

Stellare Nukleosynthese: die Entstehung der Elemente von H bis Fe

Kurs: Astronomie
Fachlehrer: Florian Riemer
Schule: Greselius-Gymnasium Bramsche
Jahrgang: 12
Abgabe: 02.03.2026

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen.....	2
3 Brennphasen.....	3
3.1 Wasserstoffbrennen.....	4
3.2 Heliumbrennen.....	6
3.3 Kohlenstoffbrennen.....	7
3.4 Neonbrennen.....	8
3.5 Sauerstoffbrennen.....	8
3.6 Siliciumbrennen.....	9
4 Eisen-Grenze.....	10
5 Fazit.....	10
6 Literaturverzeichnis.....	12
7 Abbildungsverzeichnis.....	13

1 Einleitung

„Wir bestehen alle aus Sternenstaub.“ Das waren die berühmten Worte des Astronomen Carl Sagan(vgl.[1]). Doch was stimmt an dieser Aussage wirklich? Ist sie nur poetisch oder basiert sie auf wissenschaftlichen Fakten? Wie entstanden aus den Partikeln des Universums die ersten Elemente, die bis heute die Welt, wie wir sie kennen, ausmachen?

Diese Fragen werden auf den folgenden Seiten beantwortet.

Vor Milliarden von Jahren entstand das Universum durch den Urknall. Zuerst bestand das Universum nur aus Energie, doch innerhalb von einem Bruchteil einer Sekunde bildeten sich Elementarteilchen wie Quarks und Elektronen. Diese verbanden sich daraufhin mithilfe von Gluonen zu Neutronen und Protonen. Mit der Zeit und unter verschiedenen Bedingungen entstanden dann die ersten Atome. Zuerst gab es die, von dem Aufbau her „einfachsten“, Atome Wasserstoff, Helium und einen unfassbar geringen Anteil Lithium. Dies wird auch die primordiale¹ Nukleosynthese genannt(vgl.[2]).

Der größte Teil der anderen Elemente entstand jedoch in Sternen. Deshalb auch der Name stellare Nukleosynthese. Diese erfolgt in den sogenannten nuklearen Brennphasen(vgl.[3]).

Der Schwerpunkt dieser Facharbeit liegt auf der Ausarbeitung der stellaren Nukleosynthese von Wasserstoff bis Eisen. Die Entstehung der „schweren“ Elemente wird nicht behandelt. Die primordiale Nukleosynthese soll nicht der Fokus der Arbeit sein und wird deshalb vorausgesetzt.

Zu Beginn werden die physikalischen Grundlagen, die für das Verständnis der folgenden Prozesse wichtig sind, betrachtet. Dann wird die Voraussetzung der Sterne für die Entstehung der Elemente erläutert. Den größten Teil dieser Arbeit bildet das Erklären der verschiedenen Brennphasen, durch welche die Elemente entstehen. Am Ende fasse ich das Wichtigste noch einmal zusammen und komme zu einem Fazit.

¹ =ursprüngliche

2 Grundlagen

Ein Atom, wie wir es kennen, besteht aus verschiedenen Bestandteilen. Es hat einen positiv geladenen Atomkern und negativ geladene Elektronen, die sich um den Atomkern herum bewegen. Obwohl der Atomkern nur sehr klein ist, macht er den größten Teil der Masse des gesamten Atoms aus. Das Elektron hat zwar auch eine Masse, jedoch ist diese sehr gering. Ein Elektron ist nach unserer heutigen Auffassung ein Elementarteilchen. Das heißt, es lässt sich nicht weiter teilen.

Der Atomkern kann noch weiter in seinen Bestandteilen betrachtet werden. Er besteht aus positiv geladenen Protonen und nicht geladenen Neutronen. Diese wiederum sind aus Quarks, was ein weiteres Elementarteilchen ist, zusammengesetzt. Ein Proton besteht aus zwei Upquarks und einem Downquark und ein Neutron aus zwei Downquarks und einem Upquark. Neutronen und Protonen werden oft auch Nukleonen genannt.

