

Kernfusion in der Sonne

Die Strahlungsenergie der Sonne ist die Antriebsquelle vieler natürlicher Prozesse auf der Erde: Sie liefert die Energie für Pflanzen und Lebewesen und bestimmt das Klima. Die Sonne setzt eine Strahlungsleistung von $3,85 \cdot 10^{26}$ W (Joule pro Sekunde) frei. Das entspricht pro Sekunde etwa dem 106-Fachen des jährlichen Weltenergieverbrauchs (2004)! Woher nimmt die Sonne diese Energie?

Ende der 30er Jahre des 20. Jahrhunderts fand man durch astronomische Spektroskopie heraus, dass im Inneren der leuchtenden Sterne, also auch in unserer Sonne, Kernreaktionen ablaufen und dass diese der Motor für deren Leuchtkraft sind. Da bei spektroskopischen Untersuchungen der Sonne Wasserstoff als wesentliches Element festgestellt wurde, lag die Schlussfolgerung nahe, dass er eine entscheidende Rolle dabei spielen müsse. Die entscheidenden Arbeiten zur Kernreaktion in der Sonne lieferte 1939 Hans Bethe, 1967 erhielt er u. a. dafür den Nobelpreis.

Wie funktioniert der „Motor“ der Sonne?

Die Sonne ist nicht massiv, sondern ein Gasball. Der Sonnenkern (er hat ca. 25 % des gesamten Sonnendurchmessers und 50 % der Sonnenmasse) besteht im Wesentlichen aus Wasserstoff (^1H).

Rahmenbedingungen für die Fusion

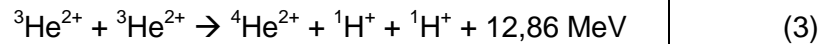
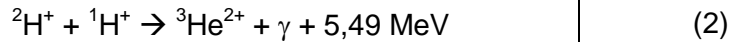
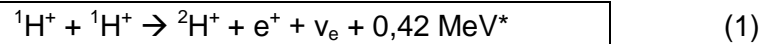
Im Sonnenkern herrscht eine Temperatur von ca. 10 – 15 Mio. K.

Dies hat zur Folge, dass der Wasserstoff vollkommen ionisiert als „Plasma“ vorliegt: Kerne und Elektronen sind getrennt. Die Sonne besteht also aus einer Wolke von Elektronen und Protonen. Gleichzeitig wird dieses Plasma aufgrund der extrem hohen Gravitationskräfte durch einen Druck von mehr als 200 Mrd. bar zusammengehalten. Dies ist ein unvorstellbar hoher Druck! Er entspricht etwa dem 200-Mrd.-fachen Druck der Erdatmosphäre.

Aus Wasserstoff wird Helium

In unserer Sonne läuft der sog. „Proton-Proton-Zyklus“ ab, bei dem Wasserstoffkerne zu Heliumkernen verschmelzen. Diese Reaktion kann nur bei extrem hoher Temperatur und extrem hohem Druck stattfinden, da die kinetische Energie der Atomkerne ausreichen muss, die Coulomb-Abstoßung zu überwinden. Unterstützt wird dieser Vorgang durch den quantenmechanischen „Tunneleffekt“ – ohne diesen wären sehr viel höhere Temperaturen zur Kernfusion notwendig. Ein Heliumkern, der bei der Fusion entsteht, wiegt weniger als seine Bausteine (zwei Neutronen und zwei Protonen) zusammen. Bei der Fusion entsteht eine dieser Massendifferenz entsprechende Menge an Strahlungs- und Wärmeenergie ($E = m \cdot c^2$). Durch den Massendefekt des Heliumfusionsprozesses können im Laufe der Zeit 0,7 % der Sonnenmasse als Energie abstrahlen.

