

# Die Sonne und andere Sterne

Das Sonnensystem und seine fernen Verwandten  
für Nicht-Physiker

**Markus Pössel**

Haus der Astronomie

3.12.2018

# Sterne vs. Planeten, Sonnensystem-Edition



Bild: NASA



Bild: NASA, ESA, A. Simon (GSFC)



Bild: SOHO (ESA &amp; NASA)

	Erde	Jupiter	Sonne
Radius:	1	11	109
Masse:	1	320	333000
Dichte:	1	0.24	0.26
Effektivtemperatur:	255 K	88 K	5777 K
Leuchtkraft:	$10^{-10}$	$10^{-9}$	1

# Absolutwerte für die Sonne

Radius:	$R_{\odot} = 6.955 \cdot 10^8 \text{ m}$
Masse:	$M_{\odot} = 1.989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
Leuchtkraft:	$L_{\odot} = 3.846 \cdot 10^{26} \text{ W}$
Effektivtemperatur:	$T_{eff} = 5778 \text{ K}$
Mittlere Dichte:	$\rho_{\odot} = 1411.437 \text{ kg/m}^3$

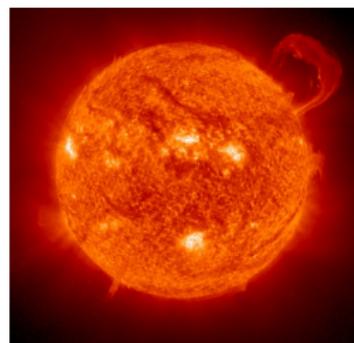


Bild: SOHO (NASA & ESA)

# Sterne als Gas-/Plasmabälle

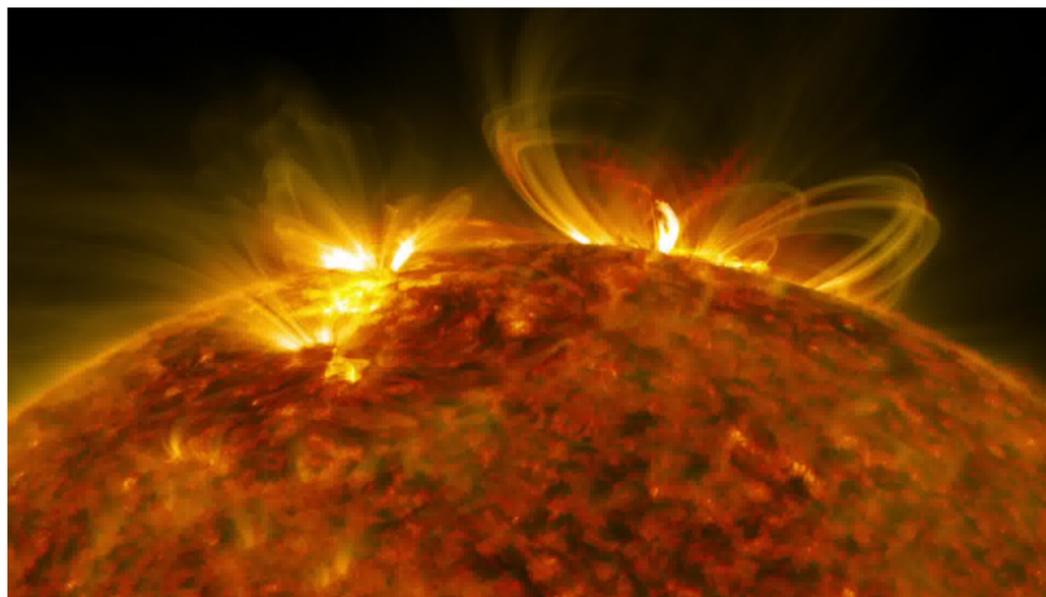
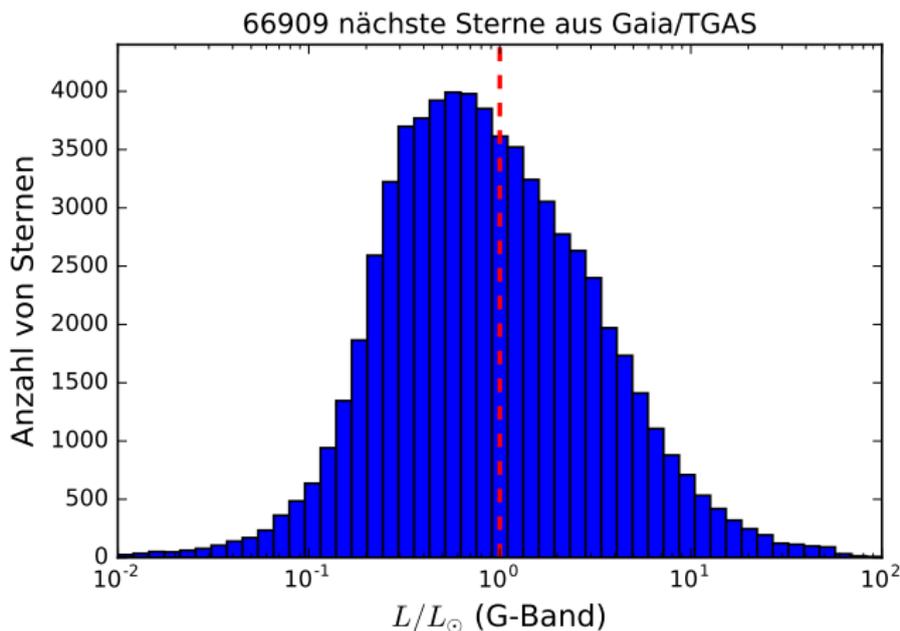


