

Astro121 - Einführung in die Astronomie

Sterne – Aufbau und Entwicklung I

Prof. Frank Bigiel

Argelander-Institut für Astronomie

Sternaufbau

Sterne - Aufbau

Problemstellung:

Aufbau der Sterne? Energieerzeugung? Zeitliche Entwicklung?

-> **Ziel:** Verständnis der physikalischen Größen durch Verbindung mit beobachtbaren Größen

-> Physikalische Beziehung zwischen

- beobachtbare Größen: Masse **M**, Radius **R**, Leuchtkraft **L**
- innerem Aufbau, lokalen Größen: Temperatur **T**, Dichte **ρ** , Druck **P**

-> Vergleich zur Beobachtung:

- Spektralklassen, Leuchtkraftklassen
- HRD: Hauptreihe, Riesenäste, Zwergsterne
- empirische Masse-Leuchtkraft-Beziehung

-> Theorie des Sternaufbaus: begründet von

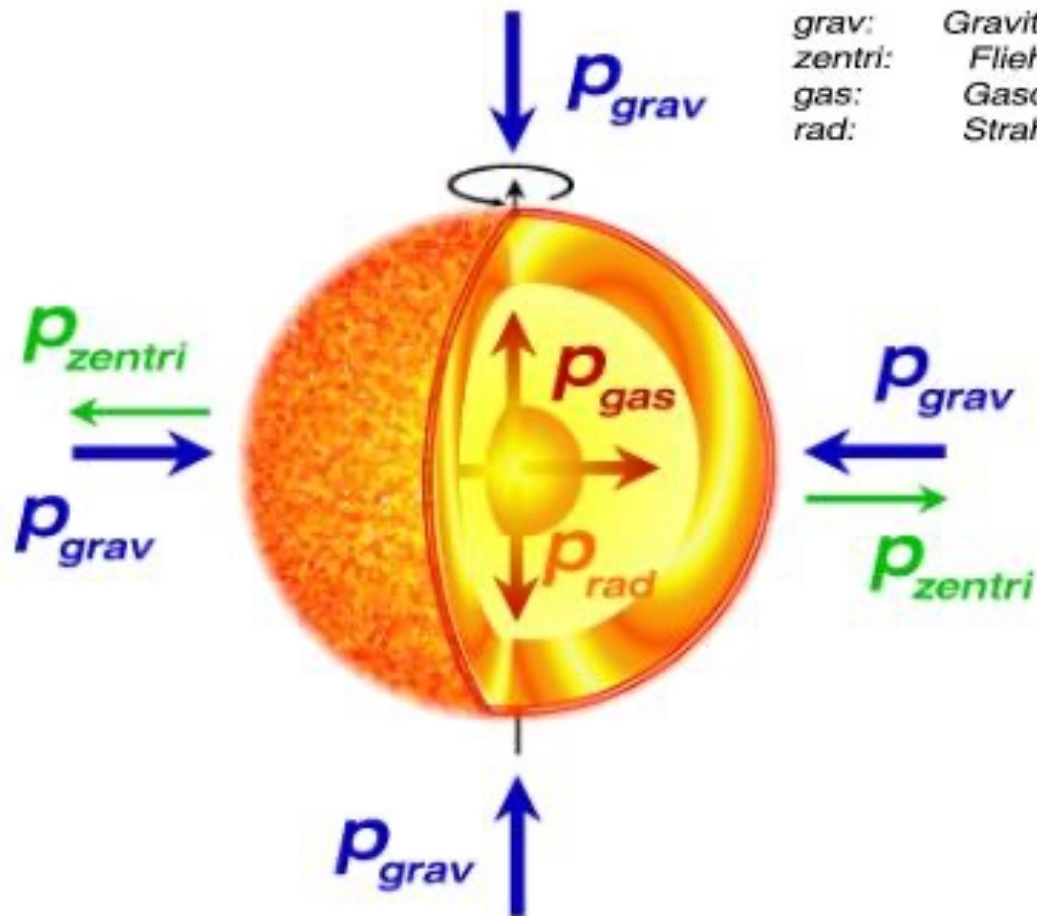
Russell (1913), Lane / Emden "Physik der Gaskugeln" (1907),
Eddington "The internal constitution of stars" (1926)

Gleichgewicht der Kräfte

- Die Oberflächentemperatur der Sonne ist bereits so hoch, dass die Materie nur im gasförmigen Zustand existieren kann. Das Eigengewicht der Gasverteilung führt zu einer Schichtung des Gases, dessen Druck mit wachsender Tiefe zunimmt. Eine so erzeugte Druckverteilung wird als **hydrostatischer Druck** bezeichnet.
- **Die Sonne hat eine konstante Größe, daher muss es ein Gleichgewicht zwischen der nach Innen gerichteten Gravitationskraft und einer nach Außen wirkenden Kraft** existieren. Der Gasdruck, erzeugt durch die thermische Bewegung der Atome, wäre eine geeignete Größe.

