

# Energieerzeugung in Sternen

Louis Rahe

Physikalisches Proseminar, 17.05.2023

- 1 Einleitung
- 2 Sternaufbau und Energieerzeugung
- 3 Beispiel: Die Sonne
- 4 Ausblick
- 5 Fazit

- Definition von Sternen:
  - Massereicher, selbstleuchtender Himmelskörper aus heu/ss em Gas und Plasma
- Welche bedeutung haben Sterne im Universum?
  - Energiequelle
  - Elementbildung
  - Kosmische Evolutuion
  - Entfernungsmessung Erforschung der Physik

- Überblick über die Energieerzeugung in Sternen
  - Thermonukleare Fusionsreaktionen
  - Hoher Druck und Temperatur
  - Voraussetzung:
    - Masse des neu entstandenen Kerns etwas geringer ist als die Summe der Komponenten
- Bedeutung für das Leben auf der Erde
  - Wärme, Licht und Energie
  - Navigation

# Sternaufbau und Energieerzeugung

## Aufbau und Eigenschaften von Sternen

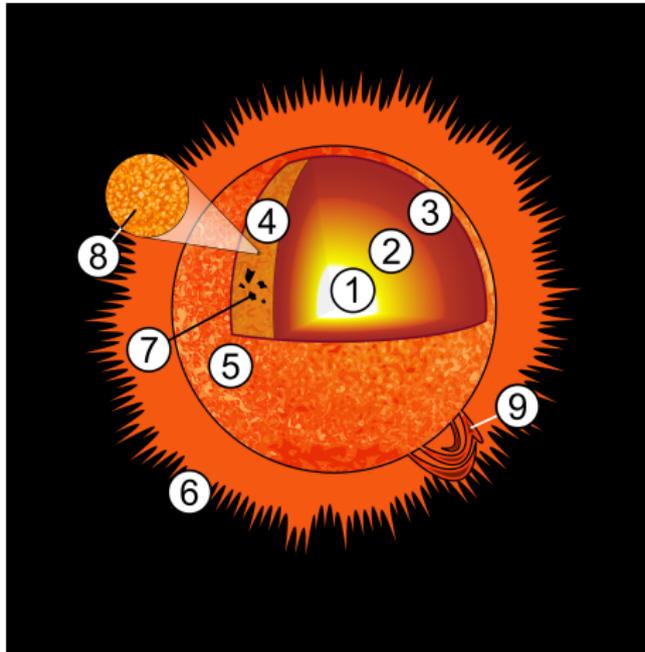
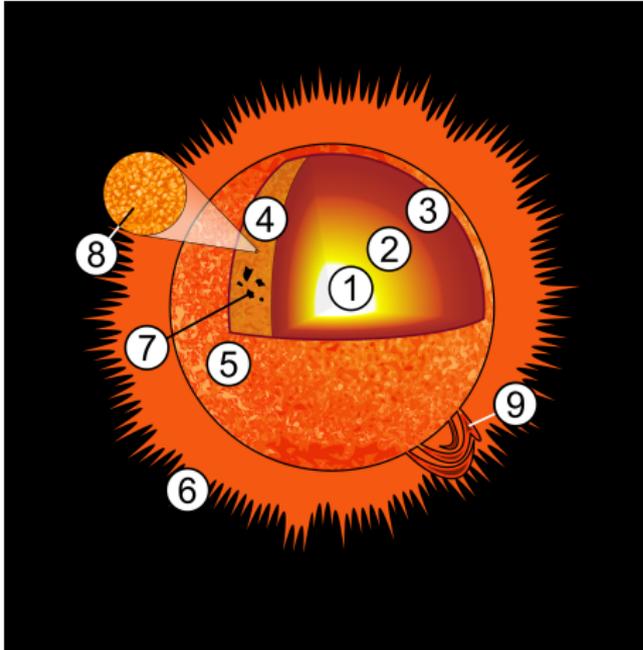


