

Gymnasium Bürgerweise, Dresden

# **Der Lebenszyklus von Sternen**

Besondere Lernleistung

Abgabetermin: 17.01.2022

Mick Baldzer

Klasse 12

Betreuer:

Altpieschen 17

Lukas Listner

01127 Dresden

Bernd Schneider

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung .....</b>	<b>4</b>
1.1 Thematik .....	4
1.2 Ziel und Anspruch der Arbeit .....	4
1.3 Gliederung .....	5
1.4 Vorgehensweise Recherche .....	6
1.5 These .....	6
1.6 Begriffserläuterung .....	7
 <b>2. Was ist ein Stern? .....</b>	 <b>9</b>
2.1 Definition .....	9
2.2 Sternaufbau .....	10
2.2.1 Sternaufbau der Sonne .....	10
2.2.2 Sternaufbau von massearmen und massereichen Sternen auf der HR .....	11
2.3 Kernfusion .....	12
2.4 Arten der Klassifizierungen .....	17
2.4.1 Spektralklassen .....	17
2.4.2 Leuchtkraftklassen .....	18
 <b>3. Der Lebenszyklus von Sternen .....</b>	 <b>20</b>
3.1 Sternenentstehung .....	20
3.1.1 Das Interstellare Medium (ISM) .....	20
3.1.2 Orte der Sternenentstehung .....	21
3.1.3 Voraussetzungen der Sternenentstehung .....	25
3.1.4 Phasen der Sternenentstehung .....	30
3.1.5 Berechnungen zur Sternenentstehung des Beispielsterns .....	36
3.2 Sternenentwicklung .....	38
3.2.1 Sterne der Leichtgewichtsklasse .....	38
3.2.2 Sterne der Mittelgewichtsklasse .....	49
3.2.3 Massereiche Sterne .....	51
3.2.4 Berechnungen zur Sternenentwicklung des Beispielsterns .....	56

<b>4. Was ist ein Schwarzes Loch?</b>	<b>58</b>
4.1 Definition	58
4.2 Arten	58
4.3 Das erste Bild von einem Schwarzen Loch	59
4.4 Eigenschaften	60
4.4.1 Der Ereignishorizont	60
4.4.2 Gravitation und die Krümmung der Raumzeit	60
4.4.3 Die Singularität	62
4.4.4 Der Gravitationslinseneffekt	63
4.4.5 Gravitationswellen	64
4.4.6 Berechnungen zum Tod des Beispielsterns	65
<b>5. Praktischer Teil</b>	<b>66</b>
<b>6. Fazit</b>	<b>67</b>
<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>68</b>
Literaturquellen	68
Internetquellen	69
Expertengespräche	76
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>77</b>

# 1. Einleitung

## 1.1 Thematik

Im Mittelpunkt meiner wissenschaftlichen Arbeit (namentlich „Besondere Lernleistung“ bzw. „BELL“) steht der Lebenszyklus, also die Entstehung, die Entwicklung und der Tod, von Sternen. Zuerst definiere ich die Grundprinzipien eines Sterns, erläutere wie er aufgebaut ist und was Sterne so besonders und unverzichtbar für das Universum macht. Ein weiterer Schwerpunkt in meiner BELL wird die Thematik Schwarzes Loch sein, da Schwarze Löcher eine der drei möglichen Resultate des Todes eines Sterns ist. Die zwei weiteren Resultate werde ich ebenfalls thematisieren: Neutronensterne und Weiße bzw. Schwarze Zwerge.

Die Theorie des Lebenszyklus von Sternen und was nach dem Tod eines Sterns geschieht, werde ich in dieser wissenschaftlichen Arbeit durch Berechnungen der einzelnen Phasen des Lebenszyklus anhand eines Beispielsterns begleiten.

Die Umsetzung beziehungsweise Programmierung einer Website, welches das Berechnen der einzelnen Phasen übernimmt, stellt neben den Berechnungen meinen Eigenanteil dar. In diese sollen Werte für die physikalischen und chemischen Größen, wie die Dichte oder die Temperatur, angegeben werden, welche vor der Entstehung eines Sterns in einer Molekülwolke vorherrschen könnten. Wenn diese Werte passend für die Entstehung eines Sterns sind (sprich über der Jeans-Masse liegen), soll das Programm mit weiteren Werte durch die passenden Formeln Informationen wie die Lebensdauer für den entstandenen Stern visualisiert angeben.

## 1.2 Ziel und Anspruch der Arbeit

Ziel meiner wissenschaftlichen Arbeit ist es, ein Programm zu erstellen, welches das Berechnen der Umstände in den einzelnen Phasen des Lebenszyklus eines Sterns vereinfachen soll. Das Programm soll einen nachhaltigen Wert besitzen d.h. dass es Schülerinnen und Schülern anschaulich astronomischen Gesetzmäßigkeiten erläutert und Zusammenhänge lebendig veranschaulicht. Meiner Erfahrung nach, wird die Bedeutung von einer Formel oftmals zu abstrakt vermittelt. Daher ist mein persönlicher Anspruch an das Programm ebenfalls, einen positiven Lerneffekt für Schülerinnen und Schüler zu erzeugen und Begeisterung für das Thema zu wecken.

Mein theoretischer Teil „Der Lebenszyklus von Sternen“, wird das Programm inhaltlich begleiten und erklären. Zusätzlich wird durch meine eigenen Berechnungen anhand eines Beispielsterns verdeutlicht, wie das Programm vorgeht, beziehungsweise welche Formeln das Programm anwendet.

### **1.3 Gliederung**

In meiner „Besondere Lernleistung“ folgt nach der Einleitung ein Kapitel, welches über Sterne im Allgemeinen informiert. Darin werde ich den Begriff Stern definieren, erläutere den Aufbau eines Sterns und erkläre die Klassifizierungen der Sterne anhand des Hertzsprung-Russell-Diagramms. Das Kapitel dient dazu, den Leser auf das kommende Kapitel „Der Lebenszyklus von Sternen“ inhaltlich beziehungsweise thematisch vorzubereiten.

Kapitel drei meiner Besonderen Lernleistung ist, wie bereits oben genannt, „Der Lebenszyklus von Sternen“. In diesem Kapitel schreibe ich über das Interstellare Medium (ISM) und weitere Voraussetzungen sowie Phasen der Sternentstehung. Anhand des bedeutendsten Diagramms in der Astronomie, dem Hertzsprung-Russell-Diagramm, erläutere ich die drei Gewichtsklassen von Sternen und deren unterschiedliche Entwicklung. Als letztes Thema in Kapitel drei vermittele ich die drei möglichen Endphasen für einen Stern.

Dies dient als Überleitung für meinen zweiten Schwerpunkt: Schwarze Löcher. In Kapitel vier werde ich erklären, was ein Schwarzes Loch ist, in welche Arten Schwarze Löcher klassifiziert werden und welche Eigenschaften diese besitzen.

Kapitel fünf werde ich meinem Praktischen Teil widmen. In diesem werde ich mein Ziel für das Aussehen der Website des Programmes beschreiben und mein weiteres Vorgehen erläutern, da ich das Programm erst nach Abgabe des Theoretischen Teils fertigstellen werde.

Im letzten Kapitel meiner wissenschaftlichen Arbeit, dem Fazit, werde ich meinen theoretischen Teil auswerten und selbstkritisch evaluieren.

Nach Kapitel sechs folgt abschließend mein Quellenverzeichnis (aus Literaturquellen, Internetquellen, Personenquellen und einem Abbildungsregister bestehend).

## **1.4 Vorgehensweise Recherche**

Quellen bzw. Mittel für meine Recherche sind fast ausschließlich Bücher wie: „Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt“ von Harald Lesch und Jörn Müller oder „Sternenentstehung, Vom Urknall bis zur Geburt der Sonne“ von Prof. Ralf Klessen und Internetquellen wie „Leifiphysik“, durch die ich mir viel Wissen angeeignet habe. Durch teils vereinfachte Erklärungen in Videos und Websites und zusätzlich komplizierte, wissenschaftlich präzise Formulierungen aus wissenschaftlichen Papers und Büchern, gelingt es mir die vielen Informationen einer Thematik auf das Niveau dieser wissenschaftlichen Arbeit zu standardisieren.

Ein Teil meiner Recherche stellte zudem der Besuch der „ESO Supernova“ in Garching bei München dar, bei dem ich die Gelegenheit bekam mit Prof. Dr. Jochen Weller mich ausführlich auszutauschen. Prof. Dr. Jochen Weller ist Professor der Physik an der Ludwigs-Maximilians Universität in München und arbeitet unter anderem mit Steven Hawking an der University of Cambridge. Dieser ermöglichte mir zudem ein Interview mit dem Doktorand Kianusch Mehran, der am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik zum Thema supermassereiche Schwarze Löcher forscht. Mit Prof. Dr. Jochen Weller durfte ich auch telefonisch weitere Male Rücksprache halten.

Weitere wichtige Quellen für meine Recherche waren Dr. Dominik Merkt von der Universität Stuttgart, mit welchem ich Rücksprachen über gewisse Berechnungen hatte und der Unterricht des Wahlgrundkurses „Astronomie“ von Herr Listner, welchen ich seit 2020 besuche.

## **1.5 These**

Es ist möglich anhand der physikalischen Größen Temperatur, Dichte und Masse einer Molekülwolke die Voraussetzungen der Entstehung eines Sterns zu berechnen und seinen Lebenszyklus auf Basis der neuen Erkenntnisse der Astro-Physik zu erläutern.

## 1.6 Begriffserläuterung

Das **interstellare Medium (ISM)** ist der Raum zwischen den Sternen. Er besteht aus Gas (vor allem Wasserstoff und Helium) und Staub und macht etwa 15 % der sichtbaren Materie in unserer Galaxie aus.<sup>1</sup>

**Fermi-Druck:** Der Fermi-Druck entsteht durch das **Pauli-Prinzip**, welches besagt, dass zwei Körper (hier bezogen auf „Bausteine eines Atoms“ aus dem Standardmodell) nicht am selben Raumzeitpunkt existieren können. Aus diesem Grund pressen sich die freien Elektronen im Plasma eines Sterns zusammen, wenn dieser kontrahiert, und bilden einen Druck, der entgegen den Gravitationsdruck wirkt.<sup>2</sup>

**Sagittarius A\*** ist das super-massereiche Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße, unserer Galaxie.

**ESO:** Das European Southern Observatory ist eine zwischenstaatliche Organisation, welche Wissenschaftliche- und Technologische Bereiche in der Astronomie abdeckt.

Die **String Theorie** beschreibt die Quantengravitation durch sogenannte Strings als fundamentale Objekte mit eindimensionaler räumlicher Ausdehnung.<sup>3</sup>

Eine **Akkretionsscheibe** ist eine rotierende Scheibe aus Materie wie zum Beispiel Gas um ein zentrales Objekt (in diesem Fall ein Schwarzes Loch). Diese Materie wird durch die Rotation in Richtung Zentrum transportiert (akkretiert), wobei das zentrale Objekt an Masse gewinnt.

**Gravitation** ist laut Albert Einsteins Relativitätstheorie die Krümmung der Raumzeit durch ein Objekt mit einer bestimmten Masse.

Albert Einsteins **Allgemeine Relativitätstheorie** beschreibt die Wirkung von Gravitation, hervorgerufen durch Masse, auf Raum und Zeit (bzw. die Raumzeit).<sup>4</sup> Zu ihr zählen auch Vorhersagen Einstein's wie zum Beispiel Schwarze Löcher oder Gravitationswellen, welche erst viel später nach der Veröffentlichung der Theorie in 1915 erwiesen worden.<sup>5</sup>

---

<sup>1</sup> <https://www.nature.com/subjects/interstellar-medium>

<sup>2</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Pauli-Prinzip>

<sup>3</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Stringtheorie>

<sup>4</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Allgemeine\\_Relativitätstheorie](https://de.wikipedia.org/wiki/Allgemeine_Relativitätstheorie)

<sup>5</sup> <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/allgemeine-relativitaetstheorie/383>

Als **Plasma** wird das Gas im inneren eines Sterns bezeichnet, welches im ionisierten Zustand ist. Das heißt, Elektronen und Protonen sind nicht gebunden und bewegen sich frei voneinander.

Der **Strahlungsdruck** und der **Gasdruck** bzw. thermische Druck sind nach außen gerichtete Drucke im inneren eines Sterns, die durch die Leuchtkraft und die Teilchenbewegung entstehen.

Der **Gravitationsdruck** ist der nach innen gerichtete Druck im inneren eines Sterns, welcher von seiner eigenen Schwerkraft ausgeht.

„Eine **Sonnenmasse**“ ist eine astronomische Einheit für die Masse von großen Körpern im Universum. Dabei ist  $1 M_{\text{Sonne}} \approx 2 \times 10^{30}$  Kilogramm.<sup>6</sup>

Das **Elektron** ( $e^-$ ) ist ein Elementarteilchen mit einer negativen elektrischen Ladung. Elektronen umkreisen den Kern eines Atoms. Sie können durch Zusammenstöße mit anderen Teilchen oder Photonen aus einem Atom herausgerissen werden.<sup>7</sup>

Das **Positron** ( $e^+$ ) ist ein atomares Teilchen mit Eigenschaften, die mit denen eines negativ geladenen Elektrons identisch sind, mit Ausnahme seiner positiven Ladung.<sup>8</sup>

Das **Neutrino** ( $\nu_e$ ) ist ein elektrisch neutrales Elementarteilchen, das eines der Produkte von Kernfusionsreaktionen ist. Neutrinos haben wenig oder gar keine Masse, bewegen sich mit annähernd Lichtgeschwindigkeit und wechselwirken nur sehr schwach mit Materie.<sup>9</sup>

Das **Neutron** ( $n$ ) ist ein Elementarteilchen mit etwa der gleichen Masse wie ein Proton, welches jedoch elektrisch neutral ist. Neutronen bilden zusammen mit Protonen die Atomkerne.<sup>10</sup>

Die **Gammastrahlung** ( $\gamma$ ) beschreibt einen Bereich des elektromagnetischen Spektrums, der über die Röntgenstrahlung hinausgeht und Strahlung mit sehr hoher Frequenz und sehr kurzer Wellenlänge umfasst.

**Kontraktion** beschreibt das Verkürzen bzw. Zusammenziehen eines Körpers (hier: der Kern des Sterns, welcher schrumpft).

---

<sup>6</sup> Meyer, L. (2016): Das große Tafelwerk interaktiv 2.0. 1. Auflage. Cornelsen Schulverlage GmbH (S. 98)

<sup>7</sup> <https://chandra.si.edu/resources/glossaryE.html>

<sup>8</sup> <https://chandra.si.edu/resources/glossaryP.html>

<sup>9</sup> <https://chandra.si.edu/resources/glossaryN.html>

<sup>10</sup> <https://chandra.si.edu/resources/glossaryN.html>



## 2. Was ist ein Stern?

Man muss nicht weit suchen, um einen uns allen bekannten Stern zu finden: die Sonne. Sie bildet das Zentrum unseres Sonnensystems und ist der Stern mit der kürzesten Entfernung zur Erde ( $149,6 \times 10^6$  km). Diese kurze Entfernung ist ein Grund, warum die Sonne als der am besten erforschte Stern gilt. Aus diesem Grund werde ich mich in diesem Kapitel oft auf die Sonne beziehen, da die Wissenschaft über Merkmale, wie z.B. den inneren Aufbau eines Sterns, das meiste Wissen aus der Untersuchung der Sonne bezieht.

Die Sonne ist somit der „Modellstern“, durch dessen Erkenntnisse man Schlussfolgerungen auf die Merkmale und Eigenschaften der restlichen Sterne machen kann.<sup>11</sup> Dies unterstreicht die Relevanz der weiteren Beobachtung und Forschung an der Sonne.

Nach der Sonne ist der nächste Stern zur Erde, namentlich Proxima Centauri, bereits 4,2465 Lichtjahre entfernt, was ca.  $4 \times 10^{13}$  Kilometern entspricht. „Proxima“ ist dabei lateinisch und kann als „Nächstgelegener“ übersetzt werden.<sup>12</sup>

### 2.1 Definition

Ein Stern ist eine sehr große Kugel aus heißem, komprimiertem Gas ( $H^+$ ) bzw. Plasma, welches im Kern des Sterns durch den enormen Druck so heiß wird, dass der Stern selbstständig Kernfusion betreibt und somit seiner eigenen Masse durch den erzeugten Strahlungsdruck standhalten kann. Dieses Prinzip, in dem die nach innen wirkende Gravitation und der nach außen wirkende Strahlungsdruck (ausgehend von der Kernfusion im Inneren der Sonne), die Zentrifugalkraft und der Gasdruck sich gegenseitig ausbalancieren, wird Hydrostatisches Gleichgewicht genannt. Der Stern erhält so seine Form.

---

<sup>11</sup> Prof. Dr. Klaas de Boer, Prof. Dr. habil. Oliver Schwarz (2011): Astronomie, Gymnasium Oberstufe – Grundstudium. 3. Auflage. DUDEN PAETEC Schulbuchverlag (S. 131)

<sup>12</sup> <https://earthsky.org/astronomy-essentials/proxima-centauri-our-suns-nearest-neighbor/>

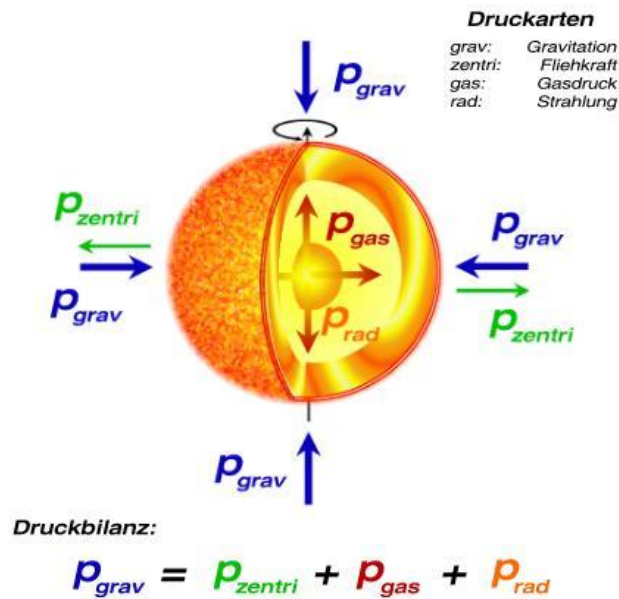


Abb. 1: Das Hydrostatisches Gleichgewicht eines Sterns.

## 2.2 Sternaufbau

### 2.2.1 Sternaufbau der Sonne

Mit den heutigen Beobachtungstechniken ist es unmöglich, in das Innere der Sonne hineinzusehen, was Grund für die Annahme war, dass es unmöglich sei, den inneren Aufbau der Sonne zu untersuchen. Diese Annahme änderte sich, als der US-amerikanische Physiker Robert B. Leighton 1960 die periodischen Schwingungen der Sonnenoberfläche entdeckte. Durch die Veröffentlichung seiner Erkenntnisse begründete Leighton ein neues Teilgebiet der Astronomie: die Helioseismologie.<sup>13</sup>

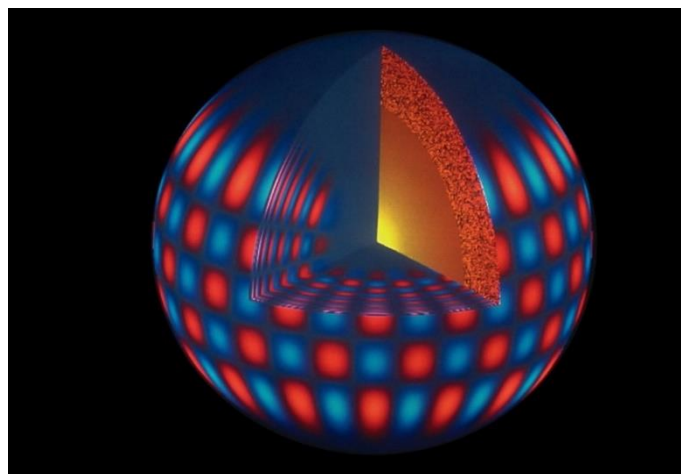


Abb. 2: Helioseismologie: Seismische Wellen (P-Wellen) in und auf der Sonne.

<sup>13</sup> Götz Hoeppe (2004): Sonnenbeben, Entdeckung der Helioseismologie. Heft 8. Sterne und Weltraum (S. 22)

Durch die Analyse dieser Schwingungen an der Sonnenoberfläche konnte man herausfinden, dass der Grund für die Schwingungen gewisse Seismische Wellen in Form von P-Wellen (Longitudinalwellen) sind, die wiederum durch sogenannte Sonnenbeben entstehen.<sup>14</sup> Ähnlich wie bei Erdbeben auf der Erde, verlaufen diese Seismischen Wellen durch die gesamte Sonne und werden an den Grenzflächen der inneren Schichten der Sonne teils reflektiert. Die reflektierten Seismischen Wellen konnte man an der Sonnenoberfläche messen und so die Tiefe der jeweiligen Grenzschicht ermitteln.<sup>15</sup> So gelang es der Wissenschaft Stück für Stück das Schichtenmodell der Sonne zu erstellen. Wie in Abbildung 2 dargestellt, besteht die Sonne laut dem Modell aus einem inneren Kern, der von einer Strahlungszone umgeben ist. Diese ist wiederum konzentrisch von der Konvektionszone umgeben, an welche die Photosphäre grenzt, die die Sonnenoberfläche bildet. Über der Photosphäre liegen die Chromosphäre und schließlich die Korona.

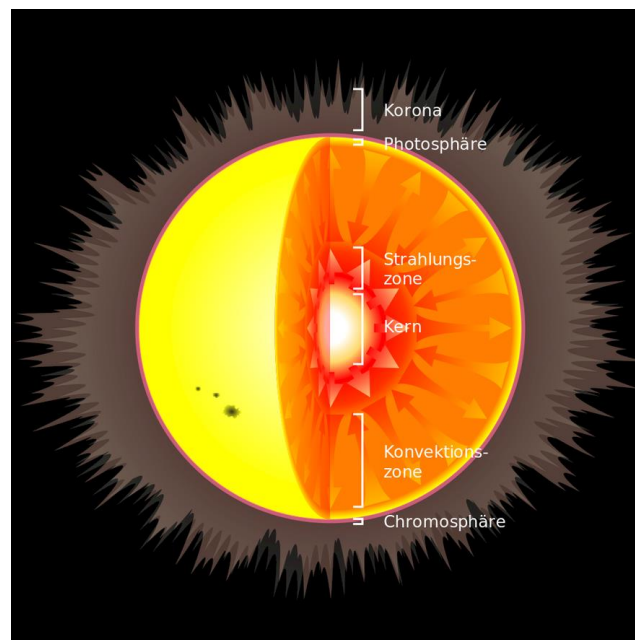


Abb. 3: Innerer Aufbau der Sonne

## 2.2.2 Sternaufbau von massearmen und massereichen Sternen auf der HR

Neben sonnenähnlichen Sternen gibt es auf der Hauptreihe des Hertzsprung-Russell-Diagramm Sterne, welche unter 0,5 Sonnenmassen besitzen, also masseärmer als die Sonne sind. Diese sogenannten Roten Zwerge werden in Abbildung 3 links abgebildet. In dieser kann man zusätzlich erkennen, dass Rote Zwerge neben einem inneren Kern und der Sonnenoberfläche nur eine Konvektionszone besitzen (durch die Ovale mit Pfeilen symbolisiert). Mittig in Abbildung 3 kann man das Modell eines Sternaufbaus für einen

<sup>14</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Helioseismologie>

<sup>15</sup> <https://www.astronomie.de/das-sonnensystem/die-sonne/basiswissen/innerer-aufbau-der-sonne/>

sonnenähnlichen Stern erkennen, welchen ich im vorherigen Kapitel mit der Sonne bereits erläutert habe. Verglichen mit diesen, ist die Struktur des Sternaufbaus in Blauen Riesen (rechts in Abb. 3) genau umgekehrt. An den inneren Kern grenzt hier direkt die Konvektionszone, gefolgt von der Strahlungszone (durch die gezackten Pfeile symbolisiert).

