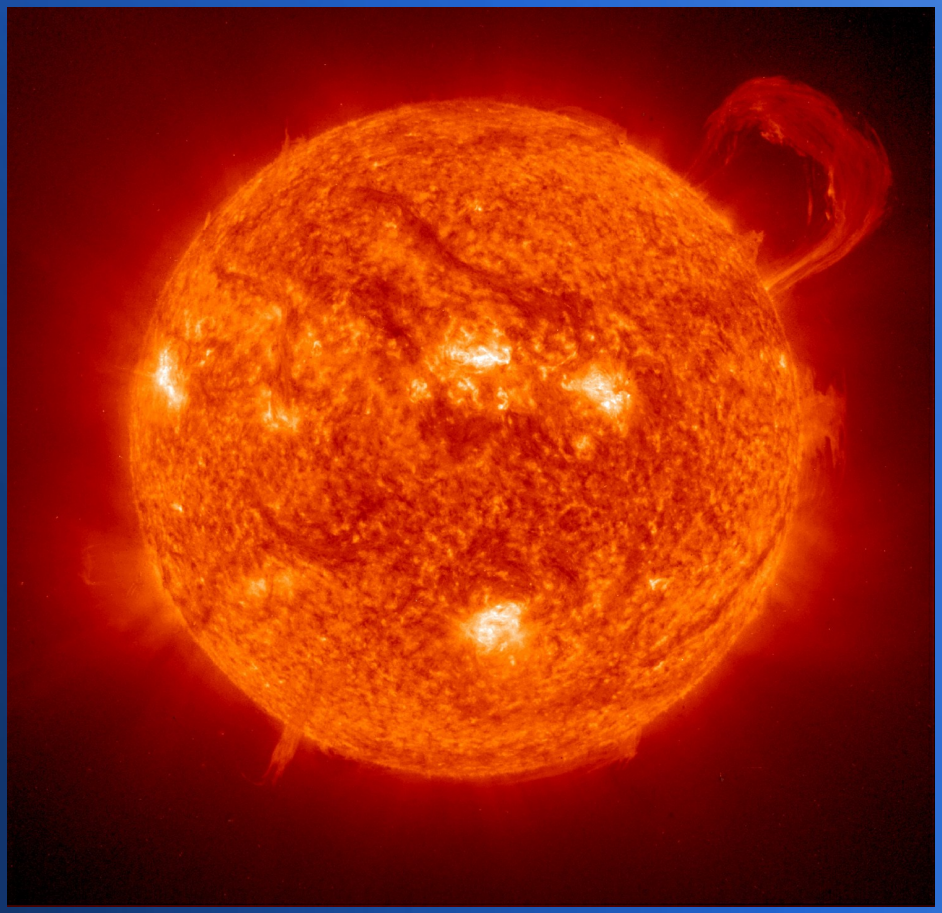
Fusion in der Sonne, Sternentwicklung

Die Sonne

Ein paar Daten:

- Mittlere Entfernung: 150 Mio. km
- Durchmesser: $1{,}4 \times 10^6$ km
- Masse: 2×10^{30} kg = 333.000 x M_E
- Massenverlust durch Sonnenwind: 1×10^9 kg/s
- Massenverlust durch Strahlung: 4×10^9 kg/s
- mittlere Dichte 1,41 g/cm^3
- Leuchtkraft $3{,}8 \times 10^{26}$ W



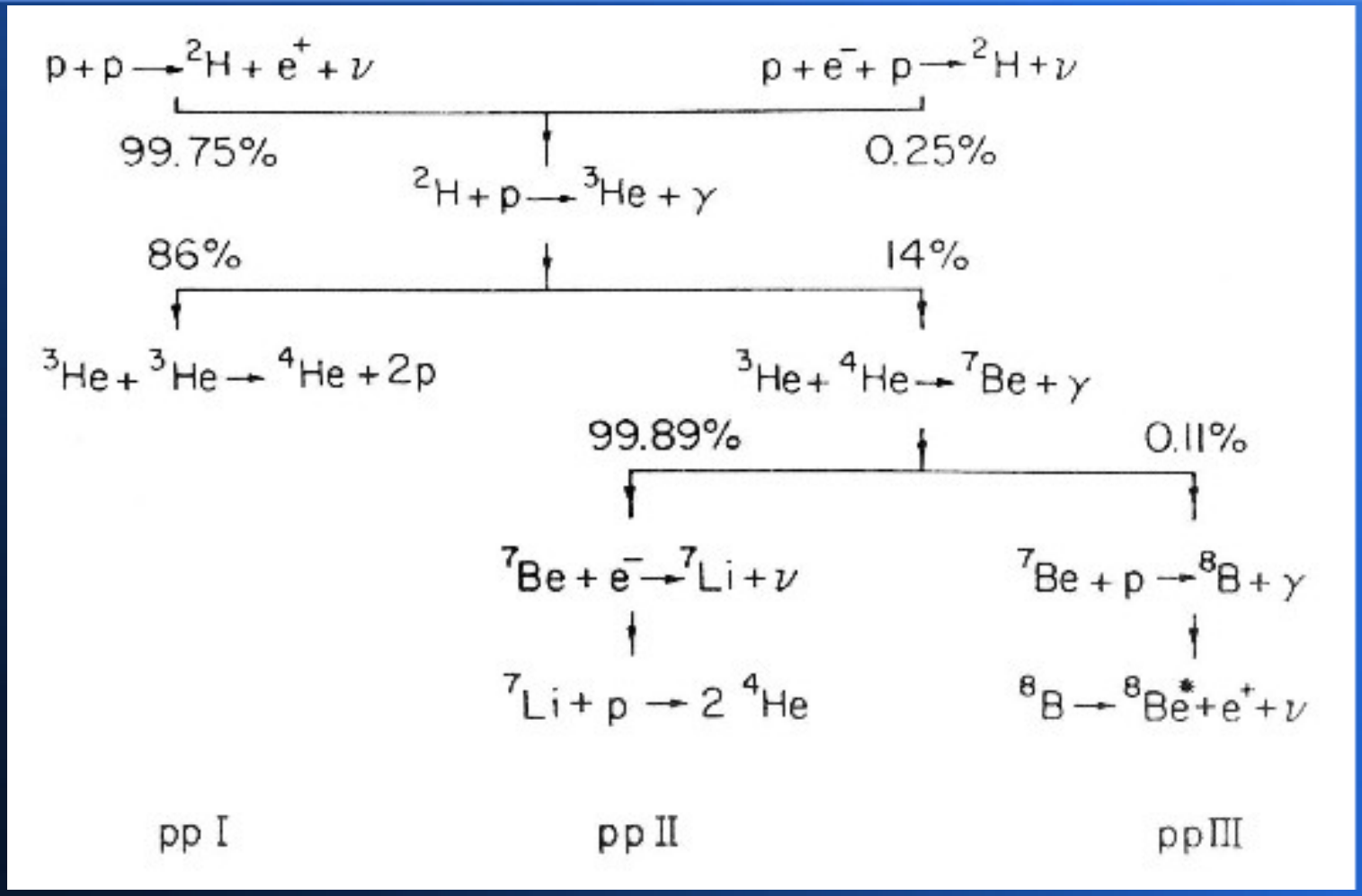
Quelle: [7]