Abbildung: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sternaufbau>

# Sternaufbau und Energieerzeugung

## Aufbau und Eigenschaften von Sternen



- 1. Kern

Abbildung: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sternaufbau>

# Sternaufbau und Energieerzeugung

## Aufbau und Eigenschaften von Sternen

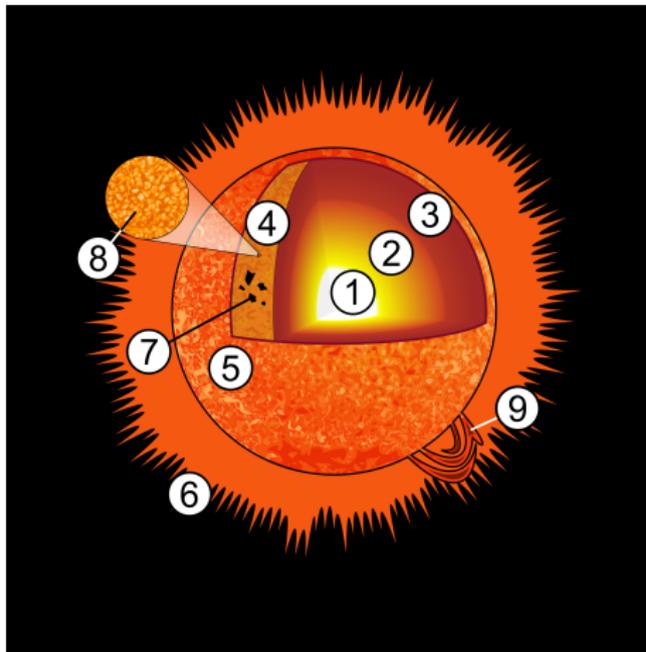


Abbildung: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sternaufbau>

- 1. Kern
- 2. Strahlungszone

# Sternaufbau und Energieerzeugung

## Aufbau und Eigenschaften von Sternen

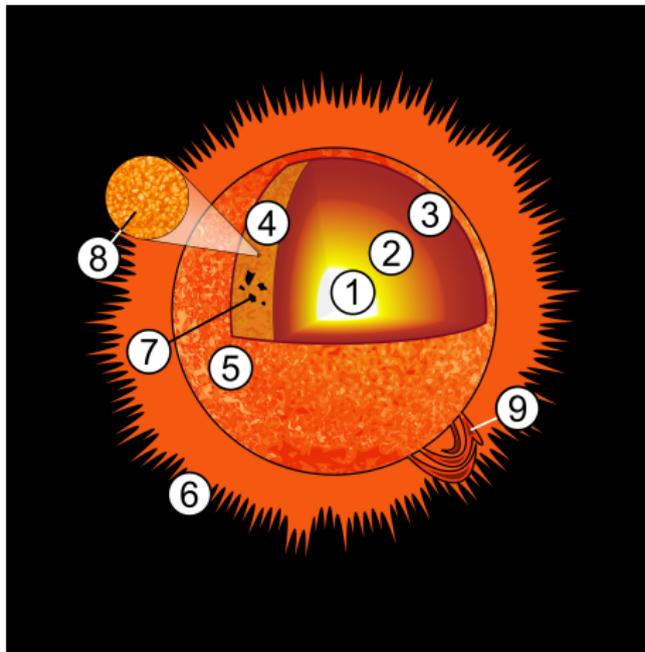
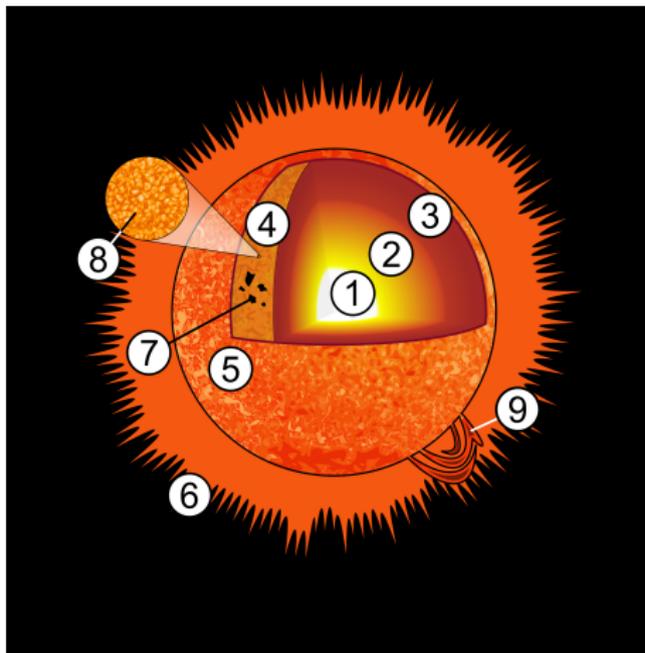