Bild: NASA/GSFC/SDO

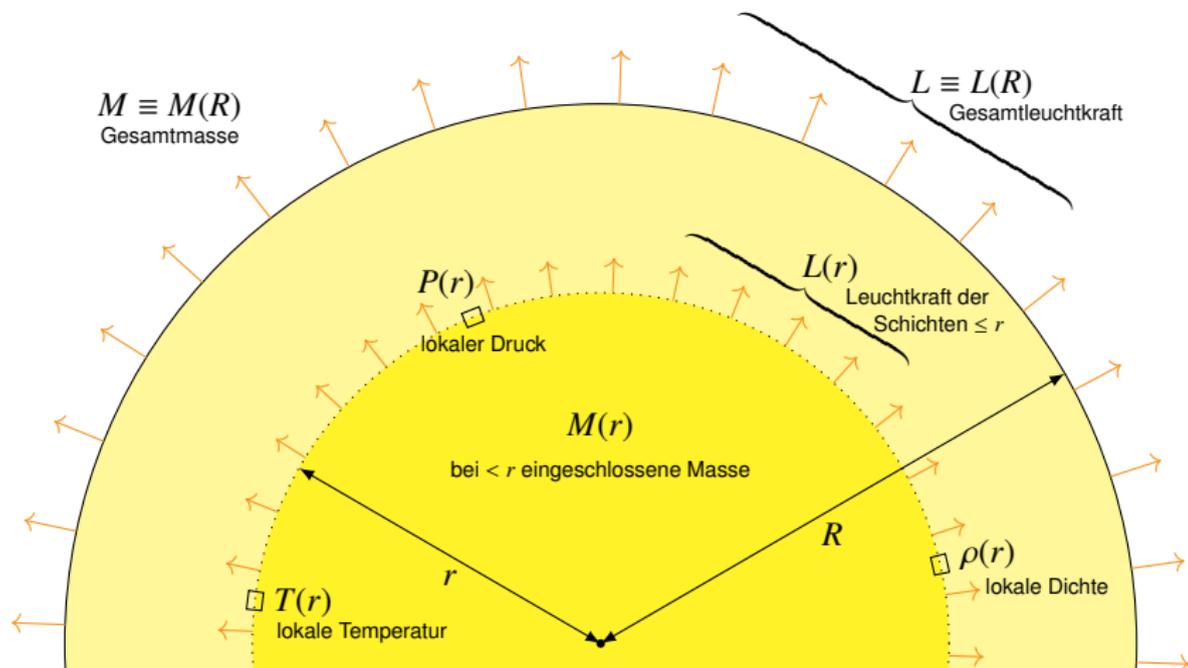
Plasmabögen, Magnetfelder, Konvention: Flare vom 10.9.2017

# Helligkeiten von Sternen



Histogramm aus Daten des Gaia-Satelliten: Abgestrahlte Leistung (im G-Band, entspricht in etwa weißem Licht) von 66909 Sternen im Vergleich zur Sonne

# Kugelsymmetrisches Modell für einen Stern



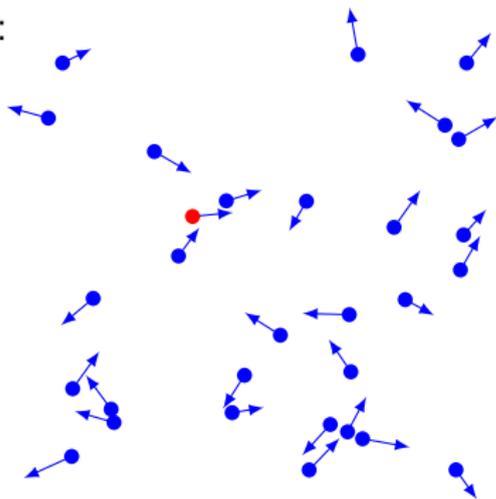
# Gegendruck Möglichkeit 1: thermischer Gasdruck

Gegendruck entscheidend! Ideales Gas:

$$PV = Nk_B T$$

mit

- $P$  Druck
- $V$  Volumen der betreffenden Region
- $N$  Teilchenzahl
- $k_B$  Boltzmann-Konstante
- $T$  Temperatur



Umschreiben in günstigere Form mit  $\mu m_p N$  der Masse im Volumen  $V$  ( $m_p$  Protonenmasse,  $\mu$  Durchschnitts-Massenzahl der Atome in  $V$ ):

$$\mu m_p PV = \mu m_p N k_B T = V \rho k_B T \quad \Rightarrow \quad P = \frac{k_B}{\mu m_p} \cdot \rho \cdot T.$$

## Gegendruck Möglichkeit 2: Strahlungsdruck

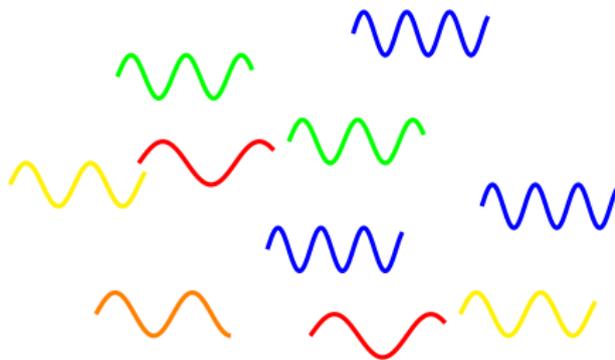
Lichtteilchen / Photonen mit  
Frequenz  $\nu$  haben Impuls

$$p = E/c = h\nu/c$$

Strom von Photonen erzeugt  
Impulsübertrag pro Zeiteinheit pro  
Flächeneinheit  $\Rightarrow$  Strahlungsdruck:

$$P_{rad} = \frac{4\sigma_{SB}}{3c} T^4 = \frac{1}{3}\varepsilon$$

(Plausibilität:  $\varepsilon$  ist Energiedichte nach Stefan-Boltzmann, Impuls verteilt sich auf drei unabhängige Richtungen, Impulsübertrag nur senkrecht zur Begrenzungsfläche)



## Vereinfachtes Modell $\rho = const.$ – Zentraldruck

Druckprofil bei  $\rho = const.$  (vgl. Vorlesung 27.11.):

$$P(r) = \frac{3}{8\pi^2} \frac{GM^2}{R^4} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right).$$

Zentraldruck  $P(r = 0)$  :

$$P(0) = \frac{3}{8\pi} \frac{GM^2}{R^4} = 10^9 \text{ bar} \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^2 \left(\frac{R}{R_\odot}\right)^{-4}.$$

(Gerundet entspricht 1 bar unserem normalen Luftdruck auf der Erde auf Meereshöhe.)

# Zentraltemperatur vereinfachtes Modell Gasdruck

Annahme: Gegendruck wird durch thermischen Druck aufgebracht,

$$P = \frac{k_B}{\mu m_p} \cdot \rho \cdot T.$$

Dann

$$\begin{aligned} T(0) &= \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\mu m_p}{k_B} \cdot P(0) = \frac{4}{3} \pi \frac{R^3}{M} \cdot \frac{\mu m_p}{k_B} \cdot P(0) = \frac{1}{2} \frac{G \mu m_p}{k_B} \cdot \frac{M}{R} \\ &= \mu \cdot \left( \frac{M}{M_\odot} \right) \left( \frac{R_\odot}{R} \right) \cdot 10^7 \text{ K.} \end{aligned}$$

Extrem heiße Temperaturen!