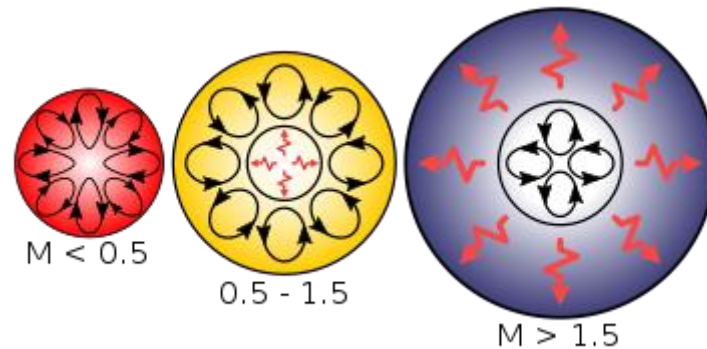


Abb. 4: Der vereinfachte Sternaufbau von Hauptreihensternen verschiedener Massen.

## 2.3 Kernfusion

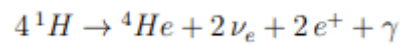
„Die Energieerzeugung in der Sonne und den Sternen wird schon seit weit über hundert Jahren diskutiert. Erst Carl Friedrich von Weizsäcker und Hans Bethe identifizierten die Kernfusion als Energiequelle.“, schrieb Kai Zuber am 1. März 2021 in der Zeitschrift „Physik in unserer Zeit“.<sup>16</sup>

Wie bereits in 2.1 und 2.2 erwähnt, betreibt jeder Stern auf der Hauptreihe in seinem inneren Kern stellare Kernfusion. Doch was bedeutet das? Vereinfacht gesagt, erfolgt bei der Kernfusion folgender Prozess: Zwei Atomkerne, welche nicht an ihre Elektronen gebunden sind, prallen aufeinander und verschmelzen zu einem einzigen, neuen Atomkern.

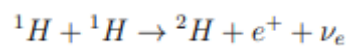
In Sternen wie der Sonne, welche eine Masse bis etwa 1,5 Sonnenmassen besitzen, verläuft das Wasserstoffbrennen hauptsächlich über die sogenannte Proton-Proton-Kette (auch PP-Zyklus genannt) ab (siehe Abbildung 5). Ergebnisse dieser Fusionsreaktion sind das Helium-Isotop  $^4\text{He}$  und weitere Reaktionsprodukte, unter anderem Energie in Form von Strahlung, was den Stern zum Leuchten bringt. Hauptsächlich gibt es drei unterschiedliche Reaktionsketten in einem Stern, die das Helium-Isotop erzeugen: die Proton-Proton-I-Kette, die Proton-Proton-II-Kette und die Proton-Proton-III-Kette.

<sup>16</sup> <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/piuz.202001599>

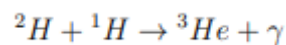
Bei der Proton-Proton-I-Kette fusionieren vier Wasserstoffkerne (Protonen) zu einem Helium-4 ( ${}^4\text{He}$ ), wobei weitere Reaktionsprodukte anfallen: zwei Positronen, wie zwei Neutrinos und Energie.



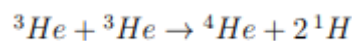
Dieser Prozess lässt sich jedoch auch spezifischer beschreiben, wozu man die Reaktion in drei Teil-Reaktionen unterteilt. Teil-Reaktion eins beginnt mit zwei Protonen ( $2 {}^1\text{H}$ ), die zu einem Deuterium ( ${}^2\text{D}$ ) fusionieren, einem Isotop des Wasserstoffs. Weitere Reaktionsprodukte sind ein Positron ( $e^+$ ) und ein Neutrino ( $\nu_e$ ).<sup>17</sup> Das Positron reagiert (annihiliert) mit einem Elektron ( $e^-$ ) und beide werden in Energie in Form von Gammastrahlung freigesetzt.<sup>18</sup>



In Teil-Reaktion zwei fusioniert dieser Deuterium-Kern mit einem weiteren Proton. Dabei entsteht ein Helium-3 ( ${}^3\text{He}$ ) und Gammastrahlung ( $\gamma$ ).



Die dritte Teil-Reaktion besteht aus dem Fusionieren von zwei Helium-3 Kernen ( $2 {}^3\text{He}$ ) zu einem Helium-4 Kern ( ${}^4\text{He}$ ) und zwei Wasserstoffkernen. Zudem wird bei Teil-Reaktion drei die meiste Energie freigesetzt.



Die Proton-Proton-I-Kette kann in Sternen bei Temperaturen von mindestens 10 bis maximal 14 Millionen Kelvin auftreten. In der Sonne ist die Reaktionskette daher mit ca. 83,30 Prozent die vorherrschende (siehe Abbildung 6), bei  $T_z \sim 15,5 \times 10^6$  Kelvin.<sup>19</sup> Die gesamte, oben beschriebene, Proton-Proton-I-Kette ist in Abbildung 5 nochmals visualisiert.

---

<sup>17</sup> Unterricht des Wahlgrundkurses „Astronomie“, Listner, L.

<sup>18</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Proton-Proton-Reaktion#Startreaktionen>

<sup>19</sup> Eric Adelberger (2011): *Solar fusion cross sections. II. The pp chain and CNO cycles*. 1. Auflage. *Reviews of Modern Physics*. (S. 7-8) <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.83.195>

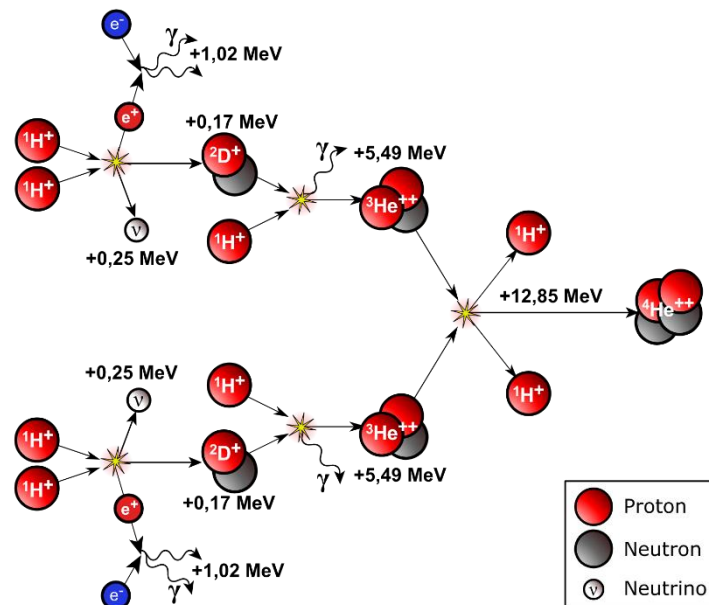


Abb. 5: Die Proton-Proton-I-Kette der Kernfusion in Sternen.

Zusammengefasst ist also festzuhalten: die Proton-Proton-I-Kette lässt sechs Protonen ( $6\ ^1\text{H}$ ) zu einem Helium-4 ( $^4\text{He}$ ) und zwei Protonen ( $2\ ^1\text{H}$ ) fusionieren. Daraus ergibt sich die oben genannte Annahme: vier Protonen fusionieren zu einem Helium-4. Bei der Reaktion wird außerdem Energie, auf Kosten eines Masseverlusts (Massedefekt), freigesetzt. Diesen kann man durch die folgende Formel errechnen:

$$\Delta M = 4(M_{^1\text{H}}) - M_{^4\text{He}}$$

Wenn man nun die beiden Massen ( $M_{\text{p}} = 1,008\text{u}$ ;  $M_{\text{He}} = 4,003\text{u}$ ) in die Formel einsetzt, erhält man:

$$\Delta M = 4 \times 1,008\text{ u} - 4,003\text{ u}$$

$$\Delta M = 0,029\text{ u}$$

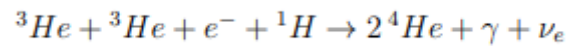
mit „u“...atomare Masseinheit ( $1\text{u} = 1,66 \times 10^{-27}\text{ kg}$ )

Die Rechnung besagt folgendes: Die vier Protonen sind um  $0,029\text{u}$  schwerer als das Helium-4. Bei der Reaktion einer Proton-Proton-I-Kette verliert die Sonne also rund  $4,81 \times 10^{-29}\text{ kg}$  an Masse, welche als Strahlungsenergie abgegeben wird.<sup>20</sup>

Wie bereits erwähnt, gibt es neben der Proton-Proton-I-Kette auch die Proton-Proton-II-Kette und die Proton-Proton-III-Kette.

<sup>20</sup> Unterricht des Wahlgrundkurses „Astronomie“, Listner, L.

Der PP-II-Zyklus läuft dabei hauptsächlich bei Temperaturen von 14.000.000 bis 23.000.000 Kelvin ab und wird in der Sonne mit 16,68 Prozent vertreten (siehe Abb. 5):



Über 23 Millionen Kelvin überwiegt die Proton-Proton-III-Kette, was in der Sonne aufgrund der geringeren inneren Temperatur ( $T_z \sim 15,5 \times 10^6$  Kelvin) nur sehr selten passiert (rund 0,02 %).

Beide Zyklen beginnen dabei mit der gleichen Teilreaktion (siehe Abb. 6) und bauen auf der Proton-Proton-I-Kette auf.

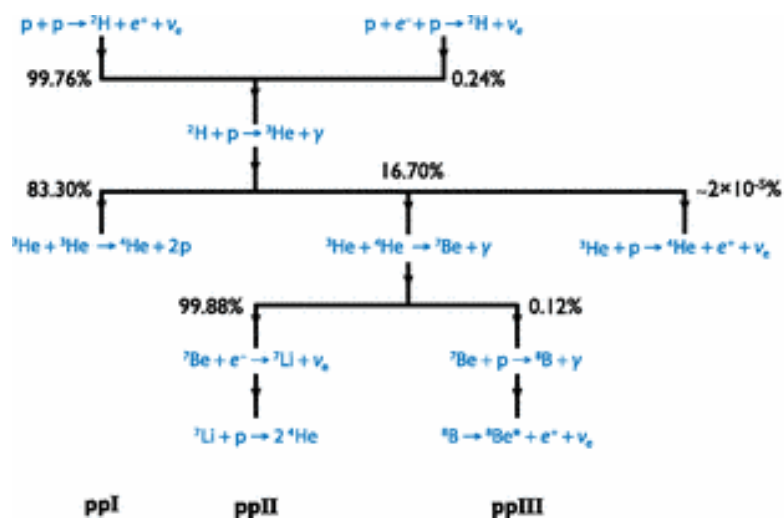
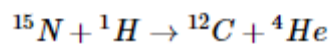
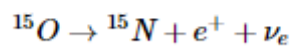
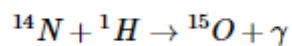
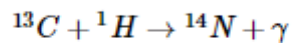
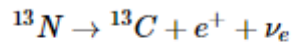
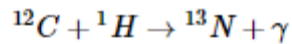


Abb. 6: Die gesamte Proton-Proton-Kette und die prozentuale Häufigkeit der drei Reaktionsketten in der Sonne.

Neben dem PP-Zyklus stellten Hans Bethe und Carl Friedrich von Weizsäcker von 1937 bis 1939 ebenfalls den CNO-Zyklus (auch Bethe-Weizsäcker-Zyklus genannt) als Methode vor, wie Sterne Wasserstoff zu Helium fusionieren.

In selbigem fusionieren vier Protonen in einer zyklischen Reaktionskette mit Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Sauerstoff (O) als Katalysator.<sup>21</sup> Daher auch der Name: CNO-Zyklus. Die Reaktionsgleichungen sind die folgenden:



Der Zyklus beginnt mit der Fusion von einem Kohlenstoffkern ( $^{12}\text{C}$ ) mit einem Proton ( $^1\text{H}$ ). Durch die Fusion entsteht ein Stickstoffkern ( $^{13}\text{N}$ ) und Gammastrahlen ( $\gamma$ ). Der Stickstoffkern mit sieben Protonen ist jedoch instabil und zerfällt nach einer kurzen Zeit in einen Kohlenstoffkern ( $^{13}\text{C}$ ) mit sechs Protonen. Zusätzliche Reaktionsprodukte sind ein Positron ( $e^+$ ) und ein Neutrino ( $\nu_e$ ). In der dritten Reaktion der Reaktionskette fusioniert der entstandene Kohlenstoffkern ( $^{13}\text{C}$ ) mit einem Proton ( $^1\text{H}$ ) in einen Stickstoffkern ( $^{14}\text{N}$ ) mit sieben Protonen und Gammastrahlung. Dieser fusioniert weiter mit einem Proton zu einem Sauerstoffatom ( $^{15}\text{O}$ ), wobei Gammastrahlen entstehen. Das Sauerstoffatom ist jedoch instabil und zerfällt zu Stickstoff ( $^{15}\text{N}$ ), sowie einem Positron und einem Neutrino. In der letzten Teil-Reaktion fusioniert das entstandene Stickstoffatom ( $^{15}\text{N}$ ) mit einem Proton zu einem Kohlenstoff-12 und einem Helium-4. Durch das entstandene Kohlenstoffatom ( $^{12}\text{C}$ ) beginnt der CNO-Zyklus mit einem Proton wieder von neuem.<sup>22</sup>

<sup>21</sup> <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/piuz.202001599>

<sup>22</sup> Unterricht des Wahlgrundkurses „Astronomie“, Listner, L.



## 2.4 Arten der Klassifizierungen

### 2.4.1 Spektralklassen

Mit den Spektralklassen unterscheidet man Sterne in ihrer Oberflächentemperatur. Grund dafür sind sogenannte Spektrallinien (Absorptions- und Emissionslinien) im farblichen Lichtspektrum eines Sterns. Diese entstehen je nach Temperatur im Stern durch die elektronischen Übergänge in einem Atom. Eine Emissionslinie entsteht, wenn ein Elektron aus einer energetisch höheren Bahn in eine energetisch niedrigere übergeht. Bei Absorptionslinien ist es genau anders herum.<sup>23</sup>

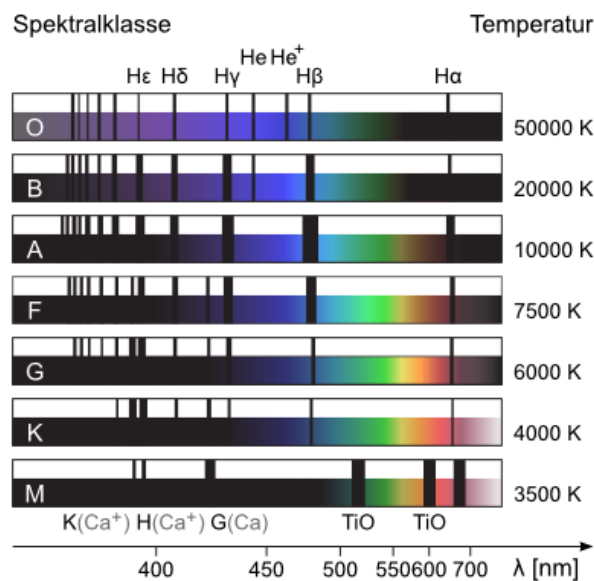


Abb. 7: Spektralklassen von Sternen mit der Lage der Absorptionslinien.

Die Spektralklassen sind wie in Abbildung 7 gezeigt: O, B, A, F, G, K und M. Zusätzlich unterscheidet man in jeder Klasse Sterne durch eine Nummerierung von 1 bis 9. Ein Beispiel: Die Sonne ist in der Spektralklasse G2.

SPEKTRALKLASSE	T <sub>EFF</sub> [K]	FARBE	BEISPIELSTERN
O	≥ 30.000	blau	Naos
B	10.000 – 30.000	blau bis weiß	Rigel
A	7.500 – 10.000	weiß	Sirius
F	6.000 – 7.500	weiß bis gelb	Polaris
G	5.200 – 6.000	gelb	Sonne
K	3.700 – 5.200	orange	Aldebaran
M	2.400 – 3.700	rot	Proxima Centauri

<sup>23</sup> Unterricht des Wahlgrundkurses „Astronomie“, Listner, L.

Berechnen kann man die Oberflächentemperatur eines Sterns mit dem Stefan-Boltzmann-Gesetz, welches man auf  $T_{\text{eff}}$  umstellt <sup>24</sup>:

$$L = \sigma \cdot 4\pi R^2 \cdot T_{\text{eff}}^4$$

$$T_{\text{eff}}^4 = \sqrt[4]{\frac{L}{\sigma \cdot 4\pi R^2}}$$

mit  $\sigma$ ...Stefan-Boltzmann-Konstante

L...Leuchtkraft

R...Radius

## 2.4.2 Leuchtkraftklassen

Die Leuchtkraftklasse eines Sterns hängt von der Oberflächentemperatur (Spektralklasse) und der absoluten Helligkeit bzw. Leuchtkraft ab. So lassen sich Sterne mit der gleichen Oberflächentemperatur, jedoch einer größeren Leuchtkraft und dadurch einem größeren Radius, im sogenannten Hertzsprung-Russell-Diagramm unterscheiden. Zusammen definieren die Spektral- und Leuchtkraftklasse den genauen Zustand eines Sterns und geben Auskunft über das Stadium seiner Entwicklung (Sonne: G2V).<sup>25</sup>

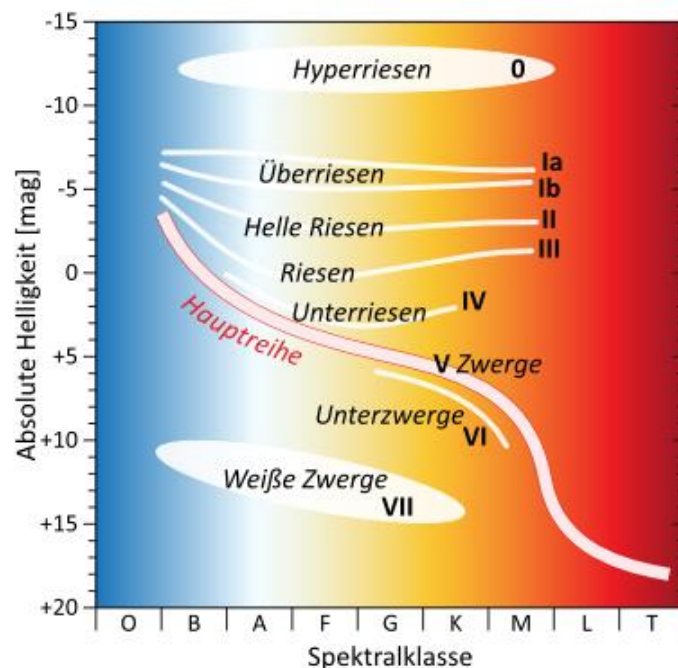


Abb. 8: Leuchtkraftklassen der Sterne.

<sup>24</sup> Unterricht des Wahlgrundkurses „Astronomie“, Listner, L.

<sup>25</sup> <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7004>

Die absolute Helligkeit (M) eines Sterns beschreibt, wie hell dieser in einer Entfernung von zehn Parsec strahlen würde. Mit der folgenden Formel kann man diese ausrechnen.

$$m - M = 5 \lg(r) - 5$$

mit m...scheinbare Helligkeit

## 3. Der Lebenszyklus von Sternen

### 3.1 Sternenentstehung

#### 3.1.1 Das Interstellare Medium (ISM)

Um verstehen zu können, wo und aus was Sterne entstehen, muss man wissen, was sich zwischen den Sternen befindet. Dieser sogenannte interstellare Raum ist erfüllt mit dem Interstellaren Medium (ISM).

Das Interstellare Medium besteht fast ausschließlich aus der interstellaren Materie. Die chemische Zusammensetzung dieser interstellaren Materie, bezogen auf die Masse der Bestandteile dieser, ist wie folgt: 70,4 Prozent Wasserstoff; 28,1 Prozent Helium und 1,5 Prozent schwere Elemente, darunter Kohlenstoff; Stickstoff; Sauerstoff; Silizium und Eisen.<sup>26</sup>

Betrachtet man den Mengenanteil der jeweiligen Elemente, so fällt auf, dass 99 Prozent der interstellaren Materie aus Gas bestehen (wie bereits aufgezählt) und ein Prozent aus interstellarem Staub. Hauptbestandteile von diesem sind Silikate und Kohlenstoff in Form von Graphit.<sup>27</sup>

Die interstellare Materie ist jedoch nur eine von vielen Komponenten im Interstellaren Medium. Außer Gas und Staub besteht die ISM aus kosmischen- und elektromagnetischer Strahlung sowie aus magnetischen Feldern. Letztere sind verhältnismäßig schwach: verglichen mit dem Magnetfeld der Erde (0,3 Gauß am Äquator), besitzen diese nur wenige Millionstel Gauß.<sup>28</sup> Trotzdem spielen die Magnetfelder des Interstellaren Mediums eine Rolle bei der Entstehung von Sternen.

---

<sup>26</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S.89f.)

<sup>27</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Interstellarer\\_Staub](https://de.wikipedia.org/wiki/Interstellarer_Staub)

<sup>28</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S.92)

### 3.1.2 Orte der Sternentstehung

Wie man in Abbildung 10 unschwer erkennen kann, ist die interstellare Materie nicht gleichmäßig verteilt. Das Gegenteil ist der Fall: in sogenannten Gas-, Staub- und Molekülwolken sammelt sich die interstellare Materie verdichtet an (siehe Abb. 11). Gas und Staub verdichten sich in manchen Regionen so stark, dass das Licht der dahinter liegenden Sterne völlig absorbiert wird und somit kein Licht beim Betrachter auf der Erde ankommt. Diese Regionen werden als Dunkelnebel bezeichnet (siehe Abb. 9).



Abb. 9: Aufnahme des Dunkelnebels LDN 483 und seinem Umfeld vom La-Silla-Observatorium der ESO in Chile.

Wenn man mit einem Teleskop sogenannte „junge Sterne“ beobachtet, fällt auf, dass diese mit wenigen Ausnahmen ausschließlich in kleineren Gruppen von mehr als zehn Exemplaren oder sogar in „Sternenhaufen“ vorkommen. Diese Sternenhaufen bestehen aus einer großen Anzahl von Sternen, die von einigen 100 bis zu 10 000 reichen kann.<sup>29</sup>

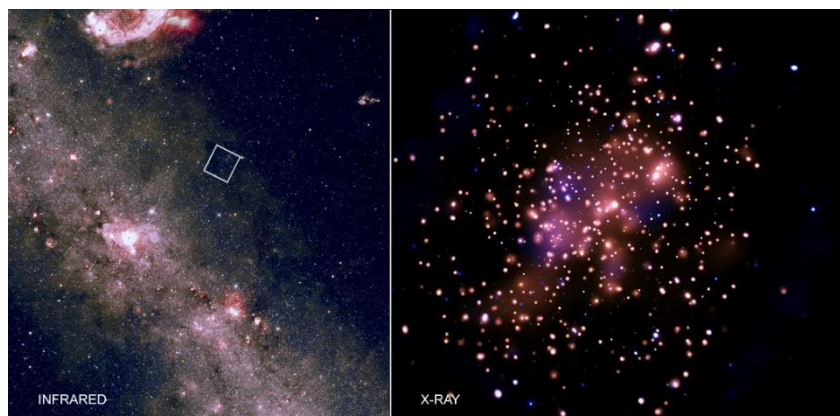


Abb. 10: Aufnahme des Sternhaufens NGC 6231 mit dem „Chandra X-Ray Teleskop“ der NASA

<sup>29</sup> Prof. Ralf Klessen (2007): Sternentstehung, Vom Urknall bis zur Geburt der Sonne. 1. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag (S.51)

Einer dieser Sternhaufen ist der Sternhaufen NGC 6231 im Sternbild Skorpion (Abb. 10).