Abbildung: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sternaufbau>

- 1. Kern
- 2. Strahlungszone
- 3. Konvektionszone

# Sternaufbau und Energieerzeugung

## Aufbau und Eigenschaften von Sternen



- 1. Kern
- 2. Strahlungszone
- 3. Konvektionszone
- 4. Photosphäre

Abbildung: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sternaufbau>

# Sternaufbau und Energieerzeugung

## Aufbau und Eigenschaften von Sternen

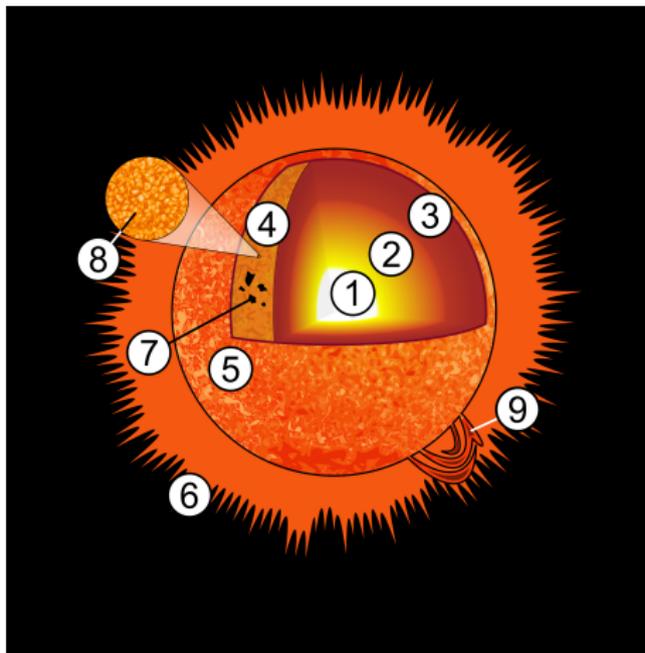
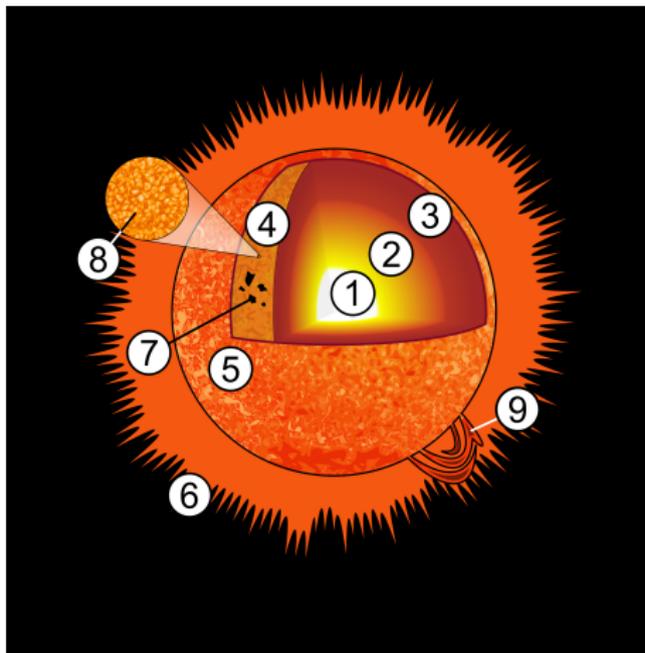


Abbildung: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sternaufbau>

- 1. Kern
- 2. Strahlungszone
- 3. Konvektionszone
- 4. Photosphäre
- 5. Chromosphäre