Die Fusion von Wasserstoff zu Helium kann durch verschiedene Prozesse erfolgen. Die wichtigste Reaktionskette besteht aus den folgenden drei Schritten:



* Das Positron zerstrahlt beim Zusammentreffen mit einem Elektron unter Energiefreisetzung: $\text{e}^+ + \text{e}^- \rightarrow 2\gamma + 1,022 \text{ MeV}$. Das Neutrino verlässt im Regelfall ohne weitere Reaktionen die Sonne, seine Energie (0,26 MeV) ist nicht nutzbar.

Insgesamt werden bei der Bildung eines Heliumkerns fast 27 MeV frei – in Form von kinetischer Energie, Neutrinos und elektromagnetischer Strahlung (z. B. Gammastrahlung, Wärmestrahlung, sichtbares Licht usw.). (Man beachte, dass vier Wasserstoffkerne benötigt werden, um einen Heliumkern ${}^4\text{He}$ zu erzeugen: Die Fusionsreaktionen (1) und (2) müssen je zweimal ablaufen, damit zwei ${}^3\text{He}$ -Kerne entstehen, die dann zu ${}^4\text{He}$ fusionieren können.)

Die Strahlungsleistung der Sonne von $3,7 \cdot 10^{26}$ Watt resultiert aus der Verbrennung von 570 Mio. t Wasserstoff zu 566 Mio. t Helium – die Masse der Sonne nimmt also pro Sekunde um 4 Mio. t ab.

Wie gelangt die Energie zur Sonnenoberfläche?

Die Energie aus der Kernfusion wird im Inneren der Sonne frei und muss erst an die Oberfläche gelangen, damit sie dann in den Weltraum abgestrahlt werden kann. Die Photonen (Energiequanten), die bei der Kernfusion frei werden, führen mit dem Plasma und den Gasteilchen in den gasförmigen Schichten der Sonne Stöße aus, weshalb sie nicht direkt aus dem Inneren in den Weltraum gelangen, sondern aus dem Sonneninneren heraus zur Oberfläche diffundieren. Dazu brauchen sie mehrere Millionen Jahre. Das Licht, das wir heute sehen, ist also schon vor sehr langer Zeit entstanden.

Übrigens: Von der Strahlung der Sonne fällt nur ein verschwindend geringer Teil auf die Erde. Diese durchschnittlich zur Erde gelangende Strahlungsleistung beträgt $1,37 \text{ kW/m}^2$ (Solarkonstante). Betrachtet man die Tatsache, dass davon derzeit nur 0,1 % durch die Photosynthese genutzt wird und vom Menschen derzeit fast nichts, so stellt diese Strahlungsenergie eine unerschöpfliche Energiereserve dar!

Was, wenn der Treibstoff des „Sonnenmotors“ knapp wird?

Die Sonne entstand vor etwa 4,6 Mrd. Jahren. Eine einfache Abschätzung zeigt, dass die Sonne mit dem heute noch vorhandenen Wasserstoff im Kerninnern maximal für weitere ca.100 Mrd. Jahre strahlen kann:

Masse der Sonne: $1,99 \cdot 10^{30}$ kg,
Massendefekt: 0,7 %,
Strahlungsleistung P: $3,85 \cdot 10^{26}$ W,
Lichtgeschwindigkeit c: $2,99 \cdot 10^8$ m/s

abgestrahlte Energie $E = 0,007 \cdot (1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}) \cdot c^2 = 1,25 \cdot 10^{45} \text{ J}$

Lebensdauer $t_{\text{Sonne}} = E / P = 1,25 \cdot 10^{45} \text{ Ws} / 3,85 \cdot 10^{26} \text{ W}$
 $= 3,25 \cdot 10^{18} \text{ s} \approx 10^{11} \text{ a}$

Der Wert ist ca. 20 Mal größer als das derzeitige Alter der Sonne!

