Die Energieproduktion der Sonne

In dieser Lektion wollen wir die Bedingungen für die Energieerzeugung in der Sonne abschätzen und die möglichen Prozesse kennenlernen.

Man kann davon ausgehen oder sich einfach durch Fragen rückversichern, dass die Kursteilnehmer als naturwissenschaftlich Interessierte bereits gehört haben, dass die Sonne ihre Energie durch die Fusion von Wasserstoff erzeugt. Allerdings sind die genauen Prozesse meist unbekannt. Als „Messdaten“ stehen uns die „Oberflächentemperatur“ von ca. 5800K und der Sonnenradius von 695000km zur Verfügung.

Was folgt aus der Oberflächentemperatur für den Aggregatszustand von Wasserstoff?

Wegen der hohen Oberflächentemperatur von ca. 5800K muss der Wasserstoff auf jeden Fall gasförmig sein.

Welche Schlussfolgerung muss man aus der Kugelform für den Ort ziehen, an dem die Energie erzeugt wird?

Da die Sonne eine Kugel ist, sieht von der leichten Abplattung auf Grund der Rotation ab, und an der „Oberfläche“ keine dramatischen Temperaturunterschiede aufweist, muss die Energie in einem Bereich um den Mittelpunkt der Sonne erzeugt werden, da sonst die Sonnenform von der Kugelform deutlich abweichen würde, und auch die Temperaturverteilung an der Oberfläche wäre weniger gleichmäßig. Außerdem muss die Temperatur von der Oberfläche nach innen zunehmen, da die Sonne Energie abgibt und auskühlt und diese Energie muss ersetzt, d. H. von Innen nachgeliefert werden. Nach diesen Überlegungen kann man folgendes Bild des Sonnenaufbaus vorstellen:

Ein Bild, das Text, Monitor, drinnen, Bildschirm enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung Quelle ESA

Die Bedeutung der Bezeichnungen wird in dem folgenden Bild erklärt.

Ein Bild, das Text, orange, Screenshot enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung Quelle ESA

Beschäftigen wir uns jetzt mit den Bedingungen im Kern der Sonne. In der Mitte der Sonne sitzt der sog. **Kern** mit einem Radius von ungefähr – alle diese Angaben sind nur Schätzwerte – 175000km, das ist knapp die Hälfte des Radius der Umlaufbahn des Mondes. In diesem Bereich herrscht eine Temperatur von ca. 15 Millionen Kelvin. Das „Sonnengas“ ist im Kern ein Plasma aus freien Elektronen und Atomkernen. Nur durch die Zerstörung der Atomstruktur kann die Materie auf die enorme Dichte von ρ = 160 g/cm³ komprimiert werden.

Eine Abschätzung macht uns das schnell klar.

Der Radius des Sonnenkerns beträgt rund 150000km und somit das Volumen des Kerns:

Weiter nehmen wir an, im Kern befindet sich die Hälfte der Sonnenmasse:

Außerdem nehmen wir jetzt der Einfachheit halber an, die Sonne bestehe nur aus Wasserstoff (, so können wir die Anzahl der Wasserstoffatome im Kern abschätzen.

Jetzt müssen wir nur noch das Volumen dieser Wasserstoffatome berechnen.

Der Radius eines Wasserstoffatoms beträgt . Daraus ergibt sich ein Volumen

Das Volumen der Wasserstoffatome im Kern würde

betragen. Also rund 200-mal mehr Platz beanspruchen als zur Verfügung steht.

Vergleichen wir jetzt mit dem Volumen von Protonen und Elektronen, so ergibt sich:

Bei dem Kernvolumen von bleibt so genügend leerer Raum, damit sich die Protonen und Elektronen frei bewegen können.

Die Protonen und Elektronen nehmen also nur des Volumens des Sonnenkerns in Anspruch.

Um die halbe Sonnenmasse im Kern unterzubringen, müssen die Wasserstoffatome nur in ihre Bestandteile Protonen und Elektronen erlegt werden, d. h. ein Plasma bilden.