# Sternaufbau und Energieerzeugung

## Aufbau und Eigenschaften von Sternen

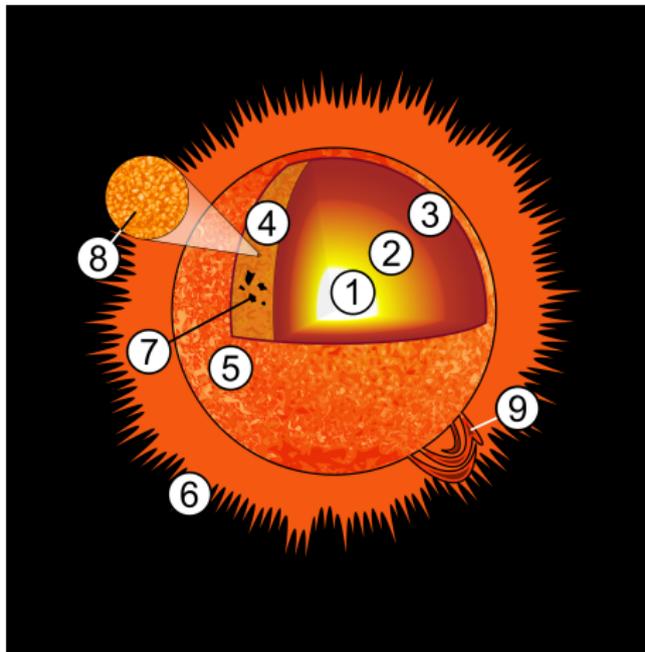


- 1. Kern
- 2. Strahlungszone
- 3. Konvektionszone
- 4. Photosphäre
- 5. Chromosphäre
- 6. Corona

Abbildung: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sternaufbau>

# Sternaufbau und Energieerzeugung

## Aufbau und Eigenschaften von Sternen

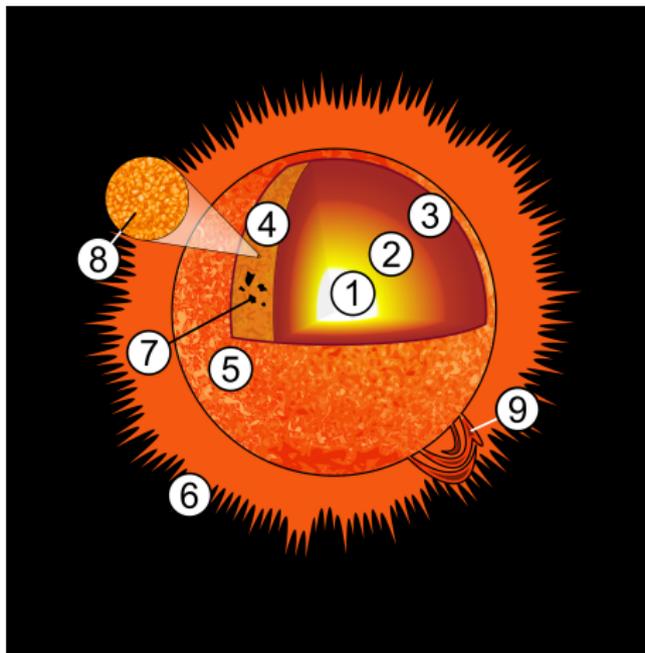


- 1. Kern
- 2. Strahlungszone
- 3. Konvektionszone
- 4. Photosphäre
- 5. Chromosphäre
- 6. Corona
- 7. Sonnenfleck

Abbildung: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sternaufbau>

# Sternaufbau und Energieerzeugung

## Aufbau und Eigenschaften von Sternen



- 1. Kern
- 2. Strahlungszone
- 3. Konvektionszone
- 4. Photosphäre
- 5. Chromosphäre
- 6. Corona
- 7. Sonnenfleck
- 8. Granulation