Alle Elemente (außer Wasserstoff) haben mehr als ein Proton im Atomkern. Das heißt, es gibt mehrere positiv geladene Teilchen, die sehr eng beieinander sind. Wenn wir nun das Prinzip der elektromagnetischen Kraft, die besagt, dass gleiche Ladungen sich abstoßen, in Betracht ziehen stellen wir uns jetzt eine Frage: Warum können im Atomkern mehrere positiv geladene Teilchen auf engstem Raum beieinander liegen, ohne sich abzustößen?

Es muss eine weitere Kraft geben, die im Atomkern wirkt. Die Rede ist von der starken Kernkraft. Sie wirkt entgegen der elektromagnetischen Kraft und den sich abstoßenden positiven Ladungen im Kern und hält diesen zusammen.

In manchen Atomkernen können sich Protonen und Neutronen ineinander verwandeln. Dies führt fast immer zum radioaktiven Zerfall. Dafür sorgt die schwache Kernkraft. Diese wirkt nur innerhalb der einzelnen Nukleonen im Atomkern und hat damit eine sehr geringe Reichweite.

Die Bindungsenergie beschreibt die Energie, die ein Atom braucht, um sich zu bilden und die auch wieder frei wird, sobald das Atom in seine Einzelteile zerfällt. Weil bei der Zusammensetzung von Teilchen zu einem Atom Energie frei wird, muss die Bindungsenergie insgesamt kleiner sein, als die Energie der Einzelteile. Wenn wir nun Einsteins berühmte Formel $E = m c^2$ betrachten fällt auf, dass wenn die Energie E kleiner wird, die Masse m auch kleiner werden muss. (Da c eine Konstante ist muss diese nicht beachtet werden.) Also ist nicht nur die Energie der Einzelteile kleiner als das Zusammengesetzte, sondern auch die Masse. Dies nennt man den Massendefekt(vgl.[2] S.20-34).

3 Brennphasen

Die stellare Nukleosynthese läuft in mehreren Schritten ab. Diese werden Brennphasen genannt. Durch sie entstehen sowohl die verschiedenen Elemente, als auch die Energie der Sterne. Je größer ein Stern ist, desto weiter kommt er in der Brennphase, aber desto kürzer ist auch seine Lebenszeit. Weil mit einer höheren Masse, auch die Gravitation erhöht wird. Die verschiedenen Brennphasen werden in der Abbildung dargestellt und sind folgende:

1. Wasserstoffbrennen
2. Heliumbrennen
3. Kohlenstoffbrennen
4. Neonbrennen
5. Sauerstoffbrennen
6. Siliziumbrennen

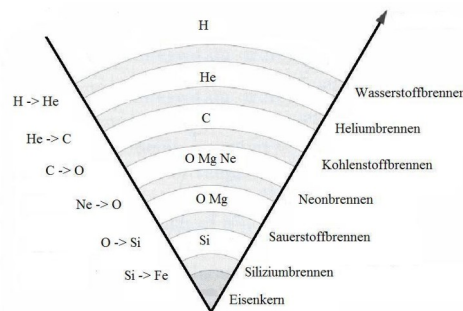


Abbildung 1: Brennphasen

Wichtig zu wissen ist, dass die Brennphasen nacheinander erfolgen. Das heißt, dass zum Beispiel das Heliumbrennen erst beginnt, wenn die Phase des Wasserstoffbrennens vollständig beendet ist.

In der Phase des Wasserstoffbrennens wird Wasserstoff zu Helium umgewandelt. Dabei ist wichtig zu verstehen, dass es mehrere Reaktionen gibt, wie H in He umgewandelt werden könnte. Sie sind alle möglich, jedoch sind einige wahrscheinlicher als andere. Welche Reaktion am wahrscheinlichsten ist hängt wiederum von Faktoren wie zum Beispiel der Temperatur ab. Solche unterschiedliche Reaktionswege gibt es natürlich auch innerhalb der anderen Brennphasen(vgl.[3]).

