

Heinrich Heine Gymnasium

Facharbeit  
aus dem Fach  
Chemie

Thema:  
**Die Entstehung der Elemente**



Verfasser: Stefan Paßvogel

Kursleiter: Herr Grahnert

Erzielte Note: ..... in Worten: .....

Erzielte Punkte: ..... in Worten: .....

abgegeben beim Kollegstufenbetreuer: .....

.....

Unterschrift des Kursleiters

## Inhaltsverzeichnis

	Seite:
1. Die Entwicklungsgeschichte der Materie.....	3
2. Die Elemente und deren Verteilung.....	4
2.1 Übersicht über die bekannten Elementarteilchen.....	4
2.2 Häufigkeitsverteilung der Elemente im Weltall.....	6
3. Die Entstehung der Elemente.....	8
3.1 Der Urknall (Primordiale Nukleosynthese).....	8
3.1.1 Quarkära.....	10
3.1.2 Hadronenära.....	11
3.1.3 Leptonenära.....	12
3.1.4 Photonenära.....	12
3.1.5 Nukleonenära.....	13
3.2 Die Entstehung der ersten Sterne.....	14
3.2.1 Dichtefluktuatation.....	14
3.2.2 Der Gravitative Kollaps.....	15
3.3 Fusionsreaktionen zwischen geladenen Partikeln .....	16
3.3.1 Wasserstoffverbrennung.....	16
3.3.2 Zyklus der Heliumverbrennung.....	18
3.3.3 Verbrennung von Helium und Bildung von Kohlenstoff.....	19
3.3.4 Die Verbrennung des Kohlenstoffes.....	20
3.3.5 Zyklus der Verbrennung von Sauerstoff.....	20
3.3.6 Prozesse der Photodesintegration.....	21
3.4 Reaktionen der Neutronen-Absorbation.....	25
3.5 Das Leben des Sterns.....	27
3.6 Die verschieden Stern-Typen.....	28
3.7 Schalentheorie der Atomkerne.....	34
3.8 Rückführungen auf die Elementarverteilung im Universum..	36
4. Zukünftige Elementarverteilung im Universum.....	37

## 1. Die Entwicklungsgeschichte der Materie

*„In Wirklichkeit erkennen wir nichts; denn die Wahrheit liegt in der Tiefe.“  
(Fragment 117, Demokrit von Abdera ~ 460 - 371 v.Chr.)*

Als der griechische Philosoph Demokrit von Abdera vor ungefähr 2400 Jahren seine Lehren über die Erscheinungen dieser Welt schuf, führte er die ganze Vielfalt des Lebens auf nur zwei Grundbestandteile zurück: den leeren Raum und die Atome. Die Atome waren die letzten, nicht weiter teilbaren (gr.: Atomos = unteilbar) Bausteine aller Dinge – der materiellen wie der seelischen.

Als im siebzehnten Jahrhundert schließlich die empirische Chemie aus der Alchemie hervorging, führte sie zunächst die kaum überschaubare Mannigfaltigkeit dieser Welt auf 92 Elemente zurück. Diese 92 Grundelemente konnten unzählige Verbindungen miteinander eingehen, Moleküle bilden, aus denen die Vielfalt der Dinge hervorging. Damit bestätigte sich die Vorstellung des griechischen Denkers auf verblüffende Weise.

Bis zur Jahrhundertwende galt es als unumstößliche Tatsache, dass die 92 Atomarten - die Elemente - die letzten unteilbaren Atome im Sinne von Demokrit waren.

Erst 1898 ging mit der Entdeckung der natürlichen Radioaktivität durch das Ehepaar Pierre und Marie Curie ein Aufschrei durch die Welt der Physiker: Es gab also Elemente, die von allein - unter Aussendung von Strahlen - in andere zerfallen. Eine unaufhaltsame Flut neuer Entdeckungen setzte nun ein, die zunächst zum Bohrschen Atom-Modell führten. In diesem besteht ein Atom aus einem Kern, um den – je nach Elementart – eine bestimmte Anzahl von Elektronen kreist. Schon bald darauf schuf Max Planck seine fundamentale Theorie der Strahlung. Sie handelt von der Vorstellung, dass Energie nur in Form scharf definierter Mengen, den Quanten oder „Energiepaketen“, wie man sie plastisch nannte, auftreten kann. Einstein wies dann nach, dass Masse und Energie

zueinander äquivalent sind und somit das eine jeweils nur eine Erscheinungsform des anderen ist. Nun kam Bewegung in die Physik.

## **2. Die Elemente und ihre Verteilung**

Anfang des 20. Jahrhunderts entdeckte man, dass Atome aus einem Atomkern - bestehend aus Nukleonen - und einer Hülle - bestehend aus Elektronen - aufgebaut sind.

Nach der Entdeckung der Teilchen, aus welchen das Atom aufgebaut ist, wurden eine Vielzahl weiterer Teilchen – zunächst hauptsächlich in der kosmischen Strahlung – (beispielsweise Myonen, Pion oder Kaon) sowie die Antimaterie entdeckt. Außerdem entdeckte man, dass selbst die als unteilbar geltenden Nukleonen aus Quarks bestehen.

Als Ergebnis dieser Entdeckungen entwickelte man das Standardmodell der Elementarteilchenphysik. Es enthält alle Teilchen, die aus heutiger Sicht als Elementarteilchen gelten.

### **2.1 Übersicht über die bekannten Elementarteilchen**

Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik beschreibt die bekannten Elementarteilchen und drei der vier elementaren Wechselwirkungen (Elektromagnetische (Ei.K), Schwache (S.K) und Starke Wechselwirkung (St.K)) sowie die Masse, Ladungen und weitere Eigenschaften der Elementarteilchen. Für die Gravitative Wechselwirkung (G) vermutet man das so genannte Higgs-Boson als Verursacher.

Die baryonische<sup>1</sup> Materie gliedert sich in die Leptonen und Hadronen.

Zu den Leptonen gehören die 4 Eichbosonen, welche Überträger der vier Wechselwirkungen sind und andere Leptonen:

---

<sup>1</sup> Der Teil der Materie, welcher aus Atomen aufgebaut ist, im Gegensatz zu Dunklen Materie.

Leptonen <sup>1</sup>							
Name	Symbol	Ruhemasse	Spin	Wechselwirkung			
Elektron	e <sup>-</sup>	0,51	1/2				
Myon	μ <sup>-</sup>	105,65	1/2				
e-Neutrino	ν <sub>e</sub>	0	1/2				
μ-Neutrino	ν <sub>μ</sub>	0	1/2				
ν-Neutrino	ν <sub>ν</sub>	0	1/2				
		in MeV	1/2=Fermionen	El.K.	St.K.	S.K.	G.

Eichsbosonen <sup>2</sup>							
Name	Symbol	Ruhemasse	Spin	Wechselwirkung			
Photon	γ	0	1				
W <sup>+</sup> -/W <sup>-</sup> -/Z <sup>0</sup> -Boson	W <sup>+</sup> /W <sup>-</sup> /Z <sup>0</sup>	ca. 80/80/91	1				
Gluonen	g	0	1				
Higgs-Boson(?)		(114,4-250)	1				
		in GeV		El.K.	St.K.	S.K.	G.

(?) Das Higgs-Boson wurde bisher noch nicht nachgewiesen

Die Teilchen der Gruppe der Hadronen sind aus Quarks aufgebaut. Es gibt 6 verschiedene Quarks (+ 6 Antiquarks), die zum Beispiel zu dritt (2x up-Quarks, 1x down-Quark) ein Proton bilden.

Quarks <sup>3</sup>							
Name	Symbol	Ladung	Masse	Wechselwirkung			
up	u	+2/3	0,0015 bis 0,004				
down	d	-1/3	0,004 bis 0,008				
charm	c	+2/3	1,15 bis 0,008				
strange	s	-1/3	0,08 bis 0,14				
top	t	+2/3	144,3+- 5,1				
bottom	b	-1/3	4,1 bis 4,4				
			in GeV	El.K.	St.K.	S.K.	G.

Die Gruppe der Hadronen kann man außerdem noch in die Mesonen und die Baryonen unterteilen, wobei letztere noch in die Nukleonen (Proton und Neutron) und die Hyperonen zu unterteilen sind.

<sup>1</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Elementarteilchen>

<sup>2</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell>

<sup>3</sup> [http://de.wikipedia.org/wiki/Quark\\_\(Physik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Quark_(Physik))

## 2.2 Häufigkeitsverteilung der Elemente im Weltall

Auf unserer Erde gibt es 90 chemische Elemente in ihrem natürlichen Zustand (Ein natürliches Element ist dadurch gekennzeichnet, dass sich so viele Elektronen um den Kern gruppieren, wie der Kern Protonen hat). Das chemische Verhalten eines Elements richtet sich nach der Anzahl seiner Protonen. Wenn zwei Atomkerne die gleiche Anzahl an Protonen, aber eine abweichende Zahl an Neutronen haben, haben sie die gleichen chemischen Eigenschaften, aber unterscheiden sich in ihrer Masse und Stabilität. Ein solches Atom wird als Isotop bezeichnet. Auf der Erde treten die Elemente zum Beispiel in 272 stabilen und 55 instabilen Isotopen auf. Insgesamt sind bisher 115 Elemente in der Natur beobachtet oder künstlich nachgewiesen worden.<sup>1</sup> Die folgenden Graphen zeigen eine Übersicht der Elementarverteilung im Universum:

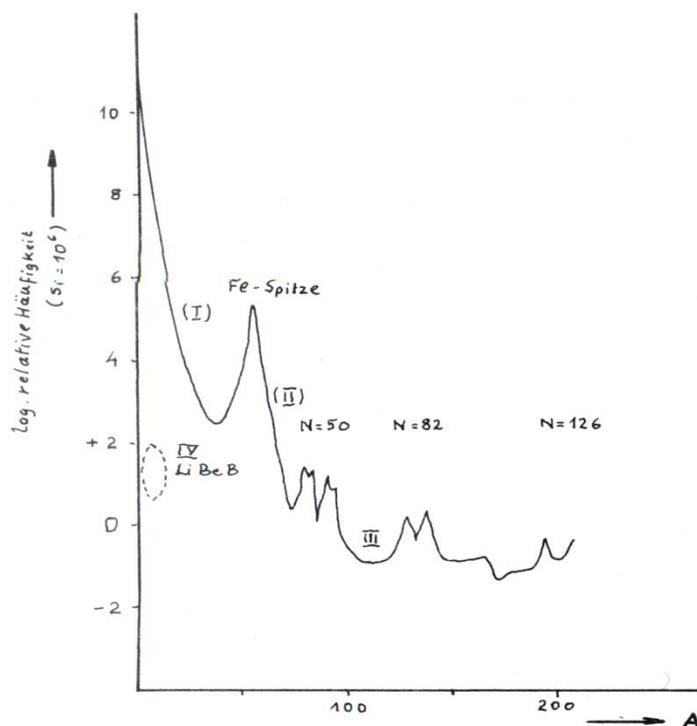


Abb. 1: Universelle Elementarhäufigkeit in Abhängigkeit der Massezahl A (in logarithmischem Maß mit  $Si=10^6$ ) (Nach Suess, Urey, 1956. Die Arbeit von Suess, beruht überwiegend auf Daten der Sonne und des Planetensystems, d.h. Meteoriten und irdischen Proben<sup>2</sup>)

<sup>1</sup> Audouze, Jean; Die Entstehung der Elemente: Einführung in die Nuklear-Astrophysik; 1. Auflage; Deutschland: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH; 1972; S.21, Z.14

<sup>2</sup> Audouze, Jean; 1972

- Zone I: Die Häufigkeit fällt vom Wasserstoff ( $A=1$ ) bis etwa zum Chrom ( $A=50$ ) beinahe zehn Größenordnungen steil ab.
- Zone II: Von der Massezahl 50 bis etwa 85 steigt die Häufigkeit um etwa vier Größenordnungen steil an, hat bei Eisen ( $A=56$ ) ihr Maximum, und fällt anschließend bis zu  $A=85$  wieder um sechs Größenordnungen steil ab. Dieser Bereich wird oftmals als Eisenspitze bezeichnet.
- Zone IV: Die Gruppe der Leichten Elemente: Lithium, Beryllium, Bor, die eine auffallend hohe Häufigkeit besitzen.