Abbildung: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sternaufbau>

# Sternaufbau und Energieerzeugung

## Aufbau und Eigenschaften von Sternen

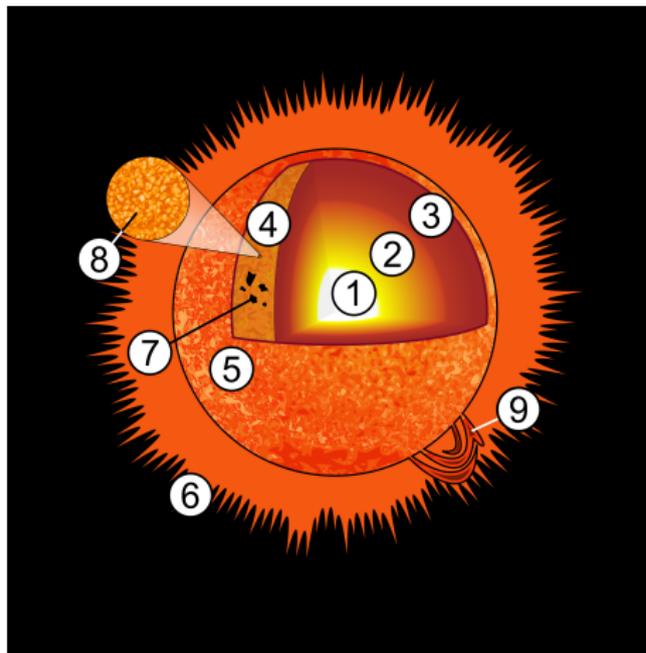


Abbildung: <https://de.wikipedia.org/wiki/Sternaufbau>

- 1. Kern
- 2. Strahlungszone
- 3. Konvektionszone
- 4. Photosphäre
- 5. Chromosphäre
- 6. Corona
- 7. Sonnenfleck
- 8. Granulation
- 9. Protuberanz

- Eigenschaften von Sternen
  - Masse
    - 0.08-100 Sonnenmassen
    - bestimmt Lebensdauer, Temperatur und Größe
  - Temperatur
    - Kern: 15-100 Mio. Kelvin
    - Oberfl/äche zwischen 2.000K und 20.000K
  - Helligkeit
  - Spektrum
    - Bestimmung von Elementen, Temperaturen und Drücke
  - Lebensdauer
  - Magnetfeld

# Sternaufbau und Energieerzeugung

## Kernfusion und ihre Rolle in der Energieerzeugung

- Kernfusion
  - Zwei Atomkerne verschmelzen zu einem
  - ermöglicht Sterne Energie abzustahlen
  - Kerne treffen mit hoher Energie aufeinander
    - Coulombbarriere
- Exotherme Fusionsreaktionen
  - können hohe Temperaturen aufrecht erhalten
    - benötigen hohen Druck

# Sternaufbau und Energieerzeugung

## Kernfusion und ihre Rolle in der Energieerzeugung

- Fusionsreaktionen des Wasserstoffbrennens
  - Proton-Proton-Kette (PP-Kette)
    - Vier Protonen  $\rightarrow$  Helium-4-Kern
  - Proton-Elektron-Kette (PE-Kette)
    - Vier Protonen  $\rightarrow$  Helium-4-Kern
  - Helium-Fusionsprozess
    - Zwei Helium-4-Kern  $\rightarrow$  Beryllium-8-Kern
    - findet in den tiefen Schichten eines Sterns statt
  - Deuterium-Helium-3-Prozess
    - Deuterium + Helium-3  $\rightarrow$  Helium-4 + ein freies Proton
    - Nur in sehr heißen und dichten Regionen eines Sterns

# Sternaufbau und Energieerzeugung

## Kernfusion und ihre Rolle in der Energieerzeugung

- Fusionsreaktionen des Wasserstoffbrennens
  - Beryllium-Zyklus
    - 4-Wasserstoffkerne  $\rightarrow$  Helium-4-Kern
    - Energieerzeugung in großen Sternen
  - CNO-Zyklus (Kohlenstoff-Stickstoff-Sauerstoff-Zyklus)
    - 4-Wasserstoffkerne  $\rightarrow$  Helium-4-Kern
    - Energieerzeugung in großen Sternen
  - Triple-Alpha-Prozess
    - 3-Helium-4-Kerne  $\rightarrow$  Kohlenstoff-12-Kern
    - Benötigt hohe Temperatur(100 Mio. Kelvin) und Dichte