Druckarten

grav: Gravitation
zentri: Fliehkraft
gas: Gasdruck
rad: Strahlung



Druckbilanz:

$$p_{\text{grav}} = p_{\text{zentri}} + p_{\text{gas}} + p_{\text{rad}}$$

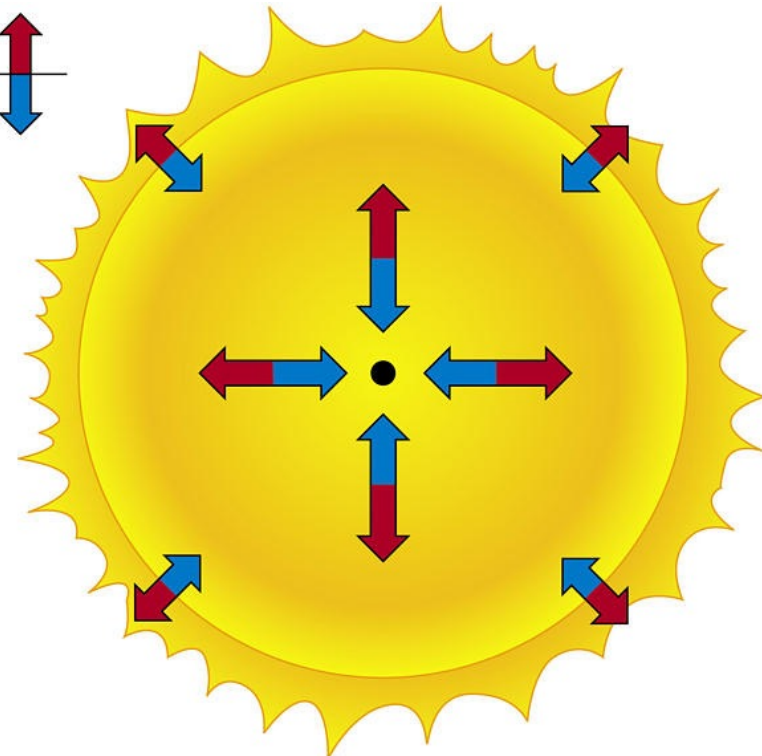
Sterne - Aufbau

Arbeitshypothese:

- > **Sterne sind Gaskugeln, durch Eigen-Gravitation gebunden**
- > Sterne befinden sich nahe eines Gleichgewichtszustandes
- > Energieverluste durch Strahlung:
 - > **Entwicklung auf langer Zeitskala**
- > Druckaufbau durch **Energieerzeugung im Sterninneren**
 - > **Energiequelle???**

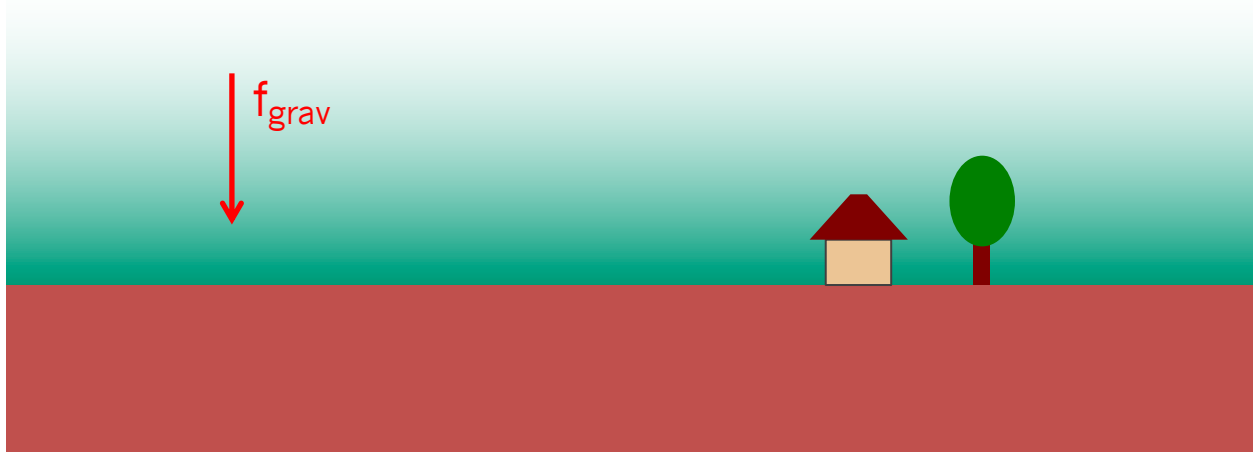


Druckgradient
(nach außen)
Gravitation
(nach innen)



Druckgleichgewicht

Beispiel: Erdatmosphäre



Die Erdatmosphäre "fällt nicht herunter", obwohl die Schwerkraft sie ständig herunterzieht.

Frage: Was sorgt dafür, dass das nicht passiert? Welche Kraft kompensiert die Schwerkraft?

Antwort: Der Druckgradient!

Deshalb nimmt der Luftdruck ab, je höher man auf einen Berg steigt!

Sonne - Aufbau

Sternaufbau:

Beispiel Sonne:

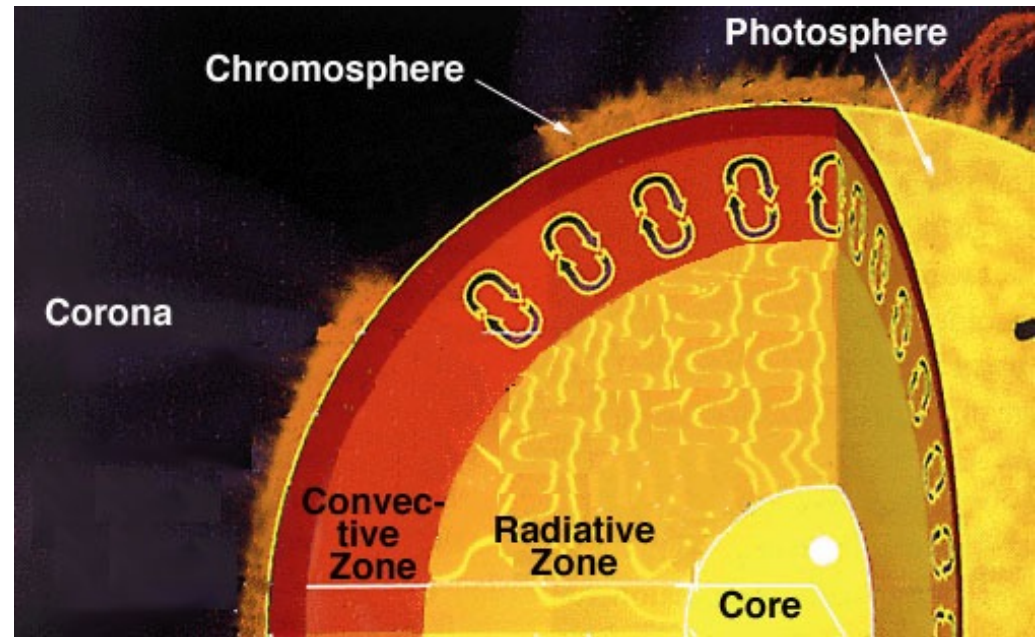
- **Kern:** 10% der Masse;
Temperatur & Druck extrem:
 $T = 16 \text{ Mio K}$, $P = 200 \text{ Mrd. bar}$
Dichte = 150x Wasser,
(aber gasförmig)
Kernfusion erzeugt Energie

- **Strahlungs- Zone:**
bis 85% im Radius, umgibt
den Kern;

Energietransport aus heißen Inneren nach außen durch Strahlung
(nicht direkt, sondern "diffusiv")

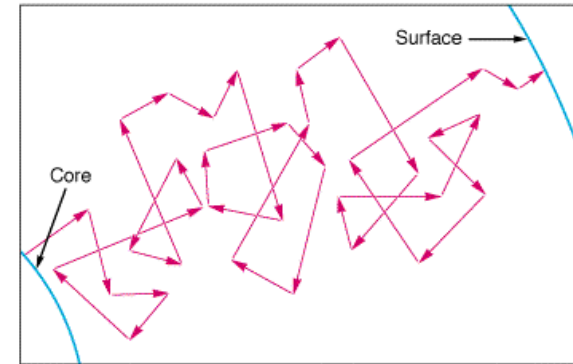
- **Konvektions-Zone:**
äußere Schicht, bei 85-100% des Radius; Dichte & Temperatur kleiner,
Energietransport durch makroskopische Bewegungen (Konvektion)

Quelle: [http://buffonescience7.wikispaces.com/3+++Our+Star+\(Sun\)+--+Ch+4.2](http://buffonescience7.wikispaces.com/3+++Our+Star+(Sun)+--+Ch+4.2)



Energietransport

- Transportmechanismen in Sternen:
 - Strahlungsdiffusion. Wie Wärmeleitung, aber mit Photonen. Photonen werden ständig absorbiert und re-emittiert. „Random-walk“.
 - Konvektion. Wenn der Temperaturgradient zu groß wird (z.B. wenn die Strahlungsdiffusion nicht effizient genug ist oder die Energiequelle zu viel Energie abgibt) dann entsteht Konvektion.



http://www.ualberta.ca/~pogosyan/teaching/ASTRO_122/lect8/lecture8.html



<http://www.seriousseats.com/images/20100813-boiling-water-primary.jpg>

Sonne - Energietransport

Sternaufbau:

Energietransport durch Strahlung:

- > Photonen durchqueren den Stern
 - > aber sie kommen nicht weit ... sie “diffundieren”, streuen, stoßen
 - > “mittlere freie Weglänge” des Photons ~ 0.09 cm:
Photon braucht 170000 Jahre um die Oberfläche zu erreichen