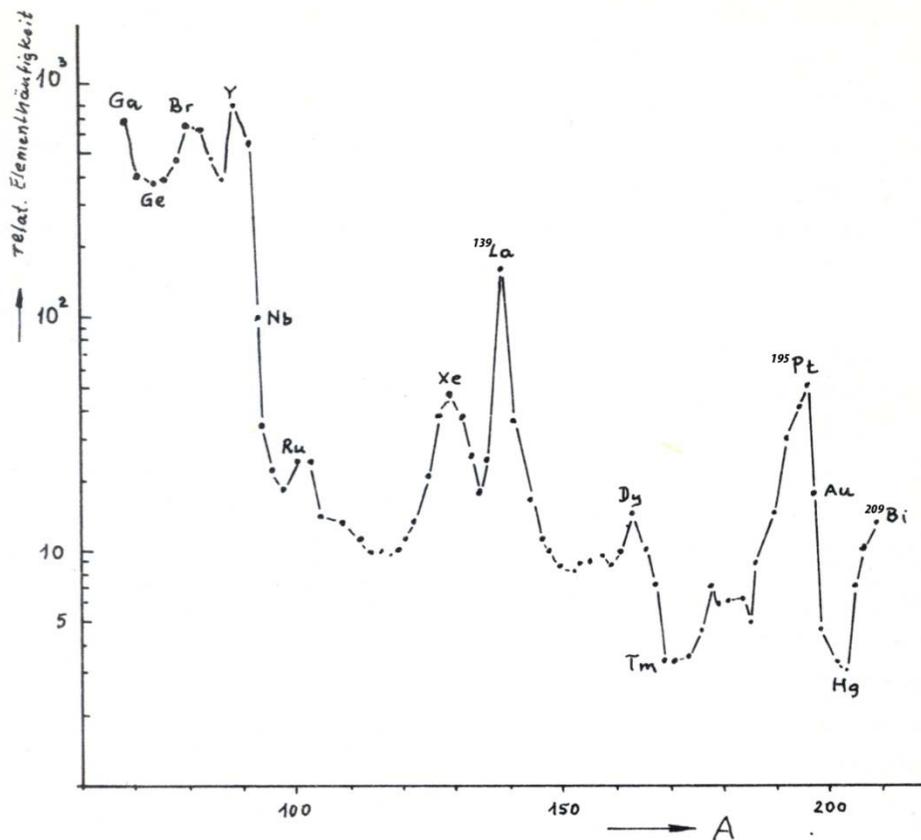


Abb. 2: Relative Elementarhäufigkeit der schweren Elemente<sup>1</sup>

- Zone III: Die sogenannten Schweren Elemente (von  $A=86$  bis  $A=205$ ), sind dadurch gekennzeichnet, dass sie relativ mehr Neutronen als Protonen enthalten. Eine detaillierte Ansicht zeigt Maxima bei  $^{139}\text{Lanthan}$ ,  $^{195}\text{Platin}$  und  $^{209}\text{Bismut}$  auf.

<sup>1</sup> Audouze, Jean; 1972

### 3. Die Entstehung der Elemente

Nach der Revolution der Physik im 20. Jahrhundert beschäftigte sich die Astronomie vor allem mit der Frage: Woher stammen die gewaltigen Energiemengen, die von den Sternen abgestrahlt werden?

Diese Frage blieb noch bis nach dem zweiten Weltkrieg offen bleiben. Nach der Entdeckung der Kernspaltung und der Kernfusion, wurde den Nuklear-Astrophysikern bewusst, dass die Energie bei der Fusion der Elemente in Sternen entsteht. Nur die leichtesten Elemente wurden schon vor der Geburt der Sterne - bei der Entstehung des Weltalls selbst - geschaffen.

#### 3.1 Der Urknall (Primordiale Nukleosynthese)

*„Wenn die Zeit fließen und durch keine Abschnitte gegliedert würde, könnten die Zeiten zwar fließen und vorübergehen, aber sie könnten von den Menschen nicht verstanden und unterschieden werden.“ (Augustinus 354 - 430 n. Chr)<sup>1</sup>*

Planeten, Sterne, Galaxien - und der Kosmos als Ganzes - unterliegen einem Entwicklungsprozess, denn der Weltraum expandiert. Aus einem extrem komprimierten, heißen und dichten Anfangszustand entwickelten sich Galaxien, Sterne und Planeten. Die Urknalltheorie beschreibt diesen Vorgang der Expansion im frühen Kosmos. Alle Theorien, die einen Anfang des Weltalls bestreiten, stoßen in ihren Einzelheiten auf Widersprüche mit astrophysikalisch gesicherten Beobachtungen (z.B. der Rotverschiebung und der kosmologischen Mikrowellenhintergrundstrahlung). Aus einer Reihe astronomischer Beobachtungen lässt sich heute abschätzen, dass das Universum seinen Anfang vor 13,7 +/- 0,2 Milliarden Jahre hatte. Seit diesem Zeitpunkt dehnt sich das Universum aus.

---

<sup>1</sup> Blome, Hans-Joachim; Zaun, Harald: Der Urknall: Anfang und Zukunft des Universums; 2. Auflage; Deutschland: Beck Verlag; 2004; S. 60

Die Energie aller im jeweiligen momentanen Gleichgewicht befindlichen Teilchen betrug anfänglich  $E=10^{19}$  GeV. Da dieser Betrag weit über der doppelten Ruhemasse aller Teilchen lag, konnten sie sich frei ineinander umwandeln.<sup>1</sup>

$$E \rightarrow X + X^*$$

$$X + X^* \rightarrow E$$

Die Paarzeugung ist physikalisch nur möglich, wenn die beteiligten Teilchen in der Lage sind die Ruheenergie  $E=2mc^2$  des entsprechendem Materie-Antimaterie-Paares mit Ruhemasse  $2m$  aufzubringen.

Drückt man diese Energieforderung durch eine äquivalente Temperatur gemäß  $kT = hv = 2mc^2$  aus, so folgt, dass für die Erzeugung von einem Proton-Antiproton-Paar eine Minimalenergie von 1 GeV, d.h. ca.  $10^{13}$ K erforderlich ist.<sup>2</sup> Somit verhält sich die Temperatur in der Anfangsphase proportional zur Energiedichte. Temperaturangaben geben also immer auch über die Energiedichte des Universums Auskunft.

Die mit der kosmischen Expansion einhergehende zeitliche Abnahme der Energiedichte - die Energie wird durch die Expansion auf ein immer größeres Volumen verteilt - bestimmt zu jeder Zeit und wegen der vorausgesetzten Homogenität (Energieerhaltungssatz, 2. Hauptsatz der Thermodynamik) des Kosmos auch an jeder Stelle die physikalischen Bedingungen, die für die Existenz und die Häufigkeit der jeweils vorkommenden unterschiedlichen Materie- und Feldquanten verantwortlich sind. Sobald die Energiedichte bzw. die Temperatur unter den für die Bildung erforderlichen Wert fällt, wird der größte Teil durch Annihilation (gegenseitige Auslöschung) ausgelöscht, und ein kleiner Rest bleibt wegen eines Symmetriebruches erhalten.

---

<sup>2</sup> Blome, Hans-Joachim; Zaun, Harald; 2004

Nach diesem Prinzip kann man den Urknall in 5 Phasen jeweils nach der Dominanz der Partikelart einteilen:

Quarkära von  $10^{-43}$  s bis  $10^{-33}$  s

Hadronenära von  $10^{-33}$  s bis  $10^{-4}$  s

Leptonenära von  $10^{-4}$  s bis  $10^{-2}$  s

Photonenära von  $10^{-2}$  s bis  $5 \times 10^{10}$  s (ca.  $10^3$  Jahre)

Nukleonenära von  $5 \times 10^{10}$  s bis  $10^{15}$  s (ca.  $10^7$  Jahre)

( Diese Zeiten sind Rechengrößen und ein Vergleich mit unserem physikalischen Zeitbegriff darf nur mit größter Vorsicht gezogen werden.)<sup>1</sup>

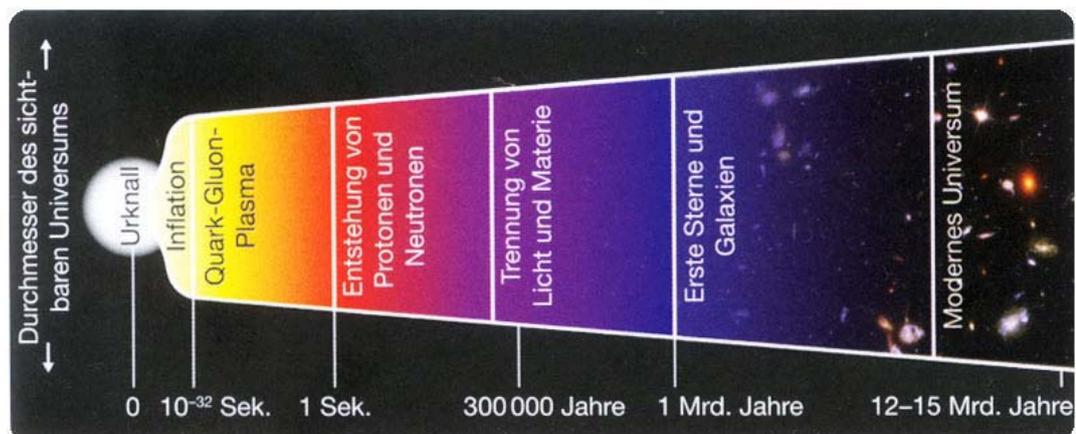


Abb. 3: Schematische Darstellung der kosmischen Entwicklung<sup>2</sup>

Der Zeitabschnitt vor  $t=10^{-43}$  s wird als Planckära bezeichnet. Über diesen Abschnitt lässt sich keine exakte Aussage treffen, denn dieser Abschnitt kann mit keiner der bisher bekannten physikalischen Theorien beschrieben werden. Nur eine Theorie der Quantengravitation könnte da weiterhelfen.

### 3.1.1 Quarkära

Nach  $t=10^{-36}$  s hatte der Raum jetzt einen Durchmesser von ungefähr 10 cm.<sup>3</sup> Nachdem die Temperatur auf  $10^{25}$  K gesunken war, können sich nun die meisten schweren Teilchen nicht mehr bilden und löschen sich

<sup>1</sup> Audouze, Jean; 1972; S. 38 Z. 12ff.

<sup>2</sup> Klessen, Ralf; Sternentstehung: Vom Urknall bis zur Geburt der Sonne; 1. Auflage; Deutschland: Elsevier GmbH; 2007; S. 1

<sup>3</sup> Blome, Hans-Joachim; Zaun, Harald; 2004

gegenseitig mit ihren Antimateriepartnern durch Annihilation aus. Der Raum war jetzt durchflutet von einem Quark-Gluonen-Plasma.

### 3.1.2 Hadronenära

Bei der Temperatur  $10^{13}\text{K}$  (nach  $10^{-6}\text{s}$ ) konnten sich nun auch die Quarks nicht mehr spontan bilden und vereinigen sich zu Hadronen. Die schweren Hadronen zerfielen relativ schnell und es blieben die Protonen, Neutronen und Hyperonen übrig, welche in ständiger Umwandlung ineinander existierten, so dass man von einem „Hadronensee“ spricht.<sup>1</sup>

Bei  $10^{13}\text{K}$  und nach  $10^{-5}\text{s}$  sollte der Übergang des Quark-Leptonen-Plasmas in Hadronen erfolgen. Unterhalb dieser Temperatur reicht die Teilchenenergie nicht mehr aus, um Protonen-Antiprotonen-Paare neu zu bilden. Protonen und Antiprotonen vernichten sich nun paarweise durch Zerstrahlung. Gäbe es keinen Protonen-Überschuss, dann wäre die kosmische Materie restlos zerstrahlt. Nur dadurch, dass etwa ein Proton aus drei Milliarden Protonen und Antiprotonen keinen Partner findet, kann die normale Materie, die die Grundlage für unsere Existenz bildet, überleben.<sup>2</sup>

Nach der inflationären Phase verbleibt nur noch ein winziger Rest von Materie: Elektronen und Positronen, Photonen, Neutrinos und Antineutrinos, sowie schwach wechselwirkende Teilchen (Myonen, Antimyonen, Pionen) und eine kleinen Menge von Protonen und Neutronen im thermischen Gleichgewicht bildeten die Substanz des Kosmos. Aufgrund des Symmetriebruches – des geringen Überschusses der Materie im Verhältnis zur Antimaterie - bildet sich ein Verhältnis von  $p/n = 6/1$ .<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> Audouze, Jean; 1972; S. 33, Z. 10

<sup>2</sup> Blome, Hans-Joachim; Zaun, Harald; 2004

<sup>3</sup> Blome, Hans-Joachim; Zaun, Harald; 2004

### 3.1.3 Leptonenära

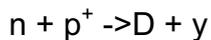
Die Energiedichte ist nun soweit gesunken, dass sich nur noch Leptonenpaare bilden können und somit war der Raum nun größtenteils von einem Elektronen-Positronen-Plasma durchsetzt.