# Sternaufbau und Energieerzeugung

## Kernfusion: Beispiel Bethe-Weizsäcker-Zyklus

- 1937-1939 von Hans Bethe und Carl Friedrich von Weizsäcker (Nobelpreis Physik 1967, H. Bethe)
- Wasserstoff  $\rightarrow$  Helium
- Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Sauerstoff (O)
- Ab 14 Mio. Kelvin und ab 18 Mio. Kelvin vorherrschend
- Setzt eine Energie von  $26,7 \text{ MeV}$  frei

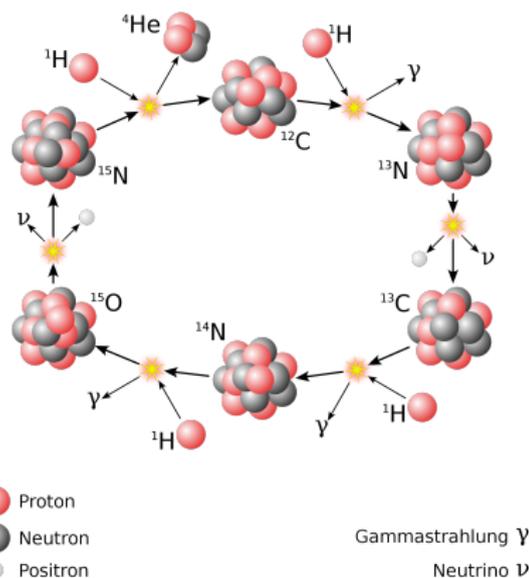


Abbildung:  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Bethe-Weizsäcker-Zyklus>

# Sternaufbau und Energieerzeugung

## Energieerzeugung in unterschiedlichen Phasen des Sternenlebens



Abbildung: Orionnebel. (Quelle: NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA) and the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team)

- Protonenstern
  - Molekülwolke fällt zu einer dichten Kugel zusammen
  - Gravitationsenergie
- Hauptreihenstern
  - beginn Wasserstofffusion

# Sternaufbau und Energieerzeugung

## Energieerzeugung in unterschiedlichen Phasen des Sternenlebens



Abbildung: Supernova.  
(<https://www.nationalgeographic.de/wissenschaft/2018/01/gewaltige-supernova-blies-bausteine-des-lebens-ins-all>)

- Rote Riesen
  - beginn Heliumfusion
- Supernova
  - Fusion bis zum Eisenkern
  - Hauptquelle für die Produktion schwerer Elemente im Universum
- Neutronenstern/Schwarzes Loch

# Beispiel: Die Sonne

## Eigenschaften der Sonne und ihr Platz im Universum

- Größe und Masse
  - 1,4 Millionen Kilometern Durchmesser
  - $1,989 \cdot 10^{30} \text{ Kg}$
- Zusammensetzung
  - Wasserstoff (etwa 74% der Masse)
  - Helium (ca. 24% der Masse)

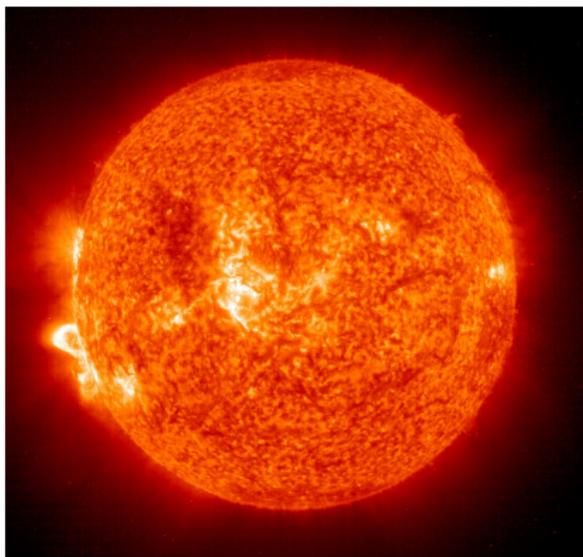


Abbildung: Sonne.