Weil diese Ausarbeitung sonst zu umfangreich wäre, befasse ich mich hier nur mit der jeweils wahrscheinlichsten Reaktion.

Im Folgenden werden die verschiedenen Brennphasen einzeln betrachtet und erklärt.

3.1 Wasserstoffbrennen

Die erste Brennphase der Sterne ist das Wasserstoffbrennen. Sie dauert von allen Brennphasen am längsten², weshalb die meisten Sterne, die wir am Nachthimmel beobachten können sich in dieser Phase befinden. Auch die Sonne ist eine von ihnen.

Im Wesentlichen ist das Wasserstoffbrennen die Kernfusion von Wasserstoff zu Helium. Bei dieser Fusion wird eine große Menge an Energie frei.

Das Wasserstoffbrennen erfolgt hauptsächlich durch die Proton-Proton-Kette und den CNO-Zyklus³. Im Folgenden wird ausschließlich der Prozess der Proton-Proton-I-Kette und des CNO-I-Zyklus erläutert. Da diese am häufigsten vorkommen und damit am wichtigsten sind.

Die in Abb 2 dargestellte pp-Kette, veranschaulicht diesen Prozess. Der Ausgangspunkt sind vier H-Atome, die in vier Protonen und Elektronen zerlegt sind. Als erstes fusionieren zwei Protonen zu einem Deuteriumkern. Bei der Umwandlung von einem Proton in ein Neutron wird ein Positron und ein Elektron-Neutrino frei. Dann verschmilzt ein weiteres Proton mit dem Deuteriumkern zu einem Heliumkern ^3He . Dabei wird ein Gammaquant⁴ abgegeben. Zuletzt fusionieren zwei ^3He -Kerne zu einem ^4He -Kern, wobei zwei Protonen frei werden.

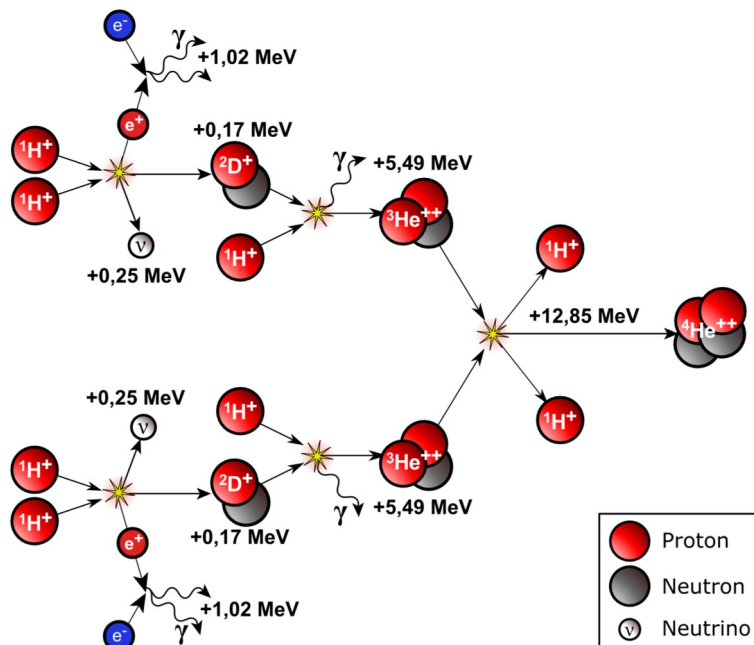


Abbildung 2: Proton-Proton-Kette

² Etwa 10 Millionen Jahre

³ Bethe-Weizsäcker-Zyklus

⁴ Photon, welches Gammastrahlung zugrunde liegt

Des Weiteren beschäftigen wir uns mit dem CNO-Zyklus. Wie der Name schon sagt spielen die Elemente Kohlenstoff C, Stickstoff N und Sauerstoff O eine besondere Rolle. Sie fungieren als Katalysatoren und kommen nach dem Zyklus unverändert hervor.