Bei  $t=4s$  und bei  $T=5$  Milliarden K zerstrahlten Elektronen und Positronen in Photonen, wobei wiederum nur ein kleinerer Elektronen-Anteil wegen des Symmetriebruches überlebte.<sup>1</sup>

### 3.1.4 Photonenära:

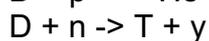
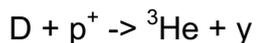
Bei  $T = 900$  Milliarden K setzte nun die primordiale Nukleosynthese ein. Da sich die Leptonen nicht mehr spontan bilden konnten, dominieren nun die Photonen im Raum.

Die mittlere Energie wird nun so gering, dass sich aus einem Proton und einem Neutron ein Deuterium Atomkern bilden kann.



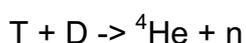
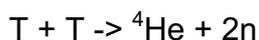
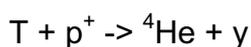
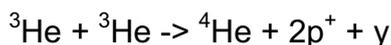
Dies war vorher zwar auch möglich, aber die umgekehrte Reaktion zerstörte das Deuterium sofort wieder. ( Photodesintegration)

Nun kann sich das Deuterium mit einem Proton oder Neutron verbinden:



( $D = \text{Deuterium}$ ,  $T = \text{Tritium}$ , das mit einer Halbwertszeit von 12 Jahren größtenteils als stabil angesehen werden kann)

Beide Isotope können nun in folgenden Reaktionen das  ${}^4\text{He}$  aufbauen:




---

<sup>1</sup> Blome, Hans-Joachim; Zaun, Harald; 2004; S. 68

Jetzt ist aber ein weiterer Aufbau der Elemente blockiert, da kein stabiles Element oder Isotop mit der Massezahl 5 existiert und die mittlere Energie für die Fusion des  ${}^4\text{He}$  mit Elementen oder Isotopen der Massenzahl  $>1$  nicht mehr ausreicht. ( ${}^5\text{He}$  und  ${}^5\text{Li}$  haben eine Halbwertszeit von  $10^{-21}$  s)

Die Elemente Lithium ( ${}^6\text{Li}$  und  ${}^7\text{Li}$ ) sowie Beryllium ( ${}^7\text{Be}$ ) stammen größtenteils auch aus der Urexplosion, wurden aber nicht durch Fusion sondern durch so genannte hochenergetische Reaktionen erzeugt.

Dabei wird ein Partikel, z.B. ein Proton mit hoher Geschwindigkeit ( $E > 10\text{MeV}$ ) auf einen Kern geschossen. Dieser wird dabei zertrümmert und es bildet sich ein neuer stabiler Kern.<sup>1</sup>

Da die Fusion der massereicheren Kerne mehr Energie kostet und somit unwahrscheinlicher ist, bilden sich die leichteren öfters. Dabei entstehen 75% H, 25%He, 0,00001% D und Spuren von Li und Be. Dieser Vorgang dauert bis  $t=5\text{min}$ .<sup>2</sup>

### 3.1.5 Nukleonenära

Nach 380000 Jahren fällt die kosmische Temperatur bei ca. 2900K unter die Ionisationstemperatur des Wasserstoffes ( $T=3600\text{K}$ ) und es werden die ersten Elektronen von den Atomkernen eingefangen. Die Rekombination der Protonen und Elektronen in Wasserstoffatome begann. Das Universum wurde durchsichtig, die Strahlung hat sich von der Materie getrennt. Die Überreste dieser Strahlung, die Kosmologische Mikrowellenhintergrundstrahlung kann zur Zeit bei 2.73 K beobachtet werden.

---

<sup>1</sup> Audouze, Jean; 1972, S. 123

<sup>2</sup> Blome, Hans-Joachim; Zaun, Harald; 2004

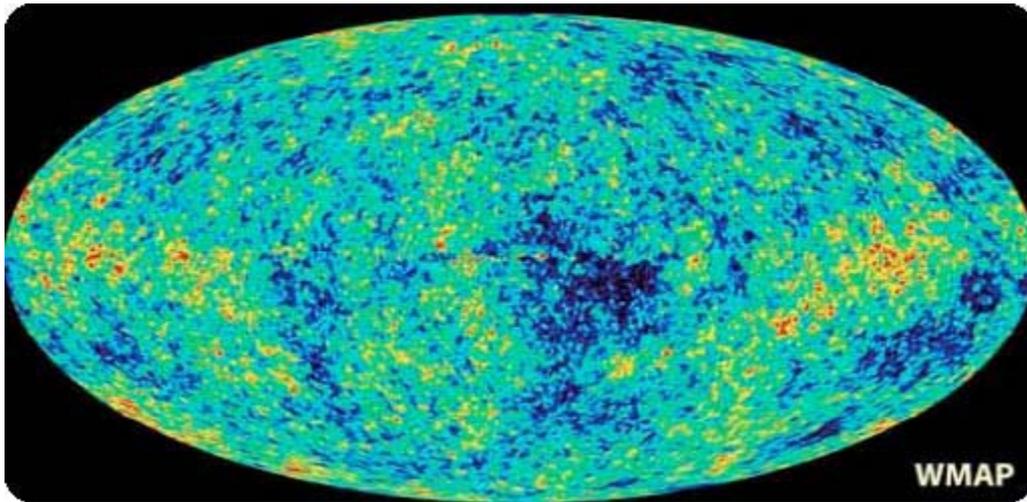


Abb.4: Die von WMAP gelieferte Karte der Kosmischen Hintergrundstrahlung.(Grafik: NASA/WMAP Science Team)<sup>1</sup>

### 3.2 Die Entstehung der ersten Sterne

Als Folge der Aufhebung des elektromagnetischen Strahlungsdruckes durch die Abkopplung der Photonen ist die Bildung der Galaxien und Galaxienhaufen aus schon vorhandenen Dichtestörungen möglich.

#### 3.2.1 Dichtefluktuation

Durch diese Dichtestörungen ist die Materie in riesige Gaswolken verteilt. Wenn zwei solcher Gaswolken aufeinander treffen oder sogar verschmelzen, wird der innere Aufbau nachhaltig gestört. Durch die einhergehende Veränderung des Gravitationspotenzials können die Gaswolken ihren normalen Gleichgewichtszustand nicht mehr länger aufrechterhalten. Es kommt zur Bildung einer Galaxie. Gas beginnt in großem Maße in das Zentrum dieser Galaxie einzuströmen, in der die Gasdichte stark anwächst. Mit steigender Gasdichte steigt auch die Wahrscheinlichkeit eines gravitativen Kollapses, und somit die Wahrscheinlichkeit der Sternentstehung. Da das Gas in der Wolke ständig in Bewegung ist- typischerweise mit Überschallgeschwindigkeit - um die Gravitationspotentiale auszugleichen, wird die Gaswolke ständig von Stoßwellen durchsetzt.

---

<sup>1</sup> [http://www.raumfahrer.net/raumfahrt/raumsonden/WMAP\\_01.shtml](http://www.raumfahrer.net/raumfahrt/raumsonden/WMAP_01.shtml)

### 3.2.2 Der Gravitative Kollaps

Nun kann die Gasdichte bei einem stark verdichteten Wolkengebiet den Grenzwert für einen gravitativen Kollaps überschreiten. Dabei muss die Schwerkraft über die nach außen gerichteten Druckkräfte dominieren, damit ein Molekülwolkenkern einen Stern bilden kann. Das ganze System kollidiert dann unter seinem eigenen Gewicht. Dabei wachsen Gasdichte und Temperatur stetig an, so dass ein neuer Stern entsteht.

Druck und Temperatur im Kern des Sterns nehmen kontinuierlich zu, bis bei rund zehn Millionen Grad im Zentrum der Wasserstoff zündet und die Verbrennung zu Helium einsetzt. Dabei befindet sich die Energie, die bei der Kernfusion frei wird (Gasdruck) und die Gravitationskraft im Gleichgewicht. Wenn sich wegen der Gravitation der Materiedruck im Inneren erhöht, steigt damit einhergehend auch die Temperatur, und Kernfusionen nehmen zu. Durch die frei gewordene Energie nimmt nun der Gasdruck zu und der Materiedruck verringert sich. Insgesamt stellt sich rasch ein Gleichgewicht zwischen den Kräften ein, welches die Sonnen für eine mittlere Dauer von insgesamt etwa neun Milliarden Jahre stabilisieren kann.

„Der Stern ist sozusagen „erwachsen geworden“, seine Hauptlebensphase beginnt. Die hier beschriebene Geburt des Sterns dauert insgesamt mehrere Millionen Jahre.“<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Klessen, Ralf; 2007; S. 66 Z. 23

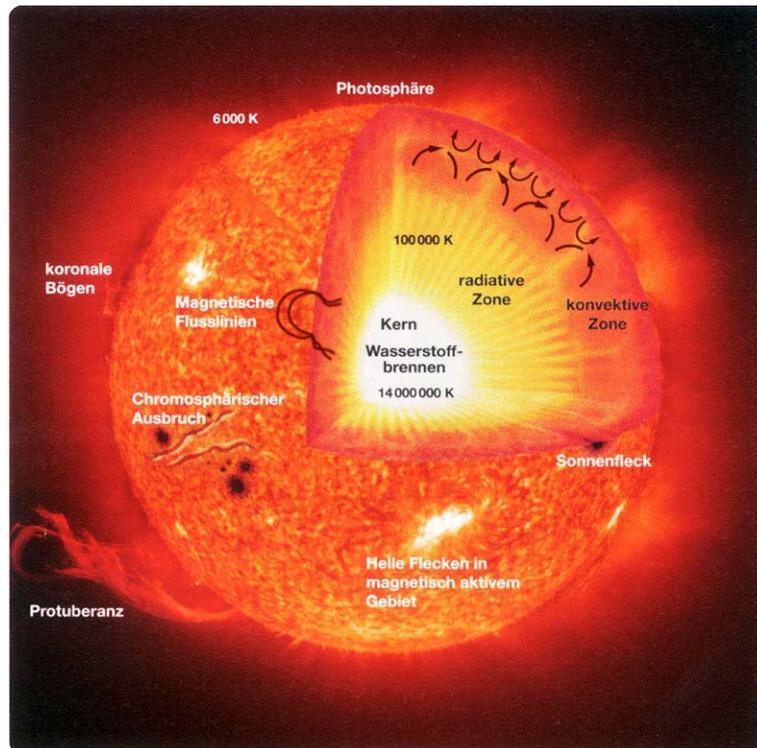


Abb. 5: Der Aufbau eines Sterns während seiner Hauptlebensphase<sup>1</sup>

### 3.3 Fusionsreaktionen zwischen geladenen Partikeln

Sterne sind gewaltige Kugeln aus Gas, in deren Innerem der Druck und die Temperatur so groß sind, dass Kernfusionsprozesse stattfinden können. Die Häufigkeitsverteilung der Elemente bis  $A=56$ , bis zur Eisenspitze, ergibt sich aus Fusionsreaktionen, also aus Reaktionen zwischen geladenen Teilchen, die im Sterninneren ablaufen. Diese Reaktionen liefern die Sternenergie.

Im Allgemeinen lässt sich die Fusionsreaktion als  $A+B \rightarrow C + \dots$  ausdrücken, wobei  $C$  immer ein Kern ist, dessen Masse größer als  $A$  bzw.  $B$  ist.

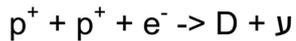
#### 3.3.1 Wasserstoffverbrennung

Die Wasserstoffverbrennung in den Sternen ähnelt der nach dem Urknall, nur sind nun alle freien Neutronen gebunden.

<sup>1</sup> Klessen, Ralf; 2007; S. 49

### Die Protonen-Kette1 (pp1-Kette)

Bei der Bildung eines  ${}^4\text{He}$  aus vier Wasserstoffkernen, wird zunächst Deuterium gebildet. Das kann auf 2 Wegen erfolgen.



(● = Proton, ○ = Neutron)

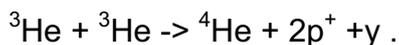
Beide Wege sind im Grunde keine Kernreaktion, denn sie erfordern einen Beta-(plus)-Zerfall (den Zerfall eines Protons in ein Elektron und ein Neutron) oder die umgekehrte Reaktion, das Einfangen eines Elektrons.

Der Zusammenstoß der beiden Protonen ist sehr kurz ( $10^{-20}\text{s}$ ). Die zweite Phase der Reaktion, die Bildung des Deuteriums, ist aber „langsam“, das heißt, sie erfolgt selten. Auf Grund dieses geringen Wirkungsquerschnitts bzw. der geringen Häufigkeit der Reaktion bildet sich das Deuterium nur sehr selten. Das ist auch der Grund dafür, dass Sterne so lange Zeitspannen damit zubringen, nur ihren Wasserstoffvorrat zu verbrennen.

