Expansion des Krebsnebels

Untersuchung zur Ausdehnung des Supernovaüberrestes M1

Projektarbeit von Ben Bastigkeit

Jahrgangsstufe Q1

Carl-Duisberg-Gymnasium

im Projektkurs Astronomie (Carl-Fuhlrott-Gymnasium)

Schuljahr 2021/2022

Kursleitung: Bernd Koch

Inhaltsverzeichnis

Seite

1. Einleitung 4

2. Definition Stern **5**

2.1 Parameter 6

2.2 Sternentypen 8

2.2.1 Doppelsterne 8

2.2.2 Veränderliche Sterne 9

2.2.3 Riesensterne 9

2.2.4 Neutronensterne 10

2.2.5 Weiße Zwerge 10

2.3 Energie und Stabilität 11

2.4 Lebenserwartung 12

3. Entwicklungsstufen eines Sterns **13**

3.1 Geburt eines Sterns 13

3.2 Daseinsstadien eines Sterns 15

3.2.1 Hauptreihenphase 15

3.2.2 Spätstadien 16

3.3 Sterben eines Sterns 17

3.3.1 Neutronenstern 17

3.3.2 Schwarzes Loch 18

3.4 Kosmischer Materiekreislauf 18

4. Der Krebsnebel **19**

4.1 Entstehung 19

4.2 Pulsar 20

4.3 Expansion 21

4.4 Forschungen 22

5. Eigene Messungen zur Expansion des Krebsnebels 23
5.1 Astrofotografie 23
5.2 Teleskop 24
5.3 Kamera 25
5.3 Filter 25
5.3 Eigene Aufnahmen 26

6. Auswertung der eigenen Aufnahmen 27
6.1 Bearbeitung mit Deep Sky Stacker 28
6.2 Farbkorrektur mit Photoshop 29
6.3 Historische Vergleichsaufnahme 30
6.4 Überprüfung auf Expansionsbelege 30
6.5 Ergebnisse der Auswertung 31

7. Fazit 33

8. Literaturverzeichnis 34

9. Abbildungsverzeichnis 36

10. Danksagung 38

11. Erklärung 38

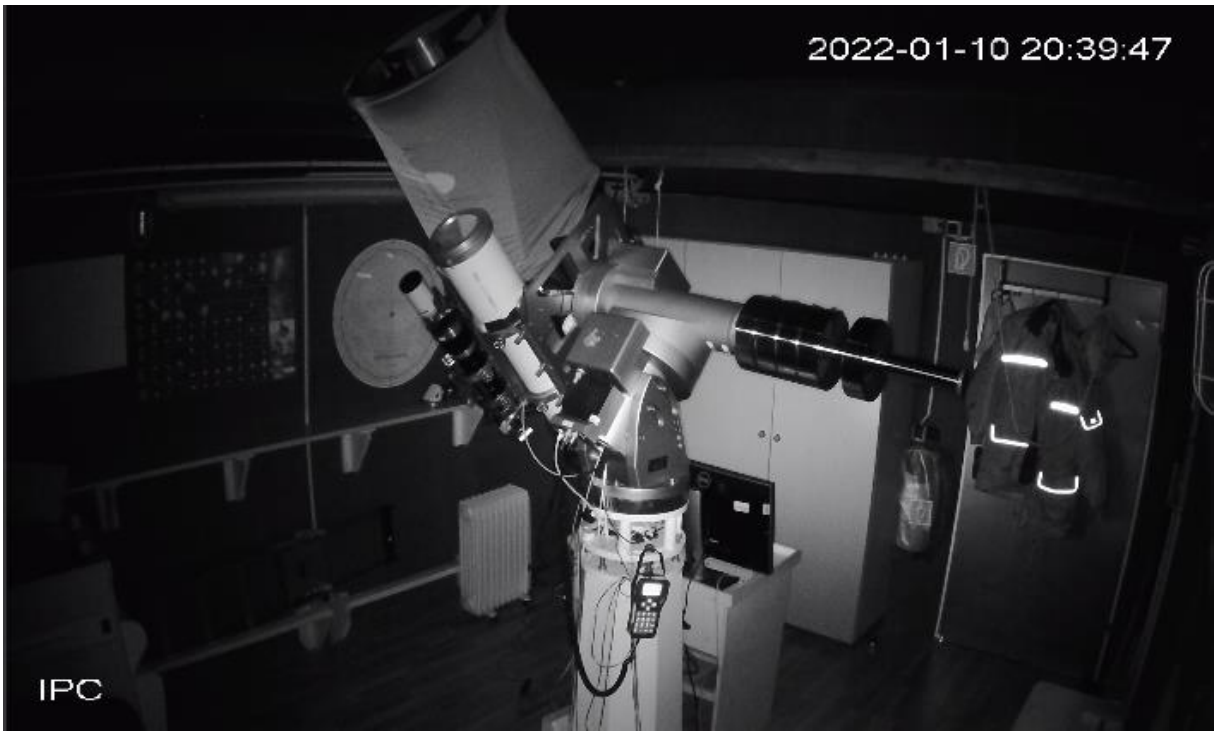
1. Einleitung

Der Krebsnebel fasziniert Astronomen seit seiner Entstehung. Dieses resultiert nicht nur aus seiner guten Beobachtbarkeit aufgrund seiner relativen Nähe zur Erde, sondern auch aus seiner permanenten Dynamik. Er ist ein Himmelsobjekt, dass sich in vergleichsweise kurzen Zeitabständen sichtbar wandelt und weiterentwickelt.

Ausgangspunkt meiner Projektarbeit ist die These, dass der Krebsnebel seit seiner Entstehung permanent expandiert. Ausgehend von dieser Annahme lässt sich prüfen, wann der Krebsnebel entstanden ist. Durch den Vergleich von aktuellen und historischen Aufnahmen des Krebsnebels, sollen in dieser Projektarbeit Rückschlüsse auf seine Entstehung gezogen werden.

In den ersten Teilen dieser Projektarbeit trage ich theoretisches Wissen zu den Themengebieten Sternentstehung und Entwicklungsstadien von Sternen zusammen, um das Himmels-objekt „Krebsnebel“ adäquat einordnen zu können.
Darauffolgend steht der Krebsnebel im Zentrum der wissenschaftlichen Recherche. Aufbauend auf dieses Wissen stelle ich meine eigenen Untersuchungen zum Krebsnebel dar.

Die darin verwendeten aktuellen Aufnahmen des Krebsnebels habe ich am 10. Januar 2022 zusammen mit einem Mitschüler selbst erstellt.



2. Definition: Stern

In der Astronomie versteht man unter einem Stern einen Himmelskörper, der sowohl eine eigene Leuchtkraft besitzt als auch die meisten anderen Himmelskörper in seiner Masse übertrifft.[1]
Grundsätzlich bestehen Sterne hauptsächlich aus Wasserstoff. Ihre Masse ist eine Mischung von Plasma und Gas. Durch Kernfusion wird Energie freigesetzt und Helium erzeugt. Diese Energieumwandlung erzeugt Licht und Wärme.

Nach ihrer Entstehung durchlaufen Stern verschiedenen Stadien einer Entwicklung (s. 3. Entwicklungsstufen eines Sterns). In diesen Phasen setzen die Sterne unterschiedlichen Mengen von Energie frei und leuchten dementsprechend unterschiedlich hell.
Aufgrund ihrer Entstehung aus Gaswolken kommen Sterne häufig in Gruppen vor. Diese Ansammlungen werden auch Sternhaufen genannt.[2]

Sterne sind in der Regel größer als andere Himmelsobjekte. Dabei bestehen allerdings signifikante Unterschiede hinsichtlich ihrer Masse und der Größe.

Die folgende Grafik beschäftigt sich mit dem Größenvergleich von verschiedenen Sternen:

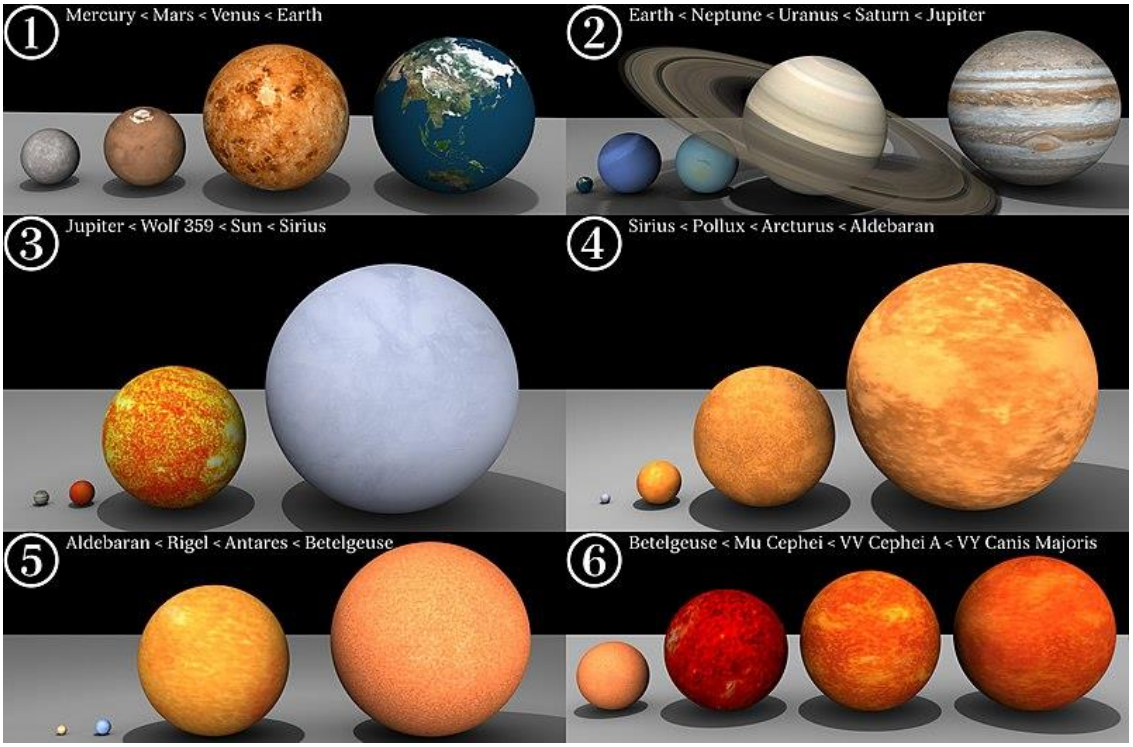


Bild 1: Sternen-Größen – Quelle: File:Star-sizes.jpg - Wikimedia Commons

Während der Stern Pollux nur einen Radius von 9,14 Sonnenradien besitzt, hat der Stern VY Canis Majoris einen Radius von 2100 Sonnenradien.

[1] vgl.: Wikipedia (2008-2022): Stern, https://de.wikipedia.org/wiki/Stern
[2] vgl.: de Bor, Klaas S.(2001): Von der Geburt bis zum Tod von Sternen, https://astro.uni-bonn.de/~deboer/sterne/pdmsternetxt.html

Abgesehen von den Merkmalen Leuchtkraft und Masse gibt es weitere Parameter von Sternen, die im Punkt 2.1 beschrieben werden.
Eine Darstellung der Untergliederung verschiedener Sternentypen erfolgt im Abschnitt 2.2.
Der Punkt 2.3 beschäftigt sich mit den Aspekten Energie und Stabilität von Sternen.
Zum Abschluss dieses Kapitels wird im Punkt 2.4 das Thema Lebenserwartung von Sternen behandelt.

2.1 Parameter

Differenzierung zwischen Sternen ergeben sich auch aus anderen Parametern. Dabei benennt die Wissenschaft als besonders aussagekräftige Parameter die Temperatur, Energie und Farbe.

Die Temperatur variiert von 3.000 K bei „kühleren“ Sternen, über 6.000 K bei sonnenähnlichen Sternen bis zu 100.000 K bei sehr energiereichen Sternen.

In der visuellen Beobachtung erscheinen Sterne mit besonders hohen Temperaturen häufig bläulich. Sterne mit im Vergleich niedrigen Temperaturen erscheinen eher rötlich.