In der Abbildung wird der Prozess veranschaulicht. Der Zyklus beginnt bei ^{12}C . Dann fusioniert der ^{12}C -Kern mit einem Proton zu einem N-Kern. So entsteht das instabile Isotop ^{13}N und ein Gammaquant wird abgegeben. Daraufhin zerfällt der ^{13}N -Kern zu einem ^{13}C -Kern. Ein Proton wird, unter Freisetzung eines Positrons und eines Elektron-Neutrinos, in ein Neutron umgewandelt. Danach fusioniert der ^{13}C -Kern mit einem weiteren Proton, unter Freisetzung eines Gammaquanten, zu ^{14}N . Dann fusioniert der ^{14}N -Kern erneut mit einem weiteren Proton, unter Freisetzung eines Gammaquanten, zum instabilen Isotop ^{15}O . Dieses zerfällt zu ^{15}N , wobei ein Positron und ein Elektron-Neutrino frei werden. Zuletzt fusioniert der ^{15}N -Kern mit einem weiteren Proton, sodass es zu einem ^4He -Kern und einem ^{12}C -Kern zerfällt. Damit ist der Zyklus beendet und aus 4 H-Kernen ist ein He-Kern entstanden. Der ^{12}C -Kern kann nun einen neuen Zyklus beginnen.

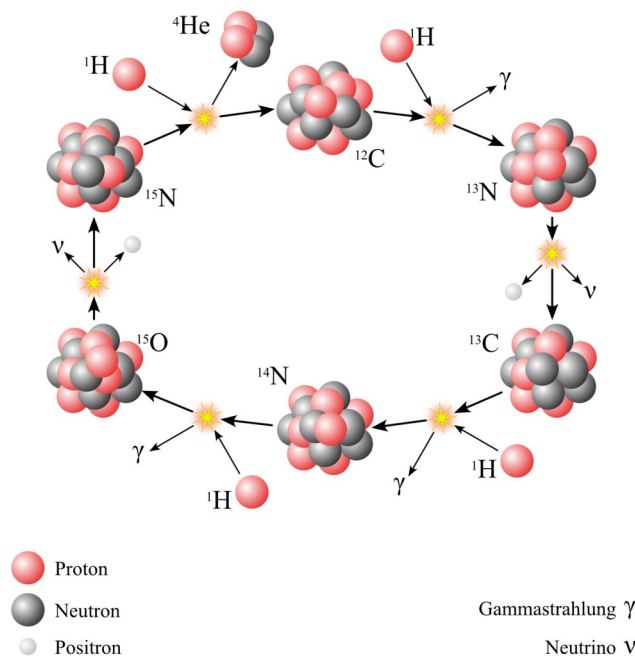


Abbildung 3: CNO-Zyklus

Der CNO-Zyklus und die Proton-Proton-Kette sind die zwei Hauptprozesse in Sternen, die H in He umzuwandeln. Doch welcher von den Prozessen dominiert?

Es gibt verschiedene Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit ein Prozess ablaufen kann. Die Proton-Proton-Kette läuft bei Temperaturen von 4-7 Millionen K und in Sternen mit einer kleineren Masse ab. Außerdem benötigt sie keine weiteren Elemente wie Kohlenstoff, Sauerstoff, usw. In unserer Sonne findet deshalb hauptsächlich die Proton-Proton-Kette statt.

Der CNO-Zyklus ereignet sich hingegen in eher massereichen Sternen bei Temperaturen von 18-20 Millionen K. Er ist außerdem viel temperaturabhängiger. Bei einer kleinen Temperaturerhöhung steigt die Energieproduktion um 7 Größeneinheiten (10^7). Des Weiteren benötigt er die Elemente Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff als Katalysatoren. In unserer Sonne kommt der CNO-Zyklus eher seltener vor(vgl.[4] S.101-108,[5],[6]).