Die wenigen Deuteriumkerne formen sich schnell gemäß der Reaktion



Daraufhin reagieren zwei Heliumisotope gemäß



Sie bilden einen normalen Heliumkern und setzen 2 Protonen frei, die die gleiche Kette durchlaufen können.

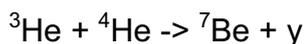
Diese pp1 Kette läuft bei Temperaturen von 10 bis 20 Millionen K und bei Dichten der Größenordnung von  $100\text{gcm}^{-3}$  ab.

Es könne auch Stöße zwischen einen  ${}^3\text{He}$  und  ${}^1\text{H}$  vorkommen, aber da der Wirkungsquerschnitt dieser Reaktionen erheblich geringer ist, kann man sie praktisch vernachlässigen.

Wenn sich genügend  ${}^3\text{He}$  Kerne im Zentrum gebildet haben, so dass ein Zusammenstoß häufig genug auftritt, kann auch die letzte Reaktion der pp1 Kette ablaufen. Dies ist bei einem Verhältnis von ungefähr 0,001 %  ${}^1\text{H}$  /  ${}^3\text{He}$  der Fall. Unsere Sonne z.B. hat dafür  $10^6$  Jahre benötigt.

### 3.3.2 Der Zyklus mit Heliumkatalysator

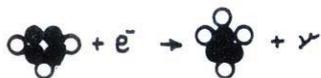
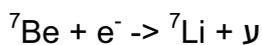
Sobald genügend  ${}^4\text{He}$  im Kern angereichert und die Temperatur auf über  $2 \times 10^6 \text{K}$  angestiegen ist, erfolgt folgende Reaktion erheblich häufiger:



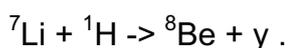
Das gebildete  ${}^7\text{Be}$  kann auf zwei verschiedenen Wegen weiter reagieren:

#### 1) Die Protonen-Kette 2:

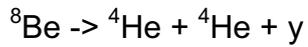
Die pp2-Kette findet vorwiegend im Temperaturbereich von  $20\text{-}30 \times 10^6 \text{K}$  statt. Dabei fängt das Beryllium Isotop  ${}^7\text{Be}$  ein Elektron ein und wandelt sich zu  ${}^7\text{Li}$ ,



welches dann ein Proton einfängt und sich zu  ${}^8\text{Be}$  transformiert.



Dieses  $^8\text{Be}$  ist sehr instabil und zerfällt deshalb seinerseits sehr rasch - innerhalb von  $10^{-16}\text{s}$  - in zwei natürliche Heliumkerne.

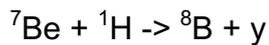


Zusammenfassend kann man den Zerfall von  $^7\text{Li}$  wie folgt darstellen.



## 2) Die Protonen-Kette 3:

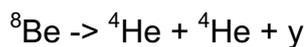
Bei Temperaturen, die höher als  $30 \times 10^6\text{K}$  liegen, kann das Beryllium Isotop  $^7\text{Be}$  viel schneller durch einen Protoneneinfang zum Bor-Isotop  $^8\text{B}$  fusionieren.



Dieses zerfällt dann seinerseits unter starker Neutrinoemission<sup>1</sup> zum instabilen Beryllium Isotop  $^8\text{Be}$ .



Das  $^8\text{Be}$  zerfällt dann – wie bei der pp2Kette - sofort in zwei natürliche Heliumkerne.



<sup>1</sup> Diese Neutrinos sind als einzige bei unserer Sonne nachweisbar.

### 3.3.3 Verbrennung von Helium und Bildung von Kohlenstoff

Obwohl es sehr unwahrscheinlich ist, dass sich aus 3  ${}^4\text{He}$  Kernen Kohlenstoff bildet, da das zuerst gebildete  ${}^8\text{Be}$  sehr instabil ist, und somit mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit auf einen weiteren  ${}^4\text{He}$ -Kern trifft und  ${}^{12}\text{C}$  bildet, stellt sich bei ausreichender  ${}^4\text{He}$  Häufigkeit ein sehr geringes Gleichgewicht ein. Somit ist die im Sterninneren relative Häufigkeit des  ${}^8\text{Be}$   $10^{-9} \frac{{}^8\text{Be}}{{}^4\text{He}}$ .



Wenn jetzt noch ein  ${}^4\text{He}$  und ein  ${}^8\text{Be}$  aufeinandertreffen, kommt es zur Bildung von Kohlenstoff.



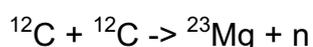
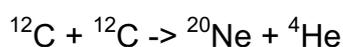
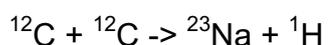
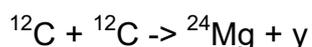
Da der  ${}^{12}\text{C}$  Kern ein angeregtes Energieniveau besitzt, ist er stabiler, und somit ist eine Anreicherung des  ${}^{12}\text{C}$  gesichert. (Resonanz)

Die Wahrscheinlichkeit eines solchen Dreierstoßes steigt natürlich mit der Anzahl des  ${}^4\text{He}$  im Kern und tritt somit häufiger in der Endphase des Sterns auf. Die Instabilität des  ${}^8\text{Be}$  ist der Grund, wieso nicht alle Roten Riesen sofort beim Einsetzen der Heliumverbrennung explodieren.

### 3.3.4 Die Verbrennung des Kohlenstoffes

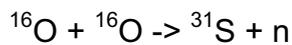
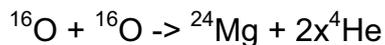
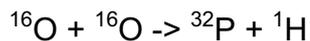
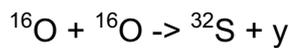
Wenn die Sonne eine Anfangsmasse von über 0,7 Sonnenmassen besitzt, können die für die Verbrennung des Kohlenstoffes erforderlichen Temperaturen entstehen. ( $500$  bis  $800 \times 10^6$  K und  $105 \text{ g cm}^{-3}$ )

Folgende Reaktionen sind möglich:



### 3.3.5 Zyklus der Verbrennung von Sauerstoff

Nachdem durch die Verbrennung von Kohlenstoff die Temperatur im Zentralbereich bis  $10^9\text{K}$  angestiegen ist, beginnt der Sauerstoff mit sich selbst zu fusionieren.



Die stabilsten Kerne, die dabei entstehen sind:  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{24}\text{Mg}$ , und  $^{32}\text{S}$ .

Man könnte annehmen, dass bei steigender Temperatur auch die schweren Elemente miteinander fusionieren können, wie z.B. Magnesium und Silicium. Dies ist aber nicht der Fall, da der Absolutwert der Columbsperre mit wachsender Protonenzahl stark ansteigt. Fusionen dieser Art würden Temperaturen von  $4,5 \times 10^9\text{K}$  erfordern, die aber nie erreicht werden. Damit würden die Reaktionen, die Photonen erzeugen, stark zunehmen. Der Kern wäre dann so stark von Photonen durchflutet, dass die Reaktionen, welche zu einer Temperatursteigerung beitragen würden, unterbunden werden.

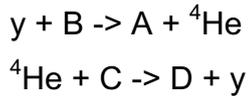
### 3.3.6 Prozesse der Photodesintegration

(Aufbau der Elemente von  $A=32$  bis  $A=56$ , besonders der Eisenspitze)

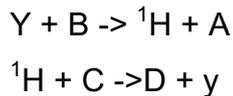
Die Photodesintegration ist der umgekehrte Prozess der Fusionsreaktion, d.h. ein Zerfallsprozess. Er tritt vorwiegend im Temperaturbereich von  $3$  bis  $5 \times 10^9\text{K}$  auf. Schematisch dargestellt:



In Sternen zerfällt dabei überwiegend B in A und ein Alpha-Teilchen ( $^4\text{He}$ -Kern). Dieses kann wiederum mit C reagieren und D bilden:



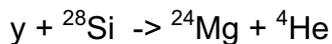
Die Photodesintegration kann auch mit der Entstehung eines Protons einhergehen. Schematisch würden die Prozesse wie folgt aussehen:



Somit werden durch die Photodesintegration kleine Mengen von Heliumkernen frei. Dabei zerfallen zuerst die instabilen Kerne.

Ein Beispiel hierfür ist die Photodesintegration des Silicium:

Die Reaktion findet im Temperaturbereich von  $3 \times 10^9 \text{K}$  und  $10^8 \text{gcm}^{-3}$  statt.



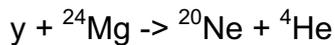
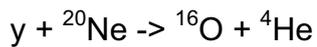
Die freigewordenen Heliumkerne können sich nur wieder an das Silicium anlagern und fusionieren zu Schwefel.



Diese Reaktion kann auch umgekehrt ablaufen, d.h. es wird sich ein Quasigleichgewichtszustand einstellen. Da die Anzahl der Alpha-Teilchen, durch den Zerfall der kleineren Kerne stark wächst, verschiebt sich das Gleichgewicht in Richtung  ${}^{32}\text{S}$ .

Allgemein kann man sagen, dass die kleineren Kerne eher zerfallen und die größeren dann mit den freien  ${}^4\text{He}$  Kernen fusionieren. Dies ist auf die höhere Bindungsenergie der schweren Elemente bis zum  $A=56$  zurückzuführen (siehe Seite 24).

Beispiele der Photodesintegrationprozesse der leichteren Kerne:



In ähnlicher Weise lässt sich das Anwachsen des  ${}^{36}\text{A}$  durch die Reaktion des  ${}^{32}\text{Si}$  mit einem Heliumkern erklären. Dieser Prozess kann bis zum  ${}^{56}\text{Ni}$  stattfinden. Parallel zu diesen Prozessen findet die Photodesintegration der leichteren Elemente statt. Durch die Photodesintegration unter Bildung eines Protons können auch die Fusionsreaktionen ablaufen, welche die Isotope und Elemente zwischen Silicium und Nickel aufbauen.

Diese Prozesse finden alle ihren Abschluss im  ${}^{56}\text{Ni}$ , das sich dann selbst durch einen Beta-Zerfall zum stabilen Eisen ( ${}^{56}\text{Fe}$ ) umwandelt.

Dass die Fusionsreaktionen beim Eisen stoppen und sich so die Eisenspitze ausbildet, hat einen ganz bestimmten Grund. Bei genauerer Betrachtung des Energieverhältnisses der Fusionsreaktionen wird deutlich, dass die Masse des Atomkerns nicht gleich der Massen-Summe seiner Protonen und Neutronen ist. Diesen Effekt hat Einstein als „Massedeffekt“ gedeutet. Bei Fusionsreaktionen wird dieser Massedeffekt als Energie frei. Bei Eisen ist diese Bindungsenergie pro Nukleon demnach:

$$E = - \left( \frac{26m_p + 30m_n - m_k({}^{56}\text{Fe})}{56} \right)$$

Diese Energie wird auch Bindungsenergie genannt. Alle Elemente, die sich nahe dem Maximalwert  $A=56$  befinden, zeichnen sich durch höchste Bindungsenergie, das heißt große Stabilität aus. Bei kleineren Massezahlen fällt die Bindungsenergie schnell, bei größeren langsam ab. Die stabilsten Elemente sind demnach Chrom, Mangan, Eisen, Nickel und Kupfer.

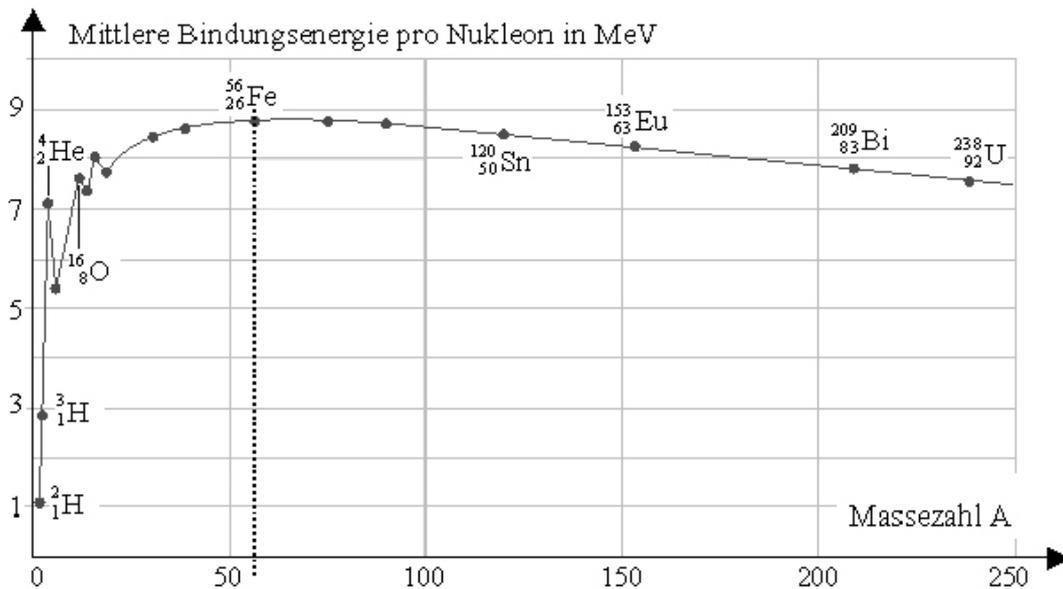


Abb. 6: Der Verlauf des Betrags der mittleren Bindungsenergie pro Nukleonen. <sup>1</sup>

Die Differenz der Bindungsenergien der Edukte und der Bindungsenergien der Produkte wird bei den Fusionsprozessen als Energiegewinn frei. Da  $^{56}\text{Fe}$  die höchste Bindungsenergie hat, kosten Fusionsreaktionen des Eisens mehr Energie als sie erzeugen und sind somit endotherm. Die höheren Elemente können also nicht mehr in Fusionsreaktionen synthetisiert werden, da sie eine zu geringe Bestreben haben um  $^4\text{He}$  anzulagern, beziehungsweise der Stern keine Energie aus den Reaktionen gewinnen kann und somit erkalte.