Das farbliche Erscheinungsbild von Sternen ist in der folgenden Grafik dargestellt:

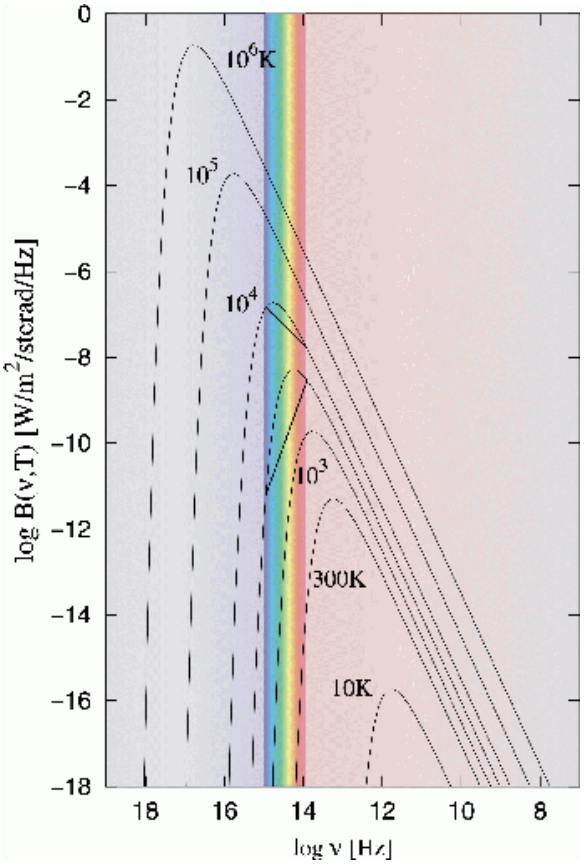
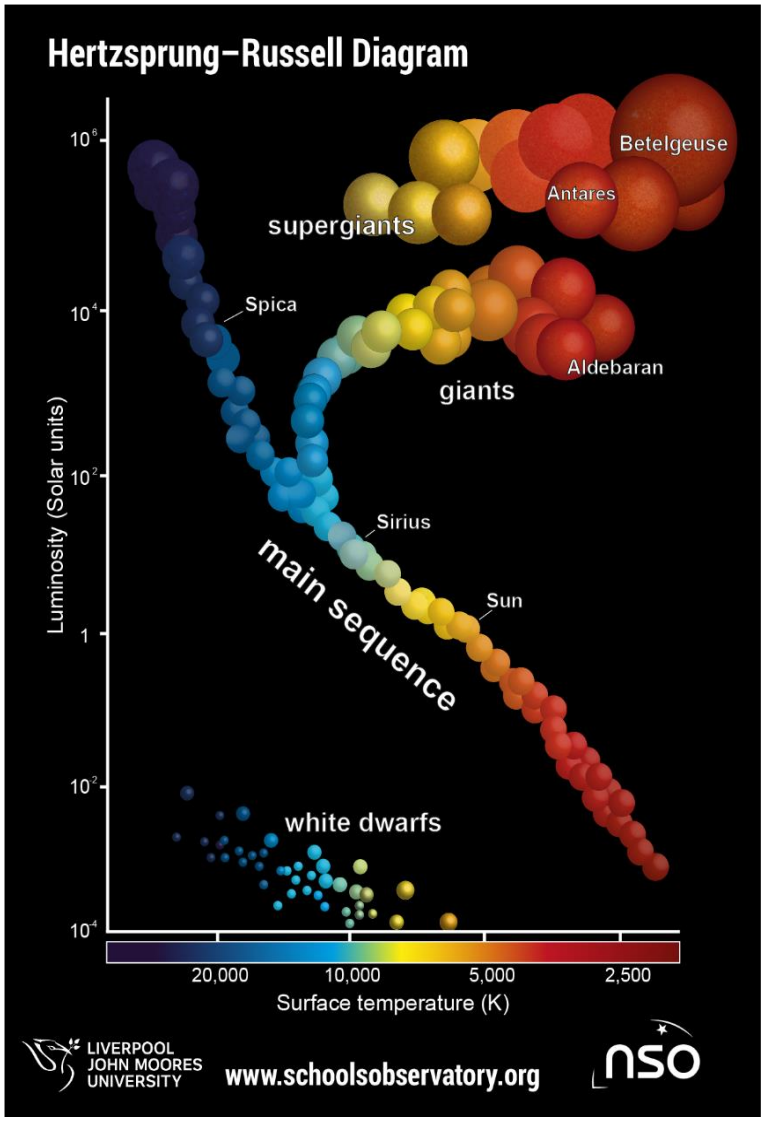


Bild 2: Farbliches Erscheinungsbild von Sternen - Quelle: Jahr der Physik, Astrophysik: Von der Geburt bis zum Tod der Sterne (uni-bonn.de)

Ein weiterer Einflussfaktor für das farbliche Erscheinungsbild ist die absolute Helligkeit. Diese wird im Hertzsprung-Russell-Diagramm veranschaulicht.[3]
Demnach ist die die Farbzusammensetzung *B-V*, welche der Stern abstrahlt, abhängig von der absoluten Helligkeit M_V .



Mithilfe des Hertzsprung-Russell Diagramms lassen sich Sterne bestimmten Gruppen zuordnen: Die Sterne werden entsprechend ihrer Helligkeit und Farbe in das Diagramm eingetragen.

Bestimmte Sterne ordnen sich masseabhängig auf einer Linie ein. In dieser so entstehenden graphischen Reihe befinden sich die Sterne, die Wasserstoff zu Helium verbrennen.

Sterne, die sich in dieser Reihe des Hertzsprung-Russell Diagramms befinden werde Hauptreihensterne genannt.

Bild 3: Hertzsprung-Russell-Diagramm -, Quelle: hr-diagram-credit-nso.png (1220×1713) (schoolsobservatory.org)

Masse, Energie, Helligkeit und Temperatur eines Sternes sind somit immer im Kontext zu betrachten. So wie die Temperatur, steht die Helligkeit im Zusammenhang mit der Energie, welche der Stern freisetzt.[4]

[3] vgl.: de Bor, Klaas S.(2001): Von der Geburt bis zum Tod von Sternen, https://astro.uni-bonn.de/~deboer/sterne/pdmsternetxt.html
[4] vgl.: de Bor, Klaas S.(2001): Von der Geburt bis zum Tod von Sternen, https://astro.uni-bonn.de/~deboer/sterne/pdmsternetxt.html

2.2 Sternentypen

Aufgrund ihrer Unterschiede werden Sterne in einzelne „Klassen“ eingeteilt, welche teilweise einzelne „Subklassen“ besitzen.
Diese Klassifizierung der Sterne erfolgt in die Typen Doppelsterne, veränderliche Sterne, Riesensterne, Neutronensterne und Weißen Zwerge.[5]

2.2.1 Doppelsterne

Als Doppelstern wird ein System aus zwei Sternen bezeichnet, das von der Erde auf den ersten Blick nicht als zwei Sterne erkannt werden kann, weil diese Sterne nah nebeneinander-stehen. Bei besonders dicht zusammenstehenden Sternen bedarf es besonderer Methoden zum Nachweis.
Doppelsterne werden ausschließlich anhand ihrer gravitativen Bindung und damit veränderten Flugbahn identifiziert.
Bei Doppelsternen handelt es sich um zwei Sterne, die sich um einen gemeinsamen Schwerpunkt bewegen. Dabei bezeichnet man des massenreicheren bzw. helleren Stern als Haupt-stern und den massenärmeren bzw. lichtschwächeren Stern als Begleiter. Abhängig von der Verteilung der beiden Sternenmassen, kann sich der Schwerpunkt, um den sich beide Sterne bewegen, auch innerhalb des Hauptsterns liegen.[6]

Bild 4: Doppelstern Albireo im Sternbild Schwan (Astronomy Picture of the Day, aufgenommen von Richard Yandrick)
Quelle: Doppelsterne | Max-Planck-Institut für Radioastronomie (mpg.de)

Doppel- und Mehrfachsysteme gibt es häufig. In der Milchstraße sind ca. 50% der Sterne Teile eines Doppel- bzw. Mehrfachsystems.

---

[5] vgl. Wikipedia (2008-2022): Liste der Sternenklassen, https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Sternklassen, [abgerufen im April 2022]
[6] vgl.: Max-Planck-Institut für Radioastronomie (2022): Doppelsterne, https://www.mpifr-bonn.mpg.de/603143/doppelsterne

Eine Unterteilung von Doppelsternen in Untergruppen orientiert sich an der Methode, mit der sie als Doppel- oder Mehrfachsystem identifiziert wurden. Man differiert vier Untergruppen[7]:

1. Visuelle Doppelsterne (Optisches Teleskop)
2. Spektroskopische Doppelsterne (Spektroskop)
3. Photometrische Doppelsterne (Untergruppe der spektroskopischen Doppelsterne)
4. Astrometrische Doppelsterne (Sterne mit unsichtbaren Begleitern)

Ein wegen seiner guten Beobachtbarkeit bekanntes Beispiel für einen Doppelstern ist Alpha Centauri, welches im Sternenbild „Centaurus“ steht.

2.2.2 Veränderliche Sterne

Ein Teil der sichtbaren Sterne leuchtet nicht gleichförmig, sondern verändert seine Helligkeit in gut beobachtbaren Zeiträumen. Ein Stern, der signifikante Schwankungen in seiner Helligkeit aufweist wird als veränderlicher Stern bezeichnet. Helligkeitsschwankungen basieren entweder auf Ungleichförmigkeiten in der Energieerzeugung des Sterns in Form von Eruptionen oder durch Verdeckungen in einem Doppelsternsystem. In jedem Fall können aus der Art des Lichtwechsels Rückschlüsse auf die physikalischen Eigenschaften eines veränderlichen Sterns gezogen werden.[8]

2.2.3 Riesensterne

Unter Riesensterne versteht man Sterne von enormer Größe und entsprechender Helligkeit. Riesensterne entsprechen dem 2. Stadium der Sternenentwicklung von sonnenähnlichen Sternen (s. Kap. 3).

Der Radius eines Riesensterns liegt zwischen 10 und 100 Sonnenradien. Seine Helligkeit variiert zwischen dem 10 und 1000-fachen unserer Sonne.[9]

In der Klasse der Riesensterne gibt es folgende Untergruppen:
1. Unterriesen
2. Normale Riesen
3. Helle Riesen
4. Überriesen
5. Hyperriesen

Da das Strahlungsmaximum von Riesen im roten Spektralbereich liegt, werden Riesensterne in diesem Stadium auch als Rote Riesen bzw. Rote Überriesen bezeichnet. Dementsprechend lauten sich Bezeichnungen mittlerer und früherer Spektralklassen Gelbe oder Blaue Riesen.[10]

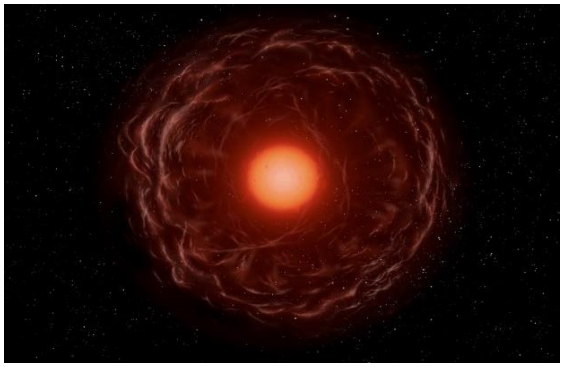


Bild 5: Roter Riese Quelle: ESA - Artist's impression of a red-giant star ejecting matter

[7] vgl. Max-Planck-Institut für Radioastronomie (2022): Doppelsterne, https://www.mpifr-bonn.mpg.de/603143/doppelsterne
[8] vgl.: Sternwarte Hartha e.V. (2022): Veränderliche Sterne, https://www.sternwarte-hartha.de/besucherinformationen/veranderliche-sterne/
[9] vgl.: Wikipedia (2008-2022): Riesensterne, https://de.wikipedia.org/wiki/Riesenstern
[10] vgl.: Wikipedia (2008-2022): Riesensterne, https://de.wikipedia.org/wiki/Riesenstern

2.2.4 Neutronensterne

Neutronensterne entstehen aus Supernovae. Sie sind die vermutlich dichtesten Objekte im Universum. Neutronensterne sind deutlich kleiner als die meisten anderen Sterne und bestehen zum größten Teil aus Neutronen. [11] (Siehe dazu auch Abschnitt 3.3.1)

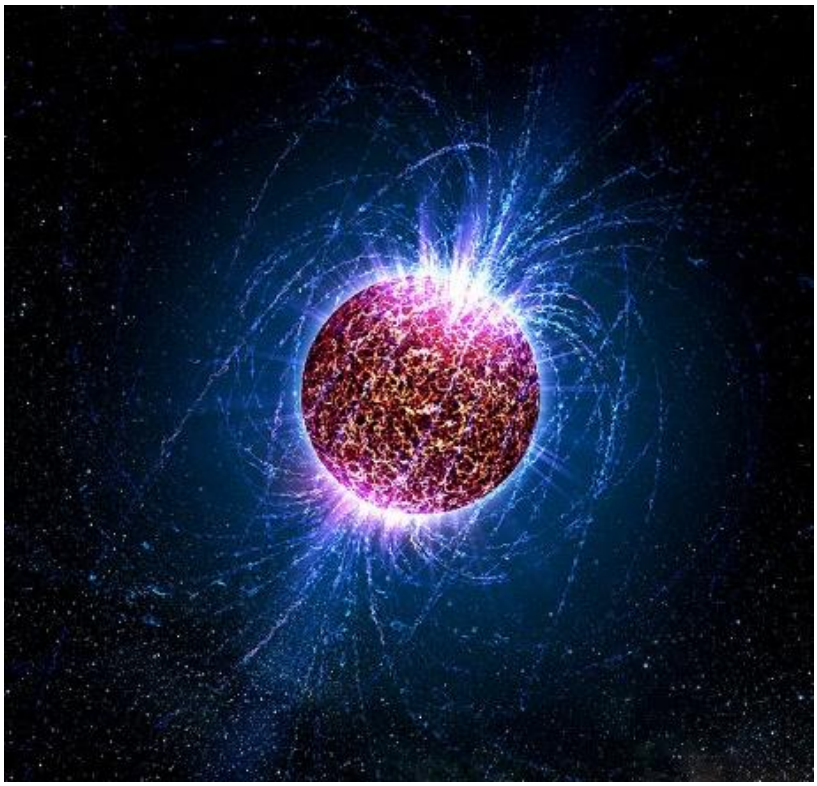


Bild 6: Neutronenstern Quelle: Neutron star illustrated - Category:Neutron stars - Wikimedia Commons