([http://t0.gstatic.com/licensed-image?q=tbn:ANd9GcQh-](http://t0.gstatic.com/licensed-image?q=tbn:ANd9GcQh-AxJRcDz5yLgVfFA_uPII6gww1aeEmAWM7DGaHTucBrN5JmPYkFGIVjrIC)

[AxJRcDz5yLgVfFA\\_uPII6gww1aeEmAWM7DGaHTucBrN5JmPYkFGIVjrIC](http://t0.gstatic.com/licensed-image?q=tbn:ANd9GcQh-AxJRcDz5yLgVfFA_uPII6gww1aeEmAWM7DGaHTucBrN5JmPYkFGIVjrIC)

# Beispiel: Die Sonne

## Eigenschaften der Sonne und ihr Platz im Universum

- Energieerzeugung
  - Wasserstoffatome → Helium
  - elektromagnetische Strahlung in Form von sichtbarem Licht
  - 98.2% Proton-Proton-Zyklus
  - 1.8% CNO-Zyklus
- Lebensdauer
  - Fusioniert seit 4,6 Milliarden Jahre
  - Noch 5 Milliarden Jahre brennen
    - Ausdehnung zum Roten Riesen
    - Zusammenfall zum Weißen Zwerg
- Platz im Universum
  - Teil der MilchstraÙ
  - 27.000 Lichtjahre vom galaktischen Zentrum entfernt

# Beispiel: Die Sonne

Eigenschaften der Sonne und ihr Platz im Universum

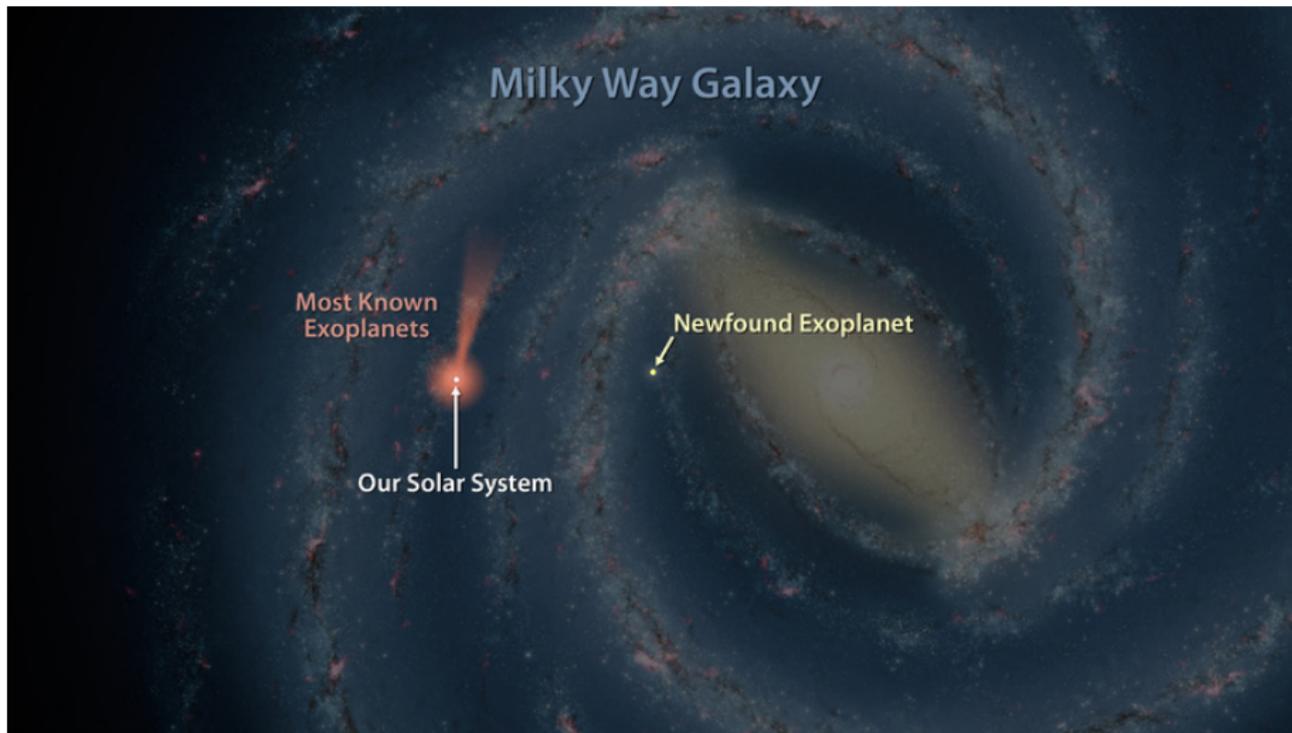


Abbildung: Sonne in der Milchstraße.