3.2 Heliumbrennen

Zu diesem Zeitpunkt ist der Wasserstoff zum größten Teil zu Helium fusioniert. Der Stern liegt nun der Gravitation zu Grunde und zieht sich zusammen. Dadurch wird die Temperatur und Dichte erhöht. Wenn die Dichte und Temperatur groß genug⁵ sind, kommt es zum Heliumbrennen. Sie beschreibt die 2. Brennphase und wird auch Tripel-Alpha-Prozess oder Salpeter-Prozess⁶ genannt. Hierbei wird aus drei Alpha-Teilchen⁷ ein Kohlenstoff-Kern gebildet.

Zunächst müssen zwei Alpha-Teilchen zu einem ${}^8\text{Be}$ -Kern fusionieren⁸. Da dieser allerdings sehr instabil ist, zerfällt er innerhalb eines kurzen Zeitraums wieder. Aus diesem Grund ist es umso wichtiger, dass kurz nach der Entstehung des ${}^8\text{Be}$ -Kerns ein weiteres Alpha-Teilchen mit ihm zu ${}^{12}\text{C}$ fusioniert. Sowohl bei der Fusion zu ${}^8\text{Be}$, als auch bei der Fusion zu ${}^{12}\text{C}$ wird jeweils ein Gammaquant⁹ freigesetzt. Die Reaktion von den zwei Alpha-Teilchen zum ${}^8\text{Be}$ -Kern ist endotherm und nach dem Prinzip von Le Chatelier¹⁰ eine Gleichgewichtsreaktion.

Das bedeutet, dass bei einer Temperaturerhöhung die Hinreaktion von den beiden Alpha-Teilchen zum ${}^8\text{Be}$ -Kern wahrscheinlicher als die Rückreaktion¹¹ ist.

Deshalb entstehen bei einer Temperaturerhöhung größere Mengen ${}^{12}\text{C}$.

5 Über 100 Millionen K

6 Nach dem Entdecker Edwin Salpeter

7 Heliumkerne

8 Siehe Abbildung 4

9 In Abb. 4 als Gammastrahlung dargestellt

10 Prinzip vom kleinsten Zwang, nach Henry Le Chatelier

11 Der Zerfall des Berylliumkerns

Die Dauer des Heliumbrennens beträgt ungefähr 1 Millionen Jahre und ist damit die zweitlängste Brennphase(vgl.[7], [4] S. 108-110, [8]).

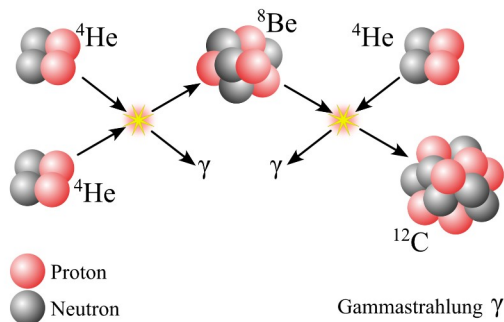
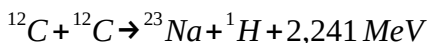


Abbildung 4: Tripel-Alpha-Prozess

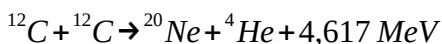
3.3 Kohlenstoffbrennen

Nun beginnt mit der 3. Brennphase das Kohlenstoffbrennen. Dabei wird der vorher entstandene Kohlenstoff als Edukt für die neue Reaktion verwendet. Ähnlich wie beim Heliumbrennen kontrahiert der Stern solange, bis die Temperatur und Dichte so hoch sind, dass das Kohlenstoffbrennen einsetzt. Beim Kohlenstoffbrennen gibt es mehrere mögliche Reaktionen, allerdings kommen zwei besonders häufig vor. Der Proton-Kanal¹² und der Alpha-Kanal¹³.

Beim Proton-Kanal fusionieren zwei ^{12}C -Kerne zu einem ^{23}Na -Kern und einem Proton.



Beim Alpha-Kanal fusionieren zwei ^{12}C -Kerne zu einem ^{20}Ne -Kern und einem Alpha-Teilchen.