2.2.5 Weiße Zwerge

Alle weißen Zwerge sind Sterne in der Endevolutionsstufe. Sie sind sehr alt und sehr kompakt. Weißen Zwerge sind, obwohl ihnen langsam die Stoffe für die Kernfusion ausgehen, noch sehr heiß. Jedoch scheinen sie, im Vergleich zu anderen Sternen, nur sehr schwaches Licht aus.
Der Name Weißer Zwerg weist auf die Merkmale hohe Temperatur (Weißes Licht) und kleine Sternenoberfläche (Zwerg) hin.
Trotz ihres geringen Raduis‘ von 1 bis 2 Erdradien, besitzen Weiße Zwerge die Masse eines Sterns. Diese besteht aus einem Kern heißer, entarteter Materie von extrem hoher Dichte, die von einer dünnen leuchtenden Photosphäre um geben ist.[12]

[11] vgl.: Konitzer, Franziska, (2018): Neutronensterne, https://www.weltderphysik.de/mediathek/podcast/neutronensterne/
[12] vgl.: Wikipedia (2008-2022): Weißer Zwerg, https://de.wikipedia.org/wiki/Wei%C3%9Fer_Zwerg

2.3 Energie und Stabilität

Sterne beziehen ihre Energie aus dem Prozess der „Kernfusion“. Der Begriff Kernfusion bezeichnet eine Kernreaktion, bei der zwei Atomkerne zu einem neuen Kern verschmelzen.
Diese Kernfusion geschieht bei Temperaturen von mehr als 10 Millionen °C, da sich ab dieser Temperatur die Elektronen frei im Plasma bewegen können.
Beim Prozess der Kernfusion wird Wasserstoff zu Helium umgewandelt, was zu einer massiven Freisetzung von Energie führt.

Die folgende Abbildung stellt den wichtigsten Fusionsprozess im Inneren der Sterne dar: Die Fusion von Wasserstoff zu Helium über die sogenannte p-p Kette
Bei diesem Prozess kommen zwei Wasserstoffkerne, Protonen (p), zur Fusion und werde so zu Deuterium (D). Im nächsten Schritt verschmilzt Deuterium mit einem Proton und wird zu ^{03}Helium. Zwei ^{03}Heliumkerne fusionieren dann unter Freigabe von zwei Protonen zu einem ^{04}Heliumkern, wodurch wieder zwei Wasserstoffatome abgestoßen werden.[13]

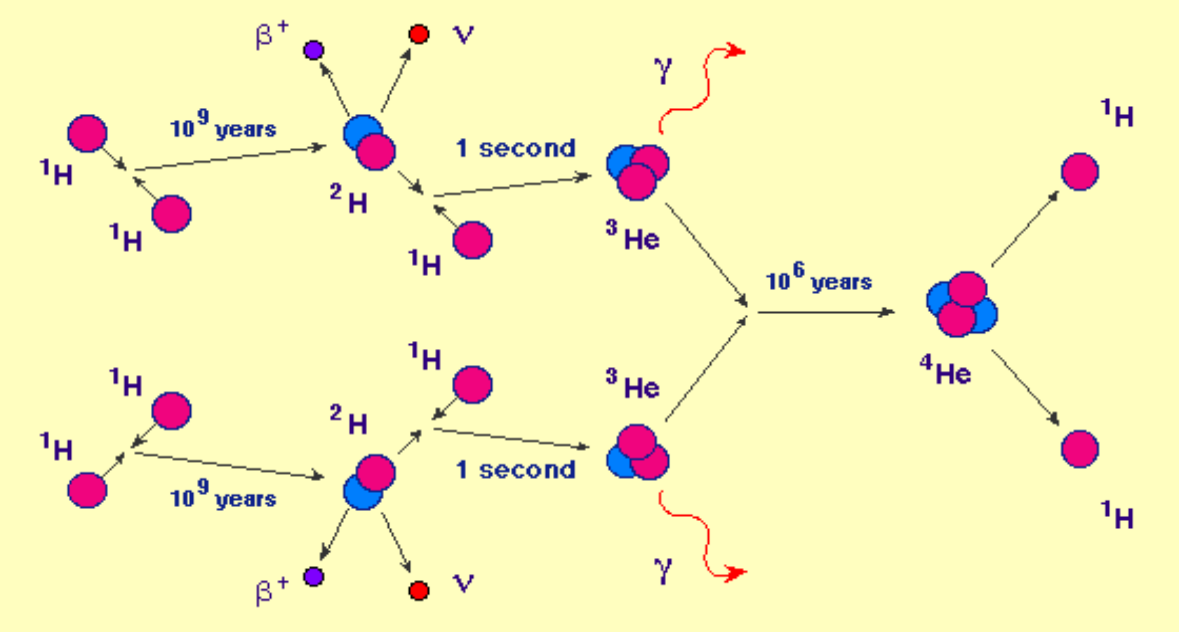


Bild 7: P-P-Kette, Quelle: http://www.pas.rochester.edu/~blackman/ast104/ppchain.html

[13] vgl.: de Bor, Klaas S.(2001): Von der Geburt bis zum Tod von Sternen, https://astro.uni-bonn.de/~deboer/sterne/pdmsternetxt.html

Trotz der enormen Menge von Energie, die Sterne abstrahlen, sind sie stabil. Ihre Stabilität beruht auf dem dauerhaften Gleichgewicht von Schwerkraft und innerem Gasdruck.
Die gesamte Masse des Sterns wird aufgrund der Schwerkraft ins Zentrum des Sternes nach innen gezogen. Gleichzeitig bewirkt die Temperatur der Gase im Inneren des Sterns ein Drängen nach außen. Solange diese Kräfte sich ausgleichen, bleibt der Stern stabil.[14]

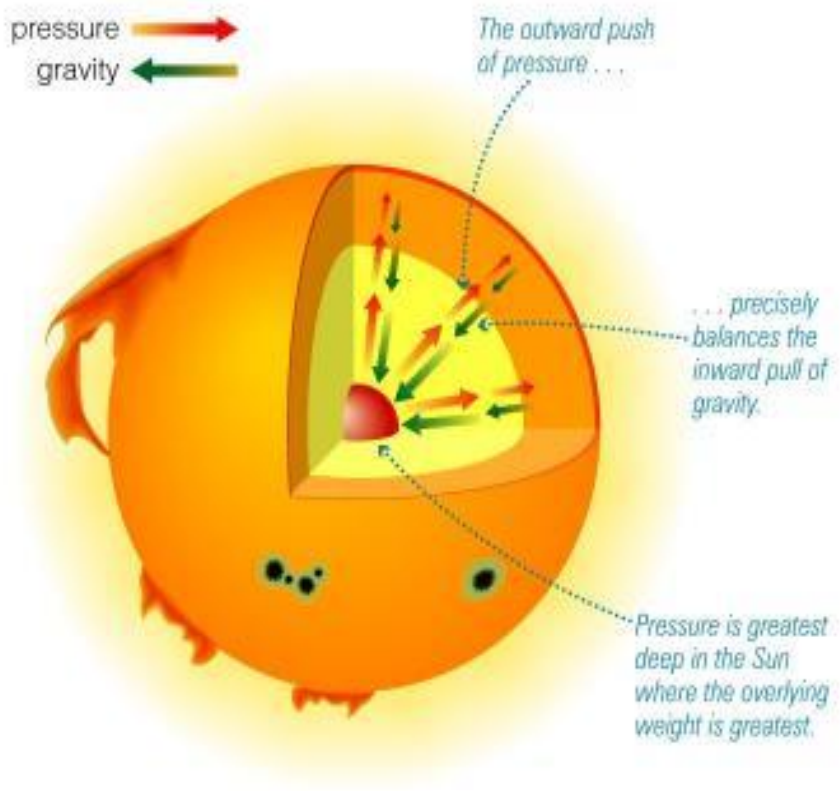


Bild 8: Hydrostatisches Gleichgewicht -t Quelle: Main Sequence | National Schools' Observatory (schoolsobservatory.org)

2.4 Lebenserwartung

Die Lebenserwartung von Sternen lässt sich aufgrund ihrer Proportionalität zwischen der Masse und dem verfügbaren Brennstoff grob berechnen. Hierzu wird der Brennstoff gegen die Leuchtkraft aufgewogen, da die Leuchtkraft die verbrauchte Energie darstellt.[15]

[14] vgl.: de Bor, Klaas S.(2001): Von der Geburt bis zum Tod von Sternen, https://astro.uni-bonn.de/~deboer/sterne/pdmsternetxt.html
[15] vgl.: Wikipedia (2008-2022): Hauptreihe, https://de.wikipedia.org/wiki/Hauptreihe

3. Entwicklungsstufen eines Sterns

Ein Stern durchläuft verschiedene Stadien. Welche Entwicklungsstufen das sind, hängt von seiner Masse ab. Die folgende Abbildung zeigt die möglichen Stadien auf. Dabei handelt es sich um eine stark vereinfachte Darstellung, die lediglich einen groben Überblick gibt.
Tatsächlich sind die Prozesse nicht so linear, wie sie hier dargestellt werden. So gibt es nicht nur zwei masseabhängige Entwicklungslinien und die Entstehung Planetarischer Nebel findet auch in anderen Entwicklungsstadien statt.
Trotzdem gibt die Grafik einen guten ersten Überblick darüber, welche Entwicklungsstadien es gibt. In den folgenden Abschnitten werden themenrelevante Spezifika näher erläutert.

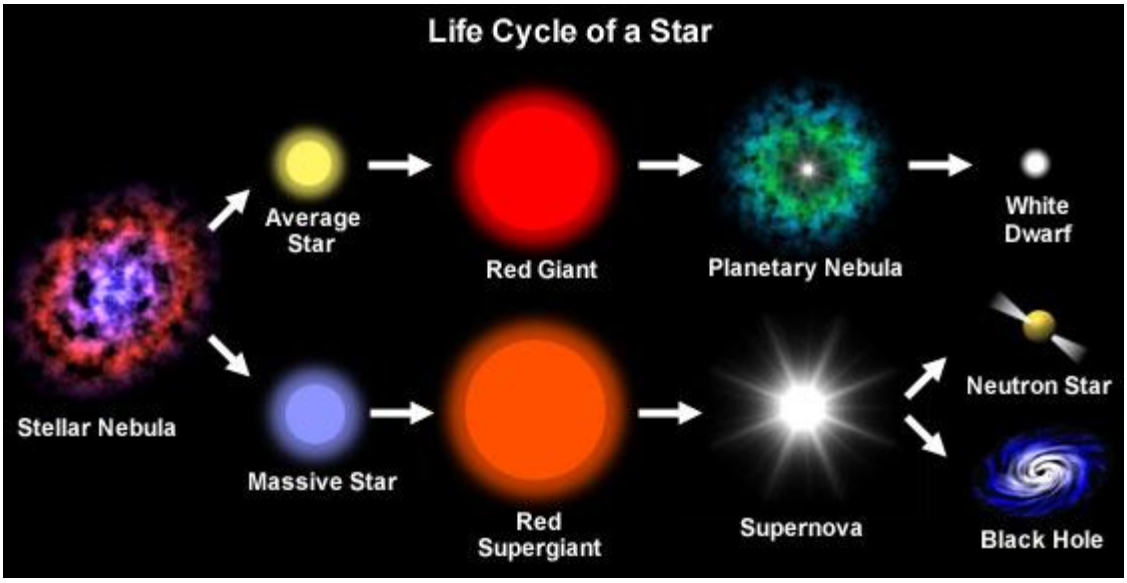


Bild 9: Entwicklungsstufen - Quelle: Life Cycle of a Star | National Schools' Observatory (schoolsobservatory.org)

3.1 Entstehung eines Sterns

Jeder Stern beginnt sein Leben als interstellare Molekülwolke. Diese Wolken verdichten sich aufgrund ihrer inhärenten Gravitation. Durch die gegenseitige Anziehung bilden sich vereinzelt erste kleinere Verdichtungen. In diesen Nebelwolken herrschen um die 20 Kelvin, eine Temperatur, die die Bildung von Molekülen erlaubt.
Solange sich in dieser Molekülwolke, die nach innen wirkenden Gravitationsenergien und der nach außen wirkende Gasdruck ausgleichen, herrscht ein hydrostatisches Gleichgewicht. Damit ist ein Kollaps der Molekülwolke und damit die Entstehung eines Sterns ausgeschlossen.