Fusionsprozesse in Sternen

- Grundsätzlich sind zwei Fusionsprozesse für die Energieerzeugung in Sternen verantwortlich: pp-Kette und CNO-Zyklus
- Bei leichten Sternen ähnlich der Sonne: pp-Kette dominierender Fusionsprozess

$$p + p \rightarrow D + e^{+} + \nu + 0{,}42\,MeV$$
$$D + p \rightarrow {}^{3}He + \gamma + 5{,}49\,MeV$$
$$\underline{{}^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + 2\mathrm{p} + 12{,}86\,MeV}$$
$$4\mathrm{p} \rightarrow {}^{4}He + 2\,e^{+} + 2\,\nu + 26{,}2\,Mev$$

pp-Reaktionsnetzwerk

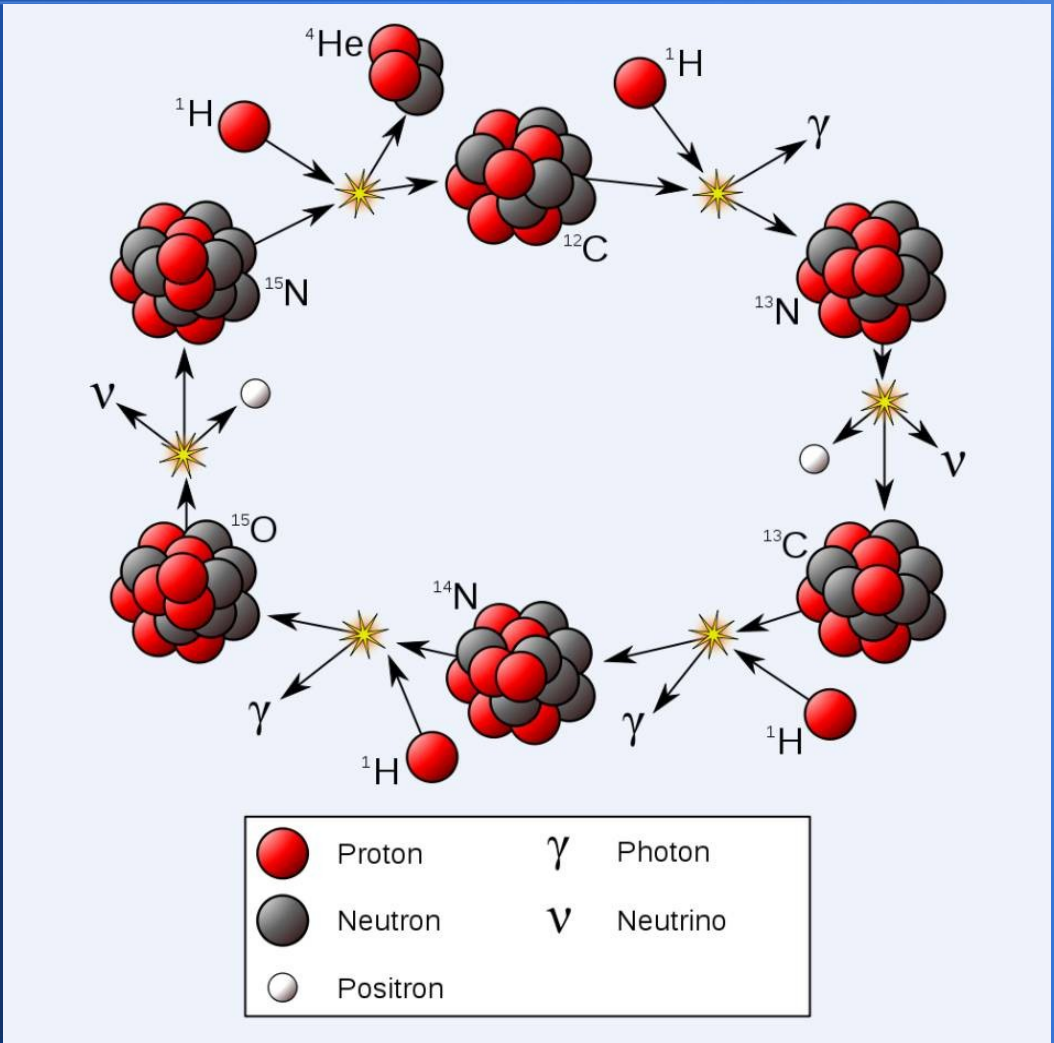


Quelle: [1]

CNO-Zyklus

- Beim CNO- oder Bethe-Weizsäcker-Zyklus dienen Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff als Katalysatoren, die bei der Reaktion nicht „verbraucht“ werden
- Gesamtreaktion ebenfalls