Wem die Abschätzung zu grob ist, der kann die Abschätzung oben auch mit einem „Sonnenelement“ rechnen. Die Sonne besteht zu 75% aus Wasserstoff, 24% Helium und 1% aus allen anderen Elementen. Damit lässt sich die Masse eines „Sonnenelements“ abschätzen:

Die Massenzahl 122,5 für alle anderen Elemente ist der ungefähre Mittelwert der Massenzahlen von Lithium bis Uran ohne ihre relativen Häufigkeiten in der Sonne zu berücksichtigen.

Als nächstes machen wir eine erste Abschätzung der Temperatur im Kern. Wir habe gerade ausgerechnet, dass die Atome im Kern in ihre Bestandteile zerlegt sind. Insbesondere muss die Temperatur ausreichen, um Helium zu ionisieren.

Schauen wir also nach, wie viel Energie notwendig ist, um Helium zu ionisieren.

Die Ionisierungsenergien der Elemente findet man z. B. unter [Ionisierungsenergie - PSE, Tabelle & Diagramm | Chemie-Azubi](https://www.chemie-azubi.de/ionisierungsenergie/). Für Helium beträgt die Ionisierungsenergie für das zweite Elektron . D. h. die Temperatur im Kern muss so hoch sein, dass mittlere Bewegungsenergie der Kernteilchen ausreicht die Heliumatome vollständig zu ionisieren. Die mittlere Bewegungsenergie berechnet sich aus:

Wobei k die Boltzmann Konstante ist, mit einem Wert von .

Auflösen nach der Temperatur ergibt:

Im Kern der Sonne muss die Temperatur also mindestens 420000K betragen.

Eine bessere Abschätzung bekommen wir daraus, dass die Sonne ihre Größe nicht wirklich verändert. Das bedeutet, dass die Gravitationskraft, die die Sonne zusammenpresst, mit einer nach außen gerichtete Druckkraft auf Grund der Temperatur im Gleichgewicht ist.

Schätzen wir den Druck, den die Gravitationskraft im Kern der Sonne erzeugt. Da der Druck nicht mehr in allen Bundesländern zum schulischen Grundwissen der Kursteilnehmer zählt, hat man hier Gelegenheit den Druckbegriff einzuführen bzw. zu definieren. Dass Druck etwas mit Kraft zu tun hat, ist den Kursteilnehmern intuitiv klar und kann schnell und einfach mit einem Softball und einem Tennisball demonstriert werden, die man vom gleichen Gewichtsstück „zusammendrücken“ lässt. Um auf die Abhängigkeit von der Fläche zu kommen, kann man mit der ungewöhnlichen Frage: „Warum sollten Mädchen beim Ausgehen Stilettos tragen?“, weiter machen. Die Antwort ist natürlich, weil sie sich so besser gegen lästige Bewunderer wehren können, denen sie mit dem Absatz auf den Fuß treten. Die kleine Fläche erzeugt, was allen einleuchtet, größeren Schmerz. „Schmerz“ bzw. Druck und Fläche sind also indirekt proportional. Daraus ergibt sich:

und

Und damit die Definition:

Ein Bild, das Entwurf, Zeichnung, Diagramm, Reihe enthält.

Automatisch generierte BeschreibungUm die Druckkraft im Zentrum der Sonne abzuschätzen, verwenden wir folgendes einfaches Modell. Wir stellen uns eine Säule mit 1m² Querschnittsfläche aus „Sonnenmaterie“ vor, die vom Rand der Sonne zum Mittelpunkt reicht.

1m²

Das Problem bei Abschätzungen mit einfachen Modellen ist, dass man ungefähr wissen muss, welches Ergebnis man erhalten will, und dann ausprobieren muss, welche Vereinfachungen die passendsten Ergebnisse liefern. Man kann die Säule vom Schwerpunkt der „unteren“ (nicht gezeichneten) Sonnenhälfte anziehen lassen. Der Schwerpunkt einer Halbkugel liegt bei . Rechnet man das durch, erhält man einen unbefriedigenden viel zu kleinen Wert. Eine recht brauchbare Abschätzung erhält man, wenn man die Säule von der halben Sonnenmasse der Halbkugel anziehen lässt, und den Schwerpunkt der „oberen“ Sonnenhälfte verwendet. Die Kraft, die den Druck erzeugt, ist die Gewichtskraft der Säule.