Für die Entstehung eines Sterns muss es in der Molekülwolke zu einem gravitativen Kollaps kommen. Dafür müssen eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt sein, die quantitativ mit dem Jeans-Kriterium beschrieben werden.[16]

[16] vgl.: Braun, Dominik, Sternenentstehung.de (2018-2021): Kollaps von Molekülwolken, https://sternentstehung.de/kollaps-von-molekuelwolken

Nach dem Jeans-Kriterium komm es zum Kollaps, wenn die Masse der Molekülwolke eine Grenz-Masse überschreitet. Wird diese kritische Jeans-Masse überschritten, muss die Molekülwolke sich durch ihre inhärenten Gravitationskräfte zusammenziehen.

Eine Wolke mit der Masse M kollabiert demnach, wenn $M > M_{Jeans}$ gilt.

Zur vereinfachten Berechnung der Masse einer Molekülwolke (ohne Einwirkung äußerer Kräfte und ohne Drehimpuls) dient die folgende Formel:

$$M_{Jeans} = \pi^{\frac{3}{2}} \frac{1}{\sqrt{\rho}} \left(\frac{RT}{\mu G} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Formel von: Wie das Jeans-Kriterium über die Sternentstehung entscheidet – Sternentstehung.de

Nach dieser Formel hängt die Jeans-Masse von den Einflussgrößen Temperatur, Dichte und Radius ab und bezieht die Masse eines Gasmoleküls und die Gravitationskonstante mit ein.

Im weiteren Verlauf setzt sich der Verdichtungsprozess weiter fort. Beim fortwährenden Kollabieren heizen sich abgeschnürte Bereiche der Molekülwolke, die Globulen, immer weiter auf, bis, bei ausreichend hohem Druck und einer Temperatur von mehreren Millionen Kelvin, die Bedingungen für das Zünden der Fusion von Wasserstoff zu Helium gegeben ist. Die Kernfusion beginnt.[17]

Durch den fortschreitenden Gravitationskollaps von Molekülwolken wird also die Geburt der Sterne eingeleitet. Dabei wird angenommen, dass innerhalb einer Molekülwolke nicht nur ein Stern entsteht, sondern ganze Sternhaufen.[18]

Eines der nächsten und bekanntesten Entstehungsgebiete von Sternen ist der Orion-Nebel, eine Molekülwolke, in welcher eine Vielzahl junger Sterne festgestellt wurden.

Bild 10: Orion Nebel – Quelle: Messier 42 (The Orion Nebula) | NASA
NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA) and the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team

[17] vgl. LEIFI, Joachim Herz Stiftung: Sterngeburt (2022): https://www.leifiphysik.de/astronomie/fixsterne/grundwissen/sterngeburt?msclkid=f08f23e7bb1911ecb23c47409d0d0d0a

[18] vgl.: LEIFI, Joachim Herz Stiftung: Sterngeburt (2022): https://www.leifiphysik.de/astronomie/fixsterne/grundwissen/sterngeburt?msclkid=f08f23e7bb1911ecb23c47409d0d0d0a

3.2 Daseinsstadien eines Sterns

Nachdem die Kernfusion in Gang gekommen ist, gleichen sich die im Stern wirkenden Kräfte aus und der Stern ist stabil: Diese Stabilität beruht auf dem dauerhaften Gleichgewicht von Schwerkraft und innerem Gasdruck. Die gesamte Masse des Sterns wird aufgrund der Schwerkraft ins Zentrum des Sternes nach innen gezogen. Gleichzeitig bewirkt die Temperatur der Gase im Inneren des Sterns ein Drängen nach außen. [19]

Wie lange diese Stabilität wärt und wie der Stern sich weiterentwickelt hängt von der Masse des Sterns ab. Dabei werden massearme und massereiche Sterne unterschieden.[20]
In der Gruppe der massearmen Sterne unterscheidet man mit Blick auf ihre weitere Entwicklung man massearme Sterne von bis zu 0,3 Sonnenmassen und massearme Sterne von 0,3 bis 2,3 Sonnenmassen. In der Gruppe der massereichen Sterne werden massereichen Sterne 2,3 bis-3 Sonnenmassen und massenreiche Sterne über 3 Sonnenmassen unterschieden.

3.2.1 Hauptreihenphase

Das nun folgende Entwicklungsstadium eines Sterns wird die Hauptreihenphase genannt. Sobald der neue Stern angefangen hat Kernfusion mit Wasserstoff zu betreiben, ist er im Hertzsprung-Russell-Diagramm, entsprechend seiner durch Kernfusion erzeugten Energie in der Hauptreihe einzuordnen. (vgl.: 2.1 Parameter)
Durch das Hertzsprung-Russell Diagramm werden Sterne in bestimmten Gruppen eingeteilt. Die Sterne werden entsprechend ihrer Helligkeit und Farbe in das Diagramm eingetragen. Bestimmte Sterne ordnen sich masseabhängig auf einer Linie ein. In dieser so entstehenden graphischen Reihe befinden sich die Sterne, die Wasserstoff zu Helium verbrennen. Die Hauptreihe ist also eine durch Beobachtungen gebildete Linie, von Sternen, die ihre Energie aus der Kernfusion mit Wasserstoff gewinnen.[21]

Sterne, die sich in dieser Reihe des Hertzsprung-Russell Diagramms befinden, werden als Hauptreihensterne bezeichnet.

Innerhalb dieser Hauptreihe unterscheidet man zwischen Anfangsstadien, wie der Nullalter-Hauptreihe und Endstadien wie der Endalter Hauptreihe. Diese liegen alle auf derselben Hauptreihe, jedoch an jeweils verschiedenen Enden von eben dieser.[22]

Sobald der Stern nicht mehr stabil ist, verschwindet er von der Hauptreihe. Damit ist seine Hauptreihenphase beendet und er geht in sein Spätstadium über.

---

[19] vgl.: de Bor, Klaas S.(2001): Von der Geburt bis zum Tod von Sternen, https://astro.uni-bonn.de/~deboer/sterne/pdmsternetxt.html
[20] vgl.: Wikipedia (2008-2022): Stern, https://de.wikipedia.org/wiki/Stern
[21] vgl.: Wikipedia (2008-2022): Hauptreihe, https://de.wikipedia.org/wiki/Hauptreihe
[22] vgl.: Wikipedia (2008-2022): Hauptreihe, https://de.wikipedia.org/wiki/Hauptreihe

3.2.2 Spätstadien

Wenn der größte Teil des Wasserstoffs verbrannt wurde, geht der in sein Spätstadium über. Wie dieses Stadium aussieht, hängt davon ab, welche Masse der Stern als Hauptreihenstern hatte. [23]

Massearme Sterne bis zu 0,3 Sonnenmassen setzen die Fusion des Wasserstoffs in einer wachsenden Schale um den erloschenen Kern fort und erlöschen komplett, wenn das Schalenbrennen zum Erliegen kommt. Aufgrund der Temperaturreduktion im Zentrum geben sie der Schwerkraft nach und kontrahieren. Dadurch steigt die Oberflächentemperatur nochmals stark an und sie glühen eine Weile als Weiße Zwerge. Nach Abkühlen enden diese Sterne als Schwarze Zwerge.[24]

Massearme Sterne zwischen 0,3 und 2,3 Sonnenmassen, erhalten durch Kontraktionen die zum Heliumbrennen nötige Temperatur und Dichte in ihrem Kern. Beim Zünden des Helium-brennens, dem Heliumflash, steigt die Temperatur zeitweise auf das 100-milliadenfache der heutigen Sonnenleistung an, bevor sich das Heliumbrennen stabilisiert. Durch den Tempe-ratur- und Leistungsanstieg expandieren die Sterne zu Roten Riesen mit Durchmessern, die dem Hundertfachen unserer Sonne entsprechen. Dabei werden häufig die äußeren Hüllen der Sterne abgestoßen und bilden planetarische Nebel. Wenn das Heliumbrennen den Roten Riesen zum Erliegen kommen, werden auch sie zunächst zu Weißen Zwergen und enden als schwarze Zwerge.[25]

Massereiche Sterne zwischen 2,3 und 3 Sonnenmassen werden in ihrem Spätstadium eben-falls zu Roten Riesen bzw. zum Roten Überriesen und gehen nach der Phase des Helium-brennens in die Phase des Kohlenstoffbrennen über. Dabei entstehen Elemente bis zum Eisen. Durch Sternenwinde und die expansionsbedingt Bildung Planetarischer Nebel verlieren diese Sterne einen erheblichen Teil ihrer Masse. Darum bleiben sie unter der kritischen Grenze für eine Supernova-Explosion und enden ebenfalls als Weiße Zwerge, die schließlich zu Schwarzen Zwergen abkühlen.[26]

Massereiche Sterne über 3 Sonnenmassen verbrennen in ihrem Spätstadium alle leichteren Elemente bis zum Eisen. Auch sie verlieren einen

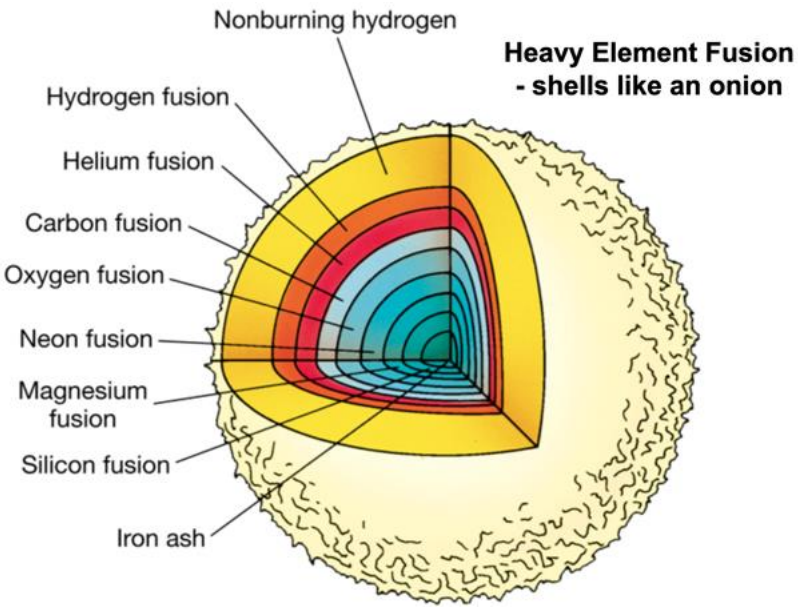


Bild 11: Massenreiche Sterne - Quelle: Nucleosynthesis | Chemical Elements | Chemogenesis (meta-synthesis.com)

[23] vgl.: Meurer, Christian (2007): Ausbildungsseminar: Kerne und Sterne Nukleare Astrophysik, http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/gebhardt/gebhardt_files/skripten/RoteRiesen.pdf
[24] vgl. Willig, Hans-Peter, Physik für alle (2022): Stern, https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Stern?msclkid=8eef673abca511ec8e01798a7e9fcd3f, [abgerufen im April 2022]
[25] vgl. Willig, Hans-Peter, Physik für alle (2022): Stern, https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Stern?msclkid=8eef673abca511ec8e01798a7e9fcd3f, [abgerufen im April 2022]
[26] vgl.: Wikipedia (2008-2022): Stern, https://de.wikipedia.org/wiki/Stern

Teil ihrer Masse durch Abstoßung ihrer äußeren Schichten, aus denen sich planetarische Nebel bilden.
Um ihrem Kern bilden sich Schalen, vergleichbar mit einer Zwiebel, in denen verschiedene Fusionsprozesse stattfinden. (s. Abbildung nächste Seite)

Ein großer Teil der Sternenmasse konzentriert sich dabei im Eisenkern des Sterns. Sobald dieser die Grenze von 1,44 Sonnenmassen (Chandrasekhar-Grenze) überschreitet, kommt es zur Supernova. Der Stern kollabiert. Dabei werden die äußeren Schichten durch die freigesetzte Energie abgestoßen und bilden eine expandierende Explosionswolke.[27]

3.3 Sterben eines Sterns

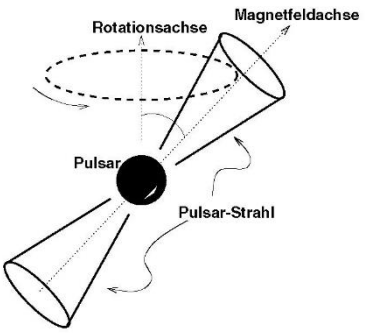
Wie im Abschnitt 3.2 Spätstadien beschrieben, enden alle Sterne mit einer Masse unter 3 Sonnenmassen früher oder später als Weise Zwerge und noch später als Schwarze Zwerge.

Nur sehr massenreiche Sterne beenden ihr Dasein in einer Supernova. Aus einer Supernova kann ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch entstehen. Außerdem kommt es zur Freisetzung ausgedehnter Materie, die als Supernovaüberrest bezeichnet wird.