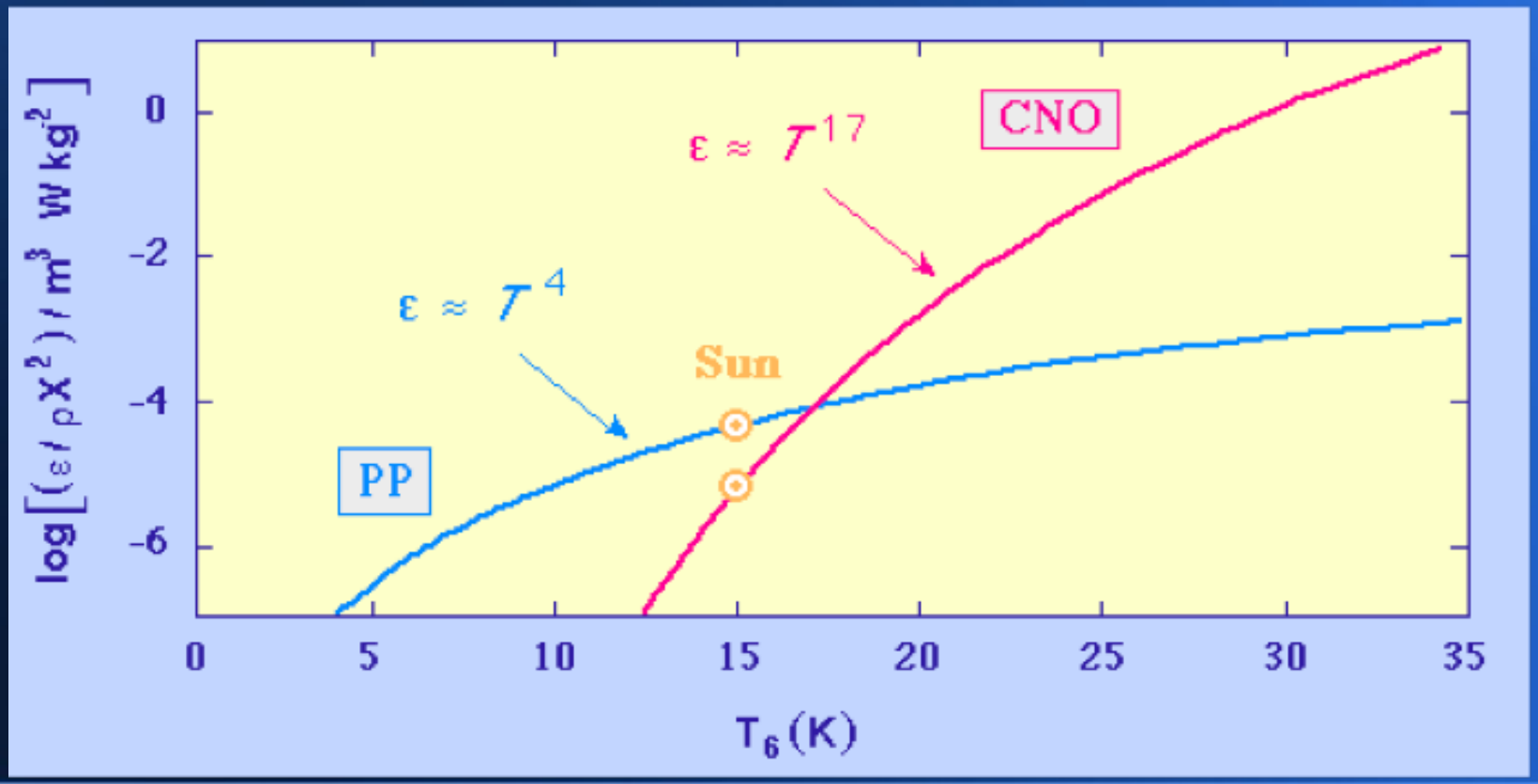
$$4\mathrm{p} \rightarrow {}^{4}He + 2\,e^{+} + 2\,\nu + 26{,}2\,Mev$$



Quelle: [2]

Temperaturabhängigkeit der Energieerzeugungsrate

- In der Sonne wird nur 1% der Energie über den CNO-Zyklus erzeugt
- Ab M>1,5 M_s und T>15 Mio. K dominiert die Energieerzeugung über den CNO-Zyklus



$$\epsilon = \frac{erzeugte\ Energie}{Zeit \cdot Volumen}$$

Quelle: [1]

Stabilität der Fusionsleistung

- Virialtheorem im nicht-relativistischen Fall:

$$E_{tot} = E_{kin} + E_{pot} = \frac{1}{2} E_{pot} = -E_{kin}$$

→ Wenn ein Stern Energie verliert (E_{tot} sinkt), kontrahiert er und wird heißer

- Während des Wasserstoff-Brennens regelt sich die Fusionsleistung selbstständig
- Sollte sich die Fusionsleistung im Kern spontan erhöhen, wird mehr Energie erzeugt, als abgeführt werden kann → Aus dem Virialtheorem folgt, dass die Gravitationsenergie steigt, der Stern expandiert und kühlt dabei ab → dadurch sinkt die Fusionsleistung wieder

Weitere Fusionsprozesse

- Heliumbrennen (triple-α process)

$$2\,{}^{4}He + 95\,keV \rightarrow {}^{8}Be + \gamma$$
$$\underline{{}^{8}Be + {}^{4}He \rightarrow {}^{12}C + \gamma + 7{,}37\,MeV}$$
$$3\,{}^{4}He \rightarrow {}^{12}C + \gamma$$

  - Da Be-8 instabil mit $\tau = 2{,}6 \times 10^{-16}$s ist ein nahezu simultaner Zusammenstoß von 3 α-Teilchen nötig
  - Deshalb war beim Urknall keine Nukleosynthese von Kohlenstoff möglich, da die nötigen Temperaturen nicht lange genug vorherrschten. (Beryllium-Barriere)

Weitere Fusionsprozesse

- Kohlenstoffbrennen
  - $M > 4M_S$
  - In unserer Sonne daher nicht mehr möglich
  - Setzt ein wenn Heliumbrennen erloschen ist, nach dem Kollaps des Kerns und dem verbundenen Temperaturanstieg

$$^{12}C + {}^{12}C \rightarrow \begin{cases} {}^{23}Na + H \\ {}^{20}Ne + {}^{4}He \\ {}^{23}Mg + n \\ {}^{24}Mg + \gamma \end{cases}$$