# Zentraltemperatur vereinf. Modell Strahlungsdruck

Annahme: Gegendruck wird durch Strahlungsdruck aufgebracht,

$$P_{rad} = \frac{4\sigma_{SB}}{3c} T^4$$

Dann

$$T(0) = \left( \frac{9}{32\pi} \cdot \frac{Gc}{\sigma_{SB}} \right)^{1/4} \frac{\sqrt{M}}{R} = 2.7 \cdot 10^7 \text{ K} \cdot \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right)^{1/2} \left( \frac{R}{R_{\odot}} \right)^{-1}.$$

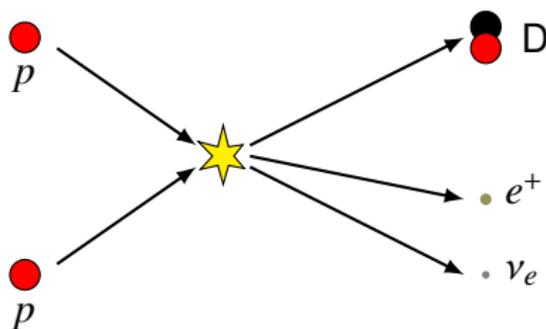
Andere Abhängigkeit von  $R$ ,  $M$ , aber gleiche Größenordnung wie bei Gasdruck!

# Kernfusion

Bei

- Zentraldruck um die  $10^9$  bar
- Zentraltemperatur um die  $10^7$  K

kann **Kernfusion** wichtig werden:

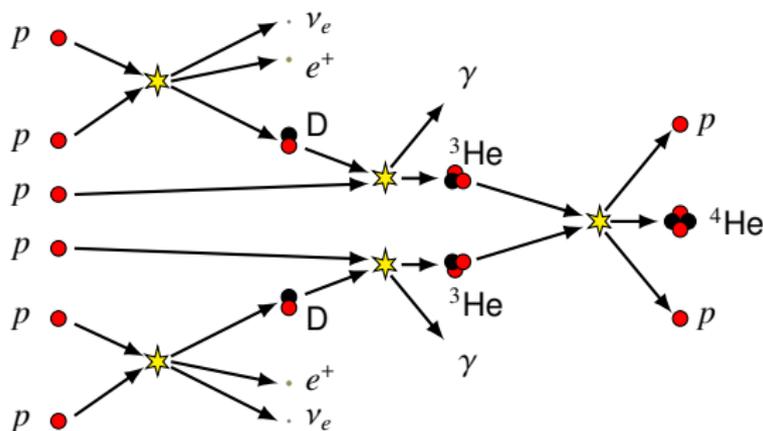


Proton ● – elektrisch positiv geladen,  $q = +e$

Neutron ● – elektrisch neutral,  $q = 0$

# Kernfusion

Dominant in Sternen niedrigerer Masse (wie der Sonne):  
Proton-Proton-Kette (hier: pp-I)



Mit zunehmender Masse wichtig: CNO-Zyklus.

Variationen/Ergänzungen: pp-II und pp-III

# Kernfusion

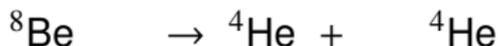
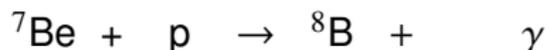
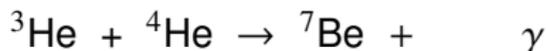
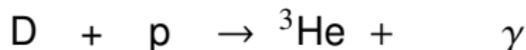
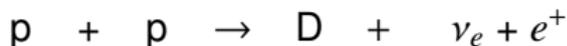
pp-III-Kette (nur ein kleiner Teil im Sonneninneren):

$^8\text{B}$ -Zerfall erzeugt  
~ 10 MeV-Neutrinos

Bei diesen Energien: auf der Erde nachweisbar!

Aber: extrem schwache Wechselwirkung  
verschiedene "Flavors":

$\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$



# Sonne: Blick ins Innere

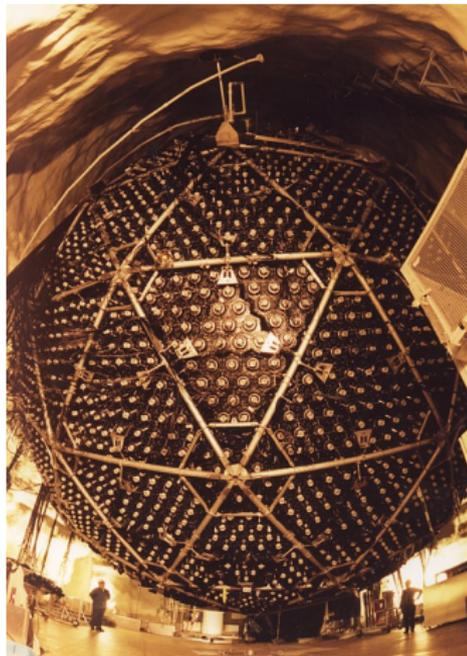
- Homestead-Experiment (1970+):  
 $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{36}\text{Ar} + e^-$   
Radioaktives Argon separieren,  
Zerfall messen
- Neutrinos bei den erwarteten  
Energien: ja, aber *Solar Neutrino  
Problem*, d.h. weniger als die Hälfte  
der erwarteten Neutrinos gemessen
- Nobelpreis Raymond Davis,  
Masatoshi Koshiba 2002



Bild: Homestake Mine Neutrino Experiment, mit freundlicher Genehmigung des Brookhaven National Laboratory

# Sonne: Blick ins Innere

- Lösung: Neutrinos wechseln auf dem Weg von der Sonne zur Erde ihre Identität,  $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$
- Sudbury Neutrino Observatory: 1000 Tonnen schweres Wasser, einige Reaktionen für alle Neutrinosorten, einige nur für  $\nu_e$
- Super-Kamiokande: 50.000 Tonnen Wasser und Tscherenkow-Effekt,  $\nu_e$  und  $\nu_\mu$  unterscheidbar
- Nobelpreise: Arthur McDonald und Takaaki Kajita 2015



Sudbury Neutrino Observatory: Außenansicht Detektor. Bild: Sudbury Neutrino Observatory (SNO) unter Lizenz CC BY-SA 4.0