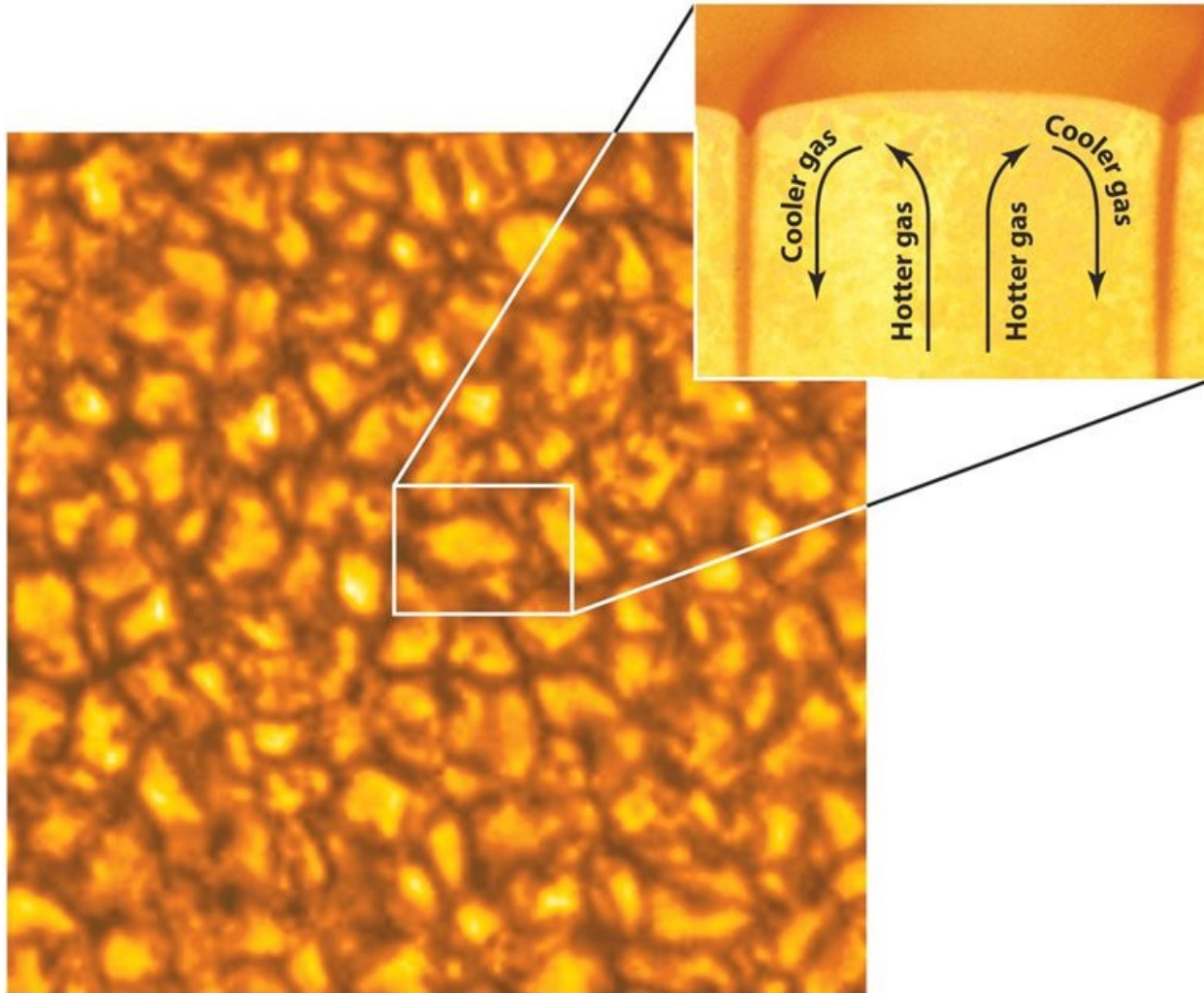


Energietransport durch Konvektion:

- > großräumige Umwälzung der Gasmassen (wie im sprudelnden Kochtopf)

Beide Prozesse finden statt, je nach **Heizung im Sterninneren** und **Durchsichtigkeit** der Sternmaterie für Strahlung

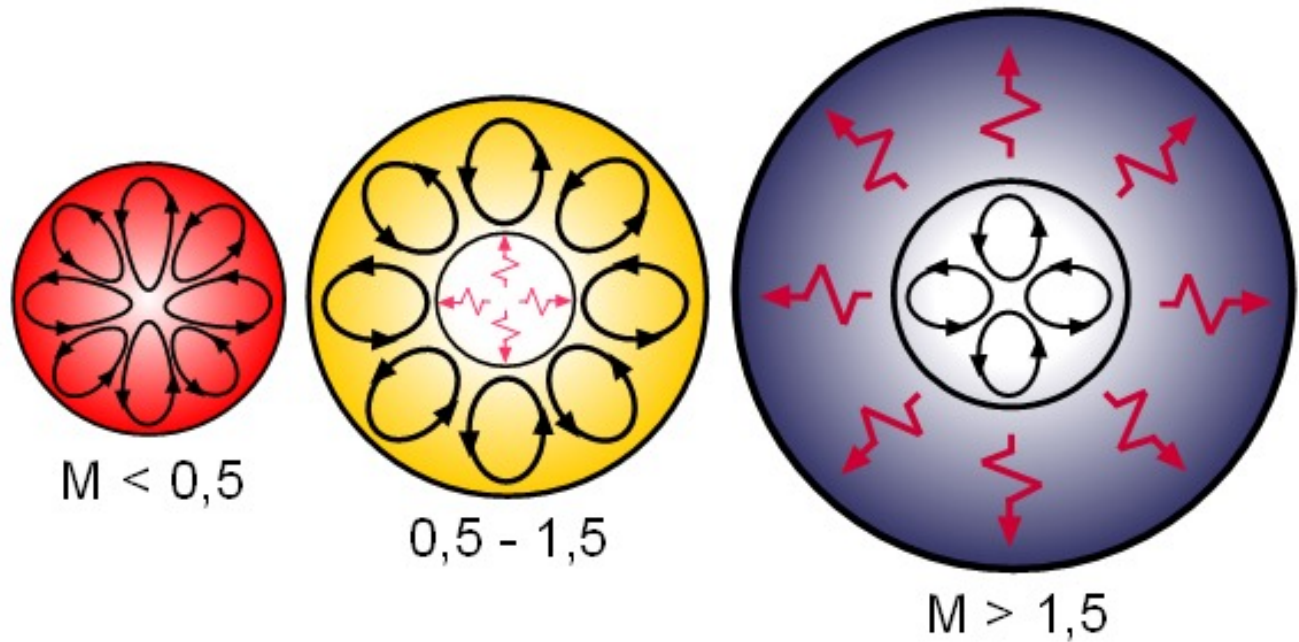
Convection in the photosphere produces granules



Sterne- Energietransport

Sternaufbau:

Schichtung in schwereren / leichteren Sternen etwas anders:



Strahlungs- Zone:	keine	innen	außen
Konvektions-Zone:	voll	außen	innen

Warum explodiert die Sonne nicht?