Die oben vorgeschlagenen Gleichgewichtsprozesse zwischen Elementsynthese und Photodesintegration – unter Berücksichtigung der Bindungsenergie – können die Eisenspitze befriedigend wiedergeben. Den gesamten Prozess kann man also als eine Neugruppierung der nur lose gebundenen Nukleonen in den Kernen verstehen.

<sup>1</sup> [http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Bindungsenergie\\_massezahl.jpg](http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Bindungsenergie_massezahl.jpg)

### 3.4 Reaktionen der Neutronen-Absorbation

(Von Massezahl  $A=56$  bis zu Massezahl  $A=X^1$ )

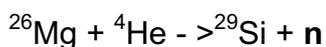
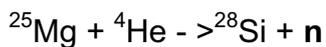
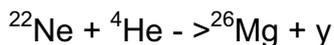
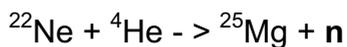
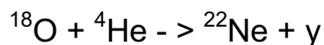
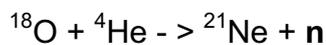
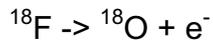
Würde man die Entstehung der Schweren Elemente ( $A>56$ ) als Fusionsprozesse deuten, käme man für die notwendigen Temperaturen und Dichten auf Werte, die physikalisch als (im Sterninneren) unrealistisch angesehen werden müssen.

Die schweren Elemente entstehen durch so genannte Neutronenabsorptionsprozesse.

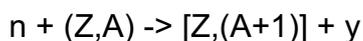
Zwei physikalische Eigenschaften bekräftigen diese Behauptung:

1. Neutronen unterlaufen die Coulomb-Sperre der Kerne ohne Schwierigkeiten.
2. Neutronen reagieren um so schneller mit Atomkernen, je schwerer sie sind.

Durch die im Kern stattfindenden Fusionsreaktionen werden zahlreiche Neutronen frei. Ein Beispiel hierfür wäre der Beta-Zerfall oder die  $^{18}\text{O}$  – Kette. Beide sind ausgezeichnete Neutronenlieferanten:



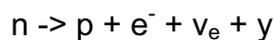
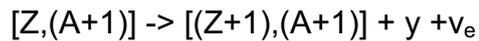
Sobald ein Kern ein Neutron einfängt, wandelt es sich zu einem Isotop des gleichen Elements um, das jedoch in der Massezahl ( $A$ ) um eine Einheit gewachsen ist. Allgemein ausgedrückt kann dies durch folgende Reaktion beschrieben werden. ( $Z$ =Kernladungszahl)




---

<sup>1</sup> Bisher ist nicht bekannt, bis zu welcher Massezahl Elemente in den Großen Sternen entstehen können.

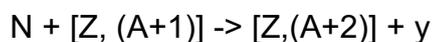
Wenn der so entstandene Kern  $[Z,(A+1)]$  stabil ist, bleibt er zunächst in dieser Form bestehen und kann später in der gleichen Form noch ein weiteres Neutron einfangen. Ist der Kern  $[Z,(A+1)]$  aber radioaktiv und hat das Bestreben von selbst zu zerfallen, hängt der weitere Verlauf davon ab, wie intensiv der Neutronenfluss ist, dem er ausgesetzt ist. Ist dieser schwach, zerfällt der Kern in ein neues Element entsprechend der Form



ehe er ein weiteres freies Neutron absorbieren kann.

Dieser Vorgang wird als s-Synthese (von eng. slow = langsam) bezeichnet.

Ist dagegen der Neutronenfluss stark, dann absorbiert der Kern zunächst ein Neutron, ehe es Zeit für einen Zerfall hat, das heißt er wandelt sich entsprechend der Form



zu einem Isotop des gleichen Elementes um.

Diese Reaktion wird r-Synthese (von eng. rapid = schnell) genannt, da die Reaktion bei einem starken Neutronenfluss meist schnell abläuft.

Die zeitliche und räumliche Unterbrechung spielt dabei keine Rolle. So ist es möglich, dass ein in einem „jungen“ Stern aufgebautes Schweres Element, im Stern der nächsten Generation weiter zu einem Superschweren Element aufgebaut wird. Das Ganze ist also ein kontinuierlicher Prozess.

Folglich können in der s-Synthese die Elemente (ab Eisen) bis zum  $^{209}\text{Pb}$  (Blei) entstehen. Bei Elementen noch höherer Massezahl überwiegt der Alpha-Zerfall und somit „überleben“ diese Isotope nicht.

Im der r-Synthese hingegen könne auch die ganzen schweren Elemente gebildet werden (z.B.  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{Uran}$ ).

Außerdem können durch den r-Prozess auch Superschwere Elemente, so genannte Transurane, gebildet werden. Superschwere Elemente sind Kerne, die mehr als  $Z=92$  Protonen sowie eine entsprechende Anzahl an Neutronen besitzen.

### 3.5 Das Leben des Sterns

Die Masse ist die physikalische Kerngröße eines Sterns. Massereiche Sterne leuchten hell, leben aber nur kurze Zeit. Massearme hingegen leuchten schwach und leben dafür lange.

Die ersten Sterne waren sehr massereich, da riesige Mengen des kosmologischen Gases beim gravitativen Kollaps verwendet wurden.

Diese Sterne bildeten sich etwa eine halbe Milliarde Jahre nach dem Urknall. Das ist ziemlich früh, wenn man bedenkt, dass das Universum zum heutigen Zeitpunkt etwa 14 Milliarden Jahre alt ist.

Von dort an nimmt die Entstehungsrate aufgrund der zunehmenden Materieverteilung bis vor ca. 10 Milliarden Jahr zu.<sup>1</sup>

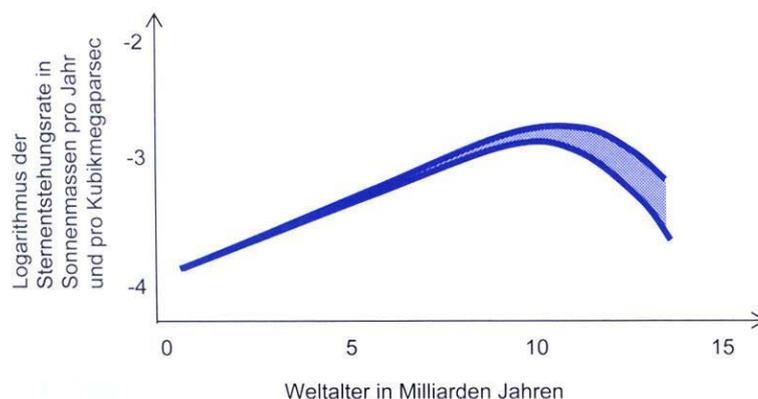


Abb. 7: Die Sternentstehungsrate im Verlauf des Weltalters<sup>2</sup>

Seit 10 Milliarden Jahren geht die Entstehungsrate dann kontinuierlich zurück. Die Masse der Sterne verhält sich dazu direkt proportional.

<sup>1</sup> Klessen, Ralf; 2007; S. 24 ff.

<sup>2</sup> Klessen, Ralf; 2007; S. 15

### 3.6 Die verschiedenen Stern-Typen

Die physikalisch bestimmende Größe bei der Entwicklung eines Sternes, seine anfängliche Masse, entscheidet über den Lebensweg, Lebensdauer und die Leuchtkraft. So werden im Hertzsprung-Russell-Diagramm Sterne in 4 verschiedene Sternentypen entsprechend ihrer Leuchtkraft-Klasse unterteilt.

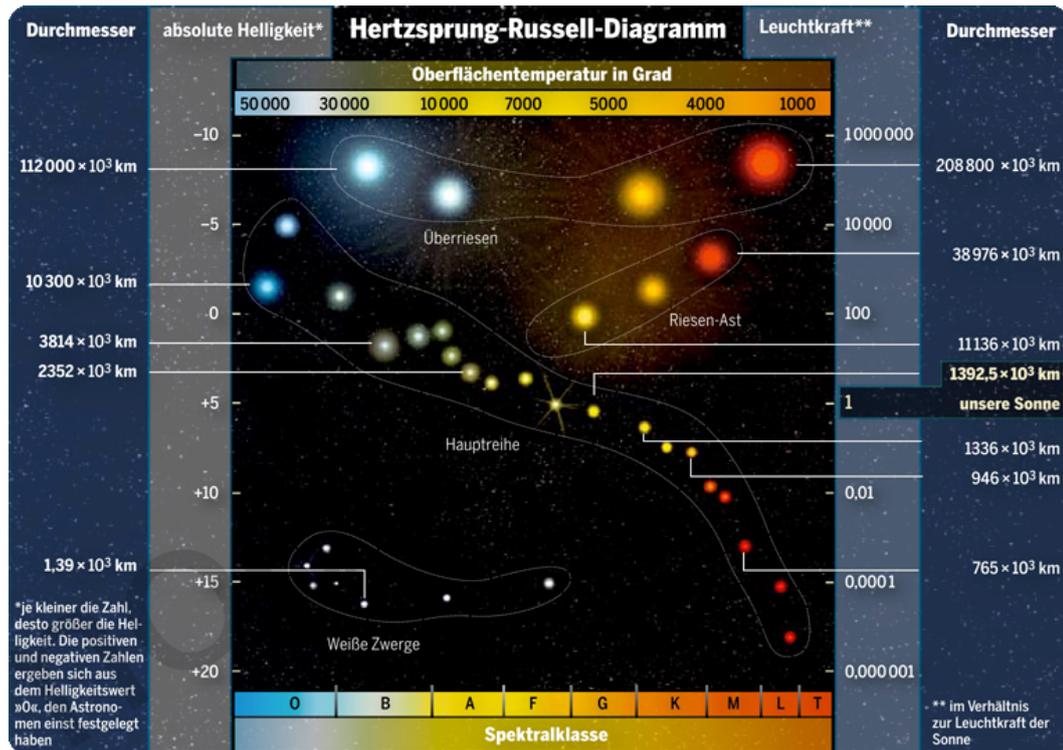


Abb. 8: Das Hertzsprung-Russell-Diagramm, in dem die Sterne entsprechend ihrer Leuchtkraftklasse geordnet sind.<sup>1</sup>

Die Massen der Sterne variieren im Bereich von etwa  $0,08M^2$  bis etwa  $150M$ .  $M$  ist dabei die Masse unserer Sonne, somit hat ein Stern mit  $2M$ , die doppelte Masse unserer Sonne.

Sterne mit unterschiedlichen Anfangsmassen durchlaufen unterschiedliche Leben, die im Folgenden kurz umrissen werden.