# Vier Grundgleichungen

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM(r)\rho(P, T)}{r^2}$$

$$\frac{dL}{dr} = \varepsilon(P, T) \cdot 4\pi r^2 \cdot \rho(P, T)$$

$$\frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \cdot \rho(P, T)$$

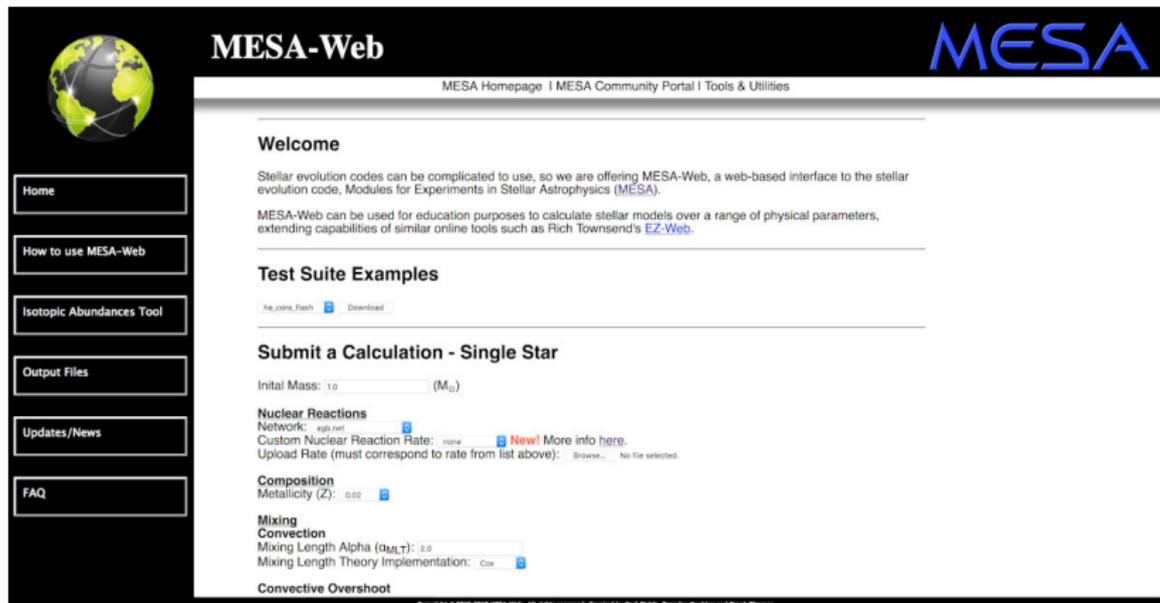
$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3}{64\pi\sigma} \cdot \frac{\kappa(P, T)\rho(P, T)}{r^2} \cdot \frac{L(r)}{T^3}$$

Mit  $\varepsilon$  der Energie-Erzeugungsrate pro Masseneinheit  
und  $\kappa$  der Absorptionsrate für Strahlung  
(bestimmt Temperaturgefälle im Stern)

Allgemeine Lösungen: Computersimulationen!

( $\kappa, \varepsilon$  auch in Abhängigkeit von  $r$  beschreibbar)

# Beispiel: MESA-Code



**MESA-Web** **MESA**

MESA Homepage | MESA Community Portal | Tools & Utilities

### Welcome

Stellar evolution codes can be complicated to use, so we are offering MESA-Web, a web-based interface to the stellar evolution code, Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA).

MESA-Web can be used for education purposes to calculate stellar models over a range of physical parameters, extending capabilities of similar online tools such as Rich Townsend's [EZ-Web](#).

### Test Suite Examples

[he\\_core\\_flash](#) [Download](#)

### Submit a Calculation - Single Star

Initial Mass:  ( $M_{\odot}$ )

**Nuclear Reactions**  
 Network: [sgp.net](#)  
 Custom Nuclear Reaction Rate: [none](#) [New!](#) [More info here.](#)  
 Upload Rate (must correspond to rate from list above): [Browse...](#) No file selected.

**Composition**  
 Metallicity (Z):

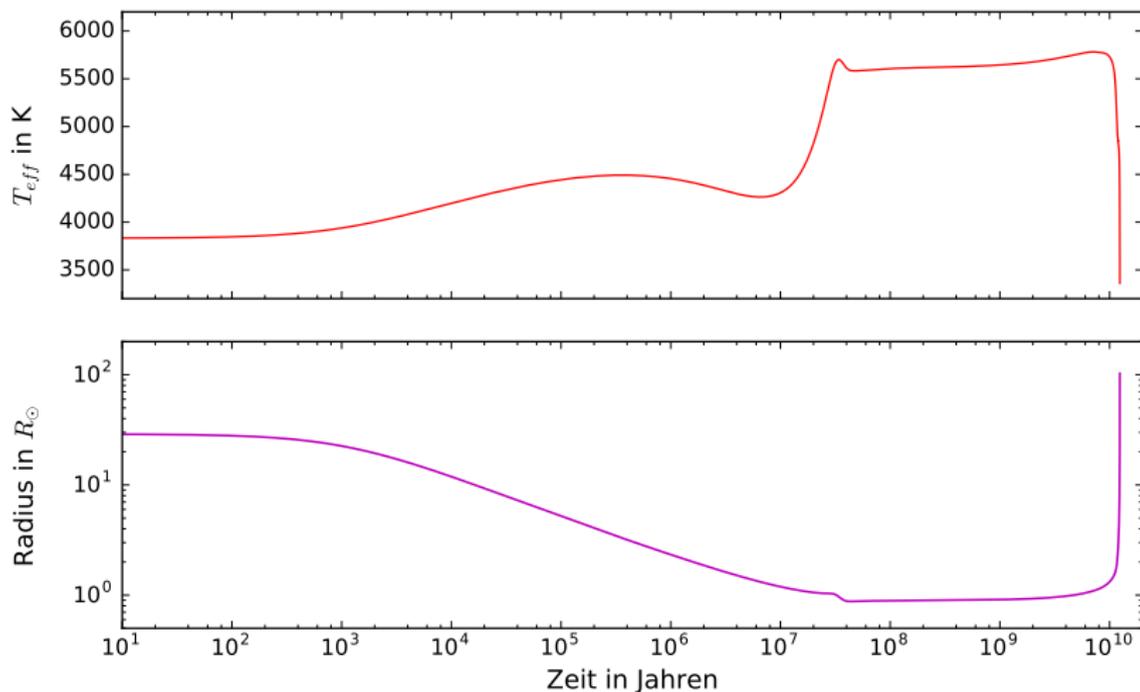
**Mixing Convection**  
 Mixing Length Alpha ( $\alpha_{MLT}$ ):   
 Mixing Length Theory Implementation: [Cox](#)

**Convective Overshoot**

Copyright © 2013-2014 MESA-Web. All rights reserved. Created by Greg Ricker, Benjamin Paxton, and Greg Townsend.