Beide Reaktionen sind exotherm und setzen dementsprechend eine große Menge an Energie frei. Die freigesetzten Protonen und Alpha-Teilchen sind der

¹² Weil u.a. ein Proton entsteht

¹³ Weil u.a. ein Alphateilchen (Heliumkern) entsteht

Grund für eine Vielzahl an anderen Reaktionen mit den ^{12}C -Kernen und weiteren Produkten des Kohlenstoffbrennens.

Das Kohlenstoffbrennen ist nur bei massereichen Sternen mit einer Ausgangsmasse von mehr als 9 Sonnenmassen möglich. Bei diesen beträgt die Dauer des Brennens nur wenige 10 000 Jahre(vgl.[9]).

3.4 Neonbrennen

Wie auch bei den vorherigen Brennvorgängen setzt das Neonbrennen erst ein, wenn der gesamte Kohlenstoff im Stern fusioniert ist. Dann unterliegt der Stern wieder der Gravitation und wird auf eine höhere Dichte und Temperatur¹⁴ komprimiert. Unter diesen Bedingungen wird ein ^{20}Ne -Kern durch ein Gammaquant in ein ^{16}O -Kern und ein ^4He -Kern gespalten. Dieser Vorgang wird als Photodesintegration¹⁵ bezeichnet.

Außerdem ist die Reaktion, anders als die vorherigen, endotherm.

Daraufhin reagiert ein weiterer ^{20}Ne -Kern mit dem zuvor entstandenen Alpha-Teilchen zu einem ^{24}Mg -Kern. Dabei wird ein Gammaquant freigesetzt, sodass diese Reaktion wieder exotherm ist.

Die Dauer dieser Brennphase ist im Vergleich zu den Vorgängern kürzer. Bei massereichen Sternen¹⁶ dauert sie nur etwa 10 Jahre an. Damit es überhaupt zum Neonbrennen kommen kann, muss der Stern eine Ausgangsmasse von mindestens 10 Sonnenmassen besitzen(vgl.[10]).

3.5 Sauerstoffbrennen

Nachdem auch hier wieder das gesamte Neon aufgebraucht ist und der Stern eine Temperatur von mindestens $1,5 \cdot 10^9$ K und eine Dichte von mindestens $10^{10} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Diese Werte kommen nur in Sternen zustande, die eine Ausgangsmasse von mindestens 8 bis 10 Sonnenmassen hatten. Die durchschnittliche Dauer des Sauerstoffbrennens beträgt etwa 5 Jahre und ist damit noch kürzer, als die vorherigen Brennphasen.

14 ca. 1,5 Milliarden K

15 Bezeichnet die durch den Stoß eines Photons ausgelöste Kernreaktion, wobei ein Alpha-Teilchen (/Proton/Neutron) frei wird

16 Mehr als 10 Sonnenmassen

Nun kommen wir zum eigentlichen Prozess, der sich beim Sauerstoffbrennen abspielt. Wie bei den anderen Brennphasen auch, gibt es hier mehrere mögliche Reaktionswege, hier beschäftigen wir uns allerdings nur mit den wahrscheinlichsten.

Beim Sauerstoffbrennen gibt es zwei Reaktionen, die sehr häufig vorkommen. Bei der ersten Reaktion fusionieren zwei ^{16}O -Kerne zu einem ^{31}P -Kern. Dabei wird auch ein Proton freigegeben.

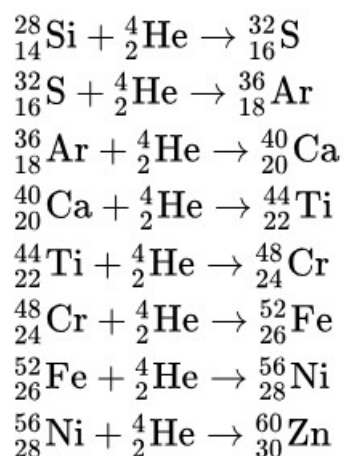
Auch bei der zweiten Reaktion fusionieren zwei ^{16}O -Kerne, jedoch bildet sich ein ^{28}Si -Kern und ein Alpha-Teilchen.