<sup>1</sup>Paetsch, Martin; Vom Werden und Vergehen der Sterne; Geo Kompakt 6.: Das Universum; Deutschland: Gruner + Jahr AG & Co KG; 2006; S. 105

<sup>2</sup> Klessen, Ralf; 2007; S. 50

**$M < 0,08$  Braune Zwerge:**

Hat ein Stern weniger als acht Prozent der Masse unserer Sonne, reicht die Schwerkraft in seinem Inneren nicht aus, um Materie so stark zusammenzupressen, dass die Kernfusion startet. Ein solcher Brauner Zwerg glüht nur und erkaltet nach nur wenigen Milliarden Jahren.<sup>1</sup>

 **$0,08 < M < 2,0$  Hauptreihesterne:**

Sterne mit einer Masse bis zur doppelten Sonnenmasse leuchten rund 10 Milliarden Jahre. Nach dieser Zeit erlischt die Wasserstoffverbrennung. Nachdem im Kern der ganze Wasserstoffvorrat verbrannt ist, erhitzt sich der aus Helium bestehende Kern nun soweit, dass die Heliumverbrennung startet. Da die umliegenden Gasschichten noch Wasserstoff enthalten, beginnen diese nun auch bei wachsender Temperatur zu verbrennen. Die Hitze bläht den Gasball auf. Er wird zu einem Roten Riesen. Da der Druck aber bei diesem Temperaturanstieg weitgehend konstant bleibt - Ausgleich des Temperaturanstieges durch die Ausdehnung (isobar) -, kann die Gravitation die extrem anwachsende Energieabgabe durch die erhöhte Temperatur im Kern nicht mehr kompensieren. Der Stern stößt seine äußeren Schichten explosionsartig ab (Helium-Flash). Im Zentrum bleibt ein meist bläulich-weiß leuchtender Kern aus den Endprodukten der Fusionsketten zurück: ein Weißer Zwerg, dessen Abkühlungsprozess noch etwa hundert Millionen von Jahren in Anspruch nimmt bevor er erkühlt. Welche Reaktion und Fusionskette während seines Lebens ablaufen und sein Aufbau als Weißer Zwerges hängt wiederum von der Anfangsmasse des Sterns ab.

$0,1 < M < 0,4$  Bei Sternen dieser Masse finden nach der Verschmelzung von Wasserstoff zu Helium (Pp1-Ketten) keine weiteren Reaktionen statt, denn die Masse reicht nicht aus um die für die Verbrennung von Helium erforderlichen Temperaturen durch gravitative Kompression zu erzeugen.  
Ablaufende Reaktionen: Wasserverbrennung

---

<sup>1</sup> Paetsch, Martin; 2006

$0,4 < M < 0,7$  Bei Sternen der Masse  $M > 0,4$  werden die für die Verbrennung von Helium erforderlichen Temperaturen erreicht.

Somit kann der s-Prozess, welcher vorwiegend in der Phase der Heliumfusion abläuft, stattfinden.

Ablaufende Reaktionen: Wasserverbrennung, Verbrennung von Helium und Bildung von Kohlenstoff, s-Prozess

$0,7 < M < 0,9$  Bei Sternen der Masse  $M > 0,7$  kann nach der Verbrennung von Helium die Kohlenstofffusion stattfinden.

Ablaufende Reaktionen: Wasserverbrennung, Verbrennung von Helium und Bildung von Kohlenstoff, s-Prozess, Kohlenstoffverbrennung

$0,9 < M < 2,0$  Die Pp-Kette, sowie die Verbrennung von Kohlenstoff und Sauerstoff laufen ab. Teilweise finden Fusionen zu höheren Elementen statt. Nach dem Helium-Flash bildet sich im Zentrum ein bläulich-weiß leuchtender Weißer Zwerg aus Kohlenstoff und Sauerstoff.

Ablaufende Reaktionen: Wasserverbrennung, Verbrennung von Helium und Bildung von Kohlenstoff, s-Prozess, Kohlenverbrennung, Sauerstofffusion

### **$2,0 < M < 10$ Überriesen**

Sterne mit mehr als dem zehnfachen der Masse unserer Sonne verbrauchen ihren Brennstoff in weniger als 20 Millionen Jahren. Alle Fusionsprozesse sowie Gleichgewichtsprozesse (Photodesintegration) laufen ab (auch Silicium-Verbrennung). Abgesehen von relativ kleinen Instabilitäten erfolgt im Wechselspiel mit der Photodesintegration kein explosionsartiges Anschwellen der nuklearen Reaktion. Im Zentrum bildet sich ein starker Eisenkern, um den sich schalenweise zunächst die übrigen Elemente, und als Oberflächenschicht der noch unverbrannte (oder freigewordene und nach außen diffundierte) Wasserstoff anlagern.

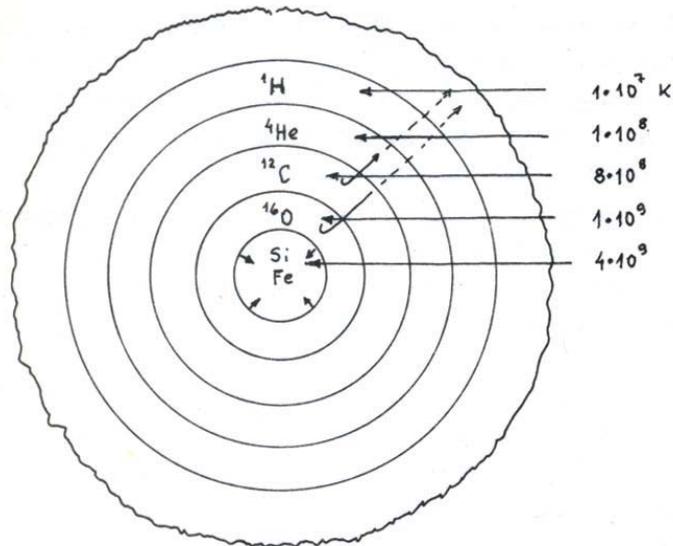


Abb. 9: Schema eines Sterns vor der SN-Explosion. Die Schichtenstruktur, in der jeweils bestimmte Elemente dominieren, ist eine starke Idealisierung. Die möglichen Stoßwellen, die die explosive Reaktion einleiten, sind angedeutet.<sup>1</sup>

Nach Ablauf der thermonuklearen Fusionsphasen bricht der Eisenkern in sich zusammen. Bei diesen extremen Temperaturen findet eine endotherme Reaktion des Aufsplitters eines Stoffes in Heliumkerne statt. Diese Heliumkerne reagieren jetzt explosionsartig und die dadurch erzeugten Stoßwellen und extremen Neutronenemissionen schleudern die äußere Hülle des Sterns ins All. Eine derartige Sternexplosion wird als Supernova bezeichnet. Im Maximum der Supernova ist der Stern 200 000 mal heller.

<sup>1</sup> Audouze, Jean; 1972, S. 82

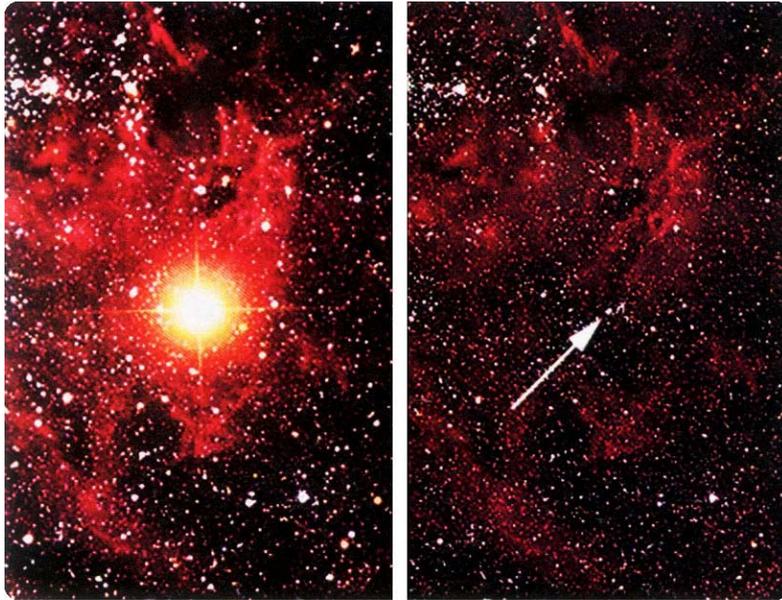


Abb. 10: Aufnahmen der Supernova 1987 A in der Großen Magellanschen Wolke ( Bild des Anglo-Australian Observatory)<sup>1</sup>

Welche Elemente vorwiegend während der Supernova entstehen hängt davon ab, in welcher Schicht der Sonne die endotherme Reaktion der Aufspaltung stattfindet. Dabei stellt sich zwischen den endothermen Zerfallsreaktionen und den Fusionsprozessen ein Gleichgewicht ein.

Folgende Tabelle zeigt, welche Isotope bei einer endothermen Reaktion in der entsprechenden Schicht entstehen:

Tabelle 4  
=====

Ergebnisse von Modellen für die explosiven Prozesse

Prozess	Anfangs-Zusammensetzung	Temperatur (K)	Dichte <sup>3</sup> (g cm <sup>-3</sup> )	Gut gedeutete Isotope	Schlecht gedeutete Isotope
He-Explos.	<sup>4</sup> He	5 · 10 <sup>8</sup>	10 <sup>4</sup>	<sup>14</sup> N, <sup>15</sup> N, <sup>18</sup> O, <sup>19</sup> F, <sup>21</sup> Ne	<sup>22</sup> Ne
C-Explos.	50% <sup>12</sup> C 3% <sup>13</sup> C 47% <sup>16</sup> O	1,8 · 10 <sup>9</sup>	10 <sup>7</sup>	<sup>20</sup> Ne, <sup>23</sup> Na, <sup>24</sup> Mg, <sup>25</sup> Mg, <sup>26</sup> Mg, <sup>27</sup> Al, <sup>29</sup> Si, <sup>30</sup> Si, <sup>31</sup> P	<sup>14</sup> N, <sup>15</sup> N, <sup>17</sup> O, <sup>18</sup> O, <sup>21</sup> Ne, <sup>22</sup> Ne
O-Explos.	48% <sup>12</sup> C 50% <sup>16</sup> O 2% <sup>26</sup> Mg	3,6 · 10 <sup>9</sup>	5 · 10 <sup>5</sup>	<sup>28</sup> Si, <sup>32</sup> S, <sup>33</sup> S, <sup>34</sup> S, <sup>35</sup> Cl, <sup>37</sup> Cl, <sup>36</sup> A, <sup>38</sup> A, <sup>39</sup> K, <sup>41</sup> K, <sup>40</sup> Ca, <sup>41</sup> Ca, <sup>46</sup> Ti, <sup>50</sup> Cr	<sup>36</sup> S, <sup>40</sup> Ar, <sup>40</sup> K, <sup>43</sup> Ca, <sup>44</sup> Ca, <sup>46</sup> Ca, <sup>48</sup> Ca, <sup>45</sup> Sc, <sup>47</sup> Ti
Si-Explos.	<sup>12</sup> C, <sup>18</sup> O <sup>28</sup> Si, <sup>56</sup> Ni	8 · 10 <sup>9</sup>	2 · 10 <sup>9</sup>	<sup>54</sup> Fe, <sup>56</sup> Fe, <sup>57</sup> Fe, <sup>58</sup> Ni, <sup>60</sup> Ni, <sup>61</sup> Ni, <sup>62</sup> Ni, <sup>50</sup> Cr, <sup>52</sup> Cr, <sup>53</sup> Cr, <sup>55</sup> Mg	<sup>44</sup> Ca, <sup>48</sup> Ti, <sup>49</sup> Ti, <sup>51</sup> V, <sup>59</sup> Co, <sup>63</sup> Cu, <sup>65</sup> Cu, <sup>64</sup> Zn, <sup>66</sup> Zn

Abb. 11: Übersicht über die Elemente und Isotope, welche bei einem explosiven Prozess in der jeweiligen Schicht des Sterns entstehen.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dr. Zaun, Harald; Exobiologisch – kosmisches Prinzip; Special Telepolis Kosmologie: 02/2007; Deutschland: Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG; 2007; S. 54

<sup>2</sup> Audouze, Jean; 1972, S. 124

Die dabei entstehenden extrem hohen Temperaturen ermöglichen es die Eisenspitze korrekt wiederzugeben.

Außerdem ermöglichen die extremen Mengen an Neutronen, die beim Zerfall des Eisens frei werden, den Aufbau der schweren Elemente und sogar der Transurane über den r-Prozess der Neutronenabsorptionsreaktionen. Denn im Gegensatz zum s-Prozess, der zum größten Teil während der Heliumverbrennung stattfindet, ist der für den r-Prozess benötigte starke Neutronenfluss meist nur während einer Supernova vorhanden. Nachdem die äußeren Schichten des Sterns in einer Supernova explodiert sind, bildet der übrig gebliebene Eisenkern, der unter seiner eigenen Schwerkraft zusammenbricht, einen sogenannten Neutronenstern.

### **10<M<150<sup>1</sup> Hyperriesen**

Sterne mit mehr als dem zehnfachen der Masse unserer Sonne verbrauchen ihren Brennstoff in weniger als 2 Millionen Jahren. Das Leben dieser Hyperriesen ähnelt dem des Überriesen, nur verläuft deren Leben schneller, heftiger und endet unterschiedlich: Denn ist die Masse des nach der Hypernova entstehenden Neutronensterns größer als 3,2 Sonnemassen, bricht er unter der eigenen Schwerkraft zusammen und wird zu einem ungeheuer dichten und schweren toten Stern: einem Schwarzen Loch.