<http://mesa-web.asu.edu>

# Zeitlicher Verlauf: Radius und Temperatur



Rechnung für  $M = 1 \cdot M_{\odot}$  und gleiche chemische Zusammensetzung wie Sonne, <http://mesa-web.asu.edu>

# Roter Riesenstern: Beteigeuze

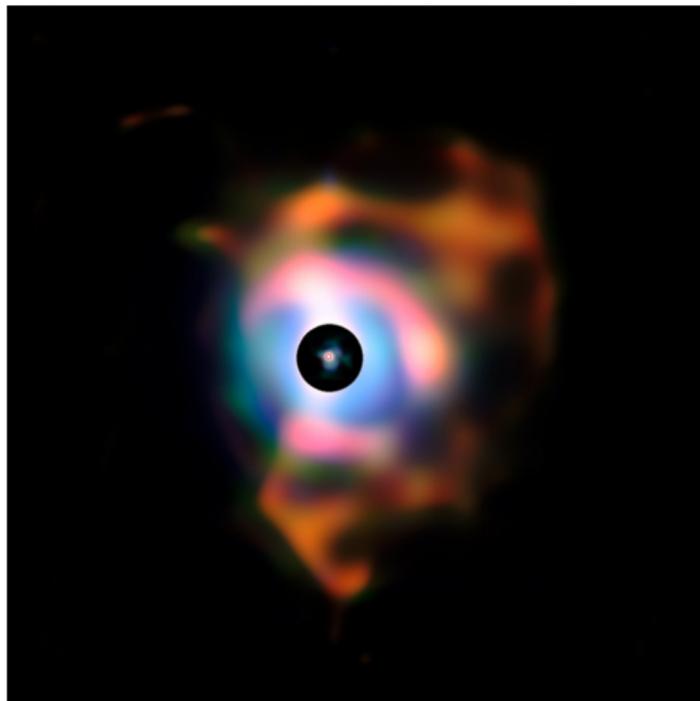


Bild: ESO/P. Kervella

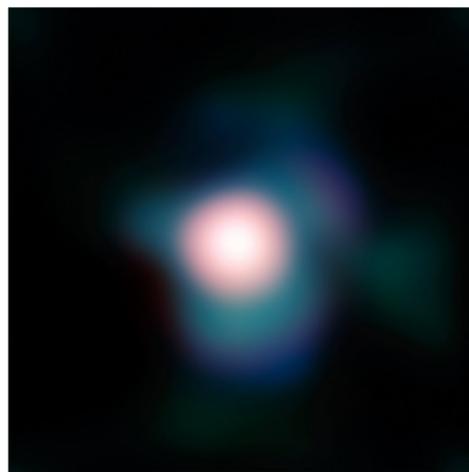


Bild: ESO/P. Kervella

$$R \sim 1200 R_{\odot}$$

# Spätstadien von Sternen

Schalenbrennen, unterschiedliche Fusionsphasen — und was passiert, nachdem der Kernbrennstoff verbraucht ist?

massearme Sterne,  $M < 8 M_{\odot}$

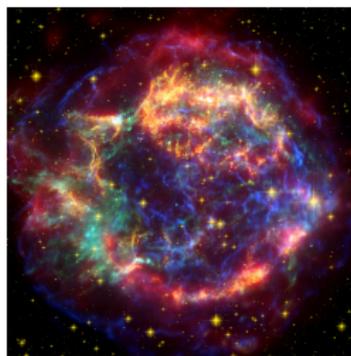
massereiche Sterne,  $M > 8 M_{\odot}$

vergleichsweise allmähliches  
Ende → Weißer Zwerg

gewaltsames Ende Supernova  
→ Neutronenstern



Bild: ESO



NASA/JPL-Caltech/STScI/CXC/SAO

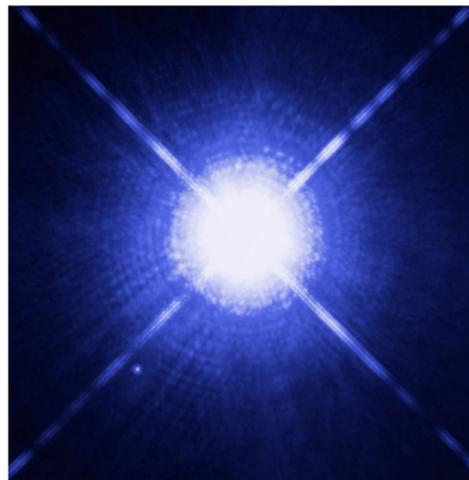
# Weißer Zwerge

Wie bei  
Planeten-Stabilitätsbetrachtungen:  
Fermionen-Quantenteilchen  
(Elektronen) widersetzen sich  
Kompression, aus unseren Formeln  
folgt maximaler Radius