Im sichtbaren Licht erscheinen diese Supernovaüberreste als Nebel unterschiedlicher Farben und Formen. Der Krebsnebel ist ein solcher Supernovaüberrest.[28]

3.3.1 Neutronenstern

Ein Neutronenstern ist ein mögliches Endprodukt einer Supernova und besteht zum größten Teil aus Neutronen. Neutronensterne besitzen zwar einen erheblich geringeren Durchmesser als andere Sterne, behalten aber trotzdem ihre Rotationsgeschwindigkeit bei, was zu einer sehr hohen Endrotationsgeschwindigkeit führt.[29] Diese sich schnell drehenden Neutronen-sterne werden Pulsare genannt.



Ein Pulsar ist ein Neutronenstern, der im gleichmäßigem Rhythmus Impulse elektromagnetischer Wellen abstrahlt. Er pulsiert bei Frequenzen, die zwischen wenigen Millisekunden und mehreren Sekunden liegen können. Ausgangspunkt der Impulse sind die Pole des Sterns.
Aufgrund ihres regelmäßigen Ausblitzens tragen Pulsare auch den Namen: Kosmische Leuchtfeuer.[30]

Bild 12: Pulsar - Pulsare - Leuchtfeuer im All | Max-Planck-Institut für Radioastronomie (mpg.de)

[27] vgl.: Wikipedia (2008-2022): Stern, https://de.wikipedia.org/wiki/Stern
[28] vgl. Max-Planck-Institut für Radioastronomie (2022): Supernova-Überreste; https://www.mpifr-bonn.mpg.de/526620/snr
[29] vgl.: Kramer, Michael; Wielebinski Richard, Max-Planck-Gesellschaft Jahrbuch 1994: Pulsare – Leuchtfeuer im All, https://www.mpifr-bonn.mpg.de/435982/1994
[30] vgl. Max-Planck-Institut für Radioastronomie (2022): Pulsare; https://www.mpifr-bonn.mpg.de/526534/pulsars

3.3.2 Schwarzes Loch

Schwarze Löcher können aus dem finalen Kollaps extrem massereicher Sterne entstehen. Das Schwarze Loch besteht aus der Singularität, ein unendlich kleiner Punkt, welcher die ganze Masse des vorherigen Sterns enthält.[31] Durch diese massive Dichte zieht die Gravitation nicht nur Elemente sondern auch Licht an.

Für jede Masse gibt es eine Grenze, bei dem diese Masse zum Schwarzen Loch wird. Diese Grenze wird als Schwarzschildradius bezeichnet. Für die Erde liegt dieser Wert bei 9 mm.

Da Schwarze Löcher das Licht absorbieren, ist keine direkte Beobachtung möglich. Es lassen sich lediglich ihre Auswirkungen auf die Umgebung beobachten.[32]

3.4 Kosmischer Materiekreislauf

Innerhalb von Galaxien befindet sich zwischen den Sternen interstellare Materie. Diese besteht aus neutralem ionisiertem Gas (ca. 90% Wasserstoff und 10% Helium) und Spuren schwerer Elemente, Molekülen und Staub. Aus dem Zusammenwirken mit Strahlung und Magnetfeldern bildet dies das interstellare Medium.

Das interstellare Medium ist basaler Bestandteil des kosmischen Materiekreislaufes.

Sternenentstehungsgebiete bestehen aus dichten, kalten Gaswolken und Staubnebeln, welche kollabieren. Daraus entstehen Vorstufen von Sternen, die sich zu neuen Hauptreihensternen entwickeln und zusammen mit anderen ganze Planetensysteme bilden.

Durch die Aktivität der Sterne in ihren verschiedenen Entwicklungsphasen wird das interstellare Medium fortwährend angereichert. In Form von Planetarischem Nebel und Supernova-Explosionen geben einzelne Sterne Materie und Energie ab.[33]

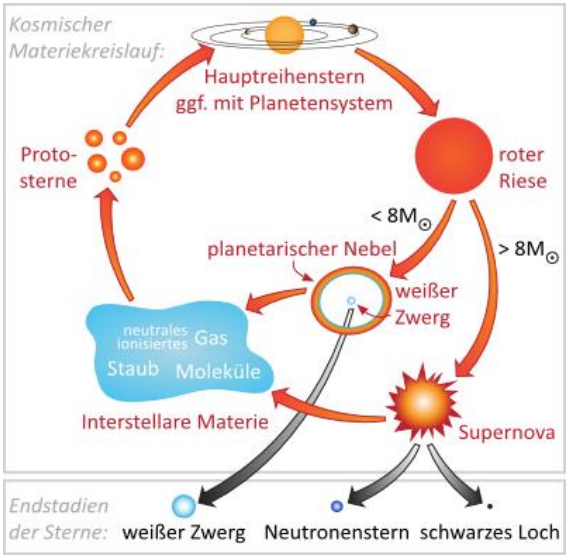


Bild 13: Kosmischer Materiekreislauf - Quelle: LP – Interstellare Materie (uni-goettingen.de)

[31] vgl.: Schwarz, Ben (1998-2001): Sternenentstehung und Entwicklung, http://www.astronomia.de/index.htm?http://www.astronomia.de/sternent.htm
[32] vgl.: Max-Planck-Institut für Radioastronomie (2022): Schwarze Löcher, https://www.mpifr-bonn.mpg.de/526550/black_hole
[33] vgl.: Universität Göttingen (2006 - 2014): Interstellare Materie, https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7283?msclkid=264434d2bd4f11ec8b906b4afaf32f39

4. Der Krebsnebel

Beim Krebsnebel (M1) handelt es sich um einen Supernovaüberrest. Er befindet sich ca. 6.300 Lichtjahre von der Erde entfernt im Perseus-Arm der Milchstraße im Sternbild Taurus.

Entstanden ist der Krebsnebel bei einer Supernova im Jahr 1054. Seine Entstehung wurde derzeit von chinesischen Astronomen festgestellt und dokumentiert. (s. Abschnitt 4.1)

Der Krebsnebel ist von ovaler Gestalt und erstreckt sich über eine Länge von 6 Bogenminuten und eine Breite von 4 Bogenminuten. Neuern Untersuchungen zufolge hat der Krebsnebel eine Gesamtmasse von 9,8 bis 10 Sonnenmassen.

Spektroskopische Untersuchungen aus dem frühen 20. Jahrhundert belegen, dass der Nebel im Wesentlichen aus Wasserstoff und Helium besteht.

Im Zentrum des Krebsnebels befindet sich ein Pulsar. Der diesen Pulsar umgebene Pulsarwind-Nebel ist von Filamenten durchzogen. (s. Abschnitt 4.2)

Seit seiner Entstehung expandiert der Krebsnebel. Hierbei wurde eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von 1000 km/s bis 1500 km/s berechnet.

Aufgrund seines geringen Helligkeitsgrades ist eine Beobachtung des Krebsnebels nur durch Teleskope möglich.

Durch seine Nähe zur Erde und als einer der jüngsten galaktischen Pulsarwind-Nebel gehört der Krebsnebel zu einem der am intensivsten astronomisch erforschten Objekte. [34]

4.1 Entstehung

Die Entstehung des Krebsnebels wird zeitlich in den Frühling des Jahres 1054 eingeordnet. Damals war die Wissenschaft der Astronomie noch im Frühstadium. Einige arabische und chinesische Astronomen entdeckten am 4. Juli 1054 einen neuen, wenige Wochen verweilenden, Leuchtfleck, welcher die meisten anderen Sterne im Osten des Sternbilds Taurus überstrahlte. Dabei handelte es sich um eine Supernova aus deren Überresten später der Krebsnebel entstand.
Historischen Überlieferungen zufolge wurde dieser Leuchtfleck innerhalb von Wochen zunehmend heller. Im Juli 1054 konnte er für 23 Tage sogar bei Tag gesehen werden. Seine Beobachtung mit bloßem Auge war über einen Zeitraum von zwei Jahren hinweg möglich.35

Die nebelartige Erscheinung des Krebsnebels wurde erstmalig im Jahr 1731 und davon unabhängig im Jahr 1758 entdeckt. Wissenschaftlich dokumentiert wurde lediglich die Entdeckung aus dem Jahr 1758.

Das genaue Datum der Supernova wird häufig direkt der Beobachtungsdokumentation des derzeitig lebenden Astronomen Sung hui-yao entnommen, welcher einen Stern oder einen Kometen beschrieb. Ebenso wahrscheinlich ist ein Datum im April 1054. In diesem Monat

[34] vgl.: Krebsnebel – Wikipedia
[35] vgl.: Der Ursprung des Krebsnebels | Max-Planck-Gesellschaft (mpg.de)

beschrieben drei unterschiedliche Astronomen unabhängig voneinander eine feurige Säule oder ein helles Licht.[36]

Der Astronom Charles Messier erstellte einen Katalog von Nebeln und Sternenhaufen, in dem der Krebsnebel als erstes Objekt mit der Bezeichnung M1 eingeordnet wurde.[37] Die Form des Krebsnebels wurde darin mit einer Kerzenflamme verglichen.

Spätere Beobachter verglichen seine Form mit der eines Krebses und waren für die Namensgebung wegweisen.

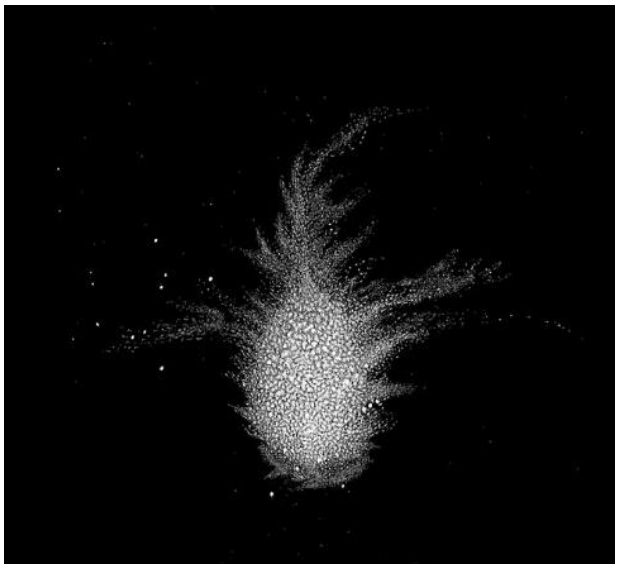


Bild: Historische Zeichnung des Krebsnebels aus dem Jahr 1844
Quelle: Datei:Crab nebula - Rosse 1844 (inv).jpg – Wikipedia

Beobachtungen mit fortschrittlicheren Teleskopen erfassten die Form des Krebsnebels detaillierter. Ende des 19. Jahrhundert publizierte Isaac Robert, ein Pionier der Astrofotographie, seine Aufnahmen des Krebsnebels. Dabei konnte er die Ähnlichkeit mit einem Krebs nicht bestätigen.[38]

4.2 Pulsar

Im Zentrum des Krebsnebels befindet sich ein, aus dem explodierten Ursprungsstern hervorgegangener, Neutronenstern. (s. Abschnitte 2.2 und 3.3.1) Dieser Neutronenstern rotiert ca. dreißigmal pro Sekunde um seine eigene Achse. Messungen im Radiofrequenzbereich, sowie im optischen, Röntgen- und Gammafrequenzbereich bestätigen diesen Neutronenstern als Pulsar. Er sendet alle 33 Millisekunden Strahlungspulse aus. Der Pulsar im Zentrum des Krebsnebels trägt die Bezeichnung PSR B0531+21.[39]

---

[36] Collins, George W.; Claspy, William P.; Martin John C. (1999): A Reinterpretation of Historical References to the Supernova of A.D. 1054, Case Western Reserve University, 10900 Euclid Avenue, Cleveland, OH 44106-7215 ; collins=grendel.astr.cwru.edu
[37] vgl.: Wikipedia (2008-2022): Messier-Katalog; https://de.wikipedia.org/wiki/Messier-Katalog
[38] vgl.: Wikipedia (2008-2022): Krebsnebel, https://de.wikipedia.org/wiki/Krebsnebel#Entdeckung_und_Erscheinungsbild_des_Nebels
[39] vgl.: Max-Planck-Institut für Radioastronomie (2022): Der Krebsnebel, https://www.mpifr-bonn.mpg.de/526659/crab_nebula?msclkid=adbd11a6b8b511ecbd1d11a3c00e0c72

Der den Pulsar umgebende Nebel ist von Filamenten durchzogen. Diese sind aus dem äußeren Schalen des Ursprungsterns entstanden und bestehen zum größten Teil aus ionisiertem Wasserstoff und Helium. Weitere Bestandteile sind geringe Mengen von Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Eisen, Neon und Schwefel. Zum Teil sind diese Elemente auch in Form von Staub im Pulsarwind-Nebel auffindbar. [40]

Neueren Untersuchungen zufolge wird für den Pulsar des ein Durchmesser von 28 bis 30 km angenommen. Die davon ableitbare Energieabgabe entspricht dem 100.000-fachen der Energieabgabe unserer Sonne.
Die enorme Abstrahlung von Energie erzeugt eine extrem dynamische Region im Zentrum des Krebsnebels. Beobachtungen mit hochauflösenden Teleskopen belegen Veränderungen in diesen dynamischen Regionen des Krebsnebels innerhalb von wenigen Tagen.[41]

Bild 14: Der Krebsnebel, in dessen Zentrum sich ein Pulsar befindet
Quelle: Pulsare - Leuchtfeuer im All | Max-Planck-Institut für Radioastronomie (mpg.de)

Der Pulsar ist energiereich und versorgt den gesamten umliegenden Nebel mit Energie. Durch eben diese intensive Energie des Pulsars; wird der Nebel zum Leuchten angerregt. Ebenfalls strahlt der Pulsar Gammastrahlung mit der Energie von ca. 400 Gigaelektronenvolt aus. Dies ist viel höher als der erwartete Wert. Woher diese Energie kommt, wurde bisher noch nicht wissenschaftlich belegt.