Doch warum ist dieses Phänomen bei jungen Sternen der Fall? Die Erklärung dafür ist eher simpel: die Gebiete der Sternentstehung sind Gas-, Staub- und Molekülwolken, also Ansammlungen an interstellarer Materie.<sup>30</sup>

Diese Ansammlungen aus konzentrierter Materie, die Geburtsstätten von Sternen, befinden sich oft an den Rändern der Spiralarme einer Galaxie, wie auf der Infraroten Aufnahme in Abbildung 10 (links) zu erkennen ist. Der hell leuchtende Streifen aus Sternen und dünnem Gas stellt dabei den Ausschnitt eines Spiralarms der Milchstraße dar.<sup>31</sup>

Die „dunklen Flecken“, welche am Rand des Spiralarms zu erkennen sind, verkörpern die dichtesten Regionen der Galaxie. Demnach entstehen in diesen Dunkelnebeln (siehe Abb.9) auch die meisten Sterne.

In unserer Galaxie, der Milchstraße, sind ebenso Gaswolken in denen Sterne entstehen beobachtbar. Ein besonders bekannter Emissionsnebel ist der der Orion-Nebel (Abb. 11).



Abbildung 11: der Orion-Nebel

---

<sup>30</sup> <https://www.leifiphysik.de/astronomie/fixsterne/grundwissen/sterngeburt>

<sup>31</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S.88)

Betrachtet man den Spiralarm in Abbildung 2 oder den Orion-Nebel in Abbildung 11, so erkennt man leuchtende, helle Stellen und dunkler erscheinende Flecken.

Ausschlaggebend für die farblichen Differenzen in solchen Regionen ist eine unterschiedliche Dichte des Gases und die damit zusammenhängende Temperatur. Grundsätzlich kann man das ISM in drei Kategorien anhand der Temperatur unterteilen. Das heiße interstellare Medium besitzt den Aggregatzustand des vollständig ionisierten Plasmas, welches in den Koronen von Sternen zu finden ist. Dieses koronale Plasma besitzt eine Temperatur von  $10^5$  bis  $10^6$  Kelvin. Die zweite Kategorie wird als warmes ISM bezeichnet. Diese kann man nochmal in drei verschiedene Arten unterteilen: die Absorptionsneben, die Emissionsnebel und die H-II-Regionen. Das warme interstellare Medium reicht dabei von  $10^3$  bis  $10^4$  Kelvin. Zur Vereinfachung werde ich in der wissenschaftlichen Arbeit nur von den H-II-Regionen sprechen, wenn es sich um das warme interstellare Medium handelt. Die dritte Kategorie ist das kalte ISM, wobei man auch hier zwischen den H-I-Regionen und den Molekülwolken unterschieden werden muss. Während letztere eine Temperatur von nur 20 bis 50 Kelvin aufweisen, haben H-I-Regionen eine Temperatur von 50 bis 100 Kelvin.<sup>32</sup>

Für die Erkenntnis, in welchen Regionen einer Galaxie Sterne entstehen, ist vor allem die kalte ISM aber auch die warme ISM von Relevanz.

Die physikalischen Eigenschaften von H-II-Regionen können stark variieren. Grundsätzlich kann man jedoch sagen, dass diese Gebiete hauptsächlich aus atomarem Wasserstoff in ionisierter Form bestehen. Daher kommt auch der Name: HII (gesprochen „H zwei“) steht für ionisierten atomaren Wasserstoff (auch  $H^+$ ). Grund dafür ist die Strahlung von nahen Sternen der Spektralklasse O und B, die im Gegensatz zu den anderen Spektralklassen viel UV-Strahlung (kurzwelliges Licht) abgeben, was wiederum zur Ionisierung des Wasserstoffs führt.<sup>33</sup> Dieser Prozess wird als Photoionisation oder atomarer Photoeffekt bezeichnet. Des Weiteren ist die Strahlung der massereichen Sterne, neben den vermehrten Supernova Explosionen (mehr zur relativ kurzen Lebensdauer von massereichen Sternen in Kapitel 3.2.3), die eine große Menge an thermischer Energie in das interstellare Medium abgeben, für die vergleichsweise hohen Temperaturen im warmen ISM verantwortlich. Dazu kommt die Komprimierung des diffusen Gases, welche durch die Gravitation in den Nebeln stattfindet und das Gas weiter erhitzt. So kommen die bereits erwähnten hohen Temperaturen von rund 10.000 Kelvin zustande.<sup>34</sup>

H-I-Regionen bestehen aus atomarem, nicht ionisiertem Wasserstoff und zusätzlich aus molekularem Wasserstoff. Da der Wasserstoff zum größten Teil nicht ionisiert ist, also nur

---

<sup>32</sup> <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7283>

<sup>33</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/H-II-Gebiet>

<sup>34</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/H-II-Gebiet>



wenige bis sehr wenige Elektronen ( $e^-$ ) durch die Photoionisation von ihrer Atomhülle gelöst werden, beträgt die Temperatur in H-I-Regionen nur um die 50 bis 100 Kelvin.<sup>35 36</sup>

Zur Dichte in H-I - und H-II-Regionen: „Die Dichte in HI- und HII-Gebieten ist im Allgemeinen sehr gering. Typische Werte liegen bei  $n(H) = 1 - 10$  Teilchen pro  $cm^3$ “<sup>34 37</sup>

Molekülwolken dagegen sind mit  $T < 50$  Kelvin die kältesten Regionen in einer Galaxie. Sie haben zudem eine Masse von  $10^3$  bis  $10^4$  Sonnenmassen und eine Ausdehnung von rund 6,5 bis 49 Lichtjahren.<sup>38</sup> Die mittlere Dichte beträgt dabei  $n(H_2) = 100 - 100\,000\,cm^{-3}$ .<sup>39</sup> Wie der Name bereits sagt, bestehen Molekülwolken zu etwa 99,9 Prozent aus molekularem Wasserstoff ( $H_2$ ).

Wie bereits erklärt, sind die Regionen mit der dichtesten und dazu kältesten ISM, also Molekülwolken, die Gebiete mit den meisten Sternentstehungen.

---

<sup>35</sup> Unterricht des Wahlgrundkurses „Astronomie“, Listner, L.

<sup>36</sup> <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7283>

<sup>37</sup> Prof. Ralf Klessen (2007): Sternentstehung, Vom Urknall bis zur Geburt der Sonne. 1. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag (S.26)

<sup>38</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Sternentstehung>

<sup>39</sup> Prof. Ralf Klessen (2007): Sternentstehung, Vom Urknall bis zur Geburt der Sonne. 1. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag (S.26)



### 3.1.3 Voraussetzungen der Sternentstehung

Vereinfacht gesagt: „Ein Stern entsteht, indem eine Gas- und Staubwolke unter ihrer eigenen Schwerkraft kollabiert, bis schließlich im Zentrum thermonukleare Fusionsprozesse anlaufen.“<sup>40</sup> Dies entspricht jedoch nur der halben Wahrheit, denn damit ein Stern entstehen kann, braucht es gewisse physikalische Voraussetzungen in der Wolke. Die wichtigsten zwei Eigenschaften sind eine möglichst niedrige Temperatur, ideal sind 10 bis maximal 20 Kelvin<sup>41</sup>, und eine hohe Dichte im Gas.

Grund dafür ist eine physikalische Kraft, die der Gravitation entgegenwirkt: der thermische Druck. Dieser wirkt nach außen, während die Gravitation nach innen auf einen Punkt im Zentrum wirkt. Ein Überwiegen des thermischen Drucks gegenüber der Gravitation hätte also eine ausbreitende Wirkung auf eine Wolke aus Gas. Umgekehrt bewirkt ein Überwiegen der Gravitation gegenüber dem thermischen Druck eine Kontraktion des Gases. Für die Kontraktion, und schließlich den Kollaps einer Molekülwolke, muss der nach außen wirkende thermische Druck also möglichst klein sein.

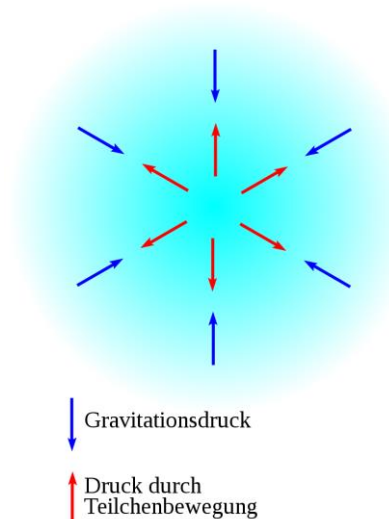


Abb. 12: Der Gravitationsdruck wirkt dem thermischen Druck entgegen.

Die Größe des thermischen Drucks ist dabei nach dem idealen Gasgesetz von der Temperatur des Gases abhängig. „Im Prinzip besagt dieses Gesetz: Bei konstantem Gasvolumen steigt der Druck im Gas proportional mit der Temperatur.“<sup>42</sup> Das heißt: je höher die Temperatur des Gases, desto höher der thermische Druck dieses.

<sup>40</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S.93)

<sup>41</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S.96)

<sup>42</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S.94)

Auch der Physiker Sir James Jeans erkannte, dass die Kontraktion einer Wolke von der Temperatur und der Dichte abhängig ist und untersuchte den Zusammenhang näher. Dabei stellte er sich die Frage: kann man eine einfache Formel finden, die uns sagt, ab wann eine Wolke instabil wird und kollabiert?

James Jeans stellte daraufhin eine Reihe von Bedingungen auf, damit sich eine Gas-, Staub- oder Molekülwolke durch die Gravitation zusammenziehen kann, was die Entstehung eines Sterns zur Folge hat. Auf den Punkt gebracht besagt das sogenannte Jeans-Kriterium, dass eine Gas-, Staub- oder Molekülwolke nur dann kollabiert, wenn die Gravitation den destabilisierenden Kräften überwiegt.<sup>43</sup> Wie bereits oben erläutert, ist eine dieser destabilisierenden Kräfte die durch die Temperatur bestimmte Gasdruck. Dazu kommen die Zentrifugalkraft und magnetische Felder.<sup>44</sup>

Eines der von James Jeans aufgestellten Bedingungen für das instabil werden einer Molekülwolke ist die Jeans-Masse.

Herleiten kann man sich die Jeans-Masse zum Beispiel über den Gleichgewichtsdruck, der sich im Zentrum der Molekülwolke befindet. Dabei gilt <sup>45</sup>:

$$|p_{Gas}| = |p_{Grav}|$$

Das Gas kann unter den herrschenden Bedingungen mit dem Gesetz der idealen Gasgleichung beschrieben werden <sup>46</sup>:

$$pV = n \cdot k_B \cdot T$$

Umgestellt bekommt man den Gasdruck <sup>47</sup>:

$$p_{Gas} = \frac{\rho}{m} \cdot k_B \cdot T$$

Der Gravitationsdruck innerhalb einer konzentrischen Kugel im Zentrum eines Himmelskörpers (in unserem Beispiel innerhalb der Molekülwolke) wird mit der folgenden Formel beschrieben <sup>48</sup>:

$$p_{Grav} = \frac{3G \cdot M^2}{8\pi \cdot R^4}$$

---

<sup>43</sup> <https://www.leifiphysik.de/astronomie/fixsterne/grundwissen/sterngeburt>

<sup>44</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S.108)

<sup>45</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Jeans-Kriterium#C3%9Cber\\_den\\_Gleichgewichtsdruck](https://de.wikipedia.org/wiki/Jeans-Kriterium#C3%9Cber_den_Gleichgewichtsdruck)

<sup>46</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S.267)

<sup>47</sup> <http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/hta-2020-2021/KTA-2020-2021.pdf>

<sup>48</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Hydrostatischer\\_Druck#Gravitationsdruck\\_in\\_Planeten,\\_Monden,\\_Asteroiden\\_und\\_Meteoriten](https://de.wikipedia.org/wiki/Hydrostatischer_Druck#Gravitationsdruck_in_Planeten,_Monden,_Asteroiden_und_Meteoriten)

Beide Formeln werden wie oben gleichgesetzt:

$$\frac{\rho}{m} \cdot k_B \cdot T = \frac{3G \cdot M^2}{8\pi \cdot R^4}$$

Durch das Umstellen der Gleichung nach M kommt man auf die Formel der Jeans-Masse:

$$M_{Jeans} = \sqrt{\frac{6}{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot \left( \frac{k_B \cdot T}{G \cdot m} \right)^3}$$

$\rho$ ...Dichte der Molekülwolke

$k_B$ ...Boltzmann-Konstante

$T$ ...Temperatur der Molekülwolke

$G$ ...Gravitationskonstante

$m$ ...mittlere Masse eines Gasmoleküls

Die Jeans-Masse beschreibt die kleinstmögliche Masse der Molekülwolke, um zu kollabieren. Es gilt also die Bedingung:

$$M_{MW} \geq M_{Jeans}$$

mit  $M_{MW}$ ...Masse der Molekülwolke

damit die Molekülwolke instabil wird und kollabieren kann.

Die Jeans-Masse ist nur von Temperatur und Dichte der Molekülwolke abhängig, da die restlichen Größen in der Formel für  $M_{Jeans}$  Konstanten sind ( $k$ ,  $G$ ,  $m$ ). Diese Korrelation zwischen den drei Größen Masse, Temperatur und Dichte kann man auch im folgenden Diagramm erkennen (siehe Abb. 13).

Neben der Jeans-Masse gibt es auch die Jeans-Länge, welche als Bedingung aufgestellt werden kann <sup>49</sup>:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\pi c_s^2}{G\rho}}$$

mit der Schallgeschwindigkeit in einem idealen Gas <sup>50</sup>:

$$c_s = \sqrt{\frac{k_B \cdot T}{\mu \cdot m_p}}$$

mit  $T$ ...Temperatur der Molekülwolke

$\mu$ ...mittlere molekulare Masse ( $\mu \approx 2,3$ ) <sup>51</sup>

$m_p$ ...Masse eines Protons

<sup>49</sup> <https://academic.oup.com/mnras/article/413/4/2741/964588> (S.2)

<sup>50</sup> <https://academic.oup.com/mnras/article/413/4/2741/964588> (S.2)

<sup>51</sup> [http://astronomy.nmsu.edu/jasonj/565/docs/09\\_03.pdf](http://astronomy.nmsu.edu/jasonj/565/docs/09_03.pdf)

Formel zur Berechnung der Dichte <sup>52</sup>:

$$\rho = \frac{3M}{4\pi \cdot R^3}$$

mit R als Radius der Molekülwolke:

$$R = \left( \frac{3M}{4\pi \cdot \rho} \right)^{\frac{1}{3}}$$

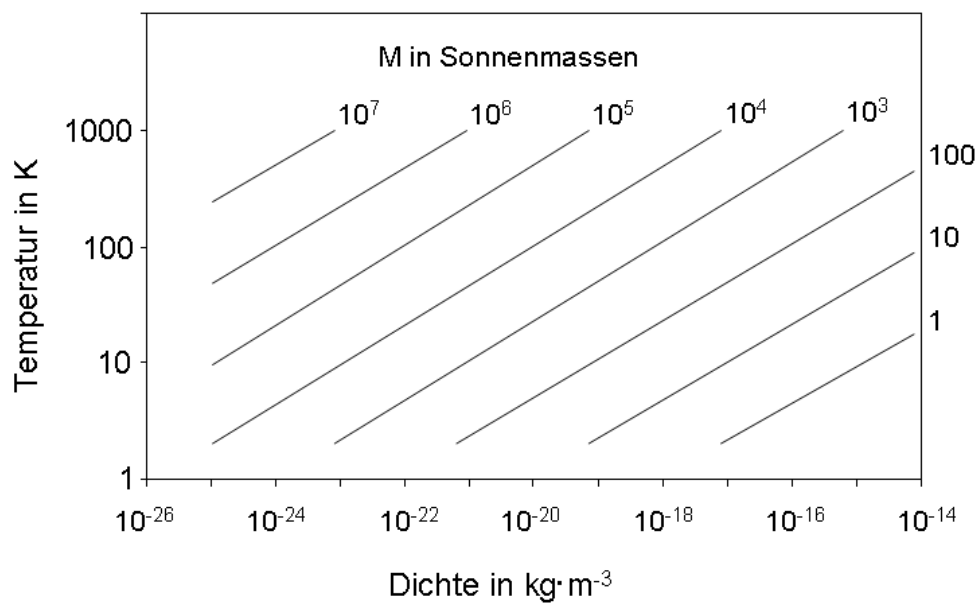


Abb. 13: Das Diagramm beschreibt die Abhängigkeit der Jeans-Masse von Temperatur (y-Achse) und Dichte (x-Achse).

<sup>52</sup> <https://www-zeuthen.desy.de/~kolanosk/astro0506/skripte/sterne01.pdf> (S.2, 6.8)

Differenziert betrachtet: Wie in Abbildung 14 veranschaulicht wird, entstehen bei der Kontraktion einer Gas-, Staub- oder Molekülwolke kleinere Klumpen bzw. gravitativ gebundene, dichtere Regionen aus Gas in der Wolke. Grund dafür sind sogenannte Turbulenzen in der Wolke, die eine ungleichmäßige Verteilung des Gases bewirken. So ist die Molekülwolke auch nicht kugelförmig. Die Annahme in der Berechnung der Formel für die Jeans-Masse, die Molekülwolke sei eine konzentrische Kugel, ist also keine Realität, sondern nur ein Modell zur Vereinfachung der Berechnung bzw. Veranschaulichung.

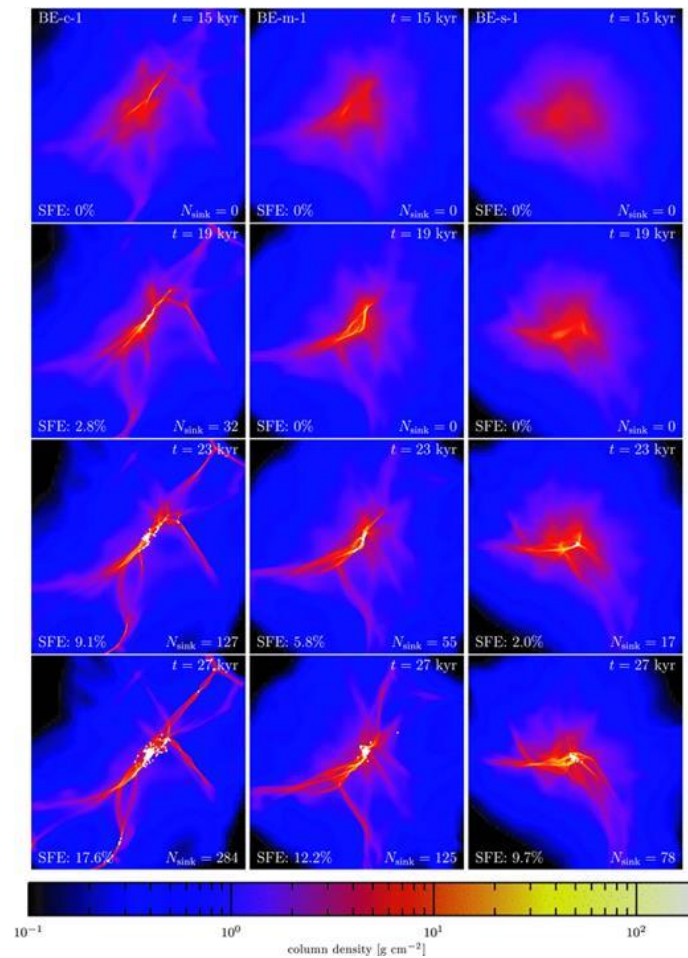


Abb. 14: Drei Simulationen der Kontraktion verschiedener interstellarer Wolken mit Turbulenzen. Die jeweiligen vier Aufnahmen geschahen nach 15 kyr, 19 kyr, 23 kyr und 27 kyr (kyr = 1000 y).

### 3.1.4 Phasen der Sternentstehung

Die Geburt eines Sterns ist im Grunde ein 2-stufiger Prozess. Die erste Stufe ist die Phase der Protosternentstehung. Am Ende der ersten Stufe ist der Stern im Hydrostatischen Gleichgewicht. Die folgende Stufe wird Vor-Hauptreihenstern genannt und beschreibt, wie der Protostern auf die Hauptreihe des Hertzsprung-Russell-Diagramms gelangt.

#### (1) Protosternentstehung

Ist das Jeans-Kriterium erfüllt, so ist die kritische Masse für einen Kollaps der Gas-, Staub- oder Molekülwolke überschritten. Folglich kollabiert die Molekülwolke dynamisch d.h. gewissermaßen im freien Fall. Daher auch der Name der ersten Phase der Sternentstehung: Erster dynamischer Kollaps.<sup>53</sup>

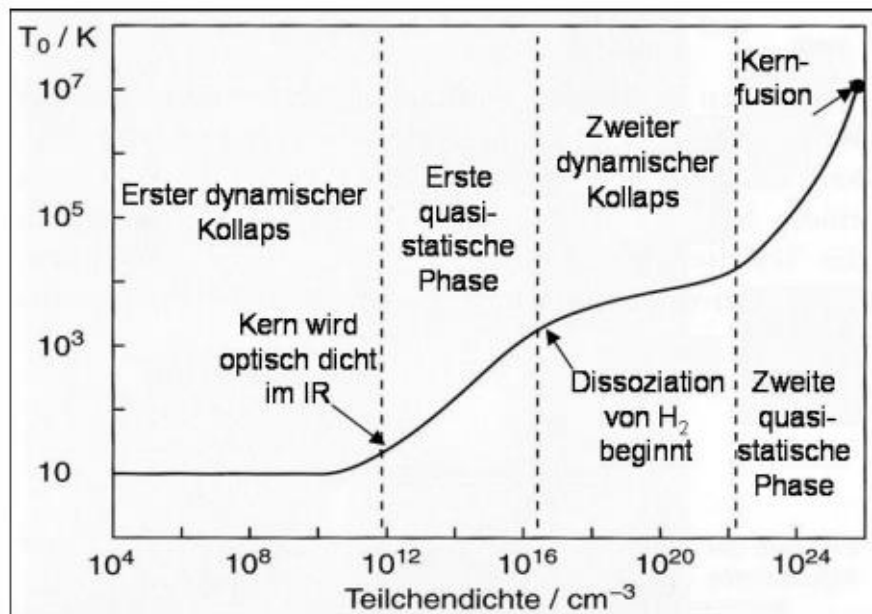


Abb. 15: Die vier Phasen der Sternentstehung in Abhängigkeit von Temperatur und Dichte.