$$R = \frac{(3/2)^{4/3}}{10\pi} \frac{h^2}{Gm_e(\mu m_p)^{5/3} M^{1/3}}$$

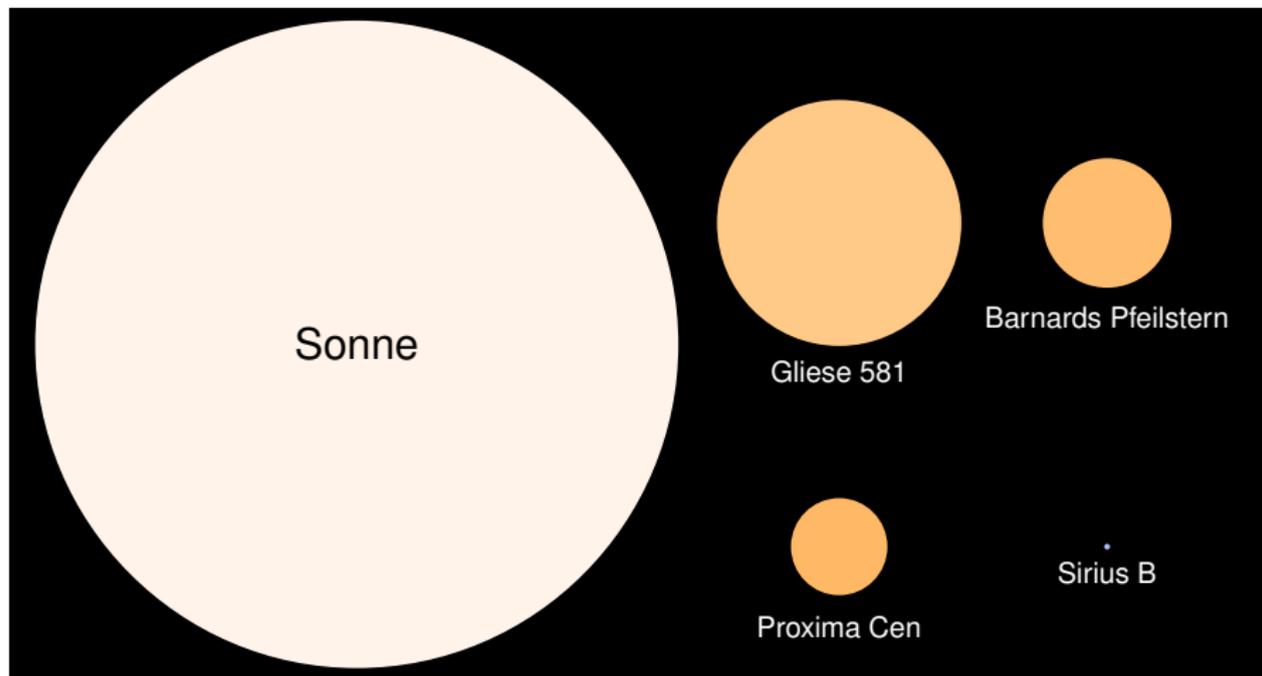
$$= \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{-1/3} \left(\frac{\mu}{2}\right)^{-5/3} 4000 \text{ km}$$

Weißer Zwerge z.B.  $\mu = 2$  und  $M = 1 M_\odot$



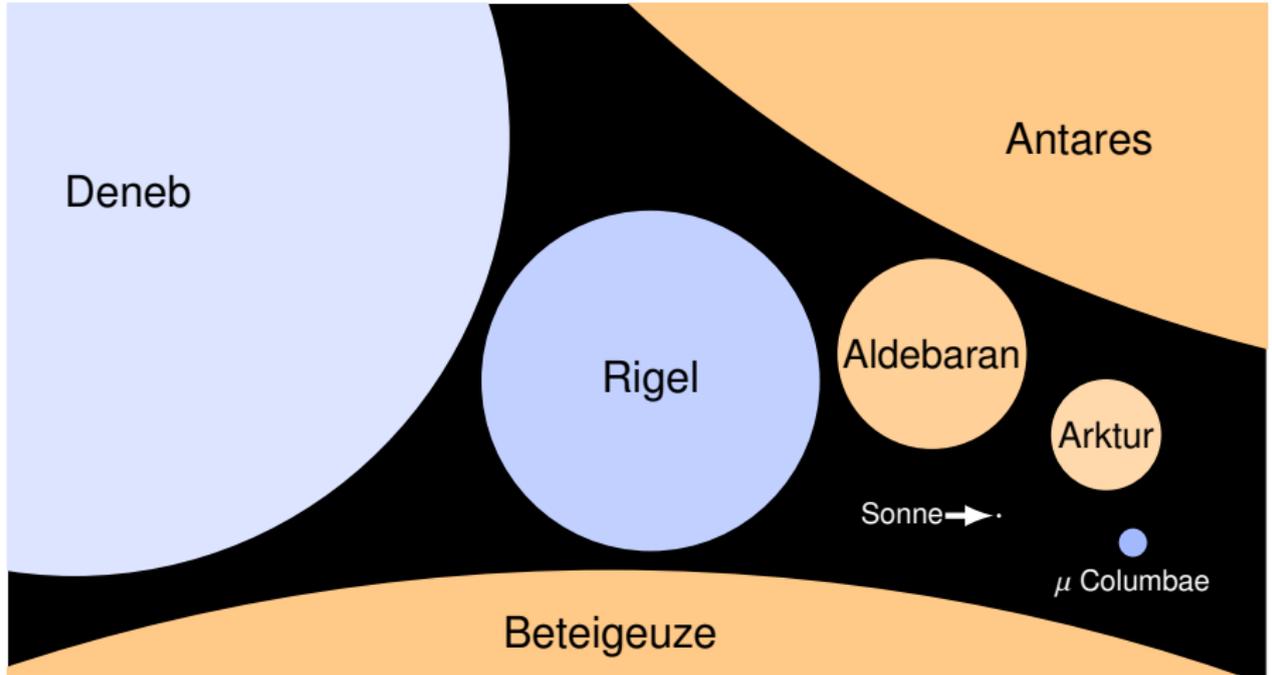
Sirius A mit Sirius B. Bild: NASA, ESA, H. Bond (STScI) and M. Barstow (University of Leicester)