4.3 Expansion

Der Krebsnebel breitet sich stetig in alle Richtungen mit einer Geschwindigkeit von 1000 km/s bis 1500 km/s aus.[42]

Bei der Annahme von konstanten Umständen und gleichbleibender Geschwindigkeit lässt sich ein Rückschluss auf das Datum der Entstehung des Krebsnebels ziehen.

Um die Geschwindigkeit der Expansion bestimmen zu können, beobachtet man über längerfristige Zeiträume hinweg den Abstand zwischen Filamenten und dem Pulsar. Die erfassten Veränderungen belegen den Ausdehnungsprozess. [43]

---

[40] vgl.: Wikipedia (2008-2022): Krebsnebel, https://de.wikipedia.org/wiki/Krebsnebel#Entdeckung_und_Erscheinungsbild_des_Nebels
[41] vgl.: Wikipedia (2008-2022): Krebsnebel, https://de.wikipedia.org/wiki/Krebsnebel#Entdeckung_und_Erscheinungsbild_des_Nebels
[42] vgl.: Max-Planck-Institut für Radioastronomie (2022): Der Krebsnebel, https://www.mpifr-bonn.mpg.de/526659/crab_nebula?msclkid=adbd11a6b8b511ecbd1d11a3c00e0c72
[43] vgl.: Krebsnebel – Physik-Schule (cosmos-indirekt.de)

4.4 Forschungen

Der Krebsnebel ist aus verschiedenen Gründen ein ausführlich erforschtes Himmelsobjekt. Die klare Zuordnung eines Entstehungsdatums liefert der Wissenschaft eine perfekte Basis für ihre Untersuchungen. Außerdem liefern die relativ kurze Entfernung von der Erde und die gute Beobachtbarkeit am Nachthimmel beste Forschungsbedingungen.
Seine permanente Wandlung durch den anhaltenden Expansionsprozess mach ihn zu einem dankbaren Beobachtungsobjekt.[44]

Im Jahr 2002 wurde die dynamische Struktur des Krebsnebels eindrucksvoll wissenschaftlich belegt. Dazu erstellen Astronomen Videos, die auf koordinierte Beobachtungen basierten. Darin sieht man einen bereits zuvor entdeckten hellen Ring. Dieser besteht aus Knoten, die sich bilden, in ihrer Leuchtkraft variieren und gelegentliche Ausbrüche zeigen. Dabei behalten sie ihre Position im Wesentlichen bei.[45]

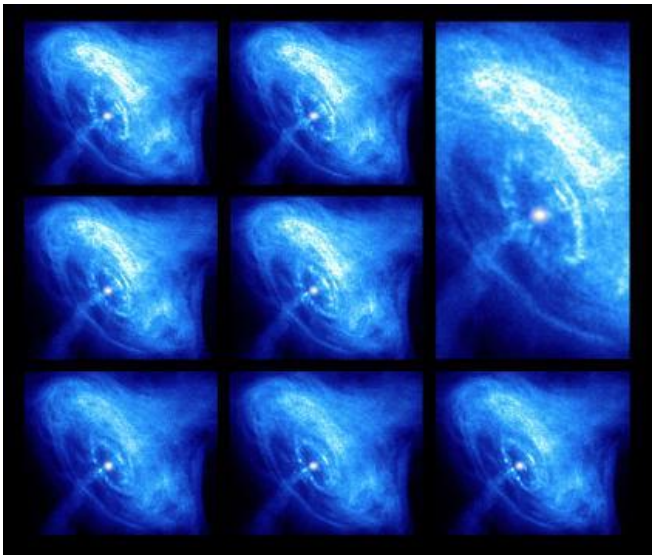


Bild 15: Dynamische Struktur des Krebsnebels - Quelle:: Chandra :: Photo Album :: Crab Nebula Movie :: 19 Sep 02 (harvard.edu)

Bild 16: Krebsnebel 2017- Quelle: https://chandra.harvard.edu/photo/2017/crab/

Im Jahr 2017 entstand, basierend auf älteren Bildern, diese hochauflösende Ansicht des Krebsnebels. Dabei wurde unter Verwendung verschiedener Teleskopdaten, die nahezu das gesamte elektromagnetische Spektrum abdecken, ein spektakuläres neues Bild erstellt.[46]

---

[44] vgl.: Kubisch, Thomas, Astropage.eu (2018): Der Krebsnebel im Wandel der Zeit, https://www.astropage.eu/2018/03/15/der-krebsnebel-im-wandel-der-zeit/?msclkid=2a5687e3b8b611ecbd8ff94dce54941d
[45] vgl.: Kubisch, Thomas, Astropage.eu (2018): Der Krebsnebel im Wandel der Zeit, https://www.astropage.eu/2018/03/15/der-krebsnebel-im-wandel-der-zeit/?msclkid=2a5687e3b8b611ecbd8ff94dce54941d
[46] vgl.: Kubisch, Thomas, Astropage.eu (2018): Der Krebsnebel im Wandel der Zeit, https://www.astropage.eu/2018/03/15/der-krebsnebel-im-wandel-der-zeit/?msclkid=2a5687e3b8b611ecbd8ff94dce54941d

5. Eigene Messungen zur Expansion des Krebsnebels

Ziel meiner Untersuchung ist die Verifikation oder Falsifikation der These, dass der Krebsnebel sich weiterhin ausbreitet.
Per Astrofotografie habe ich dazu im ersten Schritt meiner Projektarbeit selbst Aufnahmen des Krebsnebels erstellt.

5.1 Astrofotografie

Der Begriff der Astrofotografie umfasst alle Methoden der Fotographie, die dazu dienen Sterne, Planeten, Nebel und andere Himmelskörper abzubilden und dauerhaft auf verschie-denen Medien zu speichern.[47]

Astrofotografie ist selbst mit konventionellen Kameras möglich. Unter Verwendung eines Stativs können bei ausreichend langen Belichtungszeiten sogenannte Strichspuraufnahmen gemacht werden, die die scheinbare Drehung des Sternenhimmels abbilden.

Bild 17: Strichpuraufnahme - Quelle: https:// Strichspuren ++ber der Sternwarte | Astronomie in Süddeutschland (astronomie-sued.de)

Die in der Astronomie verwendeten Spezialkameras werden Astrographen genannt. Mit ihnen können astronomische Positionsbestimmungen erfolgen, Helligkeitsstufen von Sternen exakt ausgemessen werden und die Spektren von Sternen und anderen Himmelsobjekten untersucht werden.[48]
Die erhöhte Sichtbarkeit der Himmelsobjekte wird durch die skalierbare Belichtungszeit und adjustierbarer Beleuchtungseingrenzung erreicht.

Durch die Möglichkeiten der digitalen Fotografie können Bilder in großer Anzahl aufgenommen und gespeichert werden, um sie zu einem späteren Zeitpunkt weiterzuverarbeiten.

---

[47] vgl.: Wikipedia (2008-2022): Astrofotographie, https://de.wikipedia.org/wiki/Astrofotografie?msclkid=ef5d84d9b8b611eca2049d60fde60ef6
[48] vgl.: Wikipedia (2008-2022): Astrofotographie, https://de.wikipedia.org/wiki/Astrofotografie?msclkid=ef5d84d9b8b611eca2049d60fde60ef6

5.2 Teleskop

Als Teleskop bezeichnete man ein Instrument, das elektromagnetische Wellen sammelt und bündelt, damit weit entfernte Objekte beobachtet werden können. [49]

Für meine Projektarbeit erhielt ich die Gelegenheit ein Teleskop der Sternwarte des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums zu nutzen.

Es handelt sich um ein PlaneWave CDK20 Astrograph f/6.8, welches an einer 10Micron GM4000HPSII. Montierung mit Absolutencodern befestigt wurde.

Bild 18: PlaneWave CDK20 Astrograph f/6.8 - Quelle: PlaneWave Europe | CDK20 Astrograph f/6.8

Bild 19: 10Micron GM4000HPSII. Montierung - Quelle: 10Micron.eu | GM 4000 HPS II Montierung

Technische Daten

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

Bild 20: Technische Daten 10Micron GM4000HPSII. Montierung Quelle: https:// PlaneWave Europe | CDK20 Astrograph f/6.8

[49] vgl.: Wikipedia (2008-2022): Teleskop, https://de.wikipedia.org/wiki/Teleskop,

5.3 Kamera

Bei der verwendeten Kamera handelt es sich um sich um eine Canon EOS RP eine spiegellose Vollformatkamera.

Bild 21: Canon EOS RP - Quelle: Canon EOS RP – Kameras - Canon Deutschland

Bei der verwendeten Kamera handelt es nicht um eine herkömmliche Ausführung des genannten Modelles, sondern eine H-Alpha Rot empfindliche, speziell für den Zweck der Astrofotografie bearbeitete, Modifikation der Canon EOS RP.

5.4 Filter

Für meine Aufnahmen nutzte ich einen speziellen Filter, der die Lichtverschmutzung verringert und die Qualität der Aufnahmen erhöht.
Bei dem eingesetzten Filter handelt es sich und den Optolong 2" L-eNhance Nebelfilter für DSLR und Color Astro-Kameras. Die abgebildete Transmissionskurve gibt an, welches Licht durch Benutzung des Filters herausgefiltert wird.

Bild 22: Filter - Quelle: https:// Teleskop-Express: Optolong 2" L-eNhance Nebelfilter für DSLR und Color Astro-Kameras

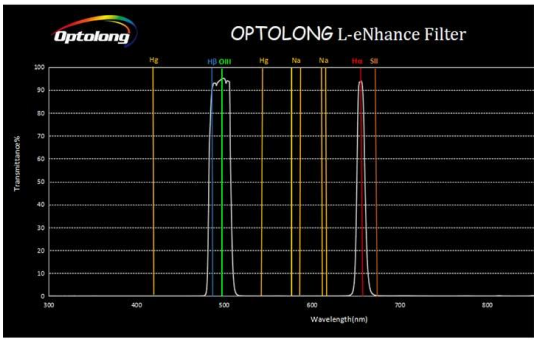


Bild 23: Filtertransmissionskurve - Quelle: https://www.teleskop-express.de/shop/product_info.php/info/p11238_Optolong-2--L-eNhance-Nebula-Filter-for-DSLR-and-Color-Astro-Cameras.html

5.5 Eigene Aufnahmen

Am Abend des 10.01.2022 habe ich zusammen mit einem Mitschüler von der Sternwarte des Carl-Fuhlrott-Gymnasiums Aufnahmen des Krebsnebels (M1) angefertigt.

Die Wetterbedingungen waren an diesem Abend günstig, weil der Himmel über Wuppertal wolkenfrei war.

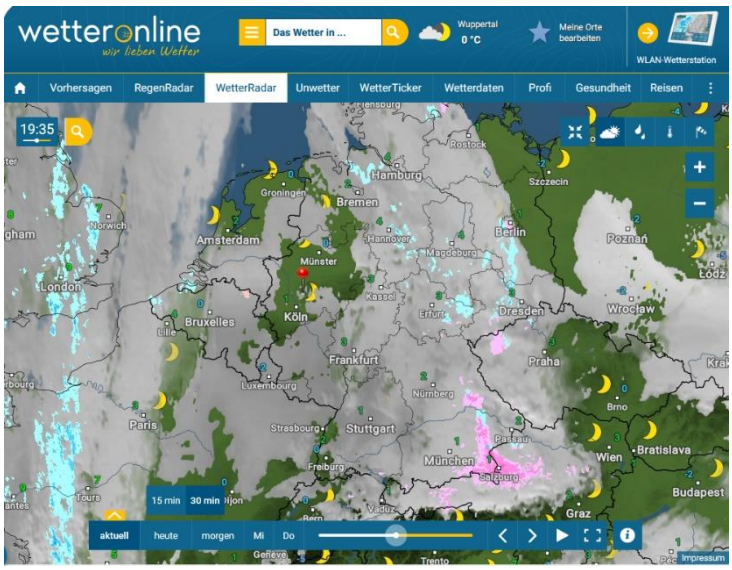


Bild 24: Wetterbedingungen Wuppertal am 10.01.2022 – Quelle: Wetter aktuell, Wettervorhersage und Wetterbericht - WetterOnline

Die Belichtungszeit für die Aufnahmen betrug jeweils 1 Minute. Diese hohe Belichtungszeit ist nötig, da der Krebsnebel, trotz der relativen Nähe zur Erde, im Vergleich mit anderen Deep-Sky-Objekten, weit entfernt ist.