- Energieproduktion = starke Funktion von Temperatur:
 $dE/dt \sim T^6$
- Frage: Warum explodiert die Sonne nicht?
- Lösung:
 - Wenn T größer \rightarrow mehr Druck
 - Mehr Druck \rightarrow Stern dehnt sich aus
 - Größere Stern \rightarrow niedrigere Dichte
 - Niedrige Dichte (adiabatische kühlung) \rightarrow niedrigere T

Sterne haben einen sehr genauen „Thermostat“ – sie sind „selbstregulierend“!

Und: Kernfusion ist sehr "ineffizient"; 2 H-Kerne zu fusionieren ist schwierig! Mehr später ...

Energieerzeugung

Sterne- Energieerzeugung

Stellare Energie-Erzeugung durch Kernfusion:

- > thermische Energie oder Gravitationsenergie nicht ausreichend
- > **Kernfusion** ("Brennen") von niederzahligen zu höherzahligen Elementen
 - > Energiegewinn aus Kern-Bindungsenergie
 - > verschiedene Fusionsprozesse und Zeitskalen
- > Langfristige Änderung des **Rohstoff- & Energiehaushalts**:

-> "Sternentwicklung":

- 1) **Gleichgewichtszustand** für Sterne der Hauptreihe
- 2) Entwicklung auf **kurzen Zeitskalen** außerhalb der Hauptreihe

-> **Eine Haupteigenheit der Astrophysik des 20. Jhrts**

Sterne- Energieerzeugung

Einschub **Atome & Chemische Elemente:**

-> **Atombestandteile:**

Protonen (+), **Neutronen** (neutral), **Elektronen** (-- , leicht)

Anzahl Elektronen = Anzahl Protonen

-> **chemische Eigenschaften** durch Anzahl der **Elektronen** gegeben

-> diese bestimmen die Möglichkeiten, atomare Verbindungen einzugehen

-> chemische Elemente: H, O, Fe

-> **Isotope**: Elemente mit mehr/weniger Neutronen

-> gleiche chemische Eigenschaften, ^{56}Fe , ^{54}Fe ,...

-> **meistens instabil**, zerfallen

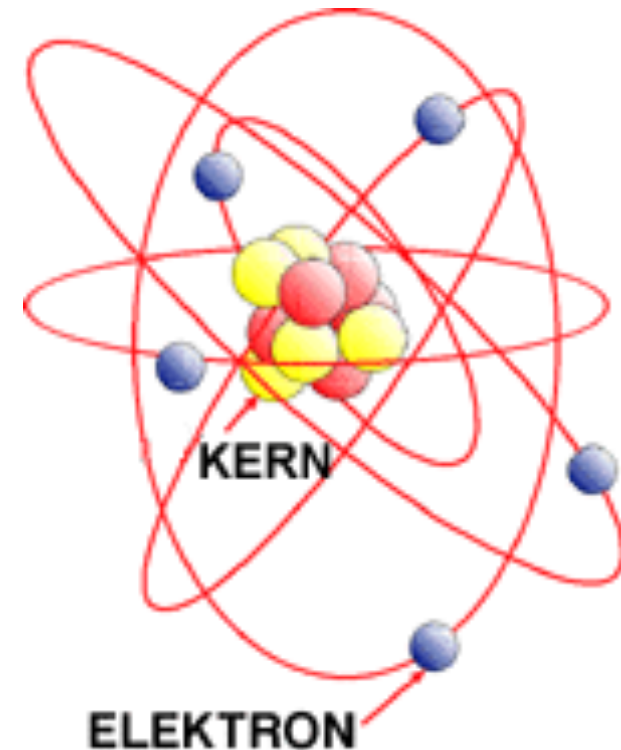
-> **Kernphysik:**

Veränderung der Atom**kerne**:

SEHR energieaufwendig, Kern elektrisch geladen

-> Kernfusion, Kernspaltung

-> Merke: Atomradius 10^{-10}m , Kernradius 10^{-15}m !!



Bohr'sches Atommodell

Kernfusion: Lösung Tunneleffekt

- Experimente zeigen, dass Protonen schon bei wesentlich niedrigeren Energien in das Innere der Atomkerne eindringen können. Wird der Atomkern quantenmechanisch betrachtet, so haben die **Kernbausteine eine gewisse endliche Aufenthaltswahrscheinlichkeiten** im **Potentialtopf**. Dieser stellt die Überlagerung der Kraft der starken Wechselwirkung und der Coulomb-Kraft dar. Der Potentialwall, der die Begrenzung des Kerns beschreibt, ist keine feste Wand, sondern eine Barriere durch die mittels des **Tunneleffektes** Protonen in den Kern eindringen können.
- Unschärferelation: $\Delta E * \Delta t \geq \hbar/2$

Sterne- Energieerzeugung

Stellare Energie-Erzeugung:

Kernfusion ("Brennen") von niederzahligen
zu höherzahligen Elementen

-> Energiegewinn aus **Bindungsenergie**:

Helium-Kern ist leichter als vier

Wasserstoffkerne -> **$E = \Delta m c^2$**

-> verschiedene Fusionsprozesse auf
verschiedenen Zeitskalen

Kernfusion

- Da die Masse eines Heliumkerns um $5,04 \cdot 10^{-29}$ kg kleiner ist als die von vier Protonen, verliert die Sonne in jeder Sekunde **$5 \cdot 10^9$ kg** ihrer Masse. Diese Masse, wird gemäß $E=mc^2$ in Energie umgewandelt!