Weitere Fusionsprozesse

- Sauerstoffbrennen
  - M > 8M$_S$

$$
{}^{16}O + {}^{16}O \rightarrow \begin{cases} {}^{32}S + \gamma \\ {}^{31}P + H \\ {}^{31}S + n \\ {}^{28}Si + {}^{4}He \\ {}^{24}Mg + 2\,{}^{4}He \end{cases}
$$

- Siliziumbrennen, etc. bis hin zu Eisen

Temperaturbereiche für die verschiedenen Fusionsprozesse

Temperaturbereich	Energiequelle/-prozess
bis 5 Mill. K	Wärme, Rotation, Gravitation
5 – 15 Mill. K	pp-Reaktion: 26.2 MeV/Reaktion
15 – 50 Mill. K	CNO-Zyklus: 25 MeV/Reaktion
100 – 200 Mill. K	3α-Prozess: 7.3 MeV/Prozeß
500 – 1000 Mill. K	C-Brennen
um 1.5 Mrd. K	O-Brennen
über 1.5 Mrd. K	Si-Brennen

Quelle: [1]

Grundgleichungen für den Sternaufbau

Hydrostatisches Gleichgewicht:

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm(r)\rho(r)}{r^2}$$

Massenbilanz:

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$

Wärmetransport:

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3}{4ac}\frac{\kappa(r)\rho(r)}{T^3(r)}\frac{L(r)}{4\pi r^2}$$

Leuchtkraft:

$$\frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \epsilon(r)$$

Aufbau der Sonne

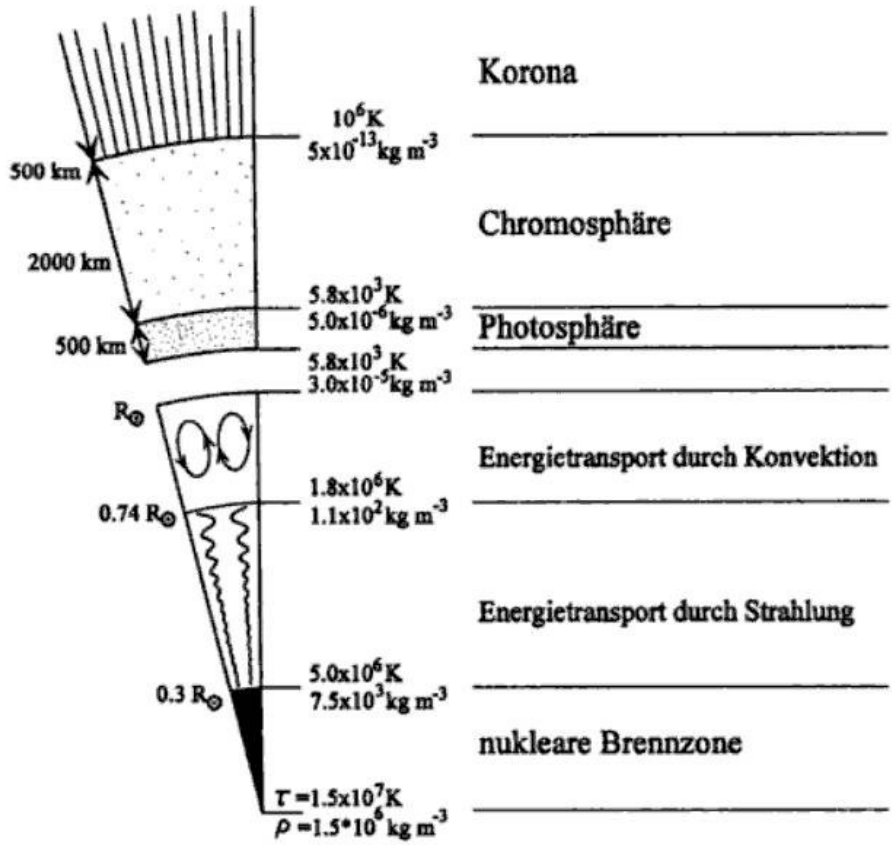


Abbildung 3.2.3: Schematischer Aufbau unserer Sonne mit den charakteristischen Modellzonen.

Quelle: [5]

Aufbau der Sonne

- Kern/Fusionszone (0-0,25 R_S):
  - Definition: Jener Radius, bei dem die nach außen strömende Energie/Zeiteinheit 99% der Leuchtkraft des Sterns erreicht.
  - 1,6% des Volumens aber rund 50% der Masse der Sonne
  - Druck bei 200 Milliarden bar
  - Temperatur ~15 Mio. K

Aufbau der Sonne

- Strahlungszone (0,25-0,75 R_S):
  - Die bei der Fusion im Kern freiwerdende Energie wird in dieser Zone ausschließlich durch Strahlung nach außen befördert
  - Diffuser Strahlungstransport
  - Die mittlere freie Weglänge der Photonen: ~mm
  - Zeit die ein Photon braucht um die Strahlungszone zu durchqueren: >10.000 Jahre

Aufbau der Sonne

- Konvektionszone (0,75-1 R_S):
  - Energietransport durch turbulente Konvektionsströme
  - Konvektion tritt ein wenn der Temperaturgradient einen kritischen Wert überschreitet, der vom Druckgradienten im Inneren des Sterns abhängt
  - Daher tritt in der Sonne keine Konvektion im Kern auf (in Sternen >1,5 M_S allerdings schon)

Aufbau der Sonne

- Photosphäre
  - ca. 400km dicke Schicht
  - „Oberfläche“ der Sonne welche bei T=5800 K annähernd Schwarzkörperspektrum und damit das von uns sichtbare Licht aussendet
- Chromosphäre
  - verantwortlich für die Fraunhoferschen Linien im Sonnenspektrum
- Korona
  - bei Sonnenfinsternis sichtbar
  - mehrere Millionen Grad heiß (warum das so ist, weiß man nicht)