Die Masse der Säule schätzen wir über die mittlere Dichte der Sonne ab.

Die mittlere Dichte der Sonne erhalten wir aus ihrer Masse und ihrem Volumen:

Da wir die mittlere Dichte verwenden, liegt der Schwerpunkt der Säule in der Mitte bei . Für den Abstand r der Schwerpunkte folgt dann:

Für den Druck ergibt sich dann:

Da die „untere“ Hälfte den gleichen Druck erzeugt beträgt der Gesamtdruck

Exaktere Abschätzungen der Astrophysiker ergeben:

Wir haben also nicht so schlecht geschätzt. Dieser Druck muss durch den Druck des heißen Plasmas im Sonnenkern ausgeglichen werden. Um die Temperatur des Plasmas zu „berechnen“, verwenden wir das allgemeine Gasgesetz:

Dabei ist n die Anzahl der Teilchen in der Einheit kmol. R ist die allgemeine Gaskonstante und T die Temperatur in Kelvin.

Die allgemeine Gaskonstante R hat den Wert . 1kmol enthält immer Teilchen. Bei 1bar Druck entspricht das einem Volumen von 22,4m³. Bei dem enormen Druck im Sonnenkern ist das Volumen natürlich bedeutend kleiner. Trotzdem gilt für 1kmol Sonnengas im Kern:

Aufgelöst nach der Kerntemperatur ergibt sich:

1kmol eines Stoffes hat immer eine Masse, die seinem Atomgewicht in kg entspricht. D. h. bei Wasserstoffgas hat 1kmol immer eine Masse von 1,0747 kg.

Im Kern der Sonne gilt nun

Damit gilt:

Für die Dichte im Kern gilt nach genaueren Angaben aus unseren Annahmen und Berechnungen oben erhalten wir:

Für die Kerntemperatur erhalten wir je nach den verwendeten Zahlenwerten:

Oder

Was recht gut bei den 15 Millionen Kelvin liegt, die von den Astrophysikern für die Kerntemperatur berechnet wird.

Auf die Frage: „Wie funktioniert die Energieerzeugung bei dieser Temperatur im Kern der Sonne?“ kommt mit ziemlicher Sicherheit die Antwort, dass sie durch Kernfusion erzeugt wird.

Wie funktioniert die Kernfusion im Kern der Sonne?

Ein einfaches Video dazu findest du bei [(517) Kernfusion & Kernspaltung – Was ist das? - YouTube](https://www.youtube.com/watch?v=ZD2TcLLyxrI).

Betrachten wir als erstes die einfache Fusionsgleichung

Wie entsteht durch Fusion von 4 Protonen zu einem Heliumkern Energie?

Wahrscheinlich weiß der eine oder andere Kursteilnehmer bereits, dass dies mit Einsteins Formel

zu tun hat.

Berechnen wir also die Massen der beteiligten Teilchen.

Die 4 Protonen haben eine Masse von

Der Heliumkern hat eine Masse von

Und die beiden Positronen

Eigentlich sollte nach der Massenerhaltung die Differenz der Massen auf der rechten und der linken Seite 0 ergeben. Rechnen wir nach

D. h. die 4 Protonen zusammen sind schwerer als der Heliumkern und die Positronen. Die Überschüssige Masse wird nach Einsteins berühmter Gleichung in Energie umgesetzt.

Rechnen wir die Massenenergie der Positronen noch dazu, die beim Zusammenstoß mit zwei der vielen freien Elektronen im Kern zerstrahlen so erhalten wir die

Bei der Fusion von 4 Protonen zu einem Heliumkern werden also 25,7MeV Energie gewonnen.

Die beiden Positronen zerstrahlen mit zwei der im Überfluss vorhandenen Elektronen zu Gammastrahlung.