Ergebnis des ersten dynamischen Kollapses ist das Bilden eines Kerns im Zentrum der Wolke, welcher etwa 0,5 Prozent der insgesamten Masse der Wolke besitzt. Der Kern ist dichter als die äußeren Hüllen um den Kern, was ihn optisch dicht für Licht im infraroten Bereich macht. Außerdem herrscht in ihm eine Temperatur von circa 500 K und eine Teilchendichte von nicht ganz  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ .<sup>54 55</sup>

<sup>53</sup> <https://www-zeuthen.desy.de/~kolanosk/astro0506/skripte/sterne01.pdf> (S. 4)

<sup>54</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S.111)

<sup>55</sup> <https://www-zeuthen.desy.de/~kolanosk/astro0506/skripte/sterne01.pdf> (S.5)

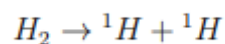
Die Zeit, welche während der Phase des dynamischen Kollapses anfällt, wird durch die sogenannte Freifallzeit bestimmt:

$$t_{ff} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G \cdot \rho}}$$

$\rho$ ...Dichte der Molekülwolke

Die zweite Phase der Sternentstehung wird als erste quasistatische Phase bezeichnet. In dieser Zeit erhitzt sich überwiegend das Gas im Kern der Wolke von anfangs 500 Kelvin auf etwa  $10^3$  Kelvin, was dazu führt, dass der von der höheren Temperatur ausgehende Strahlungsdruck größer wird und gegen den Gravitationsdruck anhält. Infolgedessen erfolgt die Kontraktion der Wolke langsamer als in der ersten Phase der Sternentstehung, nun jedoch adiabatisch d.h. ohne eine Energieabgabe nach außerhalb der Wolke.<sup>56 57</sup> Das ist der Grund für den großen Anstieg der Temperatur im inneren der Wolke, da es durch keine Energieabgabe nach außen zu einem Wärmestau kommt.<sup>58</sup>

In der folgenden Phase erhitzt sich der Kern weiter, ab einer Temperatur von ca. 1800 Kelvin beginnt jedoch die Dissoziation der Wasserstoffmoleküle ( $H_2$ ) d.h. die Wasserstoffmoleküle werden instabil und zerfallen in jeweils zwei nicht gebundene Wasserstoffatome<sup>59</sup>:



Wenn eine Temperatur von  $10^4$  Kelvin erreicht ist, werden diese Wasserstoffatome sogar ionisiert.<sup>60</sup> „Da diese Prozesse viel Energie verbrauchen, steigen in dieser Phase Druck und Temperatur nicht an, sodass der Stern nochmals dynamisch kollabieren kann.“<sup>61</sup> In der Phase des zweiten dynamischen Kollapses bildet sich aus dem Kern der Molekülwolke ein Protostern. Folglich wird die kollabierte Wolke von nun an als protostellares Objekt bezeichnet. Durch den Kollaps kommt es zur Masseaufnahme durch eine Akkretionsscheibe (siehe Abb. 16) aus der der Protostern seine Energie bezieht. Die physikalischen Eigenschaften der Akkretionsscheibe näher zu erläutern würde den Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit

<sup>56</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S.111)

<sup>57</sup> <https://www-zeuthen.desy.de/~kolanosk/astro0506/skripte/sterne01.pdf> (S.5)

<sup>58</sup> Astronomie, Herr Listner

<sup>59</sup> Steven W. Stahler: 8.4.2 Hydrogen Ionization, in: Steven W. Stahler, Francesco Palla (Hrsg.), Weinheim, Deutschland: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004, S.240

<sup>60</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S.111)

<sup>61</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S.111)

überziehen. Wichtig ist dennoch zu wissen: In und um die Akkretionsscheibe wirken Kräfte wie die Zentrifugalkraft, die Reibung zwischen den Teilchen und das Magnetfeld und die Schwerkraft des Protosterns, welche die Akkretionsscheibe aufrechterhalten. Das Gas wird folglich nur über diesen Weg im Protostern aufgenommen (siehe Abb. 16, Klasse 0). Der Protostern gewinnt so an Masse, während die Akkretionsscheibe um den Protostern immer dünner wird.

Die Leuchtkraft der Akkretion, welche bei protostellaren Objekten etwa die Gesamtstrahlungsleistung dieser beschreibt, kann durch:

$$L_{acc} = \frac{GM_* \cdot \dot{M}}{R_*}$$

mit  $L_{acc}$ ...Leuchtkraft der Akkretion

$M_{Stern}$ ...Masse des Protosterns

$R_{Stern}$ ...Radius des Protosterns

und mit der Massezuwachsrate des Protosterns berechnet werden <sup>62 63</sup>:

$$\dot{M} = 0,975 \cdot \frac{c_s^3}{G}$$

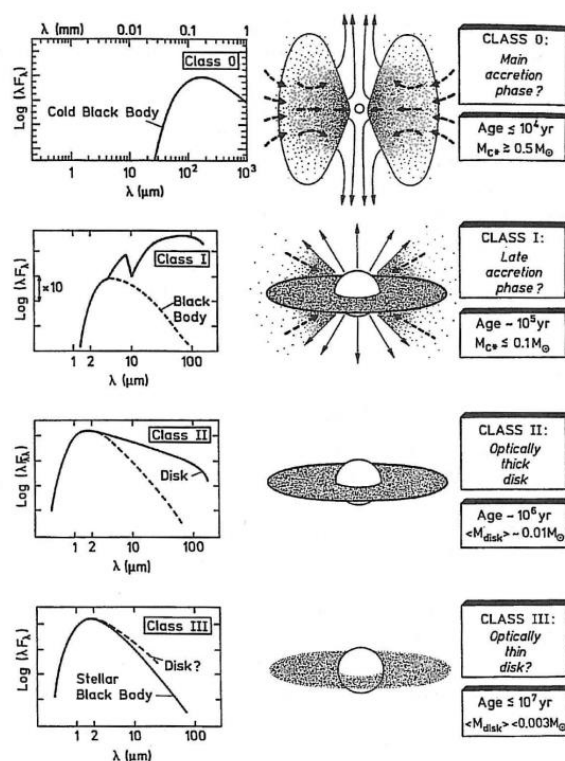


Abb. 16: Die Entwicklungsstufen von jungen, massearmen stellaren Objekten in vier Klassen bzw. Phasen unterteilt (nach P. André, 1994)

<sup>62</sup> <https://hera.ph1.uni-koeln.de/~ossk/star-formation/PMS.pdf> (S. 7)

<sup>63</sup> [http://th.nao.ac.jp/MEMBER/tomisaka/Lecture\\_Notes/StarFormation/3/node77.html](http://th.nao.ac.jp/MEMBER/tomisaka/Lecture_Notes/StarFormation/3/node77.html) (4.75)



Da der Protostern wie ein Schwarzer Körper strahlt, kann man seine effektive Temperatur mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetz für Schwarze Strahler ausrechnen: <sup>64</sup>

$$P = \sigma_B \cdot A \cdot T^4$$

mit P...Strahlungsleistung

A...Fläche des Körpers

T...Temperatur

$\sigma_B$ ...Stefan-Boltzmann-Konstante

mit der Stefan-Boltzmann-Konstante:

$$\sigma_B = \frac{2\pi^5 \cdot k_B^4}{15h^3 \cdot c^2} \approx 5,670374 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$$

mit h...Planck'sches Wirkungsquantum

c...Lichtgeschwindigkeit ( $c \approx 3 \times 10^8$  km/s)

$k_B$ ...Boltzmann-Konstante

Wie oben beschrieben ist  $L_{acc} \approx L$  (bei protostellaren Objekten). Der Protostern kann zudem als kugelförmig angenommen werden, was heißt:  $A = 4\pi R^2$ . Umgeformt lautet das Stefan-Boltzmann-Gesetz also:

$$L_{acc} \approx 4\pi \cdot R_*^2 \cdot \sigma_B \cdot T_{eff}^4$$

Stellt man nun auf  $T_{eff}$  um, erhält man <sup>65</sup>:

$$T_{eff} \approx \left( \frac{GM_* \cdot \dot{M}}{4\pi \cdot \sigma_B \cdot R_*^3} \right)^{\frac{1}{4}}$$

mit  $M_{Stern}$ ...Masse des Protosterns

$R_{Stern}$ ...Radius des Protosterns

Die Akkretionsgeschwindigkeit, mit der das Gas während der Gasaufnahme des Protosterns auf diesen fällt, kann etwa mit:

$$v_{ff} = \left( \frac{2G \cdot M_*}{R_*} \right)^{\frac{1}{2}}$$

beschrieben werden.

<sup>64</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Stefan-Boltzmann-Gesetz>

<sup>65</sup> <https://hera.ph1.uni-koeln.de/~ossk/star-formation/PMS.pdf> (S. 10)

Wenn diese die Schallgeschwindigkeit überschreitet, kommt es zum Akkretionsschock und die Gasdichte und Temperatur steigen plötzlich stark an.<sup>66</sup> Nach dem Akkretionsschock hat der Protostern im Inneren eine Temperatur von etwa  $10^6$  Kelvin erreicht, was noch nicht ganz für das Entzünden des Wasserstoffbrennens reicht.<sup>67</sup>

## (2) Vor-Hauptreihestern – Entwicklung zum HR-Stern

Nach dem zweiten dynamischen Kollaps befindet sich das ionisierte Gas (Plasma) wieder (mehr oder weniger) im hydrostatischen Gleichgewicht, der Stern ist also nicht mehr instabil. Die vierte Phase der Sternenentwicklung heißt daher zweite quasistatische Phase. Die „main accretion phase“ ist beendet, da den Protostern nur noch wenig diffuses Gas umhüllt. Diese Hülle aus Gas wird nun abgeblasen und damit ist gleichzeitig die finale Masse fast erreicht.<sup>68</sup>

Da das Gas im Protostern noch nicht dicht genug ist und das protostellare Objekt folglich noch eine relativ große Ausdehnung besitzt ( $R \gg R_\odot$ ), hat der Protostern eine hohe Leuchtkraft. Beziehen tut der Stern seine Energie deswegen aus der Gravitationsenergie (auch potentielle Energie genannt), welche durch Kelvin-Helmholtz-Kontraktion entsteht. Für die Gravitationsenergie gilt nach Newtons Gravitationsgesetz <sup>69</sup>:

$$E_{grav} \sim \frac{G \cdot M^2}{R}$$

Die Zeitdauer, die ein Stern ohne innere Energiequelle seine Strahlungsverluste allein durch die Gravitationsenergie decken kann, beschreibt die Kelvin-Helmholtz-Zeit.<sup>70</sup> Die Formel für die Kelvin-Helmholtz-Zeit ist:

$$t_{KH} = \frac{E_{grav}}{2L}$$

Setzt man nun  $E_{pot}$  in die Gleichung ein, so erhält man die endgültige Gleichung der Kelvin-Helmholtz-Zeit <sup>71</sup>:

$$t_{KH} = \frac{G \cdot M^2}{2RL}$$

<sup>66</sup> <https://www.mpa-garching.mpg.de/370224/hl201609>

<sup>67</sup> <https://hera.ph1.uni-koeln.de/~ossk/star-formation/PMS.pdf> (S. 12)

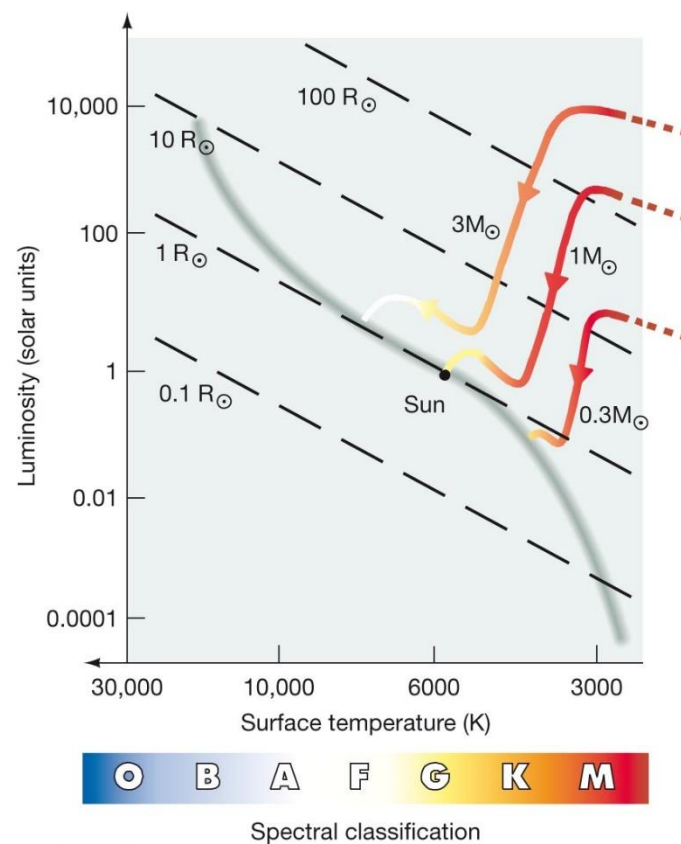
<sup>68</sup> <https://hera.ph1.uni-koeln.de/~ossk/star-formation/PMS.pdf> (S. 17)

<sup>69</sup> <https://www.astronomy.ohio-state.edu/pogge.1/Ast162/Intro/gravity.html#gravbind>

<sup>70</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S.269)

<sup>71</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S.269)

Die Kelvin-Helmholtz-Zeit beschreibt zudem die maximale Zeit, die ein Protostern dafür braucht, während der Kelvin-Helmholtz-Kontraktion auf dem Hertzsprung-Russell-Diagramm zur Hauptreihe zu gelangen. Während der Kelvin-Helmholtz-Kontraktion nutzt der Stern die Energie die bei der Kontraktion des Sterns entsteht. Dieser reicht jedoch nicht völlig für das hydrostatische Gleichgewicht aus, weswegen der Kern, und somit der gesamte Protostern schrumpfen. In Abbildung 17 sieht man den Beginn der Kelvin-Helmholtz-Kontraktion ab dem Punkt, an dem der Radius und die Leuchtkraft des Protosterns drastisch sinken. Mit einem steigenden Druck im Kern des Protosterns wächst auch die Temperatur in diesem.



© 2014 Pearson Education, Inc.

Abb. 17: Phase der Vor-Hauptreihensterne auf dem Hertzsprung-Russell-Diagramm.

Ab 15 Millionen Kelvin (Kerntemperatur) ist es im Inneren des Protosterns so heiß, dass die Wasserstoff-Atome anfangen, miteinander zu verschmelzen (siehe 2.3). Somit beginnt das Wasserstoffbrennen, was sehr viel Energie freisetzt. Dies ist auch an der ansteigenden Leuchtkraft in Abbildung 17 zu sehen. Da der Stern nun Wasserstoff in Helium fusioniert, also eine eigene Energiequelle besitzt, ist die Kelvin-Helmholtz-Kontraktion beendet.<sup>72</sup> Durch den

<sup>72</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 122-123)

damit verbundenen größeren Gas- und Strahlungsdruck im Stern, zieht sich dieser nicht weiter zusammen, sondern ist nun im Hydrostatischen Gleichgewicht.

Protosterne unter einer Masse von 0,08 Sonnenmassen erreichen die mindestens  $15 \times 10^6$  Kelvin nicht, die die Wasserstoffatome brauchen um zu fusionieren. Aus ihnen werden sogenannte Brauner Zwerge, die weiter schrumpfen und am Ende ihrer Kelvin-Helmholtz-Zeit erlöschen.

### 3.1.5 Berechnungen zu den Voraussetzungen der Sternentstehung

Gegeben ist eine Molekülwolke mit den physikalischen Eigenschaften:  $T = 10 \text{ K}$ ,  $\rho = 10^{-20} \text{ kg/m}^3$  und  $M_{\text{MW}} = 100 M_{\text{Sonne}}$ .

Mit der Formel für der Jeans-Masse berechnet man, ob die Molekülwolke die kritische Masse überschritten hat und kontrahieren kann:

$$M_{\text{Jeans}} = \sqrt{\frac{6}{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot \left( \frac{k_B \cdot T}{G \cdot m} \right)^3}$$

$\rho$ ...Dichte der Molekülwolke

$k_B$ ...Boltzmann-Konstante

$T$ ...Temperatur der Molekülwolke

$G$ ...Gravitationskonstante

$m$ ...mittlere Masse eines Gasmoleküls

mit der mittleren Masse eines Gasmoleküls ( $m$ ):

$$m = \mu \cdot m_p$$

$\mu$ ...mittlere molekulare Masse ( $\mu \approx 2,3$ )

$m_p$ ...Masse eines Protons

Daraus ergibt sich:

$$M_{\text{Jeans}} = \sqrt{\frac{6}{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot \left( \frac{k_B \cdot T}{G \cdot m} \right)^3}$$

$$M_{\text{Jeans}} = \sqrt{\frac{6}{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{1}{10^{-20} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} \cdot \left( \frac{1,3806 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1} \cdot 10 \text{ K}}{6,674 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2} \cdot 2,3 \cdot 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} \right)^3}$$

$$M_{\text{Jeans}} \approx 1,72 \cdot 10^{32} \text{ kg} \approx \underline{\underline{86,64 M_{\odot}}}$$

Verglichen mit der Voraussetzung, dass die Masse der Molekülwolke über der Jeans-Masse liegt:

$$M_{MW} \geq M_{Jeans}$$

$$\underline{\underline{100 M_{MW\odot} > 86,64 M_{Jeans\odot}}}$$

**Schlussfolgerung:** Masse der Molekülwolke liegt über der Jeans-Masse, was bedeutet, dass diese bis zum ersten dynamischen Kollaps kontrahieren wird.

Falls die Dichte nicht gegeben ist, kann man diese mit dem Radius und der Masse der Molekülwolke ausrechnen, um dann mit der erhaltenen Dichte die Jeans-Masse zu berechnen.

$$\rho = \frac{3M}{4\pi \cdot R^3}$$

Neben der Jeans-Masse kann man auch die Jeans-Länge als Bedingung aufstellen:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\pi c_s^2}{G\rho}}$$

mit der Schallgeschwindigkeit in einem idealen Gas:

$$c_s = \sqrt{\frac{k_B \cdot T}{\mu \cdot m_p}}$$

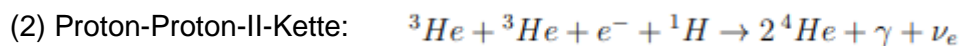
mit  $k_B$ ... Boltzmann-Konstante

## 3.2 Sternenentwicklung

Nach der Sternentstehung wandern alle Protosterne mit einer Masse größer als 0,08 Sonnenmassen auf die Hauptreihe des Hertzsprung-Russell-Diagramms, wo sie Wasserstoff in Helium fusionieren. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, brauchen massereiche Sterne dafür sehr viel weniger Zeit als massearme Sterne. Ebenfalls ausschlaggebend ist die Masse eines Sterns bei der Sternenentwicklung. Daher klassifiziert man Sterne auf der Hauptreihe in drei verschiedenen Kategorien der Masse: Sterne der Leichtgewichtsklasse ( $M \leq 2M_{\text{Sonne}}$ ), Sterne der Mittengewichtsklasse ( $2M_{\text{Sonne}} \leq M \leq 8M_{\text{Sonne}}$ ) und die Schwergewichte: Massereiche Sterne ( $M \geq 8M_{\text{Sonne}}$ ).

### 3.2.1 Sterne der Leichtgewichtsklasse

Wie bereits ausführlich in Kapitel 2.3 erläutert, fusioniert jeder Stern mit dem Entzünden der Fusionsprozesse auf der Hauptreihe Wasserstoff in Helium. Die sogenannte Proton-Proton-Kette besteht aus den drei Reaktionsketten und startet bei einer Temperatur von etwa  $15 \times 10^6$  K:



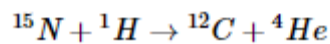
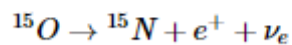
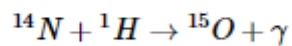
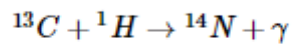
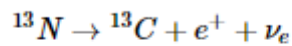
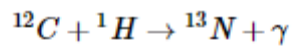
Letztere kommt jedoch so gut wie nicht vor.

Wenn ein Stern neben den sogenannten Grundsubstanzen (Wasserstoff und Helium) auch Spuren von Kohlenstoff und Sauerstoff aus seiner ehemaligen Molekülwolke erhalten hat, so kann er ab ca.  $10^7$  Kelvin den CNO-Zyklus starten (siehe Abb. 16).<sup>73</sup> In selbigem fusionieren vier Protonen in einer zyklischen Reaktionskette mit Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und

---

<sup>73</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 137)

Sauerstoff (O) als Katalysator.<sup>74</sup> Daher auch der Name: CNO-Zyklus (für eine nähere Erläuterung siehe Kapitel 2.3). Die Teil-Reaktionen des CNO-Zyklus sind wie folgt:



Ein Stern hat also zwei Möglichkeiten, Wasserstoff in Helium zu fusionieren und dabei Energie zu gewinnen: p-p-Kette und CNO-Zyklus. Entscheidend dafür, welche Form der Fusion in einem Stern überwiegt, wird durch die Kerntemperatur von diesem entschieden. Denn: ab ca.  $17 \times 10^6$  Kelvin ist der CNO-Zyklus sehr viel effektiver im Erzeugen (bzw. Umwandeln) von Energie als die p-p-Kette (siehe Abb. 18).<sup>75</sup>

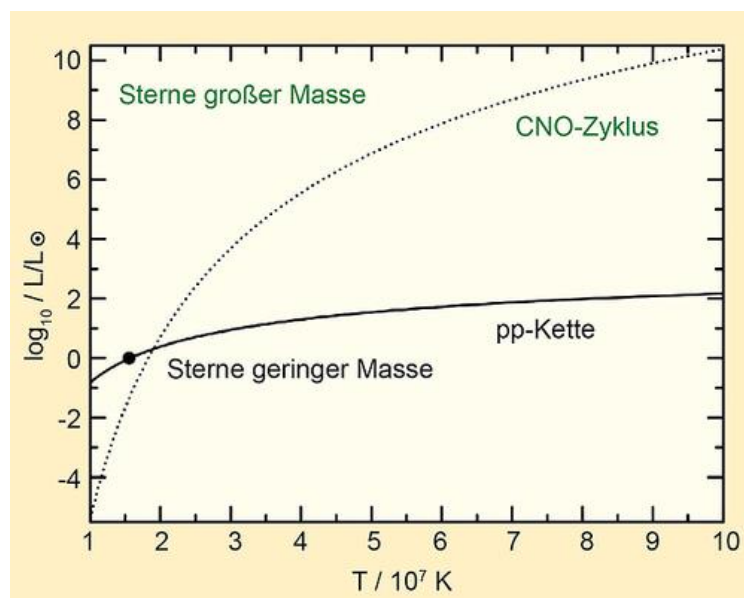


Abb. 18: Energieerzeugung (Leuchtkraft) der p-p-Kette und des CNO-Zyklus in Abhängigkeit zur Kerntemperatur des Sterns. Der schwarze Punkt symbolisiert die Sonne.

<sup>74</sup> <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/piuz.202001599>

<sup>75</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 138-140)

Ich habe bereits erschlossen, dass ein Stern auf der Hauptreihe mit einer höheren Temperatur gleichzeitig massereicher ist. Daraus geht einher, dass massearme Sterne (wie die Sonne) hauptsächlich Wasserstoff in Helium durch die p-p-Kette fusionieren und massereichere Sterne mit einer höheren Temperatur den für sie viel effektiveren CNO-Zyklus bevorzugen.

Aus dem Diagramm geht außerdem hervor: Je massereicher ein Stern ist, desto mehr Fusion kann er in einer bestimmten Zeit betreiben. Dies erklärt, warum massearme Sterne sehr viel länger leben als massereiche Sterne.

Herleitung der Zeit, welche ein Stern auf der Hauptreihe verweilt <sup>76</sup>:

$$t_{\text{Stern}} \sim \frac{M_{\text{Stern}}}{L}$$

Mit der Masse-Leuchtkraft-Beziehung:

$$L \sim M^{3,5}$$

erhält man:

$$t_{\text{Stern}} \sim \frac{1}{M_{\text{Stern}}^{2,5}}$$

Geteilt durch  $t_{\text{Sonne}}$  erhält man die Zeit, welche ein Stern auf der Hauptreihe verweilt:

$$t_{\text{Stern}} = t_{\text{Sonne}} \cdot \left( \frac{M_{\text{Sonne}}}{M_{\text{Stern}}} \right)^{2,5}$$

mit  $t_{\text{Sonne}} \approx 7,7 \times 10^9 \text{ y}$

„Da Sterne circa 90 Prozent ihres Lebens auf der Hauptreihe zubringen, bezeichnet man diese Zeit salopp auch als [Entwicklungszeit der Sterne].“ <sup>77</sup>

Beispielrechnung: Gegeben ist ein Stern mit einer Masse von 1,5 Sonnenmassen.

$$t_{\text{Stern}} = 7,7 \cdot 10^9 \text{ y} \left( \frac{1 M_{\odot}}{1,5 M_{\odot}} \right)^{2,5}$$

$$\underline{\underline{t_{\text{Stern}} \approx 2,79 \cdot 10^9 \text{ y}}}$$

---

<sup>76</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 270)

<sup>77</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 140-141)



Ein Stern mit einer Masse, die 50 Prozent größer ist als die Masse der Sonne, lebt nur 0,36-mal so lang auf der Hauptreihe wie die Sonne.

Neben der Masse-Leuchtkraft-Beziehung gibt es auch die Masse-Radius-Beziehung und die Masse-Temperatur-Beziehung <sup>78</sup>:

$$R \sim M^{0,6}$$

$$T_{eff}^4 \sim M^{2,3}$$

Doch was passiert, wenn der Stern an sein Lebensende kommt, also seinen Wasserstoffvorrat im Kern völlig ausgeschöpft ist und in Helium fusioniert wurde?