Sterne- Energieerzeugung

<http://de.wikipedia.org/wiki/Proton-Proton-Reaktion#/media/File:FusionintheSun.svg>

Stellare Energie-Erzeugung:

Kernfusion ("Brennen") von niederzahligen zu höherzahligen Elementen

-> Energiegewinn aus **Bindungsenergie**:

Helium-Kern ist leichter als zwei

Wasserstoffkerne -> $E = \Delta m c^2$

-> verschiedene Fusionsprozesse auf verschiedenen Zeitskalen

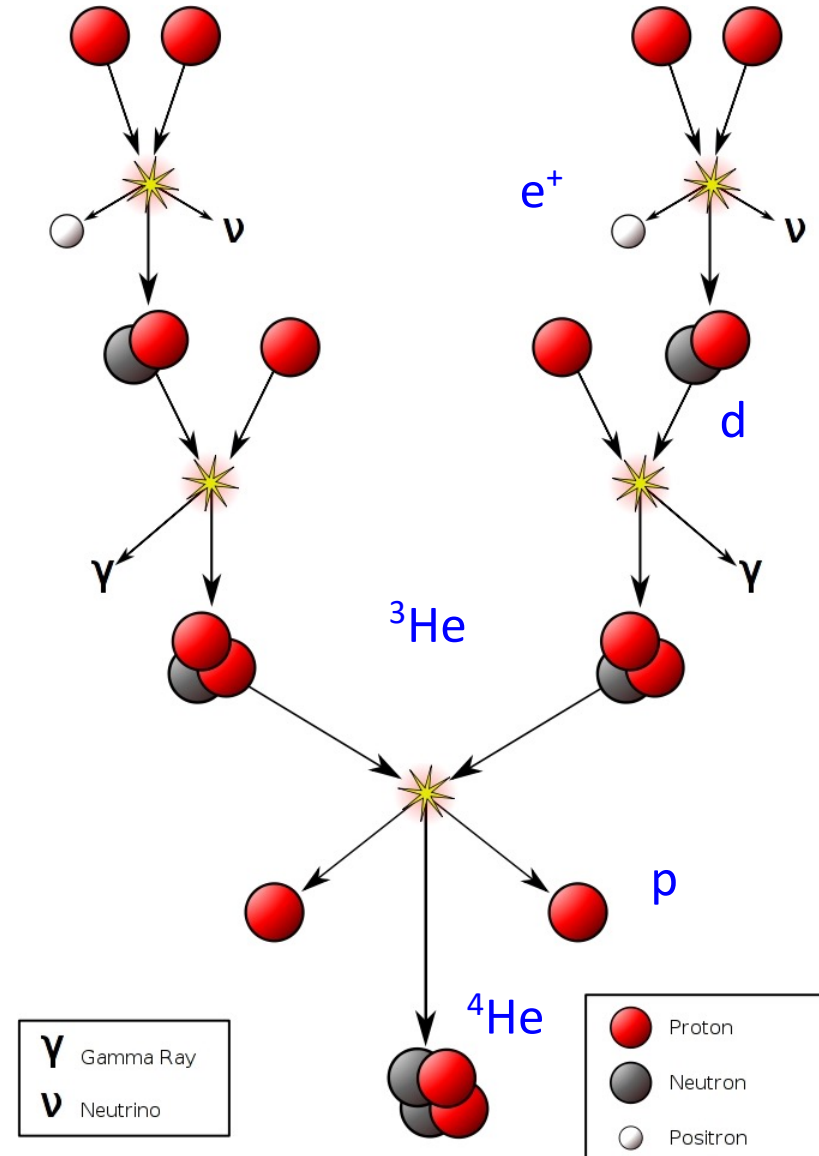
Wasserstoff-Brennen:

-> **pp-Kette**: pp1, pp2, pp3
(pp=Proton-Proton)

Alternativprozeß:

-> **CNO - Zyklus** (Bethe-Weizäcker-Zyklus)

Wasserstoff -> Helium
mit Katalysatoren (C, N, O)

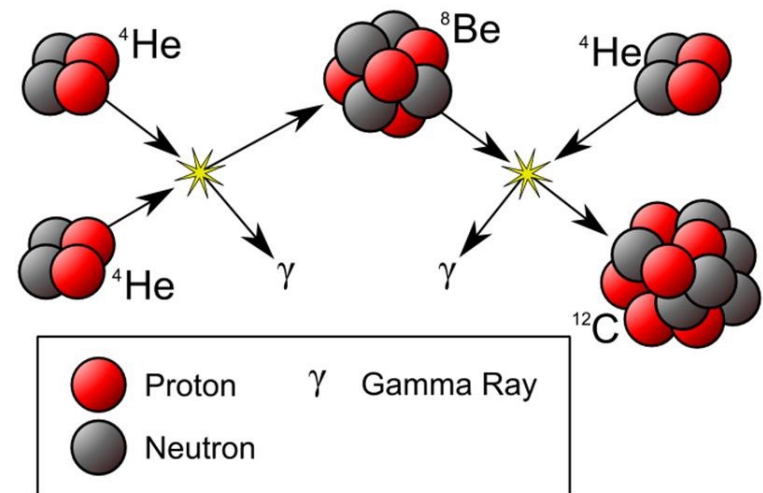


Sterne- Energieerzeugung

Kernfusion ("Brennen") von niederzahligen zu höherzahligen Elementen:

Helium-Brennen:

- **Triple- α -Prozeß:** (α = Heliumkern)
Helium \rightarrow Kohlenstoff (C):
Temp > 100 Mio K
- Falls genug C und Temp. höher:
höhere Elemente durch
weitere Reaktionen
bis ^{24}Mg , ^{28}Si , auch ^{14}N , ^{18}F , ^{18}O , ^{22}Ne



Kohlenstoff-Brennen: $500 \text{ Mio K} < T < 1 \text{ Mrd K}$

Sauerstoff-Brennen: $T > 1 \text{ Mrd K}$

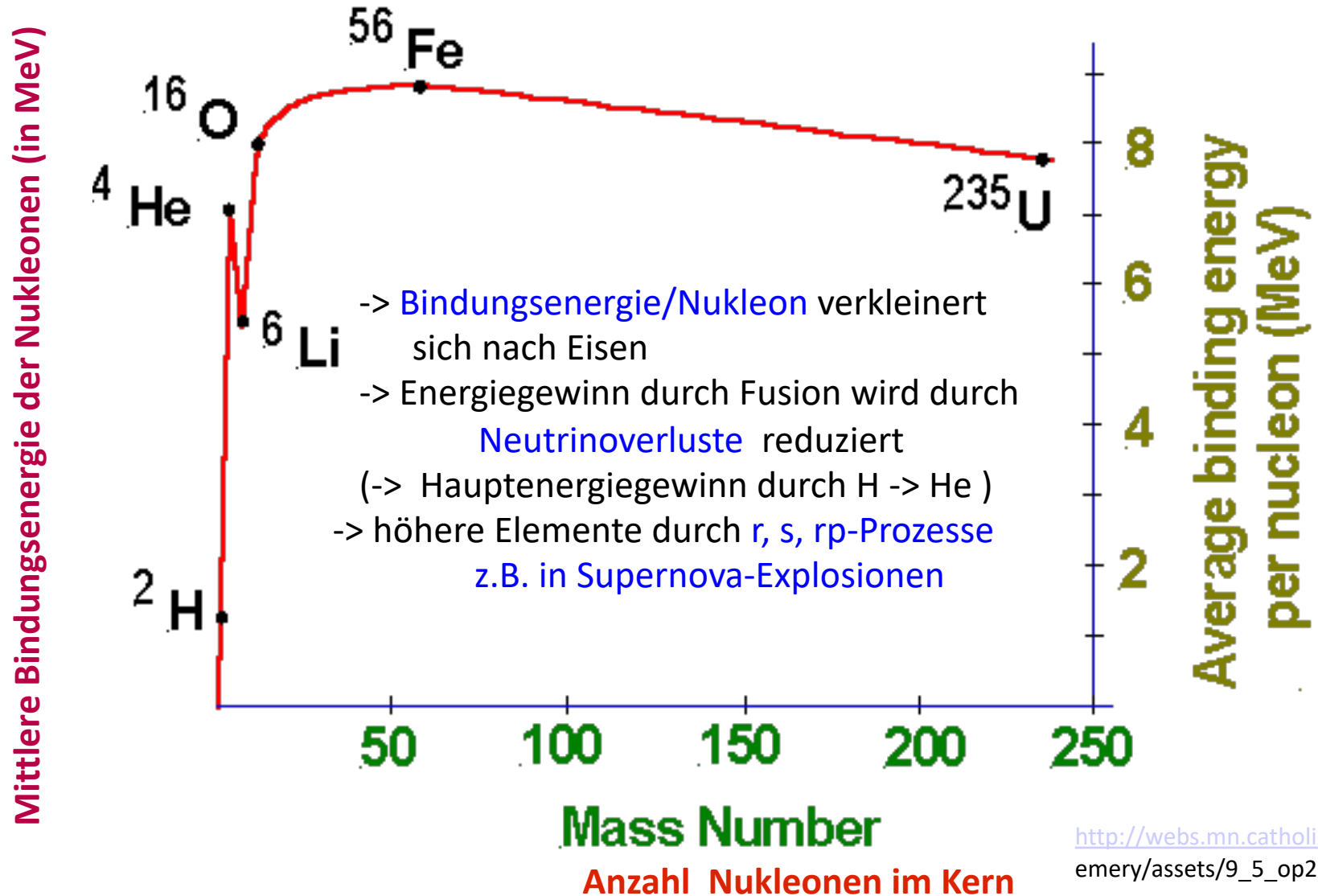
Silizium-Brennen

\rightarrow Energiegewinnung bis Eisen !!!

http://en.wikipedia.org/wiki/Triple-alpha_process#/media/File:Triple-Alpha_Process.png

Sterne- Energieerzeugung

Elemente schwerer als Eisen: Erzeugung kostet Energie !!!