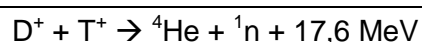
Komplexere Berechnungen (z. B. vom Max-Planck-Institut für Plasmaphysik) hingegen liefern eine Restbrenndauer von ca. 5 Mrd. Jahren. Und die Fusion hört auch nicht auf, wenn der Wasserstoffvorrat zur Neige geht. Durch den sinkenden Gasdruck zieht sich der Sonnenkern zusammen und wird dadurch heißer. Das sog. „Heliumbrennen“ (Fusion von Heliumkernen) setzt ein. Der restliche Wasserstoff wandert nach außen und es entsteht eine zweite Brennzonen. Die äußeren Schichten der Sonne blähen sich dadurch auf – die Sonne wird zu einem „Roten Riesen“. Nach der Heliumfusion hat die Sonne nicht mehr genügend Energiereserven, um in die nächste Fusionsstufe – die des Kohlenstoffs – überzugehen. Die äußeren Schichten kollabieren und werden kälter, es entsteht ein „Weißer Zwerg“.

Künstliche Sonne im Kraftwerk

Die Forschung arbeitet seit Mitte des 20. Jahrhunderts daran, die Kernfusion der Sonne in einem Reaktor nachzubilden. Unsere Energieversorgung wäre damit für immer gesichert, denn Wasserstoff als Brennstoff in der Kernfusion (Proton-Proton-Zyklus) hat einen Heizwert von $629 \cdot 10^6$ MJ/kg. (Zum Vergleich: Heizwert des Kernbrennstoffs ^{235}U bei der Kernspaltung $89,9 \cdot 10^6$ MJ/kg, Heizwert fossiler Energieträger 30 MJ/kg.)

Leider ist das nicht so einfach. Zunächst einmal braucht man elementaren Wasserstoff. Wasserstoff gibt es auf der Erde aber nur in gebundener Form, z. B. in H_2O ! Folglich muss man erst einmal Energie aufwenden, um Wasserstoff herzustellen, z. B. aus Elektrolyse von Wasser. Das ist energetisch gesehen kein Problem, denn im Vergleich zum Energiegewinn bei der Fusion ist das vernachlässigbar.

Die wirkliche Schwierigkeit liegt darin, die extrem hohe Temperatur und den extrem hohen Druck, die im Sonneninneren herrschen, zu reproduzieren, um ein Plasma der nötigen Dichte zu erzeugen. Nur dann kann sich eine Kettenreaktion einstellen, die genug Energie liefert, um sich selbst am Laufen zu halten, und zusätzlich überschüssige Energie freisetzt. Aber alle bisherigen Versuche konnten die Kettenreaktion nur für wenige Sekunden aufrechterhalten. Um den hohen Startenergiebedarf zu senken und die Überschussenergie besser abführen zu können, weicht man vom Vorbild Sonne ab und verwendet stattdessen die Wasserstoffisotope Deuterium ($\text{D} = {}^2\text{H}$) und Tritium ($\text{T} = {}^3\text{H}$) als Fusionspartner:



Hierbei entstehen auch andere Reaktionsprodukte, die von entscheidender technischer Bedeutung sind: Das Neutron, das frei wird, wird im Reaktormantel abgebremst und erwärmt diesen – hierdurch wird also Wärme aus der Fusionszone nach außen transportiert! Diese Wärme wird mittels Wärmetauscher abgeführt und zur Dampferzeugung genutzt, um eine Turbine und damit einen Generator für die Stromerzeugung anzutreiben. Der Heizwert bei der Kernfusion von D und T beträgt $414 \cdot 10^6$ MJ/kg (Massendefekt 0,46 %). Auf diese Art könnte man mit weniger als 1 g dieses Brennstoffs durch Fusion die gleiche Energie erzeugen wie in einem thermischen Kraftwerk durch die Verbrennung von 10 t Kohle oder Öl.

Hinweis: Problematisch ist nicht nur die technische Realisierung der Fusion, sondern auch ihr Abfall: Der Brennstoff Tritium ist radioaktiv und die Reaktorwände werden durch die Neutronen bestrahlt und altern schnell. Jedoch ist die Menge der radioaktiven Abfallstoffe im Vergleich zur Kernspaltung äußerst gering und ihre Halbwertszeiten sind relativ kurz.