Die abgespaltenen Alpha-Teilchen und Protonen können daraufhin selbst Reaktionen mit den anderen Atomkernen eingehen und somit neue Atomkerne bilden. Beide der oberen Reaktionen sind exotherm(vgl.[11]).

3.6 Siliciumbrennen

Jetzt ist der ganze Sauerstoff verbrannt. Der Stern kann der Gravitation nicht mehr standhalten und kontrahiert. Eine noch höhere Temperatur und Dichte entstehen. Die letzte Brennphase, das Siliciumbrennen, beginnt. Sie wird nur von sehr massereichen Sternen erreicht. Die Dauer des Siliciumbrennens ist mit etwa einer Woche am geringsten.

Da die Coulombbarriere hier zu hoch ist, können zwei Siliciumkerne nicht direkt miteinander fusionieren. Stattdessen dominiert die Photodesintegration¹⁷. Dabei gehen die Siliciumkerne mit den freien (bspw.) Alpha-Teilchen eine Reaktion ein, bei der verschiedene schwere Elemente entstehen können. Beispiele dafür, sehen wir in der folgenden Abbildung.



¹⁷ Siehe Neonbrennen

Abbildung 5: beispielhafte Reaktionen schwerer Elemente

Bei den ganzen Reaktionen bilden sich große Mengen an Nickel-56, da dieses die höchste Bindungsenergie bei gleicher Anzahl an Protonen und Neutronen im Kern besitzt. Allerdings ist Nickel-56 radioaktiv und zerfällt deshalb durch den Beta-Plus-Zerfall zu Eisen-56. Nun ist das Ende der Siliciumbrennphase erreicht und es reichert sich immer mehr Eisen, als Reaktionsprodukt, im Kern des Sterns an. Der Eisen-Kern wird gebildet. Wenn dieser eine Masse von etwas 1,26 Sonnenmassen erreicht hat, kann er dem Gravitationsdruck nicht mehr standhalten und kollabiert. Die Folge kann eine Supernova, ein Neutronenstern oder ein schwarzes Loch sein(vgl.[12]).

4 Eisen-Grenze

Nun kann man sich die Frage stellen: Warum hört der Prozess bei Eisen einfach auf? Es gibt doch noch andere/schwerere Elemente, die entstehen müssen.

Diese Frage ist durchaus berechtigt und ich werde versuchen sie im Folgenden zu beantworten.

Bei der stellaren Nukleosynthese wird zwischen den Elementen, die schwerer und leichter als Eisen sind unterschieden. Die Elemente, die leichter als Eisen sind, haben eine immer höher werdende Bindungsenergie pro Nukleon. Sie entstehen also durch exotherme Reaktionen in Sternen. Das heißt, bei ihrer Bildung wird Energie frei. Eisen selbst hat die höchste Bindungsenergie pro Nukleon. Das bedeutet, dass die Elemente, die schwerer als Eisen sind, durch endotherme Reaktionen entstehen. Sie können sich dementsprechend nur unter Energiezufuhr bilden. Die Elemente, die schwerer als Eisen sind, entstehen also unter anderen Bedingungen und durch andere Prozesse(vgl.[4] S.112-113).

5 Fazit

Zusammenfassend kann man sagen, dass die meisten Elemente durch Kernfusion entstehen. Sie werden in den einzelnen Brennphasen der Sterne gebildet. Wie viele Brennphasen ein Stern durchlaufen kann, hängt stark mit seiner Anfangsmasse zusammen. Je massereicher der Stern ist, desto mehr Brennphasen kann er durchlaufen. Allerdings sinkt mit dem Anstieg der Masse auch seine Lebenszeit(vgl. Kap.3).

Die Dauer der einzelnen Brennphasen nimmt ab, je fortgeschrittener die Brennphase ist. Das bedeutet, dass die Phase des Wasserstoffbrennens am längsten dauert. Am zweitlängsten dauert das Heliumbrennen, dann das Kohlenstoffbrennen usw. Sodass die meisten Sterne, die wir beobachten, sich in der Phase des Wasserstoffbrennens befinden.