# Unterschiedliche Sternarten: Zwerge



Die Sonne im Vergleich mit anderen Zwergsternen

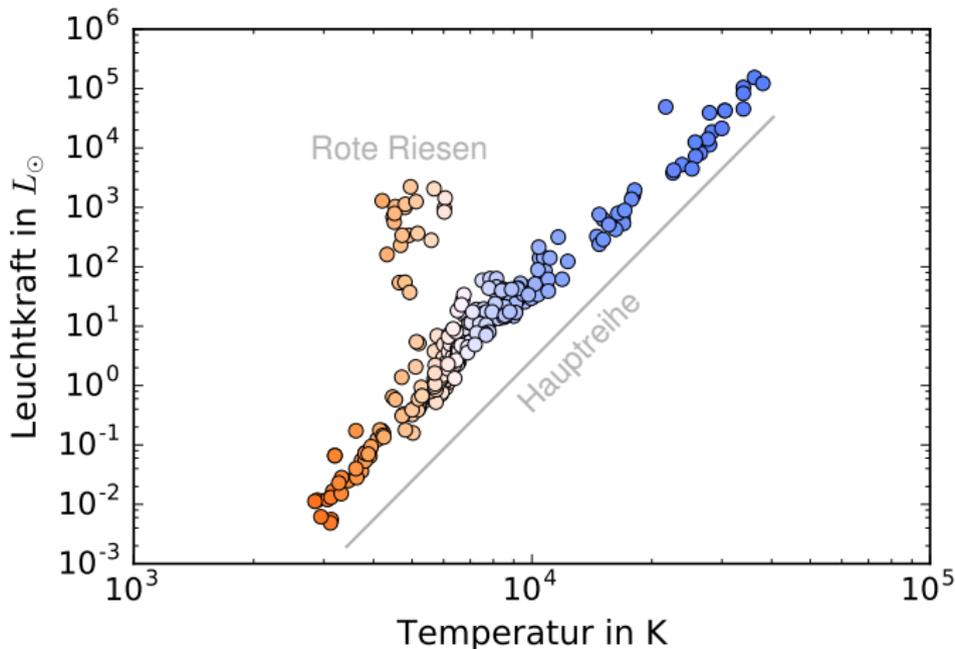
# Unterschiedliche Sternarten: Riesen



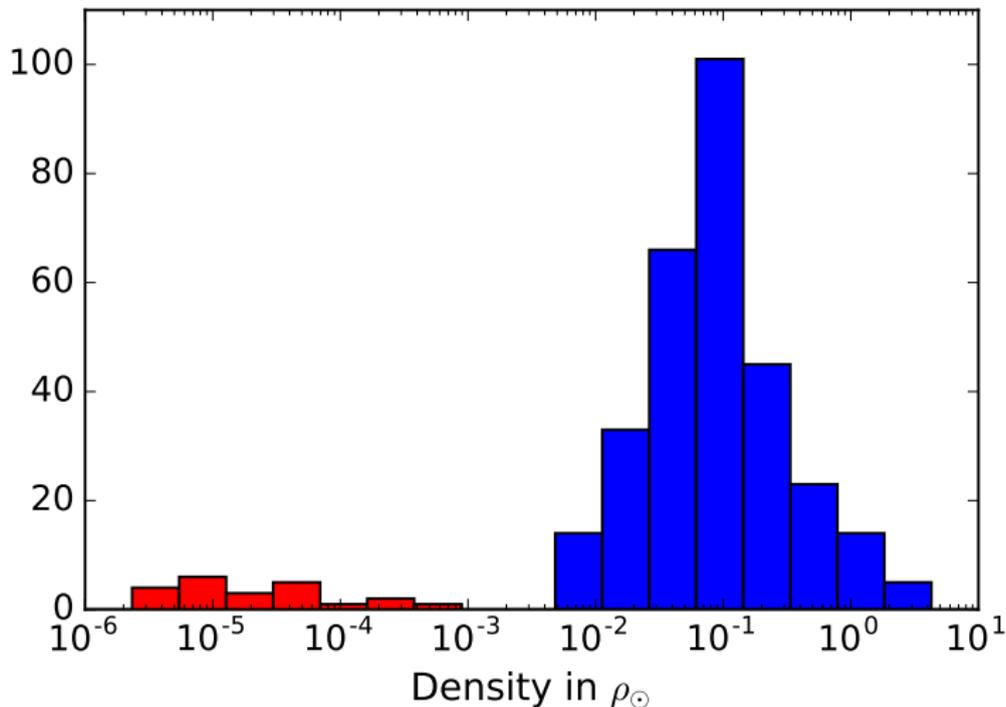
Die Sonne im Vergleich mit Riesensternen

# Sterne allgemein

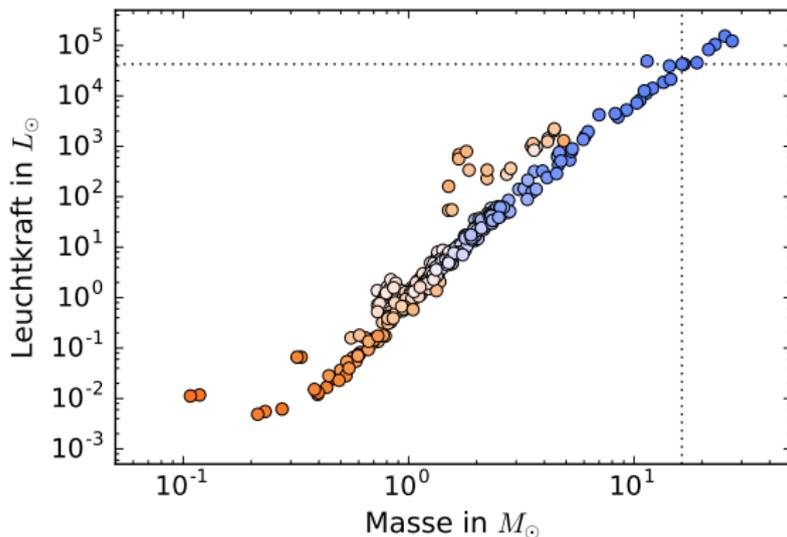
Systematik der Sterneigenschaften: Hertzsprung-Russell-Diagramm  
(Hier: Daten von Southworth 2008ff.: DEBCat)