Da Positron und Elektron gleiche Masse haben gilt wegen der Impulserhaltung:

Daraus lässt sich die Wellenlänge der emittierten Photonen berechnen:

Diese Wellenlänge liegt im Bereich der Gammastrahlung, ist also „gefährliche“ radioaktive Strahlung

Um zu sehen wie viel Masse unsere Sonne in Energie umwandelt müssen wir als nächstes die Anzahl N der Fusionsprozesse pro Sekunde berechnen. Diese ergibt sich aus der Strahlungsleistung folgendermaßen:

Da bei jedem Fusionsprozess 4 Protonen beteiligt sind, ist die Anzahl der Protonen 4-mal so groß:

Die Masse der pro Sekunde fusionierten Wasserstoffkerne beträgt:

Die Masse der erzeugten Heliumkerne beträgt:

Die Sonne verliert damit auf Grund der Energieerzeugung pro Sekunde eine Masse von

In den ca. 5 Milliarden Jahren ihrer Existenz hat die Sonne damit eine Masse von

Bis heute hat die Sonne damit

Unsere Abschätzung zeigt, dass die Sonne in 5 Milliarden Jahren trotz des gewaltigen Massenverlustes von 4,2 Millionen Tonnen pro Sekunde praktisch nichts von ihrer Gesamtmasse eingebüßt hat, und auch in den nächsten 5 Milliarden Jahren nicht viel mehr Masse einbüßen wird.

Damit wir eine kleine Vorstellung davon haben, wie viel 4,2 Millionen Tonnen pro Sekunde sind. 4,2 Millionen Tonnen entspricht einem vollbeladenen Güterzug von ca. 1600km Länge, also von Hamburg bis Rom. Ist also eigentlich gar nicht so viel. Um die gesamte Masse zu transportieren, die die Sonne an einem Tag verliert, müsste der Güterzug allerdings ca. 4000-mal um die Erde reichen.

Versuchen wir uns die Leuchtkraft der Sonne noch etwas anders vorzustellen:

Ein durchschnittliches Kernkraftwerk erzeugt eine Leistung von ungefähr 2,5GW = 2,5 · 109W

D. h. wir bräuchten Kernkraftwerke, um die gleiche Leistung zu erreichen wie die Sonne. Nur zur Information: auf der Erde gibt es gerade mal ca. 450 Kernkraftwerke.

Um die Möglichkeiten der Energieerzeugung durch Kernfusion kennen zu lernen, wollen wir die möglichen Fusionsprozesse etwas genauer betrachten.

Die Kernfusion startet mit der Fusion von zwei Wasserstoffkernen zu einem Deuteriumkern entsprechend folgender Reaktionsgleichung.

Dazu müssen sich die Wasserstoffkerne so nahekommen, dass sie fusionieren können, d. h. die beiden Kerne sollten sich vielleicht berühren. Da sich die positiven Ladungen der Protonen abstoßen, müssen die Kerne eine entsprechend hohe Geschwindigkeit haben, oder anders ausgedrückt, die Bewegungsenergie auf Grund der Temperatur muss genügend hoch sein. Die dazu notwendige Temperatur können wir wieder abschätzen.

Die mittlere kinetische Energie von Teilchen bei der Temperatur T lässt sich aus

berechnen. Dabei ist k die Boltzmann-Konstante und T die Temperatur in Kelvin. Die abstoßende potienzielle Energie zweier Protonen berechnet sich aus

Wobei r der Abstand zwischen den beiden Protonen ist. Durch Gleichsetzen lässt sich die Temperatur abschätzen, bei der sich die Protonen gerade berühren würden.