Sternentwicklung

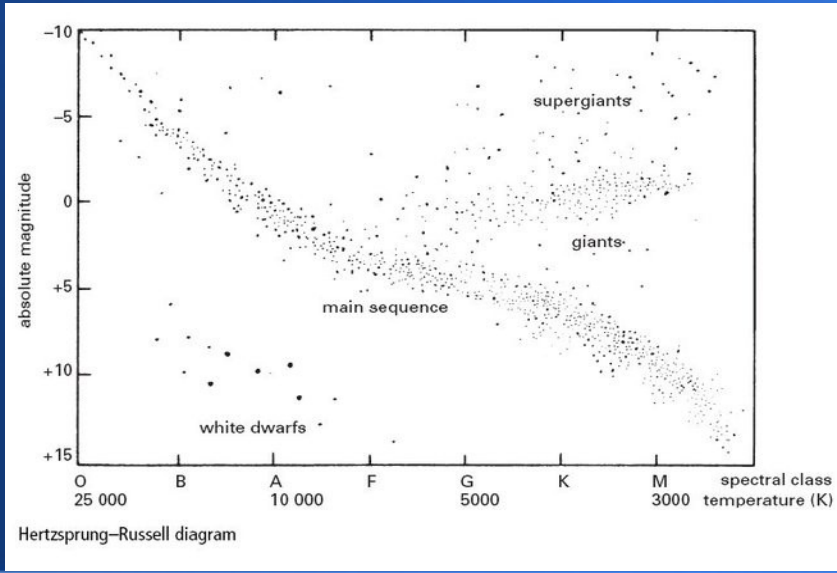
- Masse-Leuchtkraft-Beziehung ungefähr $L \sim M^3$ und Leuchtkraft <> Energieverbrauch
- Energiereservoir ~M
- Deshalb fällt die Lebensdauer eines Sterns $\sim M^{-2}$
- Beispiel für Sterne mit verschiedenen Massen

Phasen	0.6 [M_s]	1	20
Entstehungsphase	~ 100 Mill. Jahre	30 Mill. Jahre	55 000 Jahre
Hauptreihenstadium	50–75 Mrd. Jahre	6–10 Mrd. Jahre	8.5–10 Mill. Jahre
Riesen+Veränderliche	5–10 Mrd. Jahre	1.5–3 Mrd. Jahre	~ 0.7 Mill. Jahre

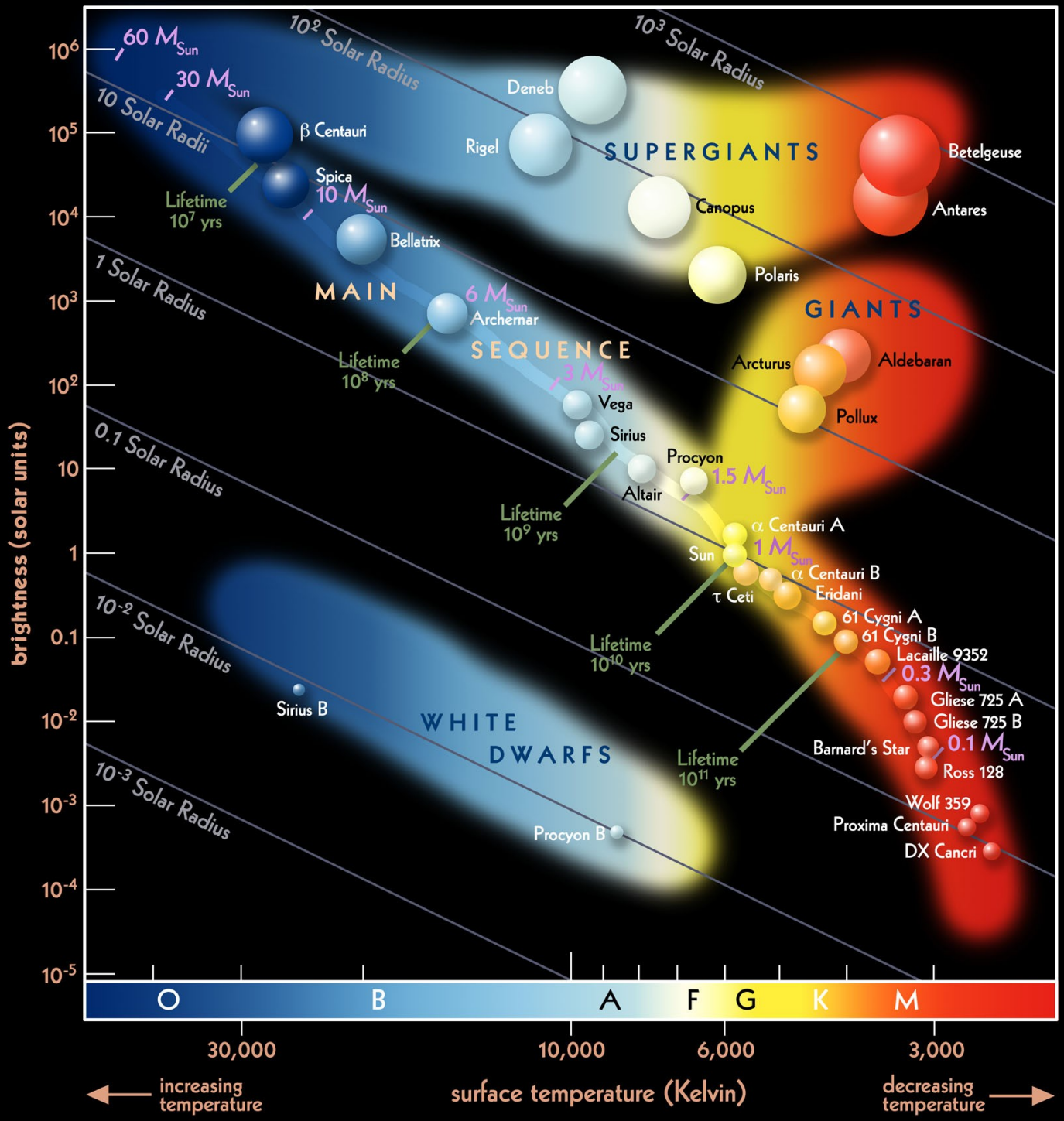
Quelle: [1]