# Separiertes Histogramm Dichte



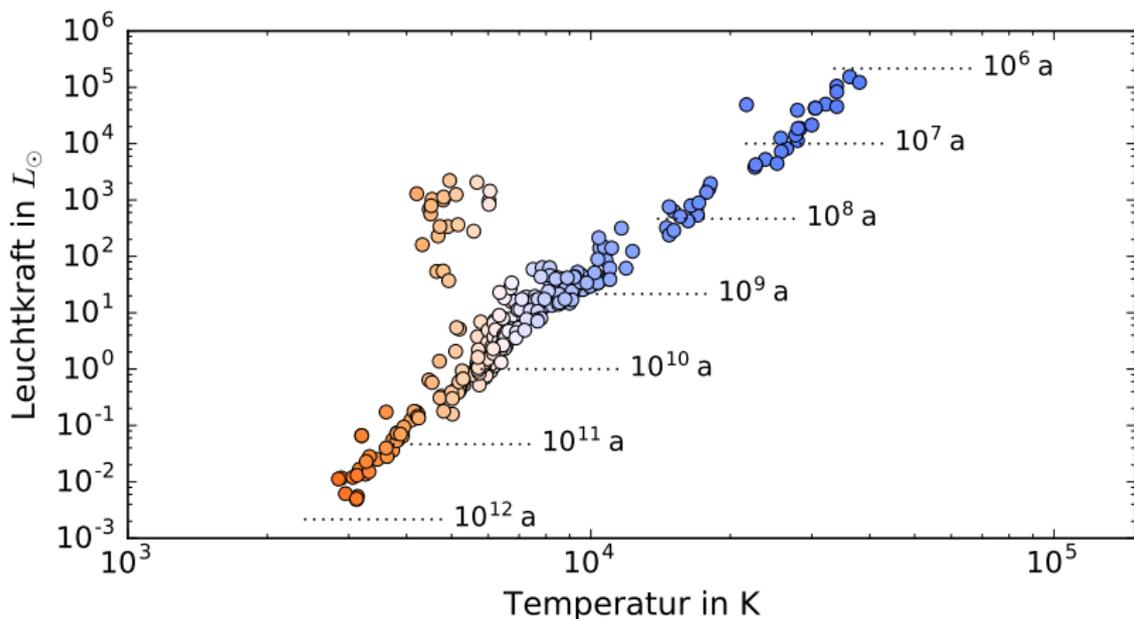
# Masse-Leuchtkraft-Relation



Masse und Leuchtkraft hängen zusammen wie

$$L \sim M^{3.5}$$

# Verweildauer auf der Hauptreihe

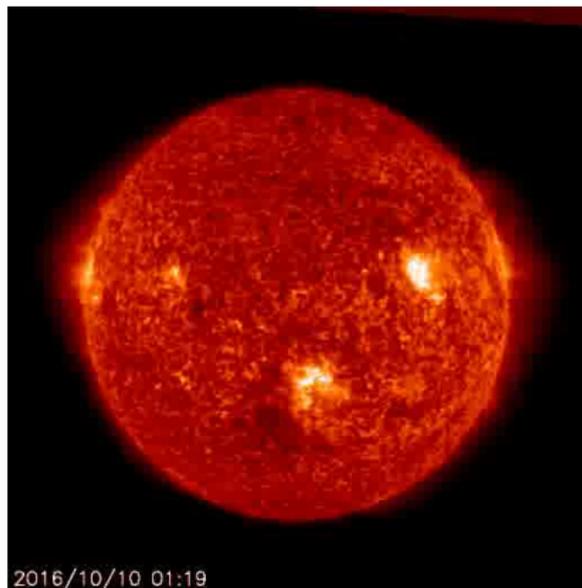


Mehr Masse  $\Rightarrow$  mehr Brennstoff,  
mehr Leuchtkraft  $\Rightarrow$  höhere Brennrate

$$\tau \sim M/L \sim M/M^{3.5} = M^{-2.5}$$

# Auswirkungen von Sternen auf ihre Umgebung

- (Gravitations-)Gezeitenkräfte:  
Gebundene Rotation, Ringe
- Elektromagnetische Strahlung
- Teilchenwinde



2016/10/10 01:19

Bilder: SOHO (NASA & ESA)

# Strahlung

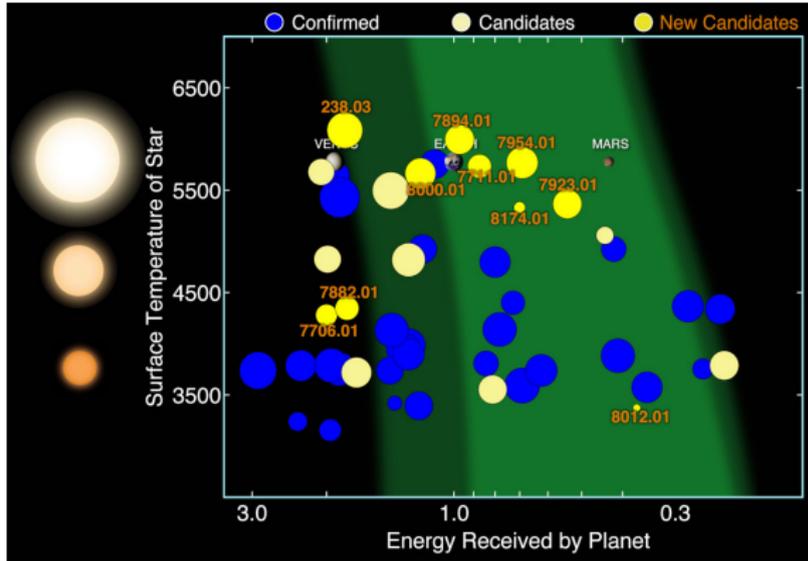
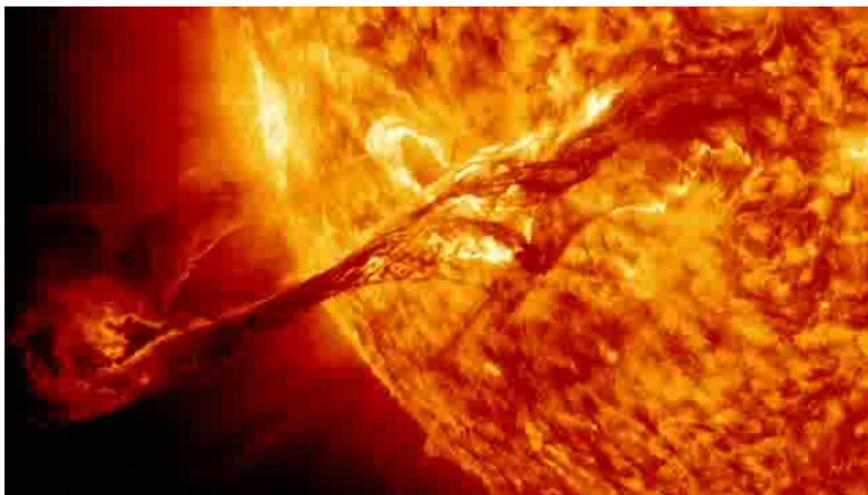


Bild: NASA/Ames Research Center/Wendy Stenzel

**Sonne:** Solarkonstante  $1367 \text{ W/m}^2$   
 d.h. zur Deckung des Weltenergiebedarfs  $11.704 \text{ km}^2$   
 (entspricht 4,6 Saarländern)

# Sonnenaktivität



Bilder: SOHO

(ESA & NASA)

Sonnenwind, Teilchenwinde allgemein: Protonen,  $^4\text{He}$ , Spuren anderer.

U.a. wichtig zu Aufheizung von Atmosphären!