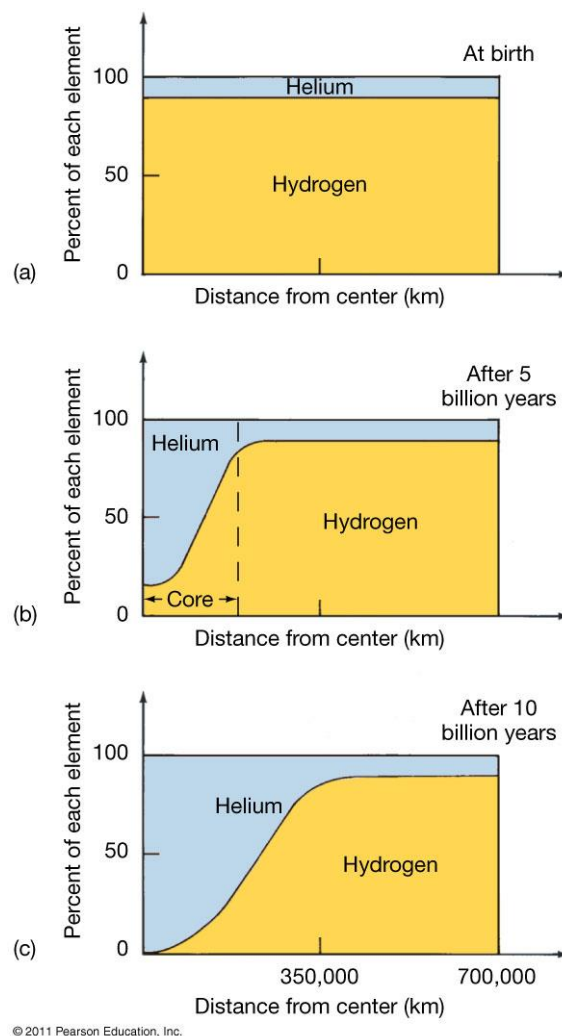


Abb. 19: Entwicklung der Verteilung von Wasserstoff und Helium im Stern und spezifisch im Kern.

<sup>78</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 265)

Angelangt an Phase (c) in Abbildung 19, besteht der Kern nur noch aus Helium, welches nicht weiter fusioniert, also keine Energie freisetzt. Wie in Abbildung 20 zu sehen ist, hat sich um den Helium-Kern eine „Schale“ gebildet, in der die Temperatur hoch genug ist, dass Wasserstoff zu Helium fusionieren kann. Dies reicht jedoch nicht aus, um das Hydrostatische Gleichgewicht aufrecht zu erhalten. Im Gegensatz: der Gravitationsdruck wird immer größer, da der Helium-Kern durch das Wasserstoff-Schalenbrennen immer weiter anwächst, also seine Masse steigt. Der Stern greift also, wie bei der Kelvin-Helmholtz-Kontraktion, auf seine potentielle Energie zurück, um das Energiedefizit auszugleichen und schrumpft dabei. Dadurch steigen der Druck und somit die Temperatur im Kern des Sterns an. Wie in Abbildung 18 gezeigt wird, steigt mit der Temperatur auch die Fusionsrate, was wiederum mehr Energie freisetzt und die Kerntemperatur des Sterns noch weiter anwächst.<sup>79</sup>

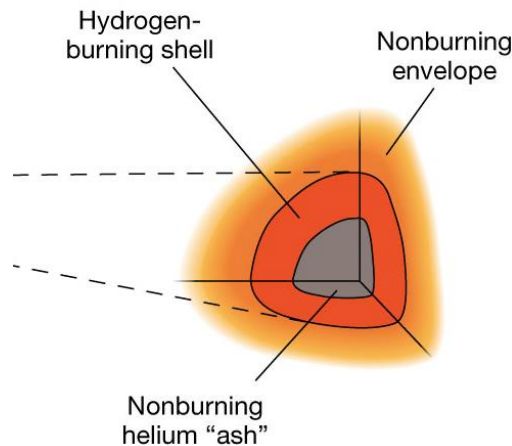


Abb. 20: Wasserstoff-Schalenbrennen zwischen Plasma und dem Helium-Kern, welcher noch keine Fusion betreibt.

Folge der höheren Fusionsrate, welche in eine Leuchtkraft des Sterns resultiert, die etwa zehnmal größer ist als die auf der Hauptreihe, ist ein „Aufblähen“ des Sterns. Grund dafür sind der Strahlungsdruck und der thermische Druck (Gasdruck), die der eigenen Schwerkraft des Sterns überwiegen. Wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben, hat dies eine „ausbreitende Wirkung“ auf den Stern. Durch den größeren Radius gelangt jedoch weniger Hitze an die Oberfläche des Sterns (die Photosphäre) und die Oberflächentemperatur sinkt auf etwa 4000 Kelvin.<sup>80</sup> Folglich

<sup>79</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 145-149)

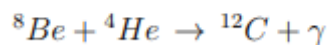
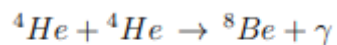
<sup>80</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 149)

wandert der Stern auf dem Hertzsprung-Russel-Diagramm, wie in Abbildung 21 zu sehen ist, nach rechts. Der Stern wird nun als Roter Unterriese (eng.: "subgiant") bezeichnet.

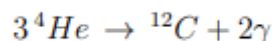
Für einen Stern mit der Masse unserer Sonne dauert der Weg vom Hauptreihenstern zum Stadium des Roten Unterriesen ungefähr 100 Millionen Jahre. Bezogen auf das Zeitverständnis eines Menschen, ist diese Zeitspanne unvorstellbar lang. Für einen Stern, der bereits mehrere Millionen bis 100 Millionen Jahre brauchte um zur Hauptreihe zu gelangen, und dort weitere 7,7 Milliarden Jahre verweilte, ist dies nur ein kurzer Lebensabschnitt.

Der nächste Lebensabschnitt im Leben eines Sterns der Leichtgewichtsklasse ist das Stadium des Roten Riesens, welches etwa die gleiche Zeitspanne wie das Stadium des Roten Unterriesen umfasst. Als Roter Riese wächst der Radius des Sterns weiter rapide an, da die Temperaturen und somit die Fusionsrate im Wasserstoff-Schalenbrennen weiter anwachsen. Grund dafür ist der Helium-Kern des Sterns der weiterhin schrumpft, da dieser seinem Gravitationsdruck weiterhin nicht standhalten kann.

Bei einer Kerntemperatur von ca.  $10^8$  Kelvin startet das Helium im Kern zu fusionieren. Sterne unter einer Masse von 0,6 Sonnenmassen können diese Kerntemperatur nicht erreichen und werden als Rote Zwerge.<sup>81</sup> Die beiden Teil-Reaktionen für das fusionieren von drei Helium-4 Kernen ist wie folgt:



Die Reaktionsgleichung für den sogenannten Triple-Alpha-Prozess ist dementsprechend:



Im Kern der Sonne beginnt also das Heliumbrennen, welches den Kern des Sterns noch weiter aufheizt und die Fusionsrate des Heliums im Kern enorm ansteigen lässt. Da der thermische Druck sowie der Strahlungsdruck der Helium-Fusion dem Gravitationsdruck sowie dem Fermi-Druck jedoch weiter unterlegen ist, kann der Kern nicht expandieren. Folglich fusioniert das Helium im Kern in einer immer höheren Rate, bis  $p_{\text{Gas}}$  und  $p_{\text{rad}}$  überwiegen und der Kern des Sterns sich schlagartig ausdehnt. Dadurch kommt es zu einem Heliumblitz: einer Explosion im inneren des Sterns, welche eine enorme Energie in die äußeren Schichten freisetzt.<sup>82 83</sup>

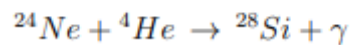
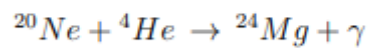
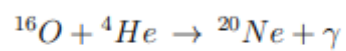
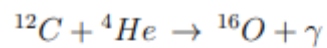
---

<sup>81</sup> [https://www.physik.uni-hamburg.de/en/hs/group-banerjee/\\_documents/teaching/ss-16-astro/astro-einf-2-sose16-02.pdf](https://www.physik.uni-hamburg.de/en/hs/group-banerjee/_documents/teaching/ss-16-astro/astro-einf-2-sose16-02.pdf) (S.2)

<sup>82</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 153-155)

<sup>83</sup> <https://pages.uoregon.edu/jimbrau/astr122/Notes/Chapter20.html>

Durch die freigesetzte Energie und die rapide Ausdehnung des Kerns, kühlt sich dieser ab und die Fusionsrate des Heliums sinkt als Folge. Der enorme Rote Riese, der bis zum Heliumblitz auf einen Radius von etwa 100 Sonnenradien gewachsen ist, schrumpft nun auf ein Zehntel seines Durchmessers und kann so das Heliumbrennen aufrechterhalten.<sup>84</sup> Auf dem Hertzsprung-Russel-Diagramm wandert Sterne der Leichtgewichtsklasse nach ihrem Riesenstadium zu einem Bereich, der Horizontalast heißt (siehe Abb. 21). Dort betreiben diese ihr Heliumbrennen. Neben dem Triple-Alpha-Prozess gibt es im Heliumbrennen eine Folgereaktion, durch die schwerere Elemente entstehen:



Ab ca.  $2 \times 10^8$  K ist die Temperatur, ab welcher die Folgereaktion möglich wird, erreicht.<sup>85</sup>

---

<sup>84</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 156)

<sup>85</sup> <https://pages.uoregon.edu/jimbrau/astr122/Notes/Chapter20.html>

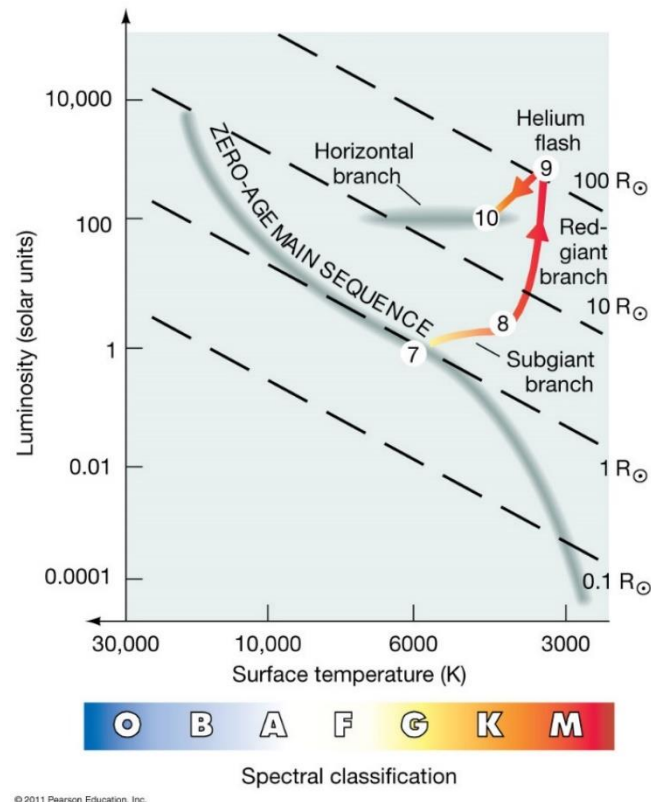


Abb. 21: Entwicklung des früheren Hauptreihensterns auf dem Hertzsprung-Russell-Diagramm. Die Abgebildeten Schritte sind: 7: Hauptreihenstern; 7-8: Roter Unterriese; 8-9: Roter Riese; 9: Heliumblitz; 10: Horizontalast.

Wie bereits durch Abbildung 18 erläutert, steigt die Fusionsrate mit einem Anstieg der Kerntemperatur im Stern. Dadurch wird zwar mehr Energie freigesetzt, der Stern verbraucht jedoch seinen „Brennstoffvorrat“ an Wasserstoff bzw. Helium schneller. Das Heliumbrennen dauert für einen Stern der Leichtgewichtsklasse deswegen nur einige Hundertmillionen Jahre (ja nach Masse des Sterns mehr oder weniger).

Durch die obige Folgereaktion entstehen vor allem Kohlenstoff und Sauerstoff, welche nun einen wachsenden Anteil des Kerns bilden. Wenn das Helium im Kern aufgebraucht ist, erlischt die Fusion im Kern, welcher nun hauptsächlich aus Kohlenstoff und Sauerstoff besteht, zum zweiten Mal.<sup>86</sup> Wie am Ende des Wasserstoffbrennens sich ein Wasserstoff-Schalenbrennen um den Heliumkern bildet, bildet sich am Ende des Heliumbrennens eine Brennschale um den C/O-Kern. Der Aufbau des Sterns ist nun der folgende (siehe Abb. 22).

<sup>86</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 156-158)

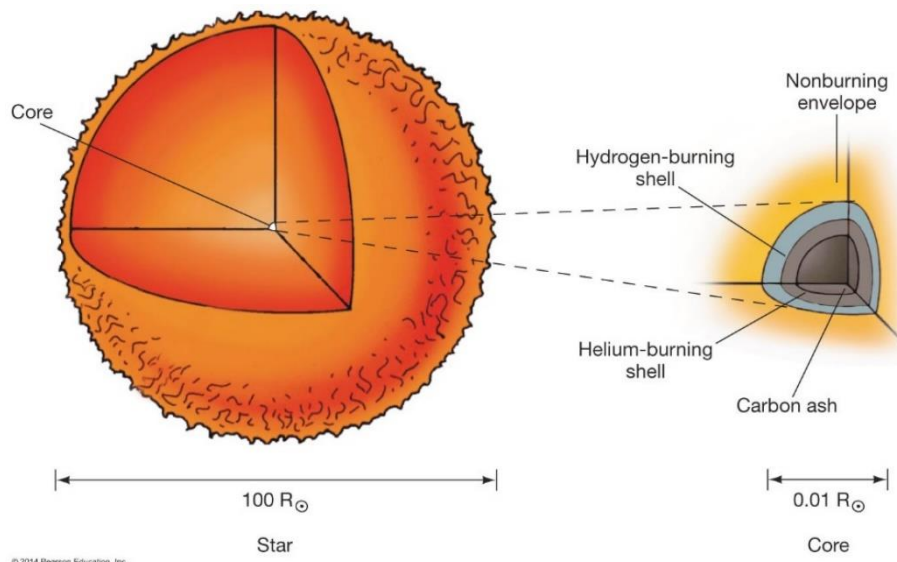


Abb. 22: Das Zweischalenbrennen am Ende des Heliumbrennens.

Unter den äußeren Schichten befindet sich das Wasserstoff-Schalenbrennen, welches durch die p-p-Kette und den CNO-Zyklus das nötige Helium für das Helium-Schalenbrennen fusioniert. Im Helium-Schalenbrennen, wiederum, wird durch den Triple-Alpha-Prozess und die Folgereaktion vor allem Kohlenstoff, aber auch Sauerstoff, Neon, Magnesium und Silizium gebildet, welche sich im Kern des Sterns ansammeln, jedoch nicht weiter fusionieren.<sup>87</sup>

Wichtig für später ist jedoch: die beiden Brennschalen sind nicht gleichzeitig aktiv, sondern wechseln sich ab. Durch das abwechselnde Zünden und Abklingen der jeweiligen Brennstufe kommt es zu sogenannten thermischen Pulsen, die alle  $10^4$  bis  $10^5$  Jahre erfolgen.<sup>88</sup>

Was mit dem Stern vor dem Heliumblitz passiert ist, passiert jetzt auf einer größeren Skala. Da der Kern des Sterns als Energiequelle wegfällt, schrumpft der Kern des Sterns, da der Gravitationsdruck dem thermischen Druck sowie dem Strahlungsdruck überwiegt. Dadurch erhöhen sich Druck, Temperatur und Dichte im Kern und die Fusionsrate des Zweischalenbrennens steigt als Folge. Dementsprechend wird mehr Energie freigesetzt, also die Leuchtkraft nimmt zu und der Stern bläht sich zum zweiten Mal auf.<sup>89</sup>

Auf dem Hertzsprung-Russell-Diagramm kann man sehen, wie sich der Stern auf dem Asymptotischen Riesenast nach oben bewegt, der Radius des Sterns also auf weit mehr als 100 Sonnenradien wächst (siehe Abb. 24, 10-11). Der Stern ist nun im Überriesenstadium.

<sup>87</sup> <https://pages.uoregon.edu/jimbrau/astr122/Notes/Chapter20.html>

<sup>88</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 162)

<sup>89</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 158)

Der wachsende Radius und der gleichzeitig kontrahierende Kern werden jedoch problematisch für den Überriesen. Da der Stern nicht genug Masse besitzt, um den benötigten Druck und die benötigte Temperatur im Kern zu erreichen, kann der Kohlenstoff nicht fusionieren. Das Kohlenstoffbrennen kann den Stern also nicht vor einem weiteren schrumpfen seines Kerns retten. Folglich wird die Anziehungskraft zwischen den äußeren Schichten und dem Zentrum des Sterns immer kleiner, da diese mit dem Quadrat des Abstandes abnimmt. Am Ende des Überriesenstadiums sind die äußeren Schichten des Sterns deswegen nicht mehr fest an sein Zentrum gebunden.<sup>90</sup>

Nun reicht eine kleine Instabilität aus dem inneren des Sterns aus, z.B. ein thermischer Puls, ausgelöst durch das Zünden des Wasserstoff-Schalenbrennens oder des Helium-Schalenbrennens, um die äußeren Schalen des Sterns, bestehend aus Wasserstoff und Helium, wegzuschleudern.<sup>91</sup>

Der Stern verliert so 25 bis 60 Prozent seiner Masse an sein Umfeld. „Die abgestoßene Gashölle bildet zunächst einen nahezu unsichtbaren Kokon um den [...] Kern und seine zwei Brennschalen.“<sup>92</sup> Das Zweischalensbrennen um den C/O-Kern läuft jedoch weiter und speist diesen weiter mit Kohlenstoff. Das emittierte Licht des Sternrests (hauptsächlich im ultravioletten Spektrum) beleuchtet die abgestoßene Gashölle, welche sich über eine Lebensdauer von etwa 50.000 Jahren weiter ausbreitet.<sup>93</sup> Ein Beispiel für einen sogenannten Planetarischen Nebel kann man in Abbildung 23 erkennen.

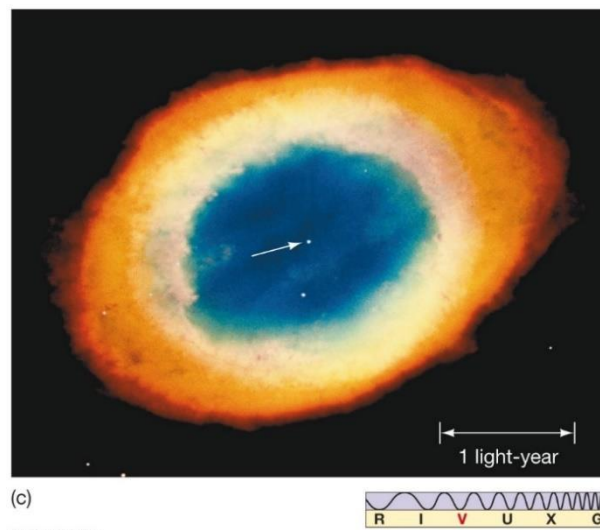


Abb. 23: Ringnebel (Messier 57) im Sternbild Leier.

<sup>90</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 160-161)

<sup>91</sup> [https://www.mpifr-bonn.mpg.de/188614/finn\\_jaekel.pdf](https://www.mpifr-bonn.mpg.de/188614/finn_jaekel.pdf)

<sup>92</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 162-163)

<sup>93</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 163)

Der übrig gebliebene Sternrest aus den Schalenbrennen von Wasserstoff und Helium sowie der aus Kohlenstoff und Sauerstoff bestehende Kern lebt noch so lange, bis das Wasserstoff-Schalenbrennen und schließlich das Helium-Schalenbrennen aufhören, da sie ihren gesamten Vorrat an „Brennstoff“ verbraucht haben. Was übrig bleibt, ist ein sehr dichter ( $10^6 \text{ g/cm}^3$ ), kleiner Weißer Zwerg, der keine Energiequelle besitzt und deshalb über mehrere Milliarden Jahre auskühlt und schließlich im Stadium des Schwarzen Zwergs verendet.<sup>94</sup>

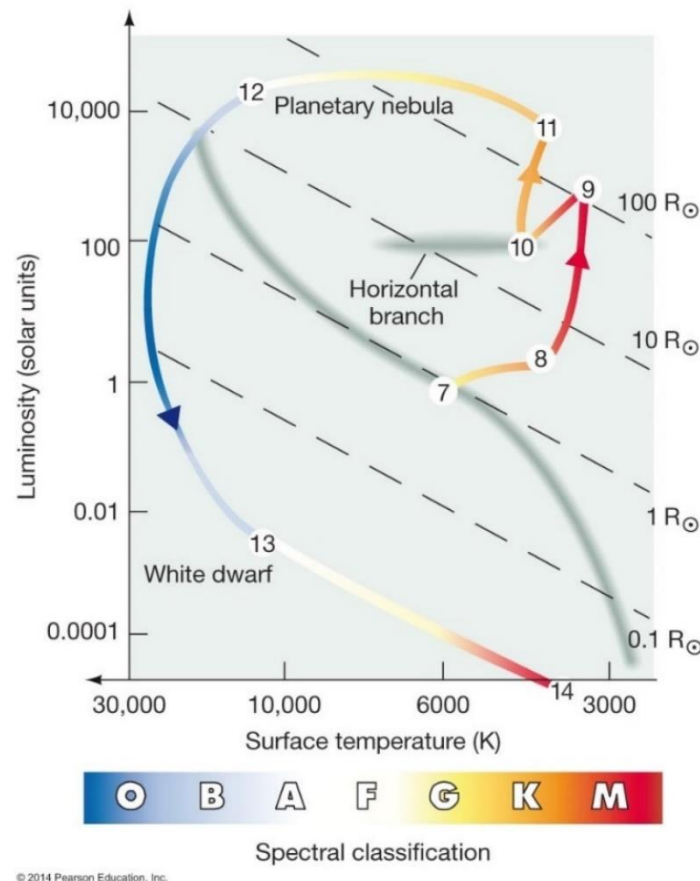


Abb. 24: Sternenentwicklung von Sternen der Leichtgewichtsklasse.

<sup>94</sup> <https://pages.uoregon.edu/jimbrau/astr122/Notes/Chapter20.html>



### 3.2.2 Sterne der Mittelgewichtsklasse

Die Entwicklung von Sternen der Mittelgewichtsklasse ist relativ ähnlich zu der Entwicklung von Sternen der Leichtgewichtsklasse. Einer der größeren Unterschiede ist dabei der zeitliche Rahmen, in dem sich die Sterne der Mittelgewichtsklasse entwickeln und schließlich verenden.

Auf der Hauptreihe fusionieren Sterne der Mittelgewichtsklasse ebenfalls Wasserstoff in Helium (Wasserstoffbrennen). Da Sterne mit einer größeren Masse höhere Temperaturen erreichen, überwiegt bei Sternen der Mittelgewichtsklasse der CNO-Zyklus, der ab einer Temperatur von  $17 \times 10^6$  Kelvin größere Mengen an Energie freisetzt, als die p-p-Kette (siehe Abb. 18).<sup>95</sup>

Die größere Fusionsrate bedeutet jedoch auch, dass die Verweildauer auf der Hauptreihe deutlich kürzer ist, da der Wasserstoff im Kern des Sterns schneller verbraucht ist. Wenn man die Formel für die Berechnung der Verweildauer eines Sterns auf der Hauptreihe aus Kapitel 3.2.1 für einen Stern der Mittelgewichtsklasse anwendet ( $M = 6$  Sonnenmassen), so erhält man:

$$t_{\text{Stern}} = 7,7 \cdot 10^9 y \left( \frac{1M_{\odot}}{6M_{\odot}} \right)^{2,5}$$
$$\underline{\underline{t_{\text{Stern}} \approx 87,3 \cdot 10^6 y}}$$

Wie bei den Sternen der Leichtgewichtsklasse besteht der Kern des Sterns nun aus Helium, welches noch nicht fusioniert. Der Kern kontrahiert folglich, da in ihm der Gravitationsdruck den beiden entgegengesetzt wirkenden Drucke (thermischen Druck und Strahlungsdruck) überwiegt. Beim Schrumpfen setzt der Kern potentielle Energie (Gravitationsenergie) frei und um den Helium-Kern wird es heiß genug für das Wasserstoff-Schalenbrennen. Durch die vergrößerte Leuchtkraft wächst der Radius des Sterns deutlich an.