Hertzsprung-Russell Diagramm

- y-Achse: Leuchtstärke (meist in Einheiten von L_S)
- x-Achse: Oberflächentemperatur (nach rechts abnehmend) und/oder Spektralklasse
- Bei genügend vielen Eintragungen verschiedener Sterne ist Häufung in typischen Bereichen erkennbar
- Charakteristische Bereiche sind vor allem Hauptreihe und (Roter) Riesenast
- Massereiche Sterne befinden sich links oben im Diagramm, massearme rechts unten
- Sternentwicklung kann im HR-Diagramm beschrieben werden



Quelle: [6]


brightness (solar units)
10^6
10^5
10^4
10^3
10^2
10
1
0.1
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
10^{-5}
10^2 Solar Radius
10^3 Solar Radius
10 Solar Radii
1 Solar Radius
0.1 Solar Radius
10^{-2} Solar Radius
10^{-3} Solar Radius
60 M_{Sun}
30 M_{Sun}
10 M_{Sun}
6 M_{Sun}
3 M_{Sun}
1.5 M_{Sun}
1 M_{Sun}
0.3 M_{Sun}
0.1 M_{Sun}
Lifetime 10^7 yrs
Lifetime 10^8 yrs
Lifetime 10^9 yrs
Lifetime 10^{10} yrs
Lifetime 10^{11} yrs
β Centauri
Spica
Bellatrix
Archernar
Vega
Sirius
Altair
Procyon
Sun
α Centauri A
α Centauri B
τ Ceti
Eridani
61 Cygni A
61 Cygni B
Lacaille 9352
Gliese 725 A
Gliese 725 B
Barnard's Star
Ross 128
Wolf 359
Proxima Centauri
DX Cancri
Deneb
Rigel
Canopus
Polaris
Betelgeuse
Antares
Arcturus
Aldebaran
Pollux
Sirius B
Procyon B
MAIN SEQUENCE
SUPERGIANTS
GIANTS
WHITE DWARFS
O
B
A
F
G
K
M
30,000
10,000
6,000
3,000
increasing temperature
surface temperature (Kelvin)
decreasing temperature

Quelle: [3]

Entwicklung der Sonne

- Erinnerung: Kern: Jener Radius, bei dem die nach außen strömende Energie/Zeiteinheit 99% der Leuchtkraft des Sterns erreicht.

Masse in M_{Sonne}	0.8	1.0	2.5	10
Kernradius in R_{Sonne}	0.28	0.23	0.18	0.19

- Kritische Massen bei denen es einem Stern möglich ist Fusionsprozesse zu starten:

Brennphase	Kritische Kernmasse	Kritische Gesamtmasse
Wasserstoffbrennen	≥ 0.08	≥ 0.08
Heliumbrennen	≥ 0.35	≥ 0.5
Kohlenstoffbrennen	≥ 0.9	≥ 8

Quelle: [1]

Entwicklung der Sonne

- In den nächsten 5 Milliarden Jahren wird die Leuchtkraft der Sonne stetig auf etwa das zweifache steigen, bis der Wasserstoff im Sonnenzentrum aufgebraucht ist
- Die Fusionszone verlagert sich in einen schalenförmigen Bereich um das Zentrum
- Da keine Fusionsenergie mehr im Zentrum freigesetzt wird, kontrahiert sich der Heliumkern kontinuierlich um das Gleichgewicht aus Druck und Gravitation aufrecht zu erhalten
- Dabei steigt die Kerntemperatur an die umgebende Wasserstoffschale wird aufgeheizt, Wasserstoff-Schalenbrennen startet
- Damit verbunden vergrößert sich der Sonnenradius, die Oberflächentemperatur sinkt, die Sonne wird rötlicher und bewegt sich im HR-Diagramm von der Hauptreihe weg

  → Die Sonne wird zum Roten Riesen

Entwicklung der Sonne

- In etwa 7 Milliarden Jahren beschleuningt sich der Anstieg, die Leuchtkraft erreicht das 2300-fache des heutigen Wertes bei einem Sonnenradius von 170 R_0. Merkur und Venus werden dabei vernichtet. Die Erdoberfläche schmilzt.
- Aufgrund der verringerten Gravitation auf der Sonnenoberfläche verliert die Sonne in dieser Phase ca. 25% ihrer Masse durch Sonnenwind.
- Dadurch, dass die Planetenbahnen sich somit vergrößern, entgeht die Erde knapp der Zerstörung.
- Mittlerweile ist die Temperatur im Heliumkern durch die Kontraktion soweit angestiegen (etwa 100 Mio. K), dass die Heliumfusion möglich ist.
- Weil der Entartungsdruck des Elektronengases dominant ist, expandiert der Kern aufgrund der erhöhten Temperatur nicht, die Fusion kann sich somit nicht selbst regulieren

Quelle: [3]