---

<sup>1</sup> Mithilfe des Hubble-Weltraumteleskops hat Donald Figer vom US-amerikanischen *Space Telescope Science Institute* in Baltimore, Maryland, nach den massereichsten Sternen des Arches-Haufens gesucht. Der Sternenhaufen nahe der Milchstraße war so groß, dass er Sterne mit der 500fachen Sonnenmasse enthalten müsste. Tatsächlich wurden aber nur Sterne mit bis zu 150 facher Sonnenmasse gefunden.

Anhand dieses Ergebnisses schätzt Figer, dass das Wachstum von Sternen durch die Ansammlung von Materie begrenzt ist und nicht über 150 Sonnenmassen hinausgeht. Man nimmt an, dass bei höheren Massen starke Pulsationsinstabilitäten auftreten, so dass der Stern kein Gleichgewicht mehr findet und instabil wird.

(<http://www.netzeitung.de/spezial/weltraum/329177.html>, Klessen, Ralf; 2007; S. 50)

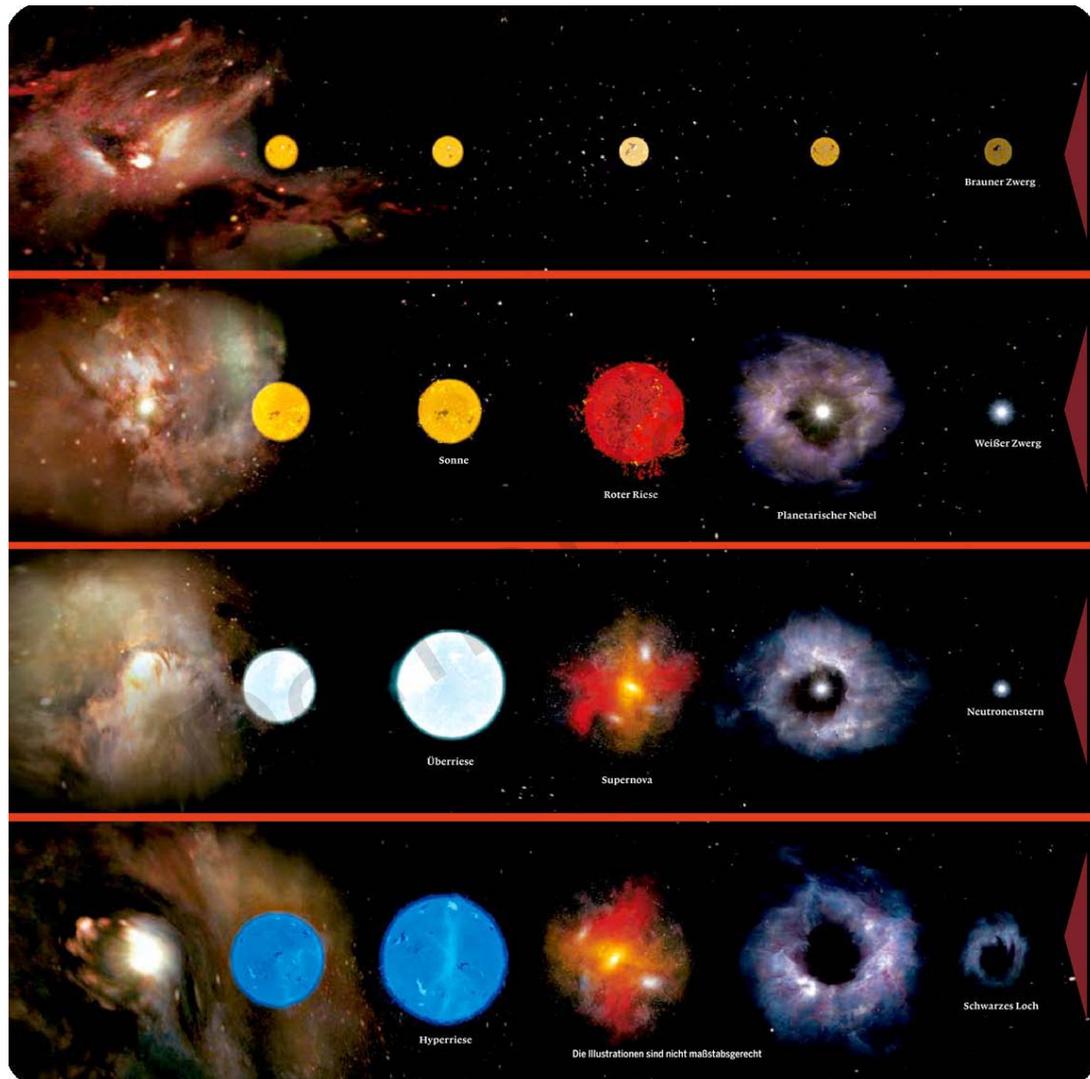


Abb. 12: Die Illustrationen zeigen den schematischen Lebensweg von 4 für ihre Masse typischen Sternen.<sup>1</sup>

### 3.7 Schalentheorie der Atomkerne

Die Schalentheorie der Atomkerne ist ähnlich aufgebaut wie der Atomaufbau im Schalenmodell nach Bohr. Bei diesem sind es die „seltene“ Elemente Helium, Neon, Argon usw., die anzeigen, dass eine Schale mit Elektronen voll besetzt ist. Die Elemente mit vollständig aufgefüllten Elektronenschalen haben bekanntlich viele gemeinsame chemische Eigenschaften und sind besonders stabil (Edelgase).

In ähnlicher Weise nimmt man in der sogenannten Schalentheorie der Atomkerne Schalen an, die entweder durch Protonen oder durch

<sup>1</sup> Paetsch, Martin; 2006; S. 102/103

Neutronen voll aufgefüllt werden. Nach dieser Theorie folgt die Anzahl von Protonen und Neutronen für eine Schale der Reihe 2 – 8 – 20 – 28 – 50 – 82. Für Neutronen lautet die nächste magische Zahl 126, für Protonen ergeben sich durch Unterschalen – abhängig von den Parametern des verwendeten Modells der Quantentheoretiker – bereits bei den Zahlen 114 und 120 die nächsten magischen Zahlen.

Die Bezeichnung „magische Zahlen“ hat rein historische Bedeutung und nichts mit Magie zu tun. Kerne, die ihre Schalen bis zu einer magischen Zahl mit Protonen oder Neutronen aufgefüllt haben, sind im Vergleich zu ihren Nachbarn im Isotopenfeld stabiler und daher weniger „anfällig“ für Kernreaktionen. Wenn man nur die Protonen betrachtet, zählen dazu die Elemente 2 (Helium), 8 (Sauerstoff), 20 (Calcium), 28 (Nickel), 50 (Zinn) und 82 (Blei). Auch die 14 (Silicium) besitzt eine "magische Stabilität", verursacht durch einen Unterschalenabschluss.

Ein doppelt magischer Kern besitzt eine magische Protonen- und eine magische Neutronenzahl. Beispiele hierfür sind  $^4\text{He}$  bzw.  $\alpha$ -Teilchen,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ca}$  und  $^{208}\text{Pb}$ . Außerdem haben Kerne von  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{139}\text{La}$  und  $^{209}\text{Bi}$  respektive 50, 82 und 125 Neutronen, da sie im Verlauf der nuklearen Prozesse die notwendigen Neutronen eingefangen haben. Dadurch sind sie gegen weitere Aktionen der freien Neutronen „immun“.

Bereits Anfang der sechziger Jahre wurden erste Überlegungen über die Existenz derartiger Schaleneffekte angestellt. Sie führten zu der Frage, ob diese Effekte auch weit jenseits des Urans zu einer ausreichend starken Stabilisierung der Atomkerne führen. So wird die Existenz einer doppelt magischen Konfiguration für das Isotop  $^{298}114$  mit 114 Protonen und 184 Neutronen erwartet. Berechnungen sagten ebenfalls eine Insel stabiler Elemente, ein Gebiet von Isotopen der so genannten superschweren Elemente (englisch: Super Heavy Elements (SHE)) mit dem Isotop  $^{298}114$  als Zentrum voraus.

Obwohl es in den letzten Jahren gelungen ist, Isotope der Elemente 112 bis 116 sowie 118 zu synthetisieren, ist es bisher noch keinem Forschungsteam gelungen, die Existenz von stabilen Kernen jenseits von 208 Blei nachzuweisen. Die Forschergemeinschaft ist aber zuversichtlich,

denn neuere Berechnungen sagen voraus, dass die nächsten Stabilitätszentren in der Nähe der Elemente 120 und 126, und somit im Bereich des Möglichen der nächsten Jahre liegen.

### 3.8 Rückführungen auf die Elementarverteilung im Universum

Durch die bisher beschriebenen Prozesse lässt sich die Elementarverteilung im Universum recht genau wiedergeben und erklären.

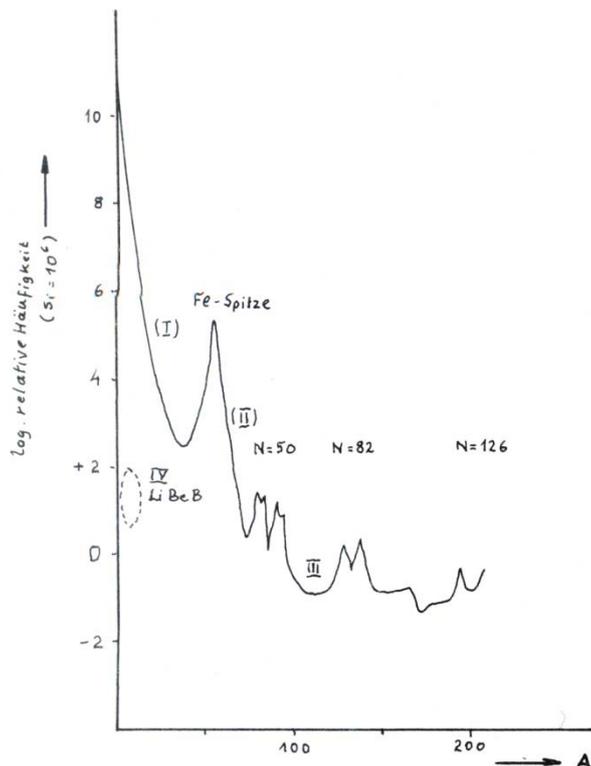


Abb. 1: Universelle Elementhäufigkeit in Abhängigkeit der Massezahl  $A$

Zone I: Die abfallende Häufigkeit zwischen Wasserstoff und Chrom ist durch Nukleosynthese zu erklären.

Zone II: Die Eisenspitze ist auf die Photodesintegrationsprozesse zurückzuführen, die besonders in den massereichen Sternen in der Endphase stattfinden.

Zone IV: Die Leichten Elemente: Lithium, Beryllium, Bor haben eine im Vergleich zur stark abfallenden der Nukleosynthese erhöhte Häufigkeit, da sie schon während der Urexplosion durch Hochenergiereaktionen entstanden sind.

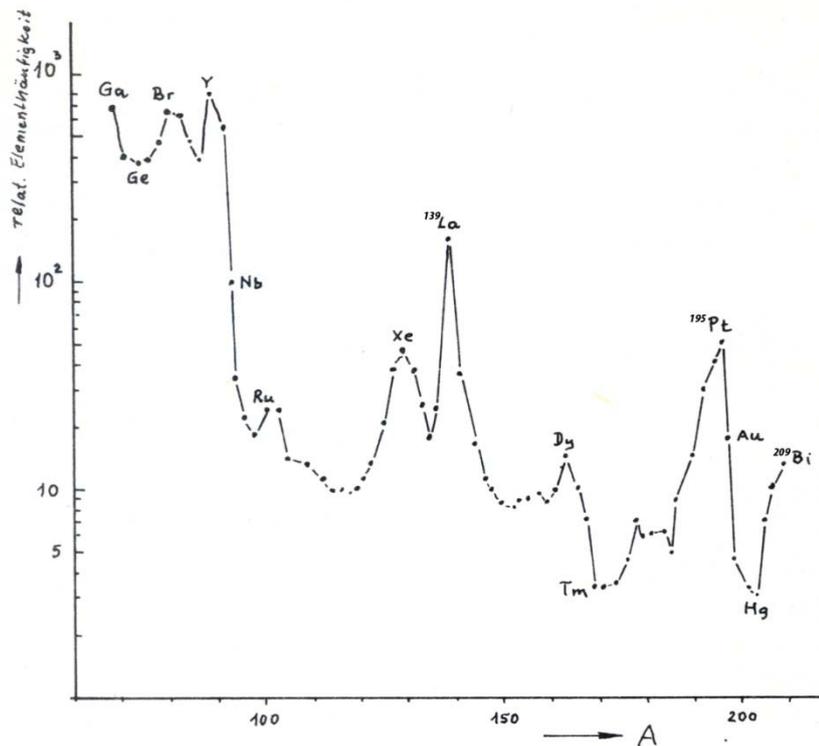


Abb. 2: Relative Elementarhäufigkeit der schweren Elemente

Zone III: Die schweren Elemente, die relativ mehr Neutronen als Protonen enthalten, sind durch die Reaktionen der Neutronenabsorption gebildet worden. Die Maxima bei den Elementen  $^{80}\text{Br}$ ,  $^{89}\text{Yttrium}$ ,  $^{131}\text{Xenon}$ ,  $^{139}\text{Lanthan}$ ,  $^{195}\text{Platin}$  und  $^{209}\text{Bismut}$  sind auf die erhöhten Bindungsenergien der Elemente aufgrund einer bestimmter Konfiguration - „magischen Zahlen“ - an Nukleonen zurückzuführen.