Die Entwicklung zum Roten Riesen dauert bei Sternen der Mittelgewichtsklasse nur mehrere Millionen Jahre (und nicht mehrere Hundert Millionen Jahre, wie bei massearmen Sternen).<sup>96</sup>

Erreicht der Kern nun eine Temperatur von  $10^8$  Kelvin, dann zündet das Heliumbrennen im Kern des Sterns. Den Prozess des Heliumblitzes übergehen Sterne der Mittelgewichtsklasse

---

<sup>95</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 138-140)

<sup>96</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 165-166)

ab 2,5 Sonnenmassen, da, wie bereits erklärt, in massereichen Sternen eine höhere Kerntemperatur herrscht.<sup>97</sup>

Wenn das Helium im Kern verbraucht ist und dieser aus Kohlenstoff und Sauerstoff besteht, startet der gleiche Prozess, der am Ende des Wasserstoffbrennens eintritt. Der Kern kann kein Helium fusionieren, weil es dafür nicht heiß genug ist. Da er keinen Strahlungsdruck besitzt, überwiegt die Schwerkraft und folglich kontrahiert der Kern. Dadurch wird es in den äußeren Hüllen um den Kern wärmer und das Zweischaalenbrennen setzt ein (siehe Abb. 22). Dadurch kommt es wie in Kapitel 3.2.1 erklärt zu den thermischen Pulsen, bei denen der Stern Teile seiner äußeren Schichten von sich wegschleudert.<sup>98</sup> In dieser Zeit ist der Stern pulsationsinstabil und wird als Cepheide bezeichnet.

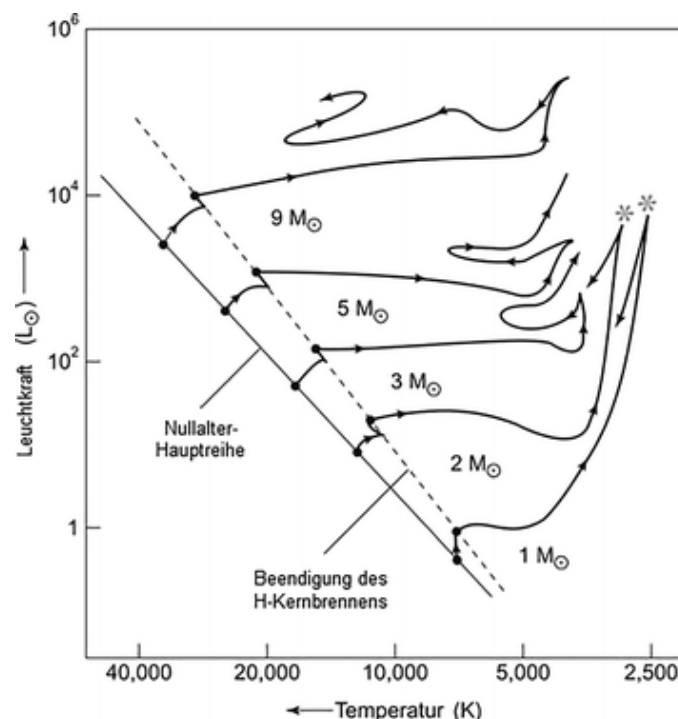


Abb. 25: Sternentwicklung von Sternen der Leichtgewichtsklasse ( $1M$ ,  $2M$ ), Sternen der Mittelgewichtsklasse ( $3M$ ,  $5M$ ) und Massereichen Sternen ( $9M$ ).

Sterne der Mittelgewichtsklasse enden, wie Sterne der Leichtgewichtsklasse, nach ihrer Pulsationsphase als Weiße Zwerge umhüllt von einem Planetarischen Nebel, bestehend aus den äußeren Schichten des früheren Sterns.<sup>99</sup>

<sup>97</sup> <https://pages.uoregon.edu/jimbrau/astr122/Notes/Chapter20.html#evol-mass>

<sup>98</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 167-168)

<sup>99</sup> <https://pages.uoregon.edu/jimbrau/astr122/Notes/Chapter20.html#evol-mass>

Es gibt jedoch ein naturgegebenes Masselimit für Weiße Zwerge, über welchem diese instabil werden. Das Masselimit heißt Chandrasekhar Limit und ist bei 1,44 Sonnenmassen.<sup>100 101</sup>

Wird das Chandrasekhar Limit von einem Weißen Zwerg überschritten, so kann der Fermi-Druck dem Gravitationsdruck nicht länger standhalten und der Weiße Zwerg explodiert in einer Supernova vom Typ 1a. Dadurch entsteht ein Neutronenstern (mehr dazu in Kapitel 3.2.3).<sup>102</sup>

### 3.2.3 Massereiche Sterne

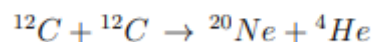
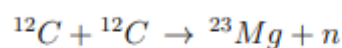
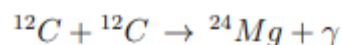
Ein massereicher Stern geht den Weg des Wasserstoffbrennens auf der Hauptreihe und das Heliumbrennen in einer noch kürzeren Zeit als ein Stern der Mittelgewichtsklasse.

Für einen Stern mit 20 Sonnenmassen ist die Verweilzeit auf der Hauptreihe nur rund 4,3 Millionen Jahre:

$$t_{\text{Stern}} = 7,7 \cdot 10^9 y \left( \frac{1M_{\odot}}{20M_{\odot}} \right)^{2,5}$$

$$\underline{\underline{t_{\text{Stern}} \approx 4,3 \cdot 10^6 y}}$$

Sterne über 8 Sonnenmassen können die Temperaturen in ihrem Kern erzeugen, die dafür nötig sind, um nach dem Helium- und Kohlenstoffbrennen die weiteren Brennphasen zu entzünden. Das Kohlenstoffbrennen beginnt ab einer Kerntemperatur von  $6 \times 10^8$  K. Dabei können zwei Kohlenstoffkerne zu verschiedenen Reaktionsprodukten fusionieren:

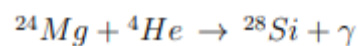
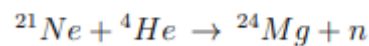
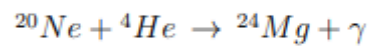
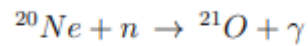
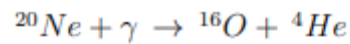


<sup>100</sup> S.372: <https://studylibde.com/doc/6763270/komplettausgabe-inkl.-index---der-kosmos-bote>

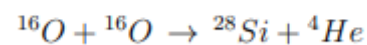
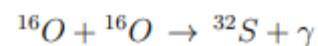
<sup>101</sup> S. 2: <https://www.physik.uni-hamburg.de/en/hs/group-banerjee/documents/teaching/ss-16-astro/astro-einf-2-sose16-02.pdf>

<sup>102</sup> [https://www.mpifr-bonn.mpg.de/188614/finn\\_jaekel.pdf](https://www.mpifr-bonn.mpg.de/188614/finn_jaekel.pdf)

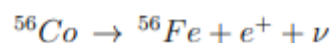
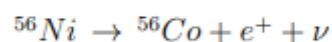
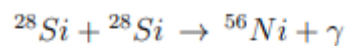
Wenn im Kern nun alle Kohlenstoffatome zu Sauerstoff und anderen schwereren Elementen fusioniert sind, beginnt der Prozess der Kontraktion des Kerns erneut, bis die Temperatur für das Neonbrennen erreicht ist ( $1,2 \times 10^9$  K).<sup>103</sup> Neon fusioniert zu:



Nach der Kontraktion des Sauerstoff-Kerns, kommt als nächste Brennphase das Sauerstoffbrennen ab einer Kerntemperatur von etwa  $1,8 \times 10^9$  Kelvin<sup>104</sup>:



Nach dem Sauerstoffbrennen kontrahiert der Kern des Sterns bis zu einer Temperatur von  $5 \times 10^9$  Kelvin, ab der die letzte Brennphase, das Siliziumbrennen, einsetzt.<sup>105</sup> Dabei fusionieren zwei Siliziumkerne zu einem Nickel ( $^{56}\text{Ni}$ ) und Gammastrahlen. Der Nickelkern zerfällt jedoch nach einer kurzen Zeit, da er instabil ist, zu einem Cobalt ( $^{56}\text{Co}$ ), einem Positron und einem Neutrino. Der Cobaltkern ist ebenfalls instabil und zerfällt schließlich zu einem Eisenkern ( $^{56}\text{Fe}$ ), einem Positron und einem Neutrino.




---

<sup>103</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 177)

<sup>104</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 177)

<sup>105</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 177)

Die Brennphasen vom Wasserstoffbrennen bis zum Siliziumbrennen haben eine immer kürzere Dauer. So braucht das Kohlenstoffbrennen in massereichen Sternen wenige Hundert Jahre, das Neonbrennen nur wenige Jahre und das Sauerstoffbrennen nur wenige Monate.<sup>106</sup> Bei dem Siliziumbrennen ist die Fusionsrate so hoch, dass der Stern den Vorrat an Silizium bereits nach wenigen Stunden bis Tagen erschöpft hat.<sup>107</sup>

Zudem wird in jeder dazu kommenden Brennphase weniger Energie freigesetzt. Der Eisen-Nickel-Kern, welcher sich beim Siliziumbrennen im Kern des Sterns bildet, kann nicht weiter fusionieren. Grund dafür ist das Energiedefizit, welches bei der Fusion von Eisen bzw. Nickel entstehen würde, da der Stern mehr Energie für die Fusion aufbringen müsste, als er aus ihr gewinnt (siehe Abb. 26).

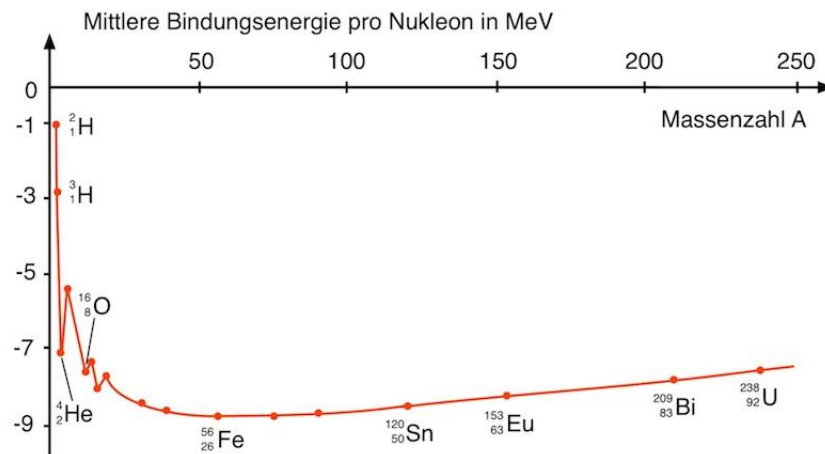


Abb. 26: Mittlere Bindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit von der Massenzahl.

Aus dem Diagramm geht hervor, dass die Fusion von leichten Elementen bis zur Fusion von Eisenkernen (Fe) Energie freigesetzt wird. Zudem kann durch die Kernspaltung von sehr schweren Elementen, z.B. Uran ( $^{238}\text{U}$ ), Energie freigesetzt werden – was jedoch ein anderes Thema ist.<sup>108</sup>

<sup>106</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 177)

<sup>107</sup> <https://wissenstexte.de/physik/sterne.htm>

<sup>108</sup> <https://physikunterricht-online.de/jahrgang-12/aufbau-und-energie-der-kerne/>

Am Ende des Siliziumbrennens angekommen, sieht der Aufbau des Kerns nun so aus, wie in Abbildung 27 zu sehen ist. Die einzelnen Schalenbrennphasen des Sterns sind jetzt in einer Schalenstruktur angeordnet. Vergleichbar ist der Aufbau mit der Ring-Struktur einer Zwiebel.

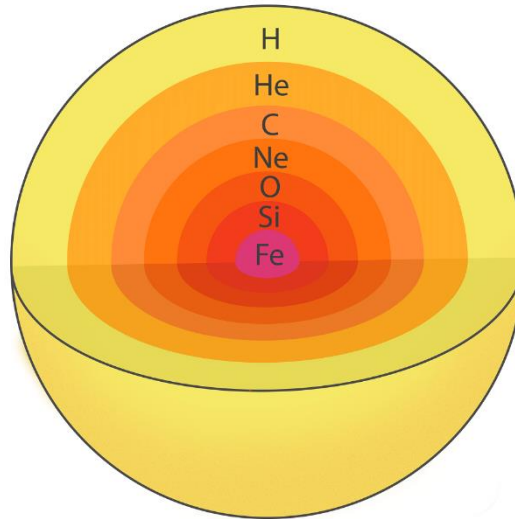


Abb. 27: Das Schalenbrennen eines massereichen Sterns am Ende seines Lebens.

Ist das restliche Silizium im Eisen-Nickel-Kern des massereichen Sterns ausgeschöpft, fällt die Leuchtkraft im Zentrum des Sterns rapide ab und der Kern kontrahiert ein letztes Mal. Der Gravitationsdruck ist im inneren des Sterns nun so groß, dass nicht mal der Fermi-Druck der freien, nun stark komprimierten, Elektronen diesem entgegenwirken kann. Folglich verschmelzen die Elektronen aufgrund es enormen Drucks mit den Protonen im ionisierten Gas (Plasma) zu Neutronen. In der Physik wird dieser Prozess als inverser  $\beta$ -Zerfall bezeichnet. Neben dem Neutron entsteht beim inversen  $\beta$ -Zerfall zudem ein Neutrino. Diese reagieren so gut wie gar nicht mit der Materie des Sterns und verlassen so relativ ungehindert diesen. Der Stern verliert so noch mehr Energie, sodass der superdichte, hauptsächlich aus Neutronen bestehende Kern nun noch weiter abkühlt und folglich schrumpft.<sup>109</sup>

<sup>109</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 180-181)

Da das Pauli-Prinzip dies verhindert, kollabiert der Kern in einem Gravitationskollaps unter seiner eigenen Schwerkraft. Die äußeren Schichten stürzen nun Richtung Zentrum und prallen auf den Neutronen-Kern. Die dadurch entstandene Druckwelle schleudert die Hüllen um den Kern mit einer Geschwindigkeit von 10.000 Kilometern pro Stunde (rund 3,3 Prozent der Lichtgeschwindigkeit) explosionsartig in das umliegende interstellare Medium.<sup>110</sup> Das Phänomen wird als Supernova vom Typ II bezeichnet. Die Energie, welche die Supernova freisetzt, beträgt rund  $10^{43}$  Kilojoule. Somit leuchtet die Supernova für eine kurze Zeit so hell wie eine ganze Galaxie (siehe Abb. 28).<sup>111</sup>



Abb. 28: Supernova 1994D (links unten) am Rand der Galaxie NGC 4526.

Doch was passiert nun mit dem Neutronen-Kern des ehemaligen Sterns?

Wieder einmal hängt das von der Masse des Kerns ab. Bis 3,2 Sonnenmassen verschmelzen die Elektronen weiter mit den Protonen (inverser  $\beta$ -Zerfall), bis alle Protonen und Elektronen in Neutronen umgewandelt sind. So entsteht ein Neutronenstern, welcher extrem klein ist ( $R \approx 10$  km), jedoch den Drehimpuls des ehemaligen, viel größeren Sterns übernimmt.<sup>112</sup> So können sich Neutronensterne bis zu 1.000 Mal pro Sekunde um die eigene Achse rotieren.<sup>113</sup>

<sup>110</sup> [http://www.joern-lenhardt.de/benny/art\\_sternende.html](http://www.joern-lenhardt.de/benny/art_sternende.html)

<sup>111</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 181-183)

<sup>112</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 187-189)

<sup>113</sup> [https://www.mpifr-bonn.mpg.de/188614/finn\\_jaekel.pdf](https://www.mpifr-bonn.mpg.de/188614/finn_jaekel.pdf)

Zudem besitzen Neutronensterne ein Magnetfeld von bis zu 10.000.000 Tesla und ist so dicht, dass sie durch ihre Gravitation die Raum-Zeit krümmen.<sup>114</sup>

Wenn die Masse des Kerns die Grenze von 3,2 Sonnenmassen überschreitet, kollabiert der Neutronen-Kern ein zweites Mal unter seiner eigenen Schwerkraft. Was nach dem Kollaps Entsteht, wird als Schwarzes Loch bezeichnet.

### 3.2.4 Berechnungen zur Sternenentwicklung eines Beispielsterns

Mit der Masse-Leuchtkraft-Beziehung lässt sich die Masse des Sterns durch seine Leuchtkraft errechnen:

$$L \sim M^{3,5}$$

Gegeben ist eine Leuchtkraft, die 160 Mal so groß ist, wie die der Sonne.

$$M = \sqrt[3,5]{160}$$

$$\underline{\underline{M \approx 4,26 M_{\odot}}}$$

Durch die weiteren Beziehungen gelistet in Kapitel 3.2.1 lassen sich weitere physikalische Größen ermitteln:

$$R \sim M^{0,6}$$

$$T_{eff}^4 \sim M^{2,3}$$

Mit der oben berechneten Masse des Sterns:

$$R = 4,26^{0,6} M_{\odot}$$

$$\underline{\underline{R \approx 2,39 R_{\odot}}}$$

$$T_{eff}^4 = 4,26^{2,3} M_{\odot}$$

$$\underline{\underline{T_{eff} \approx 2,3 T_{eff\odot}}}$$

---

<sup>114</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=oLoLey75i2k>



Außerdem erhält man durch die Masse des Sterns die Zeit, welche dieser auf der Hauptreihe verweilt:

$$t_{Stern} = t_{Sonne} \cdot \left( \frac{M_{Sonne}}{M_{Stern}} \right)^{2,5}$$

mit  $t_{Sonne} \approx 7,7 \times 10^9 \text{ y}$

Für den Stern mit der 160-fachen Leuchtkraft der Sonne bedeutet das:

$$t_{Stern} = 7,7 \cdot 10^9 \text{ y} \left( \frac{1 M_{\odot}}{4,26 M_{\odot}} \right)^{2,5}$$

$$\underline{\underline{t_{Stern} \approx 20,5 \cdot 10^7 \text{ y}}}$$

eine Verweildauer auf der Hauptreihe von  $20,5 \times 10^7$  Jahre, was ca. 90 Prozent seines Lebens ausmacht.

## 4. Was ist ein Schwarzes Loch?

### 4.1 Definition

*„Als Schwarzes Loch bezeichnet die Wissenschaft ein Objekt im Universum, in der Materie in sich selbst zusammengefallen ist. Man spricht in diesem Fall von einem Gravitationskollaps, also ein Zusammenbruch durch Schwerkraft. Schwarze Löcher basieren auf der Allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein.“*<sup>115</sup>

### 4.2 Arten

Es gibt verschiedene Arten von Schwarzen Löchern, welche anhand ihrer Masse klassifiziert werden. Drei Arten von Schwarzen Löchern wurden bereits erwiesen:

Die bekanntesten davon sind **stellare Schwarze Löcher** mit 3 bis 100 Sonnenmassen. Sie entstehen beim Tod eines Sterns mit mehr als 10 Sonnenmassen durch einen Gravitationskollaps. Dabei wirft der Stern seine äußeren Hüllen ab, was als Supernova vom Typ II bezeichnet wird.<sup>116</sup>

Vor einigen Jahren gab es Entdeckungen, dass es **mittelschwere Schwarze Löcher** gibt, welche einige hundert bis mehrere hunderttausend Sonnenmassen schwer sind. Sie befinden sich vor allem in Systemen wie jungen Sternhaufen, Kugelsternhaufen und Zwerggalaxien. Gefunden wurden sie durch die Bewegung der Sterne oder Galaxien in ihrer Nähe, da der gravitative Einfluss des Schwarzen Lochs auf diese Objekte wirkt und ihre Umlaufbahnen so beeinflusst.<sup>117</sup>

Eine weitere Art ist das **super-massereiche Schwarze Loch**. Dieses besitzt eine Masse von mehreren Millionen bis Milliarden Sonnenmassen. Sie treten nur im Zentrum einer Galaxie auf, wie z.B. das super-massereiche Schwarze Loch Sagittarius A\* im Zentrum der Milchstraße. Die Entstehung von super-massereichen Schwarzen Löchern ist noch unklar und viele Wissenschaftler forschen an dieser Frage, die auch „seed black hole problem“ genannt wird.<sup>118</sup>

---

<sup>115</sup> <https://www.it-times.de/news/schwarze-locher-das-geheimnis-der-raumzeit-im-universum-119384/>

<sup>116</sup> <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/stellare-schwarze-loecher/457>

<sup>117</sup> <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/mittelschwere-schwarze-loecher/304>

<sup>118</sup> <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/supermassereiche-schwarze-loecher/464>

### 4.3 Das erste Bild von einem Schwarzen Loch

„Am 10.04.2019 haben Wissenschaftler mit Beobachtungen des Event Horizon Telescope (EHT) im Zentrum der Galaxie M87 das erste Bild eines Schwarzen Lochs erhalten. Das Bild zeigt einen hellen Ring, der entsteht, wenn sich das Licht in der intensiven Schwerkraft um ein Schwarzes Loch krümmt, das 6,5 Milliarden Mal massereicher ist als die Sonne. Dieses lang ersehnte Bild liefert den bisher stärksten Beweis für die Existenz super-massereicher Schwarzer Löcher und öffnet ein neues Fenster für die Untersuchung von Schwarzen Löchern, ihrer Ereignishorizonte und der Schwerkraft.“<sup>119</sup>



Abb. 29: Das erste Bild eines Schwarzen Lochs (entstanden im April 2019)

Doch diese Aufnahme ist physikalisch gesehen kein Foto, da ein Schwarzes Loch kein Licht reflektiert. Das Bild wurde mit vielen Radioteleskopen auf der Welt aufgenommen, welche synchronisiert wurden um so die Informationen der einzelnen Teleskope zu einem Bild zusammenzufügen. Ein Teleskop namens ALMA wurde sogar von der ESO vertreten, bei der ich in München zu Besuch war.<sup>120</sup> Streng gesehen ist die 2019 entstandene Aufnahme kein Bild von einem Schwarzen Loch, sondern nur von seinem „Schatten“, also der strahlenden Materiescheibe (auch Akkretionsscheibe genannt). Das Schwarze Loch ist der dunkle Fleck in der Mitte dieser hellen Scheibe.

<sup>119</sup> <https://eventhorizontelescope.org/blog/first-ever-image-black-hole-published-event-horizon-telescope-collaboration> (Übersetzung von Englisch in Deutsch mit <https://www.deepl.com/translator>)

<sup>120</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=A8RPRN2964k>

## 4.4 Eigenschaften

### 4.4.1 Der Ereignishorizont

Wie alle Horizonte trennt der Ereignishorizont das Beobachtbare vom Verdeckten bzw. nicht Sichtbaren. Die Gravitation ist hier gerade noch stark genug um das Licht am Entweichen zu hindern. In der Allgemeinen Relativitätstheorie ist der Ereignishorizont eine Grenzfläche in der Raumzeit, welche die Ereignisse jenseits dieser Grenzfläche vom außenstehenden Beobachter abschirmt. "Ereignis" bezieht sich dabei auf einen Punkt in Raum und Zeit, der durch Ort und Zeit bestimmt wird. Deswegen Ereignishorizont.<sup>121</sup>

Der Radius des Ereignishorizonts eines statischen (nicht rotierenden) Schwarzen Lochs wird auch als Schwarzschild-Radius bezeichnet.