Sterne- Energieerzeugung

Stellare Energie-Erzeugung:

Kernfusion ("Brennen") von niederzahlige zu höherzahligen Elementen

-> Energiegewinn aus Kern-Bindungsenergie

Zahlenwerte Sonne:

pro Sekunde verschmelzen 567 Mio Tonnen Wasserstoff zu
562.8 Mio Tonnen Helium

-> Differenz 4.2 Mio Tonnen pro Sekunde

mit Einstein: $E = mc^2$ -> Energieleistung: $L = 4 \times 10^{26} \text{ W}$

= 400 Mio Mrd GW

Kernkraftwerk: bis zu 1.5 GW

-> **Solarkonstante:** Strahlungsleistung, die auf der Erde eintrifft::

Energie pro Fläche pro Zeit: **$E_0 = 1.4 \text{ kW /m}^2$**

im Vergleich: bei Merkur 6.6x höher, bei Neptun 1/1000 davon

Sterne - Entwicklung

Sterne- Entwicklung

Sternentwicklung: Altersentwicklung von der ZAMS

Hauptreihensterne “leben”
vom Wasserstoffbrennen

-> Vorrat begrenzt

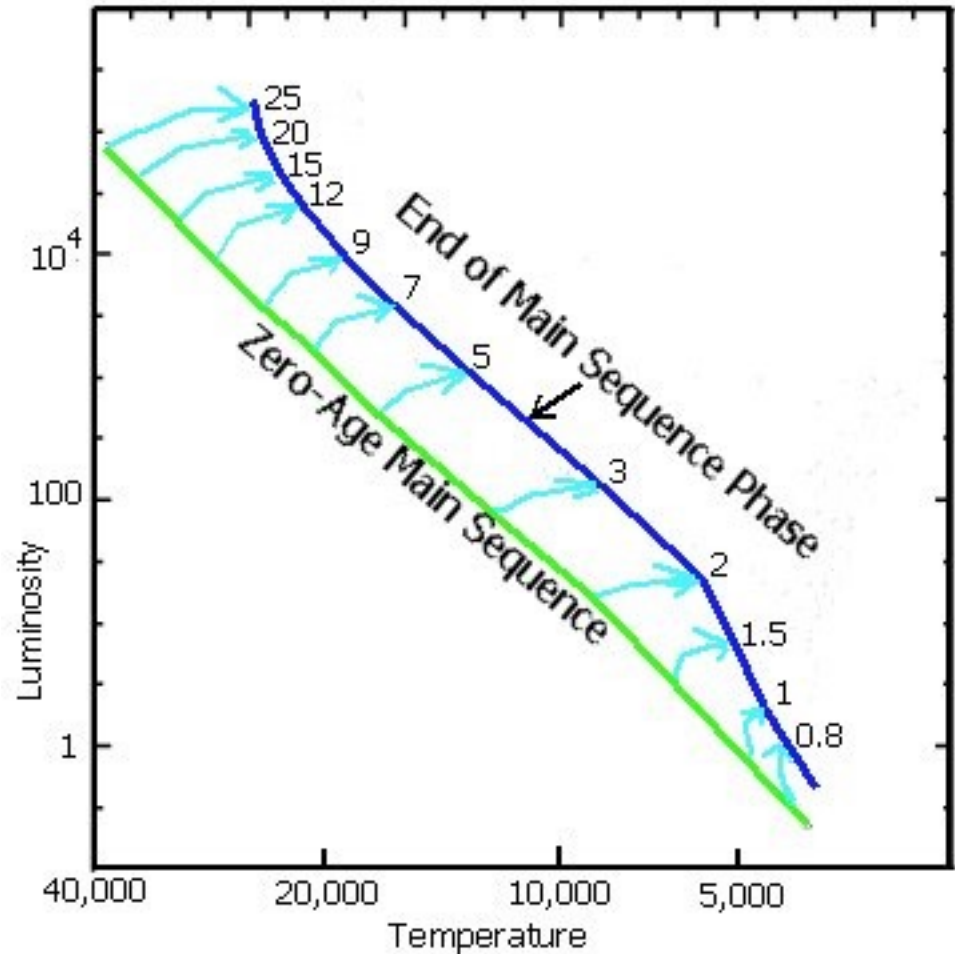
-> begrenztes

Lebensalter der Sterne

-> Entwicklung von der
Hauptreihe weg, sobald
10% des Wasserstoffs
verbraucht ist

Entwicklungszeit:

$$\tau_E = 7.3 \left(\frac{M / M_o}{L / L_o} \right) \text{Mrd. Jahre}$$



Sterne- Entwicklung

Entwicklungszeit

Massereiche Sterne “leben” kürzer: $\tau_E = 7.3 \left(\frac{M / M_o}{L / L_o} \right) \text{Mrd. Jahre}$

Entwicklungszeit von Hauptreihensternen (Zeit t_E nach der 10% Wasserstoff verbraucht ist)				
Spektraltyp	Teff (°Kelvin)	Masse (Sonne=1)	Leuchtkraft (Sonne=1)	t_E (Jahre)
O5V	44500	60	405000	550000
B0V	30000	18	13000	2.4 Mio
B5V	15400	6	830	52 Mio
A0V	9500	3	54	390 Mio
F0V	7200	1,5	6,5	1.8 Mrd
G0V	6050	1,1	1,5	5.1 Mrd
K0V	5250	0,8	0,43	14 Mrd
M0V	3850	0,5	0,077	48 Mrd
M5V	3250	0,2	0,011	114 Mrd

Vorlesungsevaluation: Einführung in die Astronomie

Um an der Evaluation teilnehmen zu können, ist eine Anmeldung im eCampus-Kurs der Fachschaft notwendig (einfach direkt beitreten)! Dieses Semester habt ihr auch die Möglichkeit der Fachschaft Feedback zu geben (FSR-Evaluation).

Fachschaft



fachschaft

FSR-Evaluation



Oder über [fspha.de/
fsrumfrage](https://fspha.de/fsrumfrage)

Frank Bigiel



astro121