Abgesehen von diesen Aufnahmen des Krebsnebels mussten mit demselben Teleskop und derselben Kamera komplett weiße Bilder (Flatframes) und komplett schwarze Bilder aufgenommen werden, um im Nachhinein feststellen zu können, ob und wo Staubkörner auf der Linse lagen.

Zur Erstellung eines Flatframes wird zur Verhinderung eines Lichteinfalls eine beleuchtete Platte auf das Teleskop gelegt. Für die Erstellung eines Darkframes wird eine unbeleuchtete Platte verwendet.

Insgesamt haben wir an diesem Abend 100 Lightframes erstellt.

Bild 25: Aufnahme des „Forscherteams“ vor dem verwendeten Teleskop

6. Auswertung der eigenen Aufnahmen

Die Auswertung der von uns aufgenommenen Bilder erfolgte in vier Schritten.

Im ersten Schritt wurde mit dem Programm „Deep Sky Stacker“ genutzt. Dabei handelt es sich um ein Programm, das alle Schritte des Vorverarbeitungsprozesses von Deep-Sky-Bildern vereinfacht.[50]
Wir nutzten das Programm, um unsere Lightframes und die angefertigten Dark- und Flatframes zu stacken. Durch das Übereinanderlegen von Aufnahme, Dark- und Flatframes, wurde die Belichtungszeit von allen Lightframes kombiniert, wodurch unsere Aufnahme wesentlich deutlicher erkennbar wurde.
Außerdem wurden durch das Hochladen der Dark- und Flatframes Staubpartikel auf der Kameralinse sowie Hotpixel vom Programm erkannt und entfernt.

Im zweiten Schritt erfolgte eine Farbanpassung der den Nebel umgebenen Sterne mit dem Programm „Photoshop“. Diese wirkten auf der Aufnahme an Stelle von dem erwarteten Weiß eher an der einen Seite rot und an der entgegengesetzten blau.
Damit die Sterne auf der Aufnahme weiß erscheinen, muss eine der Farbschichten über die jeweils andere gelegt werden.
Mithilfe von Photoshop wurde ebenfalls die Helligkeit des Gesamtbildes erhöht, was den Krebsnebel weiter hervorhebt.

Ausgangspunkt meiner Untersuchung war die These, dass sich der Krebsnebel stetig ausbreitet. Mit dem Ziel dieses zu überprüfen wurde mir eine historische Aufnahme des Krebsnebels gestellt. Diese stammt aus dem Jahr 1909.

Im dritten Schritt wurden die historische und die selbst erstellte Aufnahme zum Zweck eines Vergleichs übereinandergelegt. Dadurch wurde dargestellt, welche sichtbaren Filamente des Krebsnebels sich im Verlauf von 113 Jahren wohin bewegt haben.

[50] vgl. DeepSkyStacker - Free

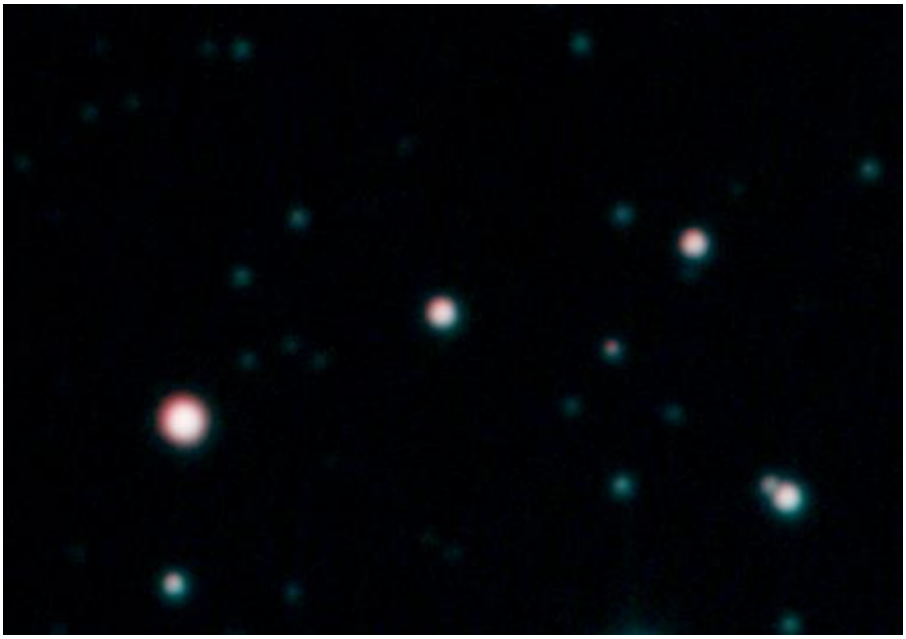
6.1 Bearbeitung mit Deep Sky Stacker

Die Lightframes konnten im unbearbeiteten Zustand noch nicht für eine Untersuchung genutzt werden.

Nach einer Bearbeitung mit dem Programm „Deep Sky Stacker“ wirkten unsere Aufnahmen heller und deutlicher.

6.2 Farbkorrektur mit Photoshop

Die den Krebsnebel umgebende Sterne wirkten auf der Aufnahme an Stelle von dem erwarteten Weiß eher an der einen Seite rot und an der entgegengesetzten blau.
Dies ist auf die Pixelmatrix der Kamera zurückzuführen, welche nur rot, grün und blau darstellen kann. Allein durch die Kombination dieser Pixel entstehen andere Farben wie Weiß. Jedoch liegen diese Sterne räumlich meist zwischen zwei dieser Pixel und wirken dadurch an der einen Seite rot und an der anderen blau.



Vor Farbkorrektur

Damit die Sterne auf der Aufnahme weiß erscheinen, muss eine der Farbschichten über die jeweils andere gelegt werden.

Nach Farbkorrektur

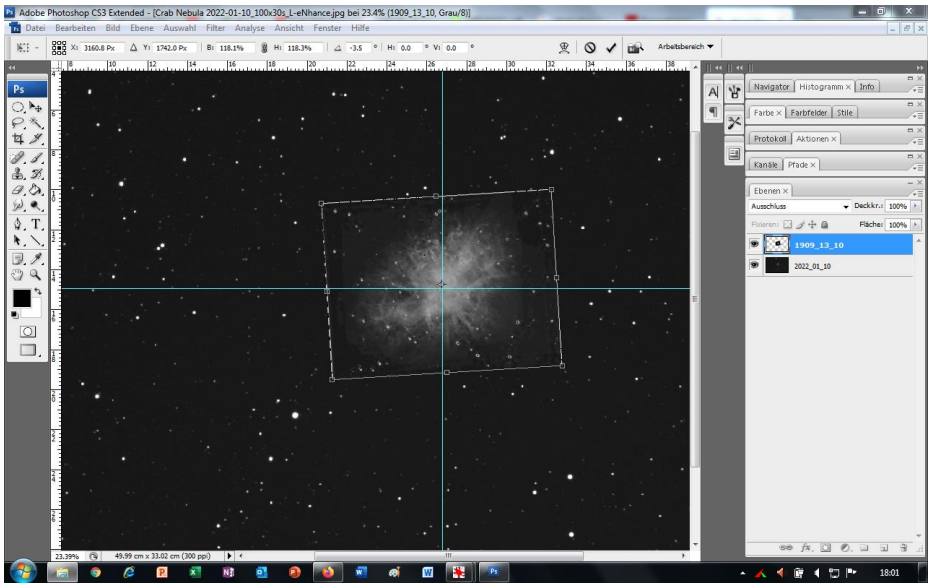
6.3 Historische Vergleichsaufnahme

Zur Auswertung der Daten musste noch eine andere Aufnahme hinzugezogen werden, welche in einem weitaus früheren Jahr erstellt wurde.
Hierbei wurde eine Aufnahme aus dem Jahr 1909 benutzt, die uns der Projektkursleiter zur Verfügung stellte.

Bild 26: Historische Aufnahme des Krebsnebels aus dem Jahr 1909 – Quelle: Ritchey, G. W., On some Methods and Results in direct Photography with the 60-inch reflecting Telescope of the Mount Wilson Solar Observatory

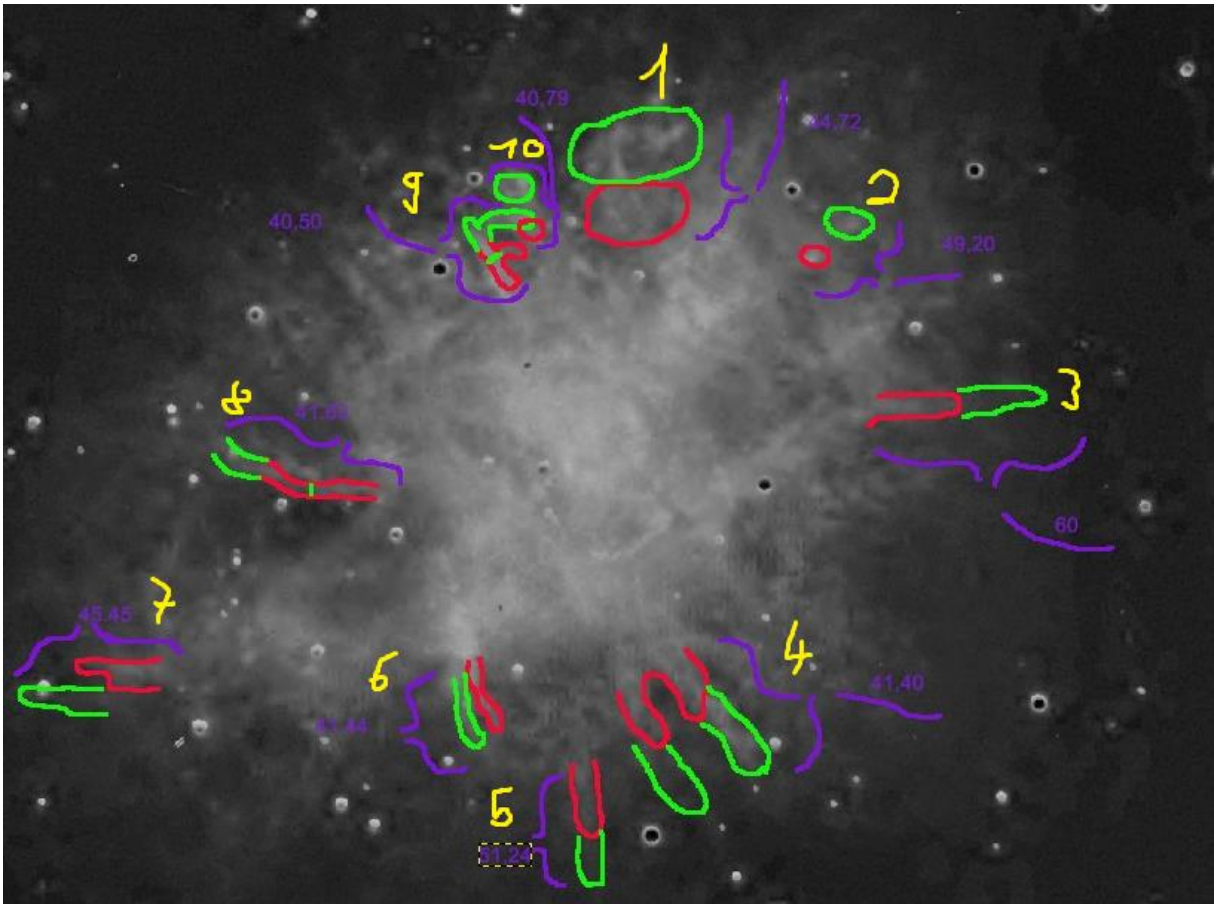
6.4 Überprüfung auf Expansionsbelege

Unsere Aufnahme vom 10.01.2022 und die historische Aufnahme aus dem Jahr 1909 wurden im nächsten Untersuchungsschritt übereinandergelegt, so dass man die Verschiebung der Filamente erkennen und bewerten kann. Die Sterne dienen hierbei als Fixpunkte.
Beim Übereinanderlegen musste beachtet werden, dass die ältere Aufnahme etwas rotiert wurde.



6.5 Ergebnisse der Auswertung

Zum Abschluss der Untersuchung wurden die sichtbaren Filamente einander zugeordnet.
Im Bildbearbeitungsprogramm GIMP (GNU Image Manipulation Program) haben wir die in der historischen Aufnahme zu sehende Filamente rot markiert. Die Filamente unserer Aufnahme markierten wir grün.
Diese Filamentpaare sind im Urzeigersinn von 1 bis 10 in Gelb durchnummeriert.
Die violetten Markierungen zeigen die Distanz zwischen den Filamentpaaren in Pixeln an.
Diese violetten Werte wurden nicht für die Auswertung benutzt, da die Distanz der Filamente zum Pulsar von Relevanz ist und nicht die Distanz voneinander.



Ausgehend vom Erscheinungsbild dieser Aufnahme haben wir in Photoshop Messungen vorgenommen. Es folgte die Berechnung der Entfernung zwischen den Filamenten und dem Pulsar. Diese Messwerte wurden mit denen des anderen Teils des Filamentpaars verglichen und es wurde die Differenz bestimmt.
Diese Differenz war der Wert, welcher in der Formel zur Berechnung von Geschwindigkeit für s eingesetzt wird:

$$v = s/t$$

Das t ist in diesem Fall konstant und damit in unserer Rechnung immer 113 Jahre.