### 4.4.2 Gravitation und die Krümmung der Raumzeit

Schwarze Löcher haben eine sehr starke Gravitation mit der sie Planeten oder sogar ganze Sterne verschlingen können. Doch diese spezielle Gravitationswirkung folgt größtenteils nicht aus der Masse, die es besitzt, denn ein Schwarzes Loch hat keine größere Masse als die Materie, aus der es entstanden ist. Entscheidend ist die Konzentration dieser Masse auf einen extrem kleinen Punkt, welche als Singularität bezeichnet wird. Dazu später mehr (siehe Kapitel 4.4.3).

Kommen Objekte bzw. Körper einem Schwarzen Loch zu nahe, werden sie durch die Gravitation zuerst angezogen und ab einem bestimmten Punkt bis zum Zerreißen gedehnt. Und einmal im Schwarzen Loch gefangen, kann nichts mehr entweichen. Nicht einmal das Licht. Deswegen ist ein Schwarzes Loch auch schwarz: Es kann kein Licht reflektieren. Was heißt, dass man nicht genau sagen kann, was sich hinter dem Ereignishorizont verbirgt.<sup>122</sup>

Auch wenn ein Mensch oder Roboter in ein Schwarzes Loch eintreten würde, könnte er niemandem die Information übermitteln, da er und jede Information die er entsendet, im Schwarzen Loch gefangen sind.

Um der enormen Gravitation eines Schwarzen Lochs zu entkommen, müsste man schneller als das Licht sein ( $c \approx 300.000.000 \text{ m/s}$ ), denn auch das wird bis zum Ereignishorizont zurückgehalten. Doch laut dem heutigen Wissensstand gibt es nichts schnelleres als die Lichtgeschwindigkeit.<sup>123</sup>

---

<sup>121</sup> <https://abenteuer-universum.de/stersterne/bl3.html>

<sup>122</sup> Harald Lesch und Jörn Müller (2008): Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag (S. 190)

<sup>123</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=yWO-cvGETRQ>

Angenommen ein Astronaut würde mit den Füßen voran in ein stellares Schwarzes Loch fallen, würde ihn dieses ab einem bestimmten Punkt der Länge nach strecken und seitlich zusammenquetschen, da die Gravitation viel stärker an seinen Füßen zieht als am Kopf. Das kann man sich wie einen Versuch vorstellen, die Niagarafälle mit einem Kanu hinunterzufahren: *„Je näher [man] den Fällen kommt, desto schneller wird die Strömung. Am Bug des Kanus zieht die Strömung stärker als am hinteren Teil, dem Heck, und droht, das Kanu auseinanderzureißen.“*<sup>124</sup>

Stephen Hawking bezeichnete diesen Effekt als Spaghettisierung. Daher kommt der Name: „Spaghetti Effekt“.

Besteht das Schwarze Loch jedoch aus einer Masse von mehr als eine Millionen Sonnenmassen (super-massereiches Schwarzes Loch), so erreicht der Astronaut den Ereignishorizont oder überquert ihn sogar. Was hinter dem Ereignishorizont geschieht, weiß man nicht genau, vermutlich wird man aber an der Singularität zu Tode gequetscht (siehe Kapitel 4.4.3).

Gleichzeitig zum Raum wird auch die Zeit gedehnt, bis sie schließlich zum Stillstand kommt. Wann genau das passiert, habe ich den Doktoranden Kianusch Mehrgan in meinem Interview gefragt:

*„Die Zeit bleibt praktisch stehen, wenn man den Schwarzschild-Radius erreicht. Die einzige Möglichkeit, die wir haben, Zeit überhaupt zu quantifizieren, wäre wahrscheinlich in dem wir sagen würden: Wie lange braucht Licht um eine Strecke zu überqueren, da das Licht im All die gleiche Geschwindigkeit besitzt. Anhand davon kann man die lokale Zeit quantifizieren. Am Schwarzschild-Radius ist die Krümmung der Raumzeit so gewaltig, dass das Licht unendlich brauchen würde um aus dem Schwarzen Loch zu entkommen. Das kommt einem dann vor, als würde es keine Zeit geben.“* (K. Mehrgan, persönliche Kommunikation (Interview), 07. Februar 2020)

---

<sup>124</sup> Hawkins, Stephen (2018): *Kurze Antworten auf Große Fragen*. 12. Auflage. Klett-Cotta Verlag

#### 4.4.3 Die Singularität

Wie schon in den vorherigen Kapiteln beschrieben, wissen Astronomen nicht wirklich, was sich hinter dem Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs verbirgt. Aktuelle Theorien besagen, dass sich im Inneren eines Schwarzen Lochs ein dimensionsloser Punkt befindet, der eine unendliche Dichte besitzt.<sup>125</sup> Physiker sprechen hier von Singularität, also einem Sonderfall. Denn bei einem unendlich kleinen Punkt, mit einer unendlich großen Masse, versagen alle physikalischen Gesetze. Dies ist noch ein ungelöstes Rätsel der Physik, welches nicht so einfach zu lösen ist, ohne zu wissen, was sich in einem Schwarzes Loch befindet. Doch das scheint laut dem heutigen Wissensstand unmöglich.

Seit Ende der 1960er werden zu der Thematik mathematische Sätze formuliert. Daher kann man heute durch die Arbeit von Stephen Hawking und Roger Penrose mit Sicherheit sagen, dass bei einem Gravitationskollaps von einem massereichen Stern eine Singularität entsteht. Im Jahr 2020 gewann der Physiker Roger Penrose von der University of Oxford für seine Singularitäten-Theoreme sogar einen Teil des Nobelpreises der Physik.<sup>126</sup>

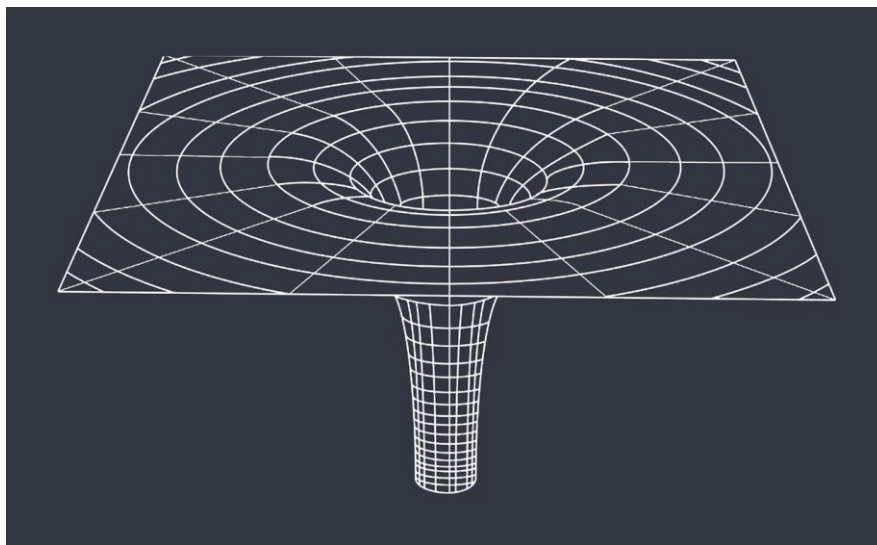


Abb. 30: Die Krümmung der Raum-Zeit eines Schwarzen Lochs

Die enorme Masse eines Schwarzen Lochs übt eine gewaltige Schwerkraft aus, aufgrund dieser Singularität. Raum und Zeit krümmen sich. Das kann man sich ungefähr so vorstellen: Wenn die Raum-Zeit als zweidimensionale Oberfläche dargestellt wird, wäre die Singularität eines Schwarzen Lochs ein bodenloser Trichter (siehe Abbildung 30).<sup>127</sup>

<sup>125</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=e-P5IFTqB98>

<sup>126</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Singularit%C3%A4ten-Theorem>

<sup>127</sup> <https://supernova.eso.org/germany/exhibition/1205/>

#### 4.4.4 Der Gravitationslinseneffekt

Die Ablenkung des Lichts durch große Massen wird in der Astronomie als Gravitationslinseneffekt bezeichnet. Grundsätzlich wird Licht von einer entfernten Quelle, wie einem Stern, einer Galaxie oder einem anderen astronomischen Objekt entsendet. Dieses wird durch ein davor liegendes zweites Objekt – die Gravitationslinse – so beeinflusst, dass der Betrachter das Objekt hinter der Gravitationslinse nicht in der eigentlichen Form bzw. Position sehen kann. Das geschieht durch die hohe Gravitation des Gravitationslinsen-Objekts, welches das Licht auf seiner geraden Bahn ablenkt.<sup>128</sup>

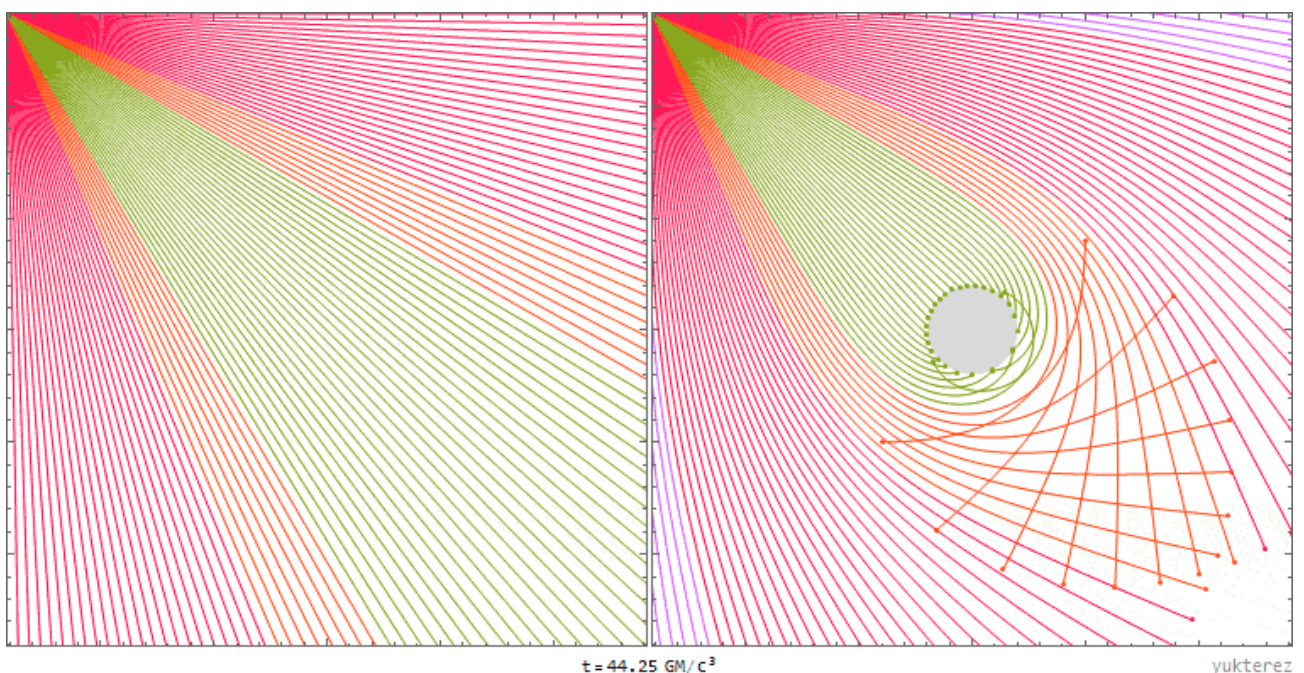


Abb. 31: Links sieht man die normale Ausbreitung von Licht und rechts die Beeinflussung der Gravitationslinse auf die Ausbreitung von Licht.

In diesem Fall ist die Gravitationslinse das Schwarze Loch, welches das Licht auf seiner geraden Bahn in Richtung des Betrachters ablenkt. Somit wird das Licht emittierende Objekt von dem Betrachter aus optisch verbogen bzw. verzerrt gesehen. Mit anderen Worten: die Position der Licht-Quelle am Himmel erscheint verschoben.

<sup>128</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationslinseneffekt>



#### 4.4.5 Gravitationswellen

Gravitationswellen werden verursacht, wenn sich sehr große Massen (wie z.B. Schwarze Löcher oder Neutronensterne) schnell bewegen.<sup>129</sup> Das passiert, wenn zwei dieser Objekte aufeinandertreffen, also kollidieren. Diese Gravitationswellen kann man sich wie ein Stauchen der Raum-Zeit vorstellen.<sup>130</sup> Vor rund 1,3 Milliarden Jahren geschah eine oben genannte Kollision von zwei Schwarzen Löchern die 29 und 36 Sonnenmassen besaßen.<sup>131</sup> Beim Verschmelzen der beiden Schwarzen Löchern wurden ca. 3 Sonnenmassen in Gravitationswellen umgewandelt, die sich seitdem mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Die Wellen dieser Stauchung konnte man nach 1,3 Milliarden Lichtjahren auf der Erde messen, wozu man Gravitationswellendetektoren braucht, die mehrere Kilometer lang sind. Einer dieser Gravitationswellendetektoren heißt LIGO-Interferometer.

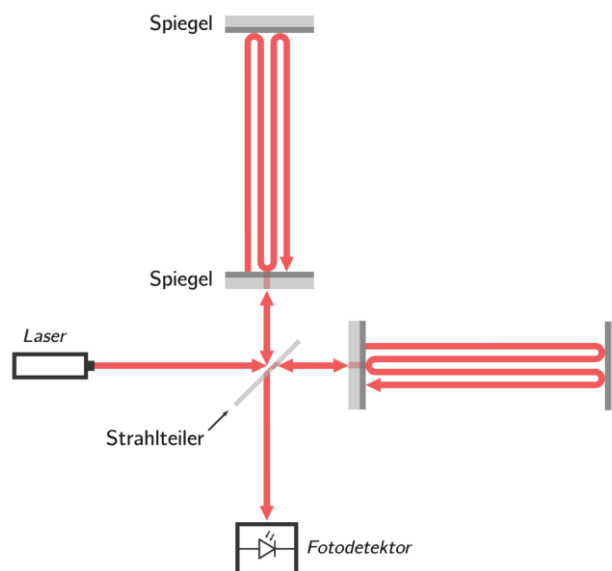


Abb. 32: Der Vereinfachte Aufbau eines LIGO-Interferometers

Mit diesen hochempfindlichen Messgeräten konnte man 2015 zum ersten Mal Gravitationswellen messen und beweisen, wofür die Wissenschaftler des Projektes, Rainer Weiss, Kip Thorne und Barry Barish, 2017 den Nobelpreis erhielten.

<sup>129</sup> [https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationswelle#Experimenteller\\_Nachweis](https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationswelle#Experimenteller_Nachweis)

<sup>130</sup> [https://www.spektrum.de/astrowissen/lexdt\\_g04.html#gravr](https://www.spektrum.de/astrowissen/lexdt_g04.html#gravr)

<sup>131</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=tSAlmhAm8-4>



#### 4.4.6 Berechnungen zur Masse eines Beispielsterns

Entsteht aus dem massereichen Stern ein Schwarzes Loch, so kann man die Masse dieses mit einer bestimmten Form des 3. Keplerschen Gesetzes bestimmen. Um dies zu tun, braucht man jedoch einen Körper (z.B. ein Stern) der um das Schwarze Loch kreist.

$$a^3 = M \cdot t^2$$

$$M = \frac{a^3}{t^2}$$

Benötigen tut man demnach die Halbachse (a) der Umlaufbahn des Körpers um das Schwarze Loch in Astronomische Einheiten (AE) und die Umlaufzeit (t) des Orbiters in Jahre (y). Wenn beide Werte gegeben sind, kann man die Masse des Schwarzen Lochs in Sonnenmassen berechnen.

Beispiel: Gegeben sind  $a = 22 \text{ AE}$  und  $t = 40 \text{ y}$ .

Lösung:

$$M = \frac{22^3 \text{ AE}}{40^2 \text{ y}}$$

$$\underline{\underline{M \approx 6,7 M_{\odot}}}$$

Das Schwarze Loch hat eine Masse von rund 6,7 Sonnenmassen und zählt damit zu den stellaren Schwarzen Löchern.

## 5. Praktischer Teil

Der erste Bestandteil meines Eigenanteils beinhaltet die Berechnungen zu den verschiedenen Phasen des Lebenszyklus eines Sterns anhand meines erfundenen Beispielsterns.

Um die Formeln in meiner wissenschaftlichen Arbeit schreiben zu können, habe ich mir das schreiben im Softwaresystem namens „LaTeX“ angeeignet, mit welchem man wissenschaftliche Formeln und Sprache einfacher formatieren kann. Gearbeitet habe ich dabei mit der Website „overleaf.com“.

Im zweiten Abschnitt meines Eigenanteils habe ich vor, eine Website zu programmieren, welche das manuelle Berechnen aus Abschnitt eins des Eigenanteils übernehmen soll. Genauer beschrieben: Auf der Website sollen Werte für die physikalischen und chemischen Größen, wie die Dichte oder die Temperatur, angegeben werden können, mit welchen das Programm für ausgewählte Formeln bzw. Umstände das richtige Ergebnis ausgibt. Des Weiteren soll der User die wichtigsten Informationen zum jeweilig ausgewählten Thema erhalten. Das Programm soll also einen nachhaltigen Wert besitzen d.h., dass es Schülerinnen und Schülern anschaulich astronomischen Gesetzmäßigkeiten erläutert und Zusammenhänge lebendig veranschaulicht. Intention des Programmes ist es daher, einen positiven Lerneffekt für Schülerinnen und Schüler ab der 10. Klasse (z.B. im Wahlgrundkurs Astronomie oder Astro-Physik) zu erzeugen und Begeisterung für das Thema zu wecken.

Für die Webgestaltung der Website werde ich HTML („Hyper Text Markup Language“) und CSS („Cascading Style Sheets“) benutzen. HTML dient dabei vor allem für die Struktur und den Inhalt (interface) der Website. Mit CSS definiere ich das Layout.

Für das Schreiben des Programms werde ich die Programmiersprache PHP („Hypertext Preprocessor“) benutzen.

Durch den Wahlgrundkurs Informatik, welchen ich bei Herr Spalteholz absolviere, habe ich die erforderlichen Grundkenntnisse für HTML und PHP, welche ich für die Aufgabe benötige.

Weitere Voraussetzungen, wie CSS, werde ich mir über YouTube Tutorials aneignen.

## 6. Fazit

Die These meiner wissenschaftlichen Arbeit besagt:

„Es ist möglich anhand der physikalischen Größen Temperatur, Dichte und Masse einer Molekülwolke die Voraussetzungen der Entstehung eines Sterns zu berechnen und seinen Lebenszyklus auf Basis der neuen Erkenntnisse der Astro-Physik zu erläutern.“

Durch die Kapitel 3.1.3 (Voraussetzungen der Sternentstehung) und 3.1.5 (Berechnungen zu den Voraussetzungen der Sternentstehung) hat sich der erste Teil meiner These bewahrheitet. Mit der Formel für die Jeans-Masse, die als Art Grenzmasse fungiert, kann man mit der Temperatur und der Dichte einer Molekülwolke berechnen, ab welcher Masse diese instabil wird. Diese instabile Molekülwolke kann daraufhin kontrahieren und so später im ersten dynamischen Kollaps zum Vorgänger des Protostern kollabieren. In Kapitel „3.1.5 Berechnungen zu den Voraussetzungen der Sternentstehung“ habe ich zudem erwiesen, dass man die Dichte der Molekülwolke ausrechnen kann, wenn der Radius der Molekülwolke gegeben ist. So gibt es mehrere Möglichkeiten, die Jeans-Masse zu berechnen.

Neben der Jeans-Masse gibt es außerdem weitere Kriterien, wie die Jeans-Länge, welche als Bedingungsgrößen zur Sternentstehung genutzt werden können.

Ich konnte mein Ziel, den Lebenszyklus vollständig wieder zu geben, in dem Kapitel 3 realisieren. Meine Anforderung, dies mit der Hilfe von mathematischen Berechnungen zu verknüpfen, ist mir ebenfalls gelungen.

## Quellenverzeichnis

### Literaturquellen

Adelberger, E. (2011): *Solar fusion cross sections. II. The pp chain and CNO cycles*. 1. Auflage. *Reviews of Modern Physics*.

de Boer, K., & Schwarz, O. (2011): *Astronomie, Gymnasium Oberstufe – Grundstudium*. 3. Auflage. DUDEN PAETEC Schulbuchverlag

Götz Hoeppe (2004): *Sonnenbeben, Entdeckung der Helioseismologie*. Heft 8. Sterne und Weltraum

Hawkins, S. (2018): *Kurze Antworten auf Große Fragen*. 12. Auflage. Klett-Cotta Verlag

Hoeppe, G. (2004): *Sonnenbeben, Entdeckung der Helioseismologie*. Heft 8. Sterne und Weltraum

Klessen, R. (2007): *Sternenentstehung, Vom Urknall bis zur Geburt der Sonne*. 1. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag

Lesch, H., & Müller, J. (2008): *Weißt du wie viele Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt*. 1. Auflage. C. Bertelsmann Verlag

Meyer, L. (2016): *Das große Tafelwerk interaktiv 2.0*. 1. Auflage. Cornelsen Schulverlage GmbH

## Internetquellen

Adelberger, E.G. (2011). Solar fusion cross sections.

URL: <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.83.195>. Letzter Aufruf am 18.12.2021.

Banerjee, R. (2017) Sternentwicklung.

URL: [https://www.physik.uni-hamburg.de/en/hs/group-banerjee/\\_documents/teaching/ss-16-astro/astro-einf-2-sose16-02.pdf](https://www.physik.uni-hamburg.de/en/hs/group-banerjee/_documents/teaching/ss-16-astro/astro-einf-2-sose16-02.pdf). Letzter Aufruf am 05.01.2022.

Beimforde, M. (2014). Die Entwicklung von Sternen. URL:

<https://slideplayer.org/slide/215058/>. Letzter Aufruf am 10.01.2022.

Bendt, G. (2007). Der innere Aufbau der Sonne. URL: <https://www.astronomie.de/das-sonnensystem/die-sonne/basiswissen/innerer-aufbau-der-sonne>. Letzter Aufruf am 14.01.2022.

Brau, J. (2016). Stellar Evolution.

URL: <https://pages.uoregon.edu/jimbrau/astr122/Notes/Chapter20.html>. Letzter Aufruf am 03.01.2022.

Byrd, D. & Whitt, K. K. (2021). Proxima Centauri, closest star to our sun.

URL: <https://earthsky.org/astronomy-essentials/proxima-centauri-our-suns-nearest-neighbor>. Letzter Aufruf am 18.12.2021.

Chandra. (2021).

URL: <https://chandra.si.edu/resources/glossaryN.html>. Letzter Aufruf am 16.01.2022.

ESO (2018)

URL: [https://supernova.eso.org/static/archives/exhibitionimages/screen/0406\\_C\\_cutaway-CCfinal.jpg](https://supernova.eso.org/static/archives/exhibitionimages/screen/0406_C_cutaway-CCfinal.jpg). Letzter Aufruf am 14.12.2021.

ESO (2020). What happens if you fall into a black hole?

URL: <https://supernova.eso.org/germany/exhibition/1205/>. Letzter Aufruf am 14.12.2021.

ESO. (2018). eso1825de – Pressemitteilung Wissenschaft. Erster erfolgreicher Test von Einsteins Allgemeinen Relativitätstheorie nahe supermassereichem Schwarzen Loch.

URL: <https://www.eso.org/public/news/eso1825/>. Letzter Aufruf am 23.05.2021.

ESO. (2018). ESOCast 173: First Successful Test of Einsteins's General Relativity Near Supermassive Black Hole.

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=wstMu4ZndM8&feature=youtu.be>. Letzter Aufruf am 01.06.2021.

ESO. (2020). Singularity.

URL: <https://supernova.eso.org/germany/exhibition/1205/>. Letzter Aufruf am 23.05.2021.

Event Horizon (2019). First-ever Image of a Black Hole Published by the Event Horizon Telescope Collaboration.