#### 4. Zukünftige Elementarverteilung im Universum

Das Universum ist seit dem Urknall einem Entwicklungsprozess, der Expansion, unterworfen. In diesen Kosmos der immerwährenden Veränderung entsteht, erbrüten und vergehen ständig neue Sterne. Doch ihre Anzahl ist nicht konstant. Durch die mit der Expansion einhergehende Abnahme der Materiedichte nimmt, wie schon in Kapitel 4.5 erwähnt, auch die Sternentstehungsrate und damit direkt proportional ihre Masse ab.

Somit werden wohl in ferner Zukunft immer weniger Sterne und damit schwere Elemente entstehen. Wenn man von einer ewigen Expansion ausgeht, würde die mittlere Materiedichte sogar soweit sinken, dass nicht nur die Kernfusion nicht mehr stattfinden kann, sondern sogar die Atome in ihre Bestandteile zerrissen würden.

Welchen Verlauf das Universum aber nehmen wird, lässt sich nicht genau vorhersagen. Drei Möglichkeiten werden heutzutage in Betracht gezogen.

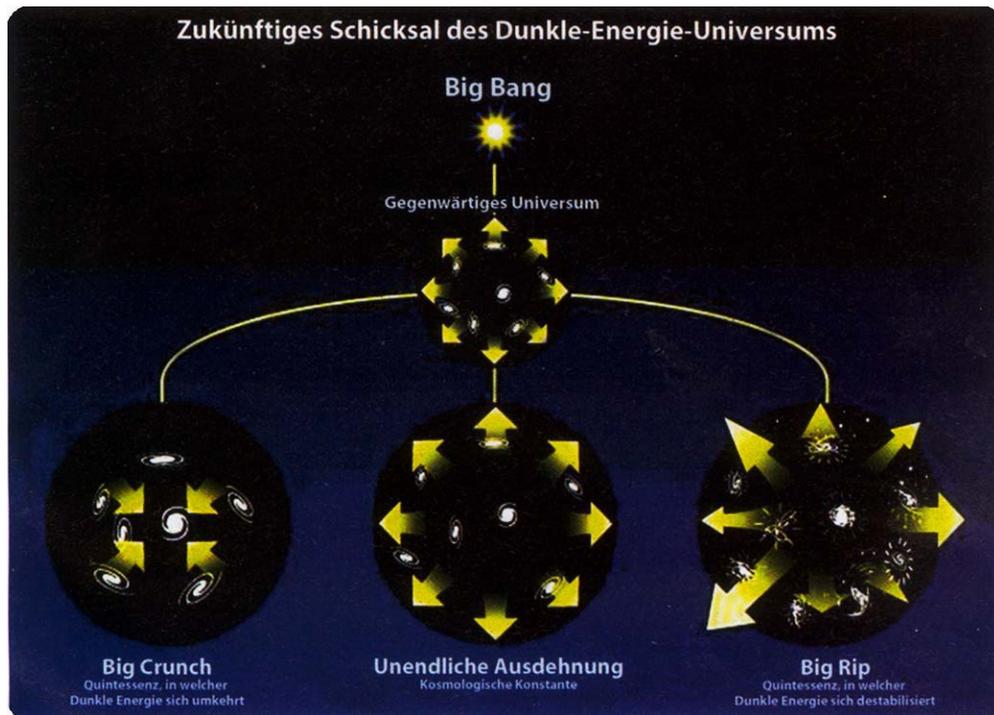


Abb. 13: Grafische Darstellung des zukünftigen Schicksal eines Universum, mit der Existenz einer Dunklen Energie<sup>1</sup>

1. Die unendliche Ausdehnung:  
Die Materie würde sich auf eine immer größere Fläche verteilen.
2. "Der Big Crunch":  
Die Expansion kehrt sich um und das Universum fällt in sich zusammen.
3. "Der Big Rip":  
Die Dunkle Energie destabilisiert sich und das Universum löst sich förmlich auf.

<sup>1</sup> Dr. Zaun, Harald; Anno Domini 22.000.000.00; Special Telepolis Kosmologie: 02/2007; Deutschland: Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG; 2007

Die Expansionsrate des Universums hängt von der kosmologischen Konstante bzw. der mysteriösen Dunklen Energie ab. Der Expansion entgegen wirkt die Gravitation. Somit bestimmt das Verhältnis der Expansion zur Gravitation die Ausdehnungsgeschwindigkeit des Universums. Momentan überwiegt die Dunkle Energie, weshalb das Universum expandiert.

Welche der doch sehr unterschiedlichen Hypothesen eintreten wird, lässt sich zur Zeit, wenn überhaupt irgendwann mal, nicht einmal vermuten, da die Forschungen auf diesem Gebiet noch zu wenig fortgeschritten sind und sich die Dunkle Energie bisher jedem Erklärungsversuch entzieht.

Wissenschaftler ziehen sogar die Möglichkeit in Betracht, dass die Dunkle Energie Wurm Löcher erzeugen kann, welche eine Zeitmaschine mit all ihren Paradoxen möglich machen würde. Aber im Gegensatz zum Anfang des Universums, welcher sich heutzutage einigermaßen rekonstruieren lässt, wird das Ende uns Menschen wohl sehr sehr lange, wenn nicht ewig, ein Mysterium bleiben.

## Literaturverzeichnis:

### Einzelveröffentlichungen/Monographien:

- Audouze, Jean; Die Entstehung der Elemente: Einführung in die Nuklear-Astrophysik; 1. Auflage; Deutschland: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH; 1972; ISBN-10: 3 421 02395 6
- Blome, Hans-Joachim; Zaun, Harald: Der Urknall: Anfang und Zukunft des Universums; 1. Auflage; Deutschland: Beck Verlag; 2004; ISBN-10: 3406508375
- Klessen, Ralf; Sterneneinstellung: Vom Urknall bis zur Geburt der Sonne; 1. Auflage; Deutschland: Elsevier GmbH; 2007; ISBN-10: 3 8274 1801 1

### Beiträge in Sammelwerken, Zeitschriften:

- Naica-Loebell, Andrea; Löchriges Weltall: Schwarze, Weiße und Wurmlöcher; Special Telepolis Kosmologie: 02/2007; Deutschland: Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG; 2007
- Povh, Bogdan; Elementarteilchenphysik und Kosmologie Sterne und Weltraum; Spektrum der Wissenschaft Dossier: Sterne und Weltraum; Deutschland: Verlagsgesellschaft mbH; 2007; ISSN: 1612-4618
- Dr. Zaun, Harald; Anno Domini 22.000.000.00; Special Telepolis Kosmologie: 02/2007; Deutschland: Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG; 2007
- Dr. Zaun, Harald; Exobiologisch – kosmisches Prinzip; Special Telepolis Kosmologie: 02/2007; Deutschland: Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG; 2007
- Blome, Hans-Joachim; Der Urknall: Ein Tag ohne Gestern; Special Telepolis Kosmologie: 02/2007; Deutschland: Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG; 2007
- Paetsch, Martin; Vom Werden und Vergehen der Sterne; Geo Kompakt Nr. 6; Das Universum; Deutschland: Gruner + Jahr AG & Co KG; 2006; ISSN: 1614-6913

**Dokumente aus dem Internet:**

- Andreas Kopp; [http://www.raumfahrer.net/raumfahrt/-raumsonden/WMAP\\_01.shtml](http://www.raumfahrer.net/raumfahrt/-raumsonden/WMAP_01.shtml); Aufruf: 18.01.08; Nr. 1 auf dem Speichermedium
- Netzzeitung; <http://www.netzeitung.de/spezial/weltraum/329177-.html>; Aufruf: 10.01.08; Nr. 2 auf dem Speichermedium
- Wikipedia; <http://de.wikipedia.org/wiki/Stern>; Stern; Aufruf:31.12.07; Nr. 3 auf dem Speichermedium
- Wikipedia; [http://de.wikipedia.org/wiki/Quark\\_\(Physik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Quark_(Physik)); Aufruf:29.12.07; Nr. 4 auf dem Speichermedium
- Wikipedia; <http://de.wikipedia.org/wiki/Standardmodell>; Aufruf:29.12.07; Nr. 5 auf dem Speichermedium
- Wikipedia; <http://de.wikipedia.org/wiki/Elementarteilchen>; Aufruf:27.12.07; Nr. 6 auf dem Speichermedium
- Wikipedia; <http://de.wikipedia.org/wiki/Nukleosynthese>; Aufruf:26.12.07; Nr. 7 auf dem Speichermedium
- Wikipedia; <http://de.wikipedia.org/wiki/Bindungsenergie>; Aufruf: 18.01.08; Nr. 8 auf dem Speichermedium
- Wikipedia; <http://de.wikipedia.org/wiki/Supernova>; Aufruf: 18.01.08; Nr. 9 auf dem Speichermedium
- Wikipedia; [http://de.wikipedia.org/wiki/Magische\\_Zahlen](http://de.wikipedia.org/wiki/Magische_Zahlen); Aufruf: 21.01.08 ; Nr. 10 auf dem Speichermedium

**Bildnachweiß:**

- Titelbild: <http://de.wikipedia.org/wiki/Supernova>
- Reaktionsgleichungen: Audouze, Jean; Die Entstehung der Elemente: Einführung in die Nuklear-Astrophysik; 1. Auflage; Deutschland: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH; 1972; ISBN-10: 3 421 02395 6, S. 56
- Audouze, Jean; Die Entstehung der Elemente: Einführung in die Nuklear-Astrophysik; 1. Auflage; Deutschland: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH; 1972; ISBN-10: 3 421 02395 6, S. 23

- Audouze, Jean; Die Entstehung der Elemente: Einführung in die Nuklear-Astrophysik; 1. Auflage; Deutschland: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH; 1972; ISBN-10: 3 421 02395 6; S. 97
- Klessen, Ralf; Sternentstehung: Vom Urknall bis zur Geburt der Sonne; 1. Auflage; Deutschland: Elsevier GmbH; 2007; S. 1
- [http://www.raumfahrer.net/raumfahrt/raumsonden/WMAP\\_01.shtml](http://www.raumfahrer.net/raumfahrt/raumsonden/WMAP_01.shtml)
- Klessen, Ralf; Sternentstehung: Vom Urknall bis zur Geburt der Sonne; 1. Auflage; Deutschland: Elsevier GmbH; 2007; ISBN-10: 3 8274 1801 1, S.49
- [http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Bindungsenergie\\_massenzahl.jpg](http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Bindungsenergie_massenzahl.jpg)
- Klessen, Ralf; Sternentstehung: Vom Urknall bis zur Geburt der Sonne; 1. Auflage; Deutschland: Elsevier GmbH; 2007; ISBN-10: 3 8274 1801 1, S.15
- Paetsch, Martin; Vom Werden und Vergehen der Sterne; Geo Kompakt 6.: Das Universum; Deutschland: Gruner + Jahr AG & Co KG; 2006; S. 105
- Audouze, Jean; Die Entstehung der Elemente: Einführung in die Nuklear-Astrophysik; 1. Auflage; Deutschland: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH; 1972; ISBN-10: 3 421 02395 6, S. 82
- Dr. Zaun, Harald; Exobiologisch – kosmisches Prinzip; Special Telepolis Kosmologie: 02/2007; Deutschland: Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG; 2007; S. 54
- Audouze, Jean; Die Entstehung der Elemente: Einführung in die Nuklear-Astrophysik; 1. Auflage; Deutschland: Deutsche Verlags-Anstalt GmbH; 1972; ISBN-10: 3 421 02395 6; S. 124
- Paetsch, Martin; Vom Werden und Vergehen der Sterne; Geo Kompakt Nr. 6; Das Universum; Deutschland: Gruner + Jahr AG & Co KG; 2006; ISSN: 1614-6913, S. 102/103
- Dr. Zaun, Harald; Anno Domini 22.000.000.00; Special Telepolis Kosmologie: 02/2007; Deutschland: Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG; 2007, S. 24

Ich erkläre hiermit, dass ich meine Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt habe und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.

....., den .....

Ort

Datum

Unterschrift des Schülers