Entwicklung der Sonne

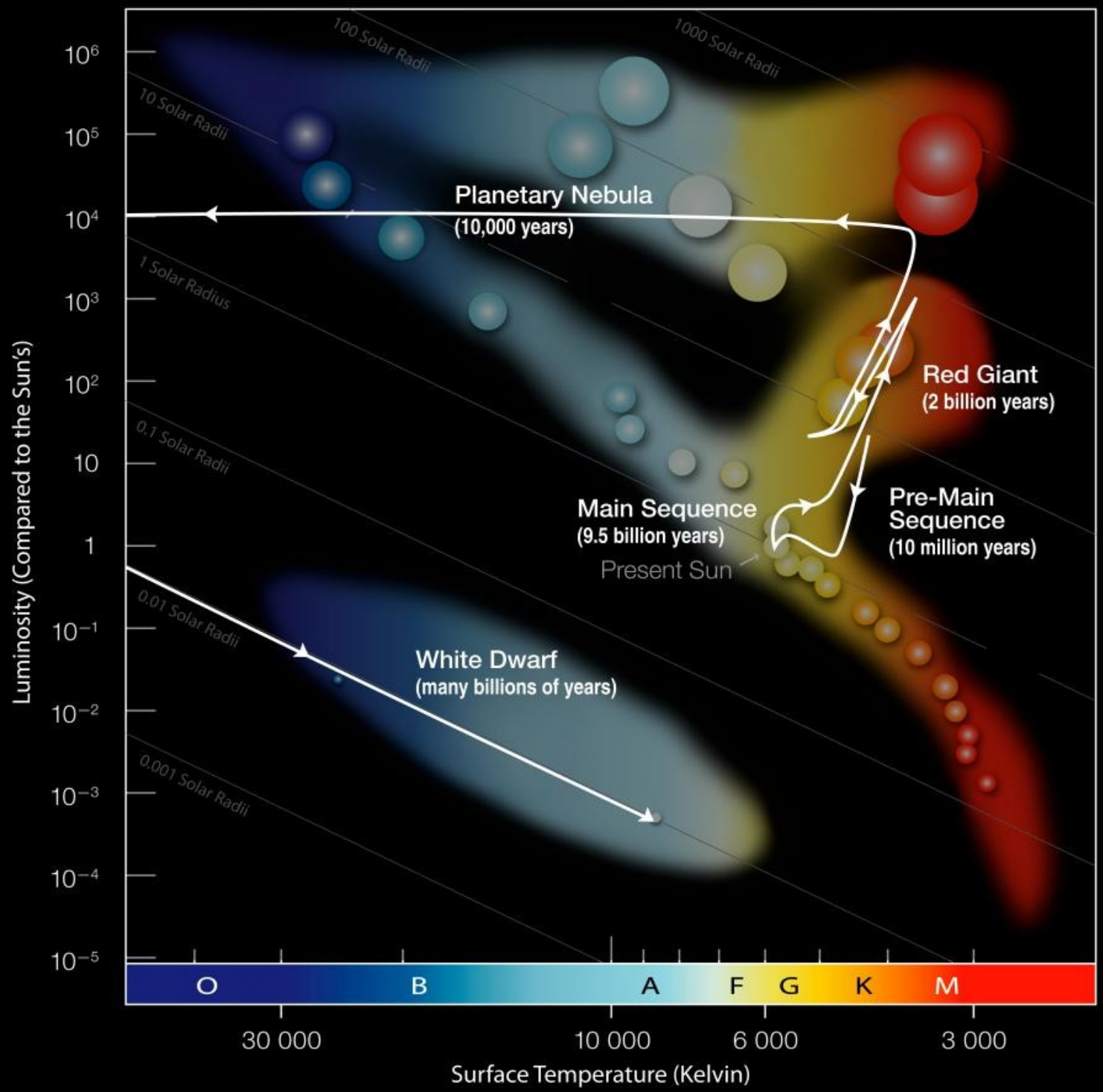
- Energieerzeugung des 3α-Prozesses $\varepsilon \sim T^{30}$
- Somit kommt es zu einem explosionsartigen Zünden der Heliumfusion

  → „Helium Flash“
- Dabei steigt die Sonnenleistung für wenige Sekunden auf 10^{10} L_0 und verbrennt während dieser Sekunden 3% ihres gesamten Heliumreservoirs
- Äußerlich ist davon nichts zu bemerken
- Im Gegenteil vergrößert sich der Sonnenradius wegen des schlagartigen Anstiegs der im Kern erzeugten Energie und die Helligkeit nimmt ab
- Heliumkern expandiert nun und stabilisiert sich, sodass nun gleichmäßiges Heliumbrennen einsetzt, welches 100 Mio. Jahre anhält
- Gleichzeitig immer noch Wasserstoff-Schalenbrennen

Entwicklung der Sonne

- Wenn auch Helium verbraucht ist, kontrahiert sich der Kohlenstoff-Kern und heizt sich dabei stark auf
- Das daraus resultierende Heliumschalenbrennen dauert nur noch 20 Mio. Jahre an
- Wahrscheinlich sind nun mehrere kleine Helium-Blitze und Oszillation von Leuchtkraft und Radius
- Die Sonne verliert nun die Helium- und Wasserstoff-Fusionszonen zusammen mit der gesamten äußeren Hülle (Planetarischer Nebel)
- Zurück bleibt ein heißer Kern aus Kohlen- und Sauerstoff
- Dieser Kern ($r=0{,}08\ R_0, T_{Oberfl}=120.000K$) strahlt UV-Licht aus, und regt somit den planetarischen Nebel zum Leuchten an
- Nach 10.000 Jahren hat sich der Nebel verflüchtigt und es bleibt nur noch ein <u>weißer Zwerg</u> von der Größe der Erde (aber einer Masse von $0{,}5\ M_S$) übrig

H-R DIAGRAM - SUN's EVOLUTIONARY TRACK



Quelle: [4]

Was passiert mit anderen Sternen?

- Abhängig von ihrer Masse erreichen Sterne verschiedene Endstadien
- $M<0{,}5\ M_S$:
  - Der kontrahierende Heliumkern erreicht nicht die erforderliche Temperatur für die Heliumfusion
  - Wasserstoff-Brennen hört auf und der Stern kollabiert

    → Weißer Zwerg (ohne Zwischenstufe Roter Riese)

Was passiert mit anderen Sternen?

- $0{,}5\ M_S < M < 2{,}5\ M_S$:
  - Entwicklung analog zur Sonne

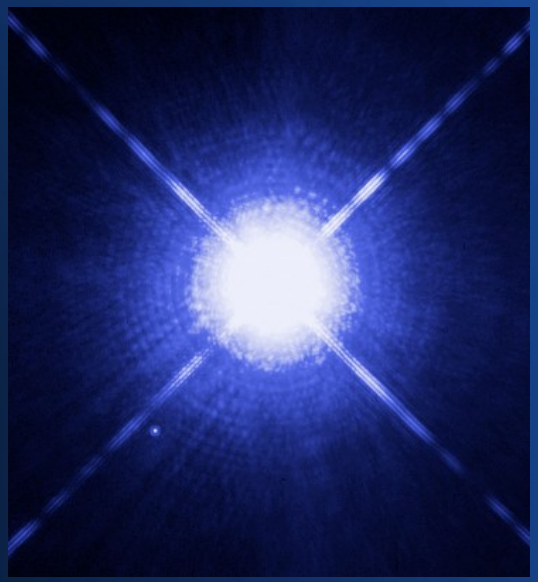
    → Weißer Zwerg (mit Zwischenstufe Roter Riese)

Gemini Observatory:
Planetarischer Nebel
NGC 7027 im
Sternbild Schwan

Was passiert mit anderen Sternen?

