20Heliumkernen.

[7] https://www.geo.de/geolino/natur-und-umwelt/10511-rtkl-wissenschaft-der-aufbau-der-sonne

[8] https://de.wikipedia.org/wiki/Sternaufbau

[9] https://de.wikipedia.org/wiki/Photosph%C3%A4re

[10] https://de.wikipedia.org/wiki/Korona_(Sonne)

Fusion in Sternen

[11] https://de.wikipedia.org/wiki/Proton-Proton-Reaktion#:~:text=Die%20Proton%2DProton%2DReaktion%20(,Wasserstoff%20in%20Helium%20umgewandelt%20wird.

[12]https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=10473&pNid=0&pLang=de#:~:text=Durch%20Kernfusion%20werden%20die%20Protonen,wobei%20es%20zu%20Kernfusionen%20kommt.

[13] https://de.wikipedia.org/wiki/Kernfusion

[14] http://www.sternsucher.com/weltraum/astrophysik/201-kernfusion.html

Stern Klassifizierung

[15] https://de.wikipedia.org/wiki/Spektralklasse

[16] https://de.wikipedia.org/wiki/Absolute_Helligkeit

[17] https://de.wikipedia.org/wiki/Hertzsprung-Russell-Diagramm

[18]https://de.wikipedia.org/wiki/Klassifizierung_der_Sterne#:~:text=Die%20Leuchtkraftklasse%20gibt%20den%20Entwicklungsstand,Regel%20ein%20Hauptreihenstern%20(V).

Sternklassen

[19] https://de.wikipedia.org/wiki/Brauner_Zwerg

[20] https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/brauner-zwerg/56

[21] https://de.wikipedia.org/wiki/Wei%C3%9Fer_Zwerg

[22] https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/weisser-zwerg/525

[23] https://www.scinexx.de/news/kosmos/weisser-zwerg-ist-kleinstes-schwergewicht/

[24] https://de.wikipedia.org/wiki/Gelber_Zwerg

[25] https://www.br-online.de/wissen-bildung/spacenight/sterngucker/deepsky/typen-zwerge-gelbe.html

[26] https://de.wikipedia.org/wiki/Riesenstern

[27] https://en.wikipedia.org/wiki/Stephenson_2-18

[28] https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_gr%C3%B6%C3%9Ften_Sterne

[29] https://de.wikipedia.org/wiki/Roter_Zwerg

Stern Entstehung

[30] https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Sternentstehung

[31]https://de.wikipedia.org/wiki/Sternentstehung#:~:text=Sternentstehung%20ist%20ein%20Schl%C3%BCsselprozess%20bei,Gas%20in%20Sterne%20umgesetzt%20wird.

[32] https://wissenstexte.de/physik/sterne.htm

[33] https://sternentstehung.de/vorhauptreihensterne

[34] https://sternentstehung.de/protosterne

[35] https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/gravitationskollaps/152

[36] https://sternentstehung.de/kollaps-von-molekuelwolken

Endstadien

[37] https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/supernova/465

[38] https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Supernova

[39] https://de.m.wikipedia.org/wiki/Neutronenstern

NGC 281

[40] https://en.wikipedia.org/wiki/Bok_globule

[41] https://de.wikipedia.org/wiki/H-II-Gebiet

[42] https://de.wikipedia.org/wiki/IC_1590

[43] Zitat von Wikipedia https://de.wikipedia.org/wiki/Supernova

Feldfunktion geändert