So erhält man die Geschwindigkeit, v, in Pixel/ Jahre.
Aus dieser Expansionsrate kann man einen Rückschluss auf das Entstehungsjahr des Krebsnebels ziehen.

In der folgenden Tabelle haben wir unsere Entfernungsmessungen festgehalten. X benennt dabei das berechnete Entstehungsjahr. Bei Filament 9 ist dabei eine starke Abweichung zu erkennen. Wir führen die Abweisung auf Messungenauigkeiten zurück.

Der von uns berechnete Mittelwert des Entstehungszeitpunktes ist 1014,7447 n.Chr.
Dabei liegen unsere Berechnungen nah an dem in der Fachliteratur aufgeführten Entstehungszeitpunkt im Jahr 1054 n. Chr. Die Unschärfe von 40 Jahren ist im astrologischen Kontext zu vernachlässigen.

	Filament1	Filament2	Filament3	Filament4	Filament5	Filament6	Filament7	Filament8	Filament9	Filament10
Wert1909	200,300	240,400	264,600	241,500	266,700	238,400	300,000	216,500	460,000	227,200
Wert2022	238,800	272,800	295,300	276,600	307,400	268,200	334,800	246,700	493,200	258,100
Differenz	38,5	32,400	30,700	35,100	40,700	29,800	34,800	30,200	33,200	30,900
1909->x	584,371	833,409	968,100	772,821	736,033	898,584	968,302	805,229	1556,280	825,883
2022->x	696,694	945,732	1080,423	885,144	848,356	1010,907	1080,625	917,552	1668,606	938,206
x=	1325,306	1076,268	941,577	1136,856	1173,644	1011,093	941,375	1104,448	353,394	1083,794

Tabelle der eigenen Messungen

7. Fazit

In meiner Untersuchung zur Expansion des Krebsnebels habe ich mich zunächst intensiv mit den Theorien zur Entstehung und den Entwicklungsstadien der Sterne beschäftigt.

Auf der Basis dieses Theoriewissens habe ich die Untersuchung für diese Projektarbeit angefertigt. Auf diese Weise habe ich mich dem Fachgebiet der Astronomie auch auf praktischer Ebene annähern und mich darin vertiefen können.

Das Ergebnis unserer eigenen Messungen lag für mein Empfinden erstaunlich nah an den Messwerten von astronomischen Experten.

Im Rahmen meiner Projektarbeit konnte ich ein Gefühl für die Themen und die Arbeitsweisen in der Astronomie entwickeln.

Die bildgebenden Verfahren haben mich besonders begeistert.

Unsere eigene nachbearbeitete Aufnahme des Krebsnebels ist eine schöne Erinnerung an meine Teilnahme an dem Projektkurs.

Eigene nachbearbeitete Aufnahme des Krebsnebels M1 vom 10.01.2022

8. Literaturverzeichnis

de Bor, Klaas S.(2001): Von der Geburt bis zum Tod von Sternen, https://astro.uni-bonn.de/~deboer/sterne/pdmsternetxt.html, [abgerufen im April 2022]

Braun, Dominik, Sternenentstehung.de (2018-2021): Kollaps von Molekülwolken, https://sternentstehung.de/kollaps-von-molekuelwolken, [abgerufen im April 2022]

Collins, George W.; Claspy, William P.; Martin John C. (1999): A Reinterpretation of Historical References to the Supernova of A.D. 1054, Case Western Reserve University, 10900 Euclid Avenue, Cleveland, OH 44106-7215 ; collins=grendel.astr.cwru.edu

Deepskystacker, http://deepskystacker.free.fr/german/index.html, [abgerufen im April 2022]

Konitzer, Franziska, (2018): Neutronensterne, https://www.weltderphysik.de/mediathek/podcast/neutronensterne/, [abgerufen im April 2022]

Kramer, Michael; Wielebinski Richard, Max-Planck-Gesellschaft Jahrbuch 1994: Pulsare – Leuchtfeuer im All, https://www.mpifr-bonn.mpg.de/435982/1994, [abgerufen im April 2022]

Kubisch, Thomas, Astropage.eu (2018): Der Krebsnebel im Wandel der Zeit, https://www.astropage.eu/2018/03/15/der-krebsnebel-im-wandel-der-zeit/?msclkid=2a5687e3b8b611ecbd8ff94dce54941d, [abgerufen im April 2022]

LEIFI, Joachim Herz Stiftung: Sterngeburt (2022): https://www.leifiphysik.de/astronomie/fixsterne/grundwissen/sterngeburt?msclkid=f08f23e7bb1911ecb23c47409d0d0d0a, [abgerufen im April 2022]

Max-Planck-Institut für Radioastronomie (2022): Der Krebsnebel, https://www.mpifr-bonn.mpg.de/526659/crab_nebula?msclkid=adbd11a6b8b511ecbd1d11a3c00e0c72 [abgerufen im April 2022]

Max-Planck-Institut für Radioastronomie (2022): Doppelsterne, https://www.mpifr-bonn.mpg.de/603143/doppelsterne, [abgerufen im April 2022]

Max-Planck-Institut für Radioastronomie (2022): Pulsare; https://www.mpifr-bonn.mpg.de/526534/pulsars, [abgerufen im April 2022]

Max-Planck-Institut für Radioastronomie (2022): Schwarze Löcher, https://www.mpifr-bonn.mpg.de/526550/black_hole, [abgerufen im April 2022]

Max-Planck-Institut für Radioastronomie (2022): Supernova-Überreste; https://www.mpifr-bonn.mpg.de/526620/snr, [abgerufen im April 2022]

Meurer, Christian (2007): Ausbildungsseminar: Kerne und Sterne Nukleare Astrophysik, http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/gebhardt/gebhardt_files/skripten/RoteRiesen.pdf, [abgerufen im April 2022]

Schwarz, Ben (1998-2001): Sternenentstehung und Entwicklung, http://www.astronomia.de/index.htm?http://www.astronomia.de/sternent.htm [abgerufen im April 2022]

Sternwarte Hartha e.V. (2022): Veränderliche Sterne, https://www.sternwarte-hartha.de/besucherinformationen/veranderliche-sterne/, [abgerufen im April 2022]

Universität Göttingen (2006 - 2014): Interstellare Materie, https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7283?msclkid=264434d2bd4f11ec8b906b4afaf32f39, [abgerufen im April 2022]

Wikipedia (2008-2022): Astrofotographie, https://de.wikipedia.org/wiki/Astrofotografie?msclkid=ef5d84d9b8b611eca2049d60fde60ef6, [abgerufen im April 2022]

Wikipedia (2008-2022): Hauptreihe, https://de.wikipedia.org/wiki/Hauptreihe, [abgerufen im April 2022]

Wikipedia (2008-2022): Krebsnebel, https://de.wikipedia.org/wiki/Krebsnebel#Entdeckung_und_Erscheinungsbild_des_Nebels, [abgerufen im April 2022]

Wikipedia (2008-2022): Liste der Sternenklassen, https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Sternklassen, [abgerufen im April 2022]

Wikipedia (2008-2022): Messier-Katalog; https://de.wikipedia.org/wiki/Messier-Katalog, [abgerufen im April 2022]

Wikipedia (2008-2022): Riesensterne, https://de.wikipedia.org/wiki/Riesenstern [abgerufen im April 2022]

Wikipedia (2008-2022): Stern, https://de.wikipedia.org/wiki/Stern, [abgerufen im April 2022]

Wikipedia (2008-2022): Teleskop, https://de.wikipedia.org/wiki/Teleskop, [abgerufen im April 2022]

Wikipedia (2008-2022): Weißer Zwerg, https://de.wikipedia.org/wiki/Wei%C3%9Fer_Zwerg, [abgerufen im April 2022]

Willig, Hans-Peter, Physik für alle (2022): Stern, https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Stern?msclkid=8eef673abca511ec8e01798a7e9fcd3f, [abgerufen im April 2022]

9. Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Sternen-Größen – Quelle: File:Star-sizes.jpg - Wikimedia Commons

Bild 2: Farbliches Erscheinungsbild von Sternen - Quelle: Jahr der Physik, Astrophysik: Von der Geburt bis zum Tod der Sterne (uni-bonn.de)

Bild 3: Hertzsprung-Russell-Diagramm -, Quelle: hr-diagram-credit-nso.png (1220×1713) (schoolsobservatory.org)

Bild 4: Doppelstern Albireo im Sternbild Schwan (Astronomy Picture of the Day, aufgenommen von Richard Yandrick) Quelle: Doppelsterne | Max-Planck-Institut für Radioastronomie (mpg.de)

Bild 5: Roter Riese Quelle: ESA - Artist's impression of a red-giant star ejecting matter

Bild 6: Neutronenstern Quelle: Neutron star illustrated - Category:Neutron stars - Wikimedia Commons

Bild 7: P-P-Kette, Quelle: The Proton-Proton Chain (rochester.edu)

Bild 8: Hydrostatisches Gleichgewicht -t Quelle: Main Sequence | National Schools' Observatory (schoolsobservatory.org)

Bild 9: Entwicklungsstufen - Quelle: Life Cycle of a Star | National Schools' Observatory (schoolsobservatory.org)

Bild 10: Orion Nebel – Quelle: Messier 42 (The Orion Nebula) | NASA
NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA) and the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team

Bild 11: Massenreiche Sterne - Quelle: Nucleosynthesis | Chemical Elements | Chemogenesis (meta-synthesis.com)

Bild 12: Pulsar – Quelle: - Pulsare - Leuchtfeuer im All | Max-Planck-Institut für Radioastronomie (mpg.de)

Bild 13: Kosmischer Materiekreislauf - Quelle: LP – Interstellare Materie (uni-goettingen.de)

Bild 14: Der Krebsnebel, in dessen Zentrum sich ein Pulsar befindet Quelle: Pulsare - Leuchtfeuer im All | Max-Planck-Institut für Radioastronomie (mpg.de)

Bild 15: Dynamische Struktur des Krebsnebels - Quelle: Chandra :: Photo Album :: Crab Nebula Movie :: 19 Sep 02 (harvard.edu)

Bild 16: Krebsnebel 2017- Quelle: https://chandra.harvard.edu/photo/2017/crab/

Bild 17: Strichpuraufnahme - Quelle: https:// Strichspuren ++ber der Sternwarte | Astronomie in Süddeutschland (astronomie-sued.de)

Bild 18: PlaneWave CDK20 Astrograph f/6.8 - Quelle: PlaneWave Europe | CDK20 Astrograph f/6.8

Bild 19: 10Micron GM4000HPSII. Montierung - Quelle: 10Micron.eu | GM 4000 HPS II Montierung

Bild 20: Technische Daten 10Micron GM4000HPSII. Montierung Quelle: https:// PlaneWave Europe | CDK20 Astrograph f/6.8

Bild 21: Canon EOS RP - Quelle: Canon EOS RP – Kameras - Canon Deutschland

Bild 22: Filter - Quelle: https:// Teleskop-Express: Optolong 2" L-eNhance Nebelfilter für DSLR und Color Astro-Kameras

Bild 23: Filtertransmissionskurve - Quelle: https://www.teleskop-express.de/shop/product_info.php/info/p11238_Optolong-2--L-eNhance-Nebula-Filter-for-DSLR-and-Color-Astro-Cameras.html

Bild 24: Wetterbedingungen Wuppertal am 10.01.2022 – Quelle: Wetter aktuell, Wettervorhersage und Wetterbericht - WetterOnline

Bild 25: Aufnahme des „Forscherteams“ vor dem verwendeten Teleskop

Bild 26: Historische Aufnahme des Krebsnebels aus dem Jahr 1909 – Quelle: Ritchey, G. W., On some Methods and Results in direct Photography with the 60-inch reflecting Telescope of the Mount Wilson Solar Observatory

10. Danksagung

Ich danke dem Carl-Fuhlrott-Gymnasium für die Möglichkeit, am Projektkurs Astronomie teilnehmen zu dürfen und in diesem Rahmen die hauseigene Sternwarte sowie die darüberhinausgehenden Materialien (Daten, Software und Literatur) benutzen zu dürfen.

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Projektkurses Herrn Bernd Koch. Mit seiner fachlichen Kompetenz hat er mich während des gesamten Schuljahres zuverlässig unterstützt und entscheidend zum Gelingen meiner Projektarbeit beigetragen.

11. Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Projektarbeit selbständig angefertigt habe, keine andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe und die Stellen meiner Ausführungen, die ich dem Inhalt nach anderen Werken entnommen habe, mit genauen Quellenangaben kenntlich gemacht habe. Bilder, die ich nicht selbst aufgenommen habe, wurden ebenfalls nur unter Angabe der verwendeten Quelle in diese Arbeit eingefügt.

Ich bin damit einverstanden, dass meine Projektarbeit der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Wuppertal, 15.05.2022

Ben Bastigkeit