- $M > 2{,}5\ M_S$:
  - Ähnlich der Entwicklung der Sonne, allerdings mit kontinuierlichem Übergang zum Heliumbrennen (kein helium flash)

    → Weißer Zwerg



NASA/ESA:
Doppelsterne
Sirius A und B

Was passiert mit anderen Sternen?

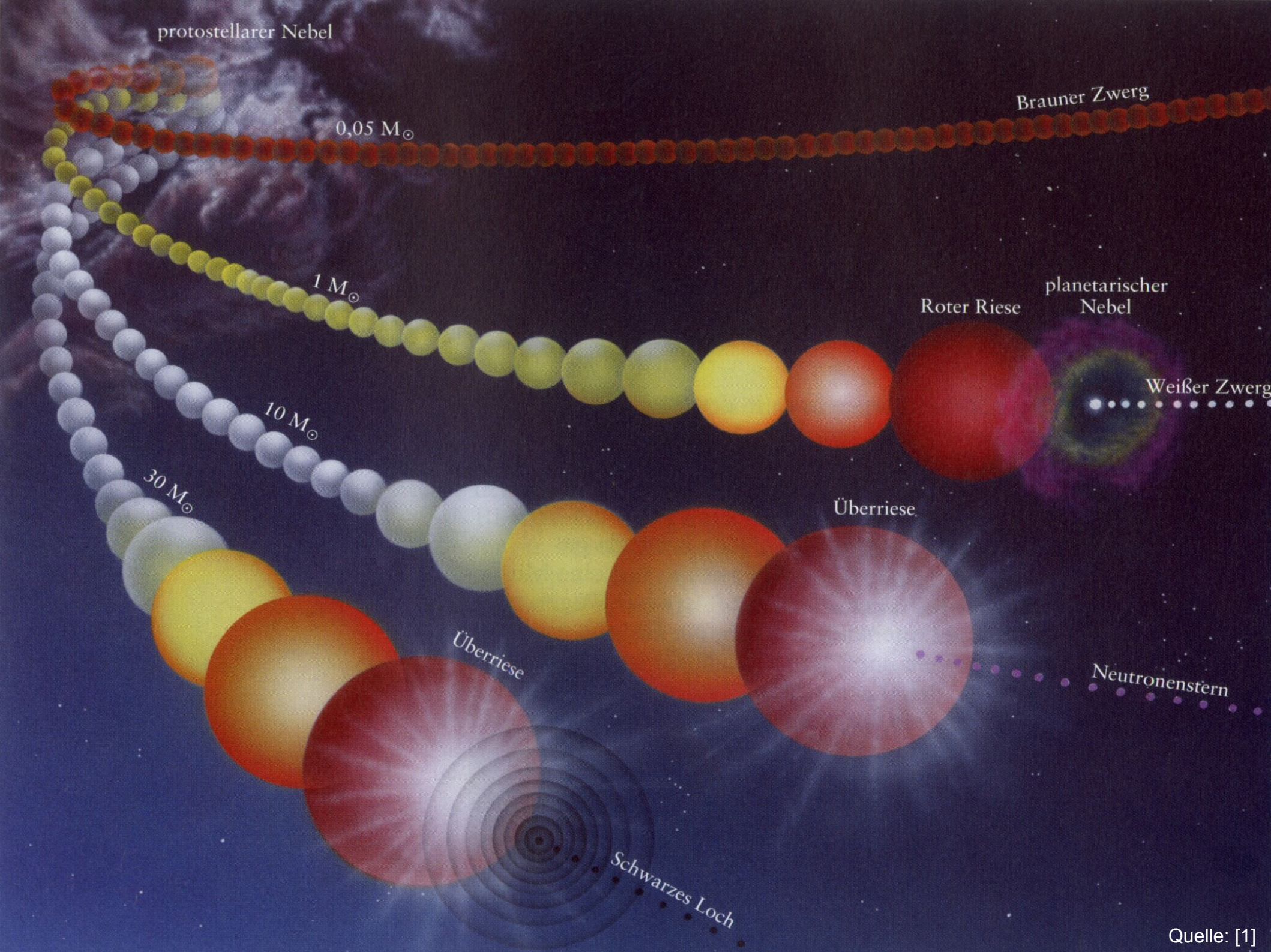
- $M > 8\ M_S$:
  - Der Stern fusioniert C, Ne, Si bis hin zu Fe und bläht sich zu einem Roten Überriesen auf
  - Da die Anfangsmasse nun groß genug ist, um nach dem Verlust durch Sonnenwinde noch größer als die Chandrasekhar-Masse(1,44 M_S) zu sein, kollabiert der Stern in einer Supernova-Explosion zu einem

    → Neutronenstern/Pulsar

Was passiert mit anderen Sternen?

- $M > 8\ M_S$:
  - Ist die Endmasse sogar größer als 2,5 M_S(Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Grenze) kann ein Neutronenstern nicht stabil existieren und entsteht ein

    → Schwarzes Loch


protostellarer Nebel
Brauner Zwerg
0,05 M⊙
1 M⊙
Roter Riese
planetarischer Nebel
Weißer Zwerg
10 M⊙
30 M⊙
Überriese
Überriese
Neutronenstern
Schwarzes Loch

Quelle: [1]

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Quellenangaben:
[1]: Vorlesung: Einführung in die Astrophysik WS10/11, Frank Eisenhauer/ Günther Hasinger
[2]: http://de.wikipedia.org/wiki/Bethe-Weizs%C3%A4cker-Zyklus
[3]: http://ia.terc.edu/images/mod_05/H-R%20Diagram.jpg
[4]: http://www.museumofflight.org/files/imagecache/lightbox/EvolutionaryTrack.jpg
[5]: Astrophysik, Karl-Heinz Spatschek, Teubner-Verlag 2003
[6]: http://science.jrank.org/article_images/science.jrank.org/hertzsprung-russell-diagram.1.jpg
[7]: http://www.dlr.de/rd/Portaldata/28/Resources/images/RX/SOHO_EIT_Sonne1500.jpg