<https://www.it-times.de/news/sonne-ein-sterne-der-mit-900-000-km-h-um-die-galaxie-milchstrasse-rast-119603/>

# Beispiel: Die Sonne

## Der Sonnenzyklus und seine Auswirkungen auf die Erde

- Sonnenzyklus
  - Beschreibt die Veränderung der Aktivität der Sonne über 11 Jahre
  - Sonnenflecken
    - dunkle, kühlere Bereiche
    - verbunden mit magnetischen Feldern
  - Solarfackeln und Eruptionen
    - plötzliche Ausbreitung von intensiver Strahlung
    - explosive Freisetzungen von Plasma, Energie und magnetischen Feldern aus der Sonnenkorona
  - Sonnenwinde
    - Elektronen und Protonen strömen von der Sonne in den Weltraum

# Beispiel: Die Sonne

## Der Sonnenzyklus und seine Auswirkungen auf die Erde

- Auswirkungen auf die Erde
  - Magnetfeld
    - beeinflussen das Magnetfeld der Erde
    - Sonnenwinde können zu geomagnetischen Stürmen führen
  - Aurora (Polarlichter)
  - Kommunikation und Stromnetz
    - können elektrische Ströme in Leitungen induzieren und Störungen verursachen
  - Strahlung
    - anstieg Strahlungspegel im Weltraum

- Herausforderungen
  - Hohe Temperaturen und Drücke
  - Magnetische Einschränkungen
  - Materialeigenschaften
- Möglichkeiten
  - Umweltfreundliche unbegrenzte Energie
  - Ressourceneffizienz
  - Technologische Fortschritte
    - Tokamak, Stellarator und Inertial Confinement Fusion (ICF)

# Ausblick

## Herausforderungen und Möglichkeiten bei der Energieerzeugung durch Sterne

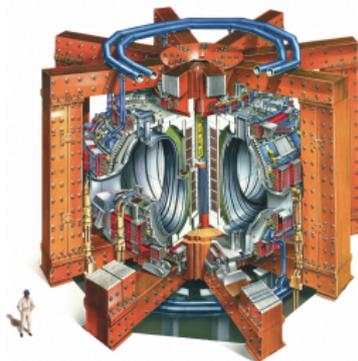


Abbildung: Tokamak.  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Tokamak>

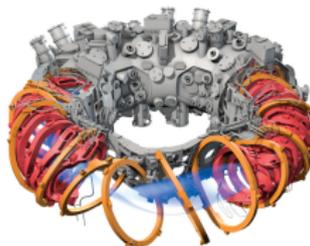


Abbildung: Stellarator,  
<https://www.science.org/content/article/twisty-device-explores-alternative-path-fusion>

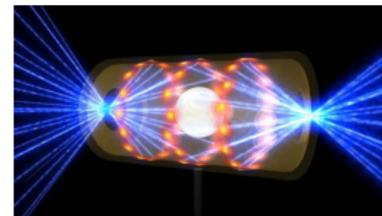


Abbildung: Sonne.  
<https://www.spektrum.de/magazin/schnell-zuendung-fuer-die-traegheitsfusion/1152346>

- Energieerzeugung in Sternen erfolgt über Kernfusion
  - Wasserstoffbrennen: Wasserstoff  $\rightarrow$  Helium
- "Sterne sterben"
  - Durch Kernfusion wird die Masse des Sterns verringert
- Kernfusion könnte für Energiegewinnung genutzt werden
  - Forschungsfortschritt noch nicht so weit

Vielen dank für Zuhören  
Gibt es noch Fragen?