URL: <https://eventhorizontelescope.org/blog/first-ever-image-black-hole-published-event-horizon-telescope-collaboration>. Letzter Aufruf am 04.01.2022.

Evers, M. (2021). Aufbau und Energie der Kerne.

URL: <https://physikunterricht-online.de/jahrgang-12/aufbau-und-energie-der-kerne/>. Letzter Aufruf am 02.01.2022.

Freistetter, Florian. (2017). Wie entstehen supermassereiche Schwarze Löcher?

URL: <http://scienceblogs.de/astrodicticum-simplex/2017/05/01/wie-entstehen-supermassereiche-schwarze-loecher/>. Letzter Aufruf am 01.06.2021.

Fröhlich, H.-E. (2017). Der Kosmos-Bote.

URL: <https://studylibde.com/doc/6763270/komplettausgabe-inkl.-index---der-kosmos-bote>. Letzter Aufruf am 04.01.2022.

Gaßner, M. Josef. (2014). Entwicklung schwerer Sterne zur Supernova.

URL: [https://www.youtube.com/watch?v=yfsO-36j\\_nI](https://www.youtube.com/watch?v=yfsO-36j_nI). Letzter Aufruf am 18.05.2021.

Girichidis, P. (2011). Importance of the initial conditions for star formation.

URL: <https://academic.oup.com/mnras/article/413/4/2741/964588>. Letzter Aufruf am 10.01.2022.

Hartmann, Benny. (2009). Das Ende eines Sterns.

URL: [http://www.joern-lenhardt.de/benny/art\\_sternende.html](http://www.joern-lenhardt.de/benny/art_sternende.html). Letzter Aufruf am 29.05.2021.

Henne, B. (2011). Spektralklassen und Leuchtkraftklassen.

URL: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7004>. Letzter Aufruf am 08.01.2022.

IT-TIMES. (2020). Phänomene im Weltall. Schwarze Löcher: Das Geheimnis der Raumzeit im Universum.

URL: <https://www.it-times.de/news/schwarze-locher-das-geheimnis-der-raumzeit-im-universum-119384/>. Letzter Aufruf am 03.06.2021.

IT-Times. (2022). Schwarze Löcher: Das Geheimnis der Raumzeit im Universum.

URL: <https://www.it-times.de/news/schwarze-locher-das-geheimnis-der-raumzeit-im-universum-119384/>. Letzter Aufruf am 18.12.2021.

Jaekel. F. Sternentwicklung.

URL: [https://www.mpifr-bonn.mpg.de/188614/finn\\_jaekel.pdf](https://www.mpifr-bonn.mpg.de/188614/finn_jaekel.pdf). Letzter Aufruf am 18.12.2021.

Joachim-Herz-Stiftung. (2022). Fixsterne.

URL: <https://www.leifiphysik.de/astronomie/fixsterne/grundwissen/sterngeburt>. Letzter Aufruf am 15.01.2022.

Kahn, F. (2009). Sternende.

URL: [http://www.joern-lenhardt.de/benny/art\\_sternende.html](http://www.joern-lenhardt.de/benny/art_sternende.html). Letzter Aufruf am 18.12.2021.

Kiehlmann, S. (2011). Interstellare Materie.

URL: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7283>. Letzter Aufruf am 15.01.2022.

Klessen, R. (2007). Sternenentstehung, Vom Urknall bis zur Geburt der Sonne.

URL: [http://cdn.sci-news.com/images/enlarge4/image\\_5977e-NGC-6231](http://cdn.sci-news.com/images/enlarge4/image_5977e-NGC-6231). Letzter Aufruf am 21.12.2021.

Kurzgesagt – In a Nutshell. (2015). Schwarze Löcher erklärt - Von der Geburt bis zum Tod.

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=e-P5IFTqB98>. Letzter Aufruf am 15.12.2021.

Kurzgesagt – In a Nutshell. (2019). Warum Schwarze Löcher das Universum löschen könnten.

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=yWO-cvGETRQ>. Letzter Aufruf am 15.12.2021.

Lesch, H. (2019). Das erste Foto eines Schwarzen Lochs LIVE.

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=A8RPRN2964k>. Letzter Aufruf am 20.12.2021.

Marti, O. (2020) Institut für Experimentelle Physik.

URL: <http://wwwex.physik.uni-ulm.de/lehre/cta-2020-2021/KTA-2020-2021.pdf>. Letzter Aufruf am 14.01.2022.

Müller, A. (2007). Gravitationsrotverschiebung.

URL: [https://www.spektrum.de/astrowissen/lexdt\\_g04.html#gravr](https://www.spektrum.de/astrowissen/lexdt_g04.html#gravr). Letzter Aufruf am 15.12.2021.

Müller, A. (2014). Mittelschwere Schwarze Löcher.

URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/mittelschwere-schwarze-loecher/304>. Letzter Aufruf am 20.12.2021.

Müller, A. (2014). Stellare Schwarze Löcher.

URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/stellare-schwarze-loecher/457>. Letzter Aufruf am 20.12.2021.

Müller, A. (2014). Supermassereiche Schwarze Löcher.

URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/astronomie/supermassereiche-schwarze-loecher/464>. Letzter Aufruf am 20.12.2021.

Müller, Andreas. (2020). Akkretion.

URL: [https://www.spektrum.de/astrowissen/lexdt\\_a02.html](https://www.spektrum.de/astrowissen/lexdt_a02.html). Letzter Aufruf am 04.01.2022.

Müller, Thomas. (2007). Astro Wissen, Astro-Lexikon G4, Gravitationslinse.

URL: [https://www.spektrum.de/astrowissen/lexdt\\_g04.html#gravr](https://www.spektrum.de/astrowissen/lexdt_g04.html#gravr). Letzter Aufruf am 28.09.2021.

Nasa (2021). Parker Solar Probe.

URL: <https://www.nasa.gov/content/goddard/parker-solar-probe>. Letzter Aufruf am 19.12.2021.

Nature portfolio. (2021).

URL: <https://www.nature.com/subjects/interstellar-medium>. Letzter Aufruf am 10.01.2022.

Palacki, H. (2019). Schwarze Löcher.

URL: <https://abenteuer-universum.de/stersterne/bl3.html>. Letzter Aufruf am 17.12.2021.



Puntigam, R.A. (2021). Allgemeine Relativitätstheorie.

URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/allgemeine-relativitaetstheorie/383>. Letzter Aufruf am 18.12.2021.

Quarks. (2020). Gravitationswellen und Co.: Wie wir den Kosmos enträtseln.

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=tSAlmhAm8-4>. Letzter Aufruf am 15.12.2021.

Roussel, A. (2021) Pulsars and Neutron Stars.

URL: <https://www.youtube.com/watch?v=oLoLey75i2k>. Letzter Aufruf am 18.12.2021.

Salzmann, W. (2008). Entstehung und Lebensweg von Sternen.

URL: <https://wissenstexte.de/physik/sterne.htm>. Letzter Aufruf am 02.01.2022.

Shi. X. (2016) Am Rande von Galaxienhaufen: Zurückplatschen und Akkretionsschock.

URL: <https://www.mpa-garching.mpg.de/370224/hl201609>. Letzter Aufruf am 03.01.2022.

Spektrum. (2020). Allgemeine Relativitätstheorie.

URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/allgemeine-relativitaetstheorie/383> . Letzter Aufruf am 28.11.2021.

Tomisaka, K. (2007). Star Formation.

URL: [http://th.nao.ac.jp/MEMBER/tomisaka/Lecture\\_Notes/StarFormation/3/node77.html](http://th.nao.ac.jp/MEMBER/tomisaka/Lecture_Notes/StarFormation/3/node77.html).  
Letzter Aufruf am 08.01.2022.

Universität Köln (2011). Starformation.

URL: <https://hera.ph1.uni-koeln.de/~ossk/star-formation/PMS.pdf>. Letzter Aufruf am 08.01.2022.

Wikipedia (2021). Helioseismologie.

URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Helioseismologie>. Letzter Aufruf am 08.01.2022.

Wikipedia (2021). Proton-Proton-Reaktion.

URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Proton-Proton-Reaktion#Startreaktionen>. Letzter Aufruf am 14.01.2022.

Wikipedia. (2019). Interstellarer Staub.

URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Interstellarer\\_Staub](https://de.wikipedia.org/wiki/Interstellarer_Staub). Letzter Aufruf am 21.12.2021

Wikipedia. (2020). Allgemeine Relativitätstheorie.

URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Allgemeine\\_Relativitätstheorie](https://de.wikipedia.org/wiki/Allgemeine_Relativitätstheorie) . Letzter Aufruf am 04.10.2021.

Wikipedia. (2020). Gravitationslinseneffekt.

URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationslinseneffekt>. Letzter Aufruf am 14.09.2021.

Wikipedia. (2020). Gravitationswelle.

URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationswelle#Experimenteller\\_Nachweis](https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationswelle#Experimenteller_Nachweis). Letzter Aufruf am 28.07.2021.

Wikipedia. (2020). Messier 87.

URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Messier\\_87](https://de.wikipedia.org/wiki/Messier_87). Letzter Aufruf am 14.08.2021.

Wikipedia. (2020). Sagittarius A\*.

URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Sagittarius\\_A\\*](https://de.wikipedia.org/wiki/Sagittarius_A*). Letzter Aufruf am 01.06.2021.

Wikipedia. (2020). Schwarzes Loch.

URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzes\\_Loch#Klasseneinteilung](https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzes_Loch#Klasseneinteilung) . Letzter Aufruf am 14.11.2021.

Wikipedia. (2021). Gravitationslinseneffekt.

URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationslinseneffekt>. Letzter Aufruf am 14.12.2021.

Wikipedia. (2021) Allgemeine Relativitätstheorie.

URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Allgemeine\\_Relativitätstheorie](https://de.wikipedia.org/wiki/Allgemeine_Relativitätstheorie). Letzter Aufruf am 06.01.2022.

Wikipedia. (2021). Gravitationswelle.

URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationswelle#Experimenteller\\_Nachweis](https://de.wikipedia.org/wiki/Gravitationswelle#Experimenteller_Nachweis). Letzter Aufruf am 15.12.2021.

Wikipedia. (2021). Helioseismologie.

URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Helioseismologie> Letzter Aufruf am 21.12.2021.

Wikipedia. (2021). H-II-Gebiet.

URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/H-II-Gebiet>. Letzter Aufruf am 14.01.2021.

Wikipedia. (2021). Jeans-Kriterium.

URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Jeans-Kriterium#%C3%9Cber\\_den\\_Gleichgewichtsdruck](https://de.wikipedia.org/wiki/Jeans-Kriterium#%C3%9Cber_den_Gleichgewichtsdruck).

Letzter Aufruf am 14.01.2022.

Wikipedia. (2021). Messier87.

URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Messier\\_87](https://de.wikipedia.org/wiki/Messier_87). Letzter Aufruf am 18.12.2021.

Wikipedia. (2021). Pauli Prinzip.

URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Pauli-Prinzip>. Letzter Aufruf am 20.12.2021.

Wikipedia. (2021). Sternentstehung.

URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sternentstehung>. Letzter Aufruf am 15.01.2022.

Wikipedia. (2021). Stringtheorie.

URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Stringtheorie> Letzter Aufruf am 15.12.2021.

Wikipedia. (2020). Singularitäten-Theorem.

URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Singularit%C3%A4ten-Theorem>. Letzter Aufruf am 15.12.2021.

Wikipedia. (2022). Hydrostatischer Druck.

URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Hydrostatischer\\_Druck#Gravitationsdruck\\_in\\_Planeten,\\_Monden,\\_Asteroiden\\_und\\_Meteoriten](https://de.wikipedia.org/wiki/Hydrostatischer_Druck#Gravitationsdruck_in_Planeten,_Monden,_Asteroiden_und_Meteoriten). Letzter Aufruf am 15.01.2022.

Wikipedia. (2022). Stefan-Boltzmann-Gesetz.

URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Stefan-Boltzmann-Gesetz>. Letzter Aufruf am 14.01.2022.

Zuber, K (2021). Erstmalige Beobachtung des CNO-Zyklus.

URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/piuz.202001599>. Letzter Aufruf am 14.01.2022.

## **Expertengespräche**

Prof. Dr. Jochen Weller (07.02.2020; 02.10.2021; 09.01.2022). Ludwigs-Maximilians-Universität München

Kianusch Mehrgan (07.02.2020). Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik

Dr. Domnic Merkt (14.01.2022) Universität Stuttgart.

Lukas Listner (2020/2021;2021/2022). Unterricht des Wahlgrundkurses „Astronomie“ (Sek2) am Gymnasium Bürgerwiese Dresden

## Abbildungsverzeichnis

**Abbildung 1:** Das Hydrostatisches Gleichgewicht eines Sterns.

URL: <https://www.spektrum.de/astrowissen/images/intermed/hydrost-equ.jpg>

**Abbildung 2:** Helioseismologie: Seismische Wellen (P-Wellen) in und auf der Sonne.

URL: [https://supernova.eso.org/static/archives/exhibitionimages/screen/0406\\_C\\_cutaway-CCfinal.jpg](https://supernova.eso.org/static/archives/exhibitionimages/screen/0406_C_cutaway-CCfinal.jpg)

**Abbildung 3:** Innerer Aufbau der Sonne.

URL: [https://www.astronomie.de/fileadmin/\\_processed\\_/6/0/csm\\_sonnenaufbau\\_ac7d0b0542.png](https://www.astronomie.de/fileadmin/_processed_/6/0/csm_sonnenaufbau_ac7d0b0542.png)

**Abbildung 4:** Der vereinfachte Sternaufbau von Hauptreihensternen verschiedener Massen.

URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/71/Star\\_types.svg/370px-Star\\_types.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/71/Star_types.svg/370px-Star_types.svg.png)

**Abbildung 5:** Die Proton-Proton-I-Kette der Kernfusion in Sternen.

URL: <https://www.leifiphysik.de/sites/default/files/images/0fd2c1ea3c38253529775a775d03934c/992P-P-I-Kette.svg>

**Abbildung 6:** Die gesamte Proton-Proton-Kette und die prozentuale Häufigkeit der drei Reaktionsketten in der Sonne.

URL: <https://journals.aps.org/rmp/article/10.1103/RevModPhys.83.195/figures/2/medium>

**Abbildung 7:** Spektralklassen von Sternen mit der Lage der Absorptionslinien.

URL: <https://lp.uni-goettingen.de/get/image/7156>

**Abbildung 8:** Leuchtkraftklassen der Sterne.

URL: <https://lp.uni-goettingen.de/get/image/7159>

**Abbildung 9:** Aufnahme des Dunkelnebels LDN 483 und seinem Umfeld vom La-Silla-Observatorium der ESO in Chile.

URL: <https://cdn.eso.org/images/wallpaper1/eso1501a.jpg>

**Abbildung 10:** Aufnahme des Sternhaufens NGC 6231 mit dem „Chandra X-Ray Teleskop“ der NASA.

URL: [http://cdn.sci-news.com/images/enlarge4/image\\_5977e-NGC-6231.jpg](http://cdn.sci-news.com/images/enlarge4/image_5977e-NGC-6231.jpg)

**Abbildung 11:** Der Orion-Nebel.

URL: <https://stsci-opo.org/STScI-01EVT7WK0WCVNRN91GD8SA299X.png>

**Abbildung 12:** Der Gravitationsdruck wirkt dem thermischen Druck entgegen.

URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e2/Spherical\\_molecular\\_cloud\\_d\\_hc2-de.svg/800px-Spherical\\_molecular\\_cloud\\_d\\_hc2-de.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e2/Spherical_molecular_cloud_d_hc2-de.svg/800px-Spherical_molecular_cloud_d_hc2-de.svg.png)

**Abbildung 13:** Das Diagramm beschreibt die Abhängigkeit der Jeans-Masse von Temperatur (y-Achse) und Dichte (x-Achse).

URL: <https://sternentstehung.de/assets/img/content/jeans-masse-diagramm.png>

**Abbildung 14:** Drei Simulationen der Kontraktion verschiedener interstellarer Wolken mit Turbulenzen.

URL: [https://oup.silverchair-cdn.com/oup/backfile/Content\\_public/Journal/mnras/413/4/10.1111/j.1365-2966.2011.18348.x/2/m\\_mnras0413-2741-f6.jpeg?Expires=1643481330&Signature=sJtQ4Irv-f6Beto~eGRIvtVztW~RtsOxGCpEeb1UpMCtXgZuDEGdRsKDHcne2xE53MYHt~nN4MSPvPhvYZTbWiYyEC76uw77TQA3b1wULaLJ0f8osyTKRYY~lpccpo~3OpfNCvpDRfGYBfYelIPOcg3bxbDatOkuKgmGQ7HwMR617Jj4odLzvRufbJs0F5J9Vv1oW-y8aNmNd68h34CNO~8oh4TGn1Z6i7ZI52KJbvIEBM9oUBOt5NJMtI6txkEvpwsosSoUu20t06jFjfc6KTyh3oME0Pdv2XRNHrbHE1hOw1VXY5ypunwNgUU3PBLLgN3mTDAhXLiEiiKN9diY3Q\\_\\_&Key-Pair-Id=APKAIE5G5CRDK6RD3PGA](https://oup.silverchair-cdn.com/oup/backfile/Content_public/Journal/mnras/413/4/10.1111/j.1365-2966.2011.18348.x/2/m_mnras0413-2741-f6.jpeg?Expires=1643481330&Signature=sJtQ4Irv-f6Beto~eGRIvtVztW~RtsOxGCpEeb1UpMCtXgZuDEGdRsKDHcne2xE53MYHt~nN4MSPvPhvYZTbWiYyEC76uw77TQA3b1wULaLJ0f8osyTKRYY~lpccpo~3OpfNCvpDRfGYBfYelIPOcg3bxbDatOkuKgmGQ7HwMR617Jj4odLzvRufbJs0F5J9Vv1oW-y8aNmNd68h34CNO~8oh4TGn1Z6i7ZI52KJbvIEBM9oUBOt5NJMtI6txkEvpwsosSoUu20t06jFjfc6KTyh3oME0Pdv2XRNHrbHE1hOw1VXY5ypunwNgUU3PBLLgN3mTDAhXLiEiiKN9diY3Q__&Key-Pair-Id=APKAIE5G5CRDK6RD3PGA)

**Abbildung 15:** Die vier Phasen der Sternentstehung in Abhängigkeit von Temperatur und Dichte.

URL: <https://slideplayer.org/slide/215058/> (S. 8)

**Abbildung 16:** André, P (1994): Die Entwicklungsstufen von jungen, massearmen stellaren Objekten in vier Klassen bzw. Phasen unterteilt.

**Abbildung 17:** Phase der Vor-Hauptreihensterne auf dem Hertzsprung-Russel-Diagramm.

URL: [http://pages.uoregon.edu/jimbrau/BraulmNew/Chap19/8th/19\\_07\\_Figure.jpg](http://pages.uoregon.edu/jimbrau/BraulmNew/Chap19/8th/19_07_Figure.jpg)

**Abbildung 18:** Energieerzeugung (Leuchtkraft) der p-p-Kette und des CNO-Zyklus in Abhängigkeit zur Kerntemperatur des Sterns.

URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/cms/asset/b83ec5d7-e7d9-4300-9ad1-5ac10244f992/piuz202001599-fig-0300-m.png>

**Abbildung 19:** Entwicklung der Verteilung von Wasserstoff und Helium im Stern und spezifisch im Kern.

URL: [https://pages.uoregon.edu/jimbrau/BraulmNew/Chap20/7th/AT\\_7e\\_Figure\\_20\\_01.jpg](https://pages.uoregon.edu/jimbrau/BraulmNew/Chap20/7th/AT_7e_Figure_20_01.jpg)

**Abbildung 20:** Wasserstoff-Schalenbrennen zwischen Plasma und dem Helium-Kern, welcher noch keine Fusion betreibt.

URL: [https://pages.uoregon.edu/jimbrau/BraulmNew/Chap20/7th/AT\\_7e\\_Figure\\_20\\_02.jpg](https://pages.uoregon.edu/jimbrau/BraulmNew/Chap20/7th/AT_7e_Figure_20_02.jpg)  
(Ausschnitt)

**Abbildung 21:** Entwicklung des früheren Hauptreihensterns auf dem Hertzsprung-Russell-Diagramm.

URL: [https://pages.uoregon.edu/jimbrau/BraulmNew/Chap20/7th/AT\\_7e\\_Figure\\_20\\_04.jpg](https://pages.uoregon.edu/jimbrau/BraulmNew/Chap20/7th/AT_7e_Figure_20_04.jpg)

**Abbildung 22:** Das Zweischalenbrennen am Ende des Heliumbrennens.

URL: [http://pages.uoregon.edu/jimbrau/BraulmNew/Chap20/8th/20\\_05\\_Figure.jpg](http://pages.uoregon.edu/jimbrau/BraulmNew/Chap20/8th/20_05_Figure.jpg)

**Abbildung 23:** Ringnebel (Messier 57) im Sternbild Leier.

URL: [https://pages.uoregon.edu/jimbrau/BraulmNew/Chap20/8th/20\\_09\\_FigureC.jpg](https://pages.uoregon.edu/jimbrau/BraulmNew/Chap20/8th/20_09_FigureC.jpg)

**Abbildung 24:** Sternenentwicklung von Sternen der Leichtgewichtsklasse.

URL: [https://pages.uoregon.edu/jimbrau/BraulmNew/Chap20/8th/20\\_11\\_Figure\\_Unanno.jpg](https://pages.uoregon.edu/jimbrau/BraulmNew/Chap20/8th/20_11_Figure_Unanno.jpg)

**Abbildung 25:** Sternenentwicklung von Sternen der Leichtgewichtsklasse (1M, 2M), Sternen der Mittelgewichtsklasse (3M, 5M) und Massereichen Sternen (9M).

URL: [https://media.springernature.com/lw785/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-3-662-57801-8\\_6/MediaObjects/428446\\_1\\_De\\_6\\_Fig6\\_HTML.gif](https://media.springernature.com/lw785/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-3-662-57801-8_6/MediaObjects/428446_1_De_6_Fig6_HTML.gif)

**Abbildung 26:** Mittlere Bindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit von der Massenzahl.

URL: <https://physikunterricht-online.de/wp-content/uploads/2016/02/Mittlere-Energie-eines-gebundenen-Nukleons.jpg>

**Abbildung 27:** Das Schalenbrennen eines massereichen Sterns am Ende seines Lebens.

URL: [https://quant.uni-graz.at/images/quant-module/3\\_neutronensterne/Schalenbrennen.png](https://quant.uni-graz.at/images/quant-module/3_neutronensterne/Schalenbrennen.png)

**Abbildung 28:** Supernova 1994D (links unten) am Rand der Galaxie NGC 4526.

URL: <https://stsci-opo.org/STScI-01EVTA31RYX6ZV74E5HX2D228T.png>

**Abbildung 29:** Das erste Bild eines Schwarzen Lochs (entstanden im April 2019).

URL: <https://eventhorizontelescope.org/files/ehf/files/20190410-78m-4000x2330.png?m=1554877782>

**Abbildung 30:** Die Krümmung der Raum-Zeit eines Schwarzen Lochs.

URL: [https://supernova.eso.org/exhibition/images/RZ\\_Educational\\_1205\\_DRUCK/](https://supernova.eso.org/exhibition/images/RZ_Educational_1205_DRUCK/)

**Abbildung 31:** Normale Ausbreitung von Licht und die Beeinflussung der Gravitationslinse auf die Ausbreitung von Licht.

URL: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d6/Shapiro\\_delay.gif](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d6/Shapiro_delay.gif)

**Abbildung 32:** Gorfer, Alexander: Der vereinfachte Aufbau eines LIGO-Interferometers.

URL: <https://quant.uni-graz.at/quant-module/neutronensterne-und-schwarze-loecher/33-neutronensterne-und-schwarze-loecher-artikel/31-artikel-4-gravitationswellen.> (Abbildung 2)