Die Reaktionen, die sich in den Brennphasen abspielen, sind insgesamt exotherm. Durch sie gewinnt der Stern die für ihn nötige Energie.

Abschließend kann man sagen, dass Carl Sagan mit seiner Aussage recht hatte(vgl. Kap.1). Zwar klingt sie auch poetisch, aber im Wesentlichen stimmt sie. Die meisten Elemente unseres Universums entstehen in Sternen. So auch die, aus denen wir und alles um uns herum besteht. Ohne Sterne wäre unser Leben, so wie wir es heute kennen, nicht möglich.

6 Literaturverzeichnis

- [1]Sabater, V. (2023, 25. April). Wir sind Sternenstaub: Wir sind zum Leuchten gemacht. *Gedankenwelt*. <https://gedankenwelt.de/wir-sind-sternenstaub-wir-sind-zum-leuchten-gemacht/> (online)
- [2]Lesch, Harald, Universum für Neugierige, Vom Urknall bis heute, München, 2017
- [3]Wikipedia-Autoren. (2010, 19. Mai). *Schalenbrennen*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Schalenbrennen> (online)
- [4]Oberhummer, H., Sterne und Kerne, Einführung in die Nukleare Astrophysik, Leipzig, 1993
- [5]Sternentstehung.de. (2018, 14. Mai). *Von Wasserstoff zu Helium: der CNO-Zyklus*. <https://sternentstehung.de/von-wasserstoff-zu-helium-der-cno-zyklus> (online)
- [6]Sternentstehung.de. (2018a, Mai 7). *Von Wasserstoff zu Helium: die PP-Kette*. <https://sternentstehung.de/von-wasserstoff-zu-helium-die-pp-kette> (online)
- [7]Wikipedia-Autoren. (2003, 3. Dezember). *Drei-Alpha-Prozess*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Drei-Alpha-Prozess> (online)
- [8]Sternentstehung.de. (2018c, Mai 27). *Von Helium zu Kohlenstoff: der Drei-Alpha-Prozess*. <https://sternentstehung.de/von-helium-zu-kohlenstoff-der-drei-alpha-prozess> (online)
- [9]Wikipedia-Autoren. (2005, 24. April). *Kohlenstoffbrennen*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffbrennen> (online)
- [10]Wikipedia-Autoren. (2005b, April 30). *Neonbrennen*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Neonbrennen> (online)
- [11]Wikipedia-Autoren. (2005c, Mai 6). *Sauerstoffbrennen*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Sauerstoffbrennen> (online)
- [12]Wikipedia-Autoren. (2005d, Dezember 18). *Siliciumbrennen*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Siliciumbrennen> (online)

Sämtliche Quellen wurden zuletzt aufgerufen am: 01.03.2026.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Brennphasen (Schalenbrennen - Schalenbrennen – Wikipedia).....	3
Abbildung 2: Proton-Proton-Kette (Proton-Proton-I-Kette LEIFIphysik).....	4
Abbildung 3: CNO-Zyklus (BETHE-WEIZSÄCKER-Zyklus LEIFIphysik).....	5
Abbildung 4: Tripel-Alpha-Prozess (Triple-Alpha Process - Drei-Alpha-Prozess – Wikipedia).....	7
Abbildung 5: beispielhafte Reaktionen schwerer Elemente (Siliciumbrennen – Wikipedia).....	9

Versicherung der selbständigen Erarbeitung und Anfertigung der Facharbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und die Stellen der Facharbeit, die im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt aus anderen Werken (auch aus dem Internet) entnommen wurden, mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Verwendete Informationen aus dem Internet sind nach Absprache mit der Fachlehrerin bzw. dem Fachlehrer vollständig im Ausdruck zur Verfügung zu stellen.

Bramsche, den

Unterschrift der Schülerin / des Schülers

Einverständniserklärung zur Veröffentlichung

Hiermit erkläre ich, dass ich damit einverstanden bin, wenn die von mir verfasste Facharbeit der schulinternen Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird.

Bramsche, den

Unterschrift der Schülerin / des Schülers