Einsetzen der Zahlenwerte liefert:

Das ist ungefähr 700-mal so viel Temperatur, wie im Kern der Sonne zur Verfügung steht. Die Protonen haben also auf den ersten Blick nicht genügend Bewegungsenergie, um zu fusionieren. Allerdings müssen wir uns hier daran erinnern, dass wir nur die mittlere kinetische Energie der Teilchen bei 15 Millionen Kelvin berechnet haben. Teilchen in einem Gas besitzen bei einer bestimmten Temperatur eine sich ständig ändernde Geschwindigkeitsverteilung – die Maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung. Zur Demonstration kann man die Simulation <https://phet.colorado.edu/sims/html/gas-properties/latest/gas-properties_de.html> benützen und damit die Bewegung von Teilchen bei verschiedenen Temperaturen und die Bedeutung der mittleren kinetischen Energie zeigen.

Welche Geschwindigkeit müssten die Protonen erreichen, um zu fusionieren?

Wie viele Teilchen der Sonne bei einer Kerntemperatur von 15 Millionen Kelvin eine bestimmte Geschwindigkeit bis 3,8 Millionen Meter pro Sekunde aufweisen kann man anhand der Datei Maxwellverteilung.xlsx im Verzeichnis Materialien zeigen. Eine Geschwindigkeit von 65 Millionen Meter pro Sekunde erreichen nur ganz wenige Teilchen. Bei 15 Millionen Kelvin haben zwar „einige“ Protonen die notwendige Geschwindigkeit, um zu fusionieren, aber es sind bei weitem nicht genügend (vgl. Anzahl der Fusionsreaktionen oben), um die Energieerzeugung aufrecht zu erhalten.

Die Kernfusion in unserer Sonne liefert also zu wenig Energie, um die Energieabgabe aufrecht zu erhalten!

Wie kann man die Energieerzeugung „retten“?

Dazu brauchen wir noch einen weiteren Prozess, den sog. Tunneleffekt, der von Georg Gamov, zur Erklärung des Alphazerfalls von radioaktiven Atomen, eingeführt wurde. Nach der Quantenmechanik sind die Protonen nicht nur Teilchen, sondern auch Wellen, das heißt man kann ihnen eine Wellenlänge zuordnen, die sog. de Broglie-Wellenlänge oder Materiewellenlänge

Diese ist einfach herzuleiten:

Für Photonen gilt:

Für Teilchen gilt: legen wir jetzt einfach fest, dass sich der Teilchenimpuls ebenfalls mit ansetzen lässt, so folgt für die Wellenlänge eines Teilchens, die de Broglie-Wellenlänge:

Für die mittlere Wellenlänge, da v ja nur die mittlere Geschwindigkeit ist, des Protons im Sonnenkern ergibt sich: .

Damit lässt sich das Proton als Welle beschreiben:

Das Quadrat dieser Funktion gibt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens am Ort x zur Zeit t an.

Ein Bild, das Reihe, Diagramm, parallel enthält.

Automatisch generierte BeschreibungBetrachten wir den Zusammenstoß zweier Protonen im Ruhesystem des einen Protons, d. h. das eine Proton ruht, und das andere bewegt sich darauf zu. Das bewegte Proton nimmt (nicht maßstabsgetreu) folgendes Potential unter Berücksichtigung der starken Kraft zwischen den Quarks wahr:

Wir sehen, dass das ankommende Proton immer mehr an potenzieller Energie gewinnt und dabei auf Grund der Energieerhaltung langsamer wird – es rollt so zu sagen den Potenzialwall hoch. Hat das ankommende Proton genügend kinetische Energie, um den höchsten Punkt der Kurve zu erreichen, so übernimmt an diesem Punkt die starke Kraft das Kommando, und die beiden Protonen fusionieren zu einem Deuteriumkern. Hat das ankommende Proton nicht genügend kinetische Energie, um den Potenzialwall zu überwinden, erreicht es eine gewisse Höhe und rollt wieder zurück, es wird abgestoßen. Auf Grund seiner Welleneigenschaft kann es aber mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit den Potenzialwall durchtunneln. Beträgt der Abstand zwischen den Mittelpunkten der Protonen ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge des Protons, so besitzt das ankommende Proton eine kleine Wahrscheinlichkeit sich im Inneren des anderen Protons aufzuhalten, d. h. mit ihm zu fusionieren. Je kleiner der Abstand wird, umso größer wird die Wahrscheinlichkeit für den Aufenthalt des ankommenden Protons im Einzugsbereich der starken Kraft und damit für eine Fusion. Das ankommende Proton muss also den Potenzialwall nicht überwinden, sondern kann den Potentialwall in einer bestimmten Höhe einfach durchtunneln. Als Beispiel:

Erreicht das Proton eine Höhe, so dass die Aufenthaltswahrscheinlichkeit für die Fusion 5% beträgt, so wird in 5 von 100 Protonenpaaren, in denen das ankommende Proton diese Höhe erreicht, also eine bestimmte Energie hat, der Potenzialwall überwunden, die anderen Protonen werden abgestoßen. Mit Hilfe des Tunneleffekts können genügend Protonen fusionieren und die Sonne ihren Energiebedarf im Kern decken.

Mehr über den Tunneleffekt findet man bei folgenden Adressen:

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/50/EffetTunnel.gif> (Veranschaulichung)

<https://schulblog.net/fus/der-atomkern-im-quantenmechanischen-modell/> (Lehrerseite mit mehr)

<https://www.milq.info/mehr/11-tunneleffekt/> (milq mathematische Lösung der Schrödingergleichung)

Ein Bild, das Text, Screenshot, Schrift, Diagramm enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Mit Hilfe des Tunneleffekts kann man die Energieerzeugung im Kern der Sonne „retten“. Im Folgenden betrachten, wir die möglichen Fusionsschritte ohne weitere Berechnungen.

Bei ca. 10.000.000 Kelvin beginnt der sog. Proton-Proton-Zyklus (pp-Zyklus I) in Sternen Energie zu erzeugen. Er beginnt, wie berechnet, mit der Fusion von zwei Protonen zu einem Deuteriumkern.

Der -Kern besteht aus einem Proton und einem Neutron. Die überschüssige positive Ladung wird in Form eines Positrons (Antielektron) abgegeben und zusätzlich aus Gründen der Impulserhaltung ein Elektronneutrino emittiert.

Eigentlich brauchen wir 4 Protonen, die zu zwei Deuteriumkernen fusionieren.

Ein Bild, das Kunst enthält.

Automatisch generierte Beschreibung mit mittlerer ZuverlässigkeitDie beiden Deuteriumkerne fangen dann je ein weiteres Proton ein und werden dadurch zu Helium-3-Kernen. Da sich der Helium-3-Kern nach der Fusion in einem „angeregten“ Zustand befindet, gibt er anschließend die „überschüssige“ Energie als Gammastrahlung ab. Das dazukommende Proton Ein Bild, das Text, Diagramm, Reihe, Screenshot enthält.

Automatisch generierte Beschreibungbesitzt, da es ja die Coulombbarriere überwinden muss, zuerst etwas zuviel Energie und besetzt ein höheres Energieniveau im Kern.

Durch Abgabe von Gammastrahlung kann es in ein niedrigeres Energieniveau übergehen und damit den Kern stabiler machen.

Ein Bild, das Uhr enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung pp-I-Zyklus Wikipedia

Zwei Helium-3-Kerne fusionieren anschließend unter Abgabe von zwei Protonen zu einem stabilen Helium-4-Kern. Bei diesem gesamten Prozess werden, wie wir oben berechneten haben, 25,7MeV an Energie in Form von Gamma-Photonen freigesetzt.

Steigt die Temperatur auf 14 Millionen Kelvin, so setzt allmählich ein weiterer Fusionsprozess ein, der pp-II-Zyklus. Dieser übernimmt mit zunehmender Temperatur einen immer größeren Anteil bei der Energieerzeugung ein. Da die Kerntemperatur unserer Sonne bei 15 Millionen Kelvin liegt, macht hier der pp-II-Zyklus nur ein paar Prozent bei der Energieerzeugung aus. Dabei fusionieren Helium-3-Kerne mit den vorhandenen Helium-4-Kernen zu Beryllium-7-Kernen mit 4 Protonen und 3 Neutronen. Die Beryllium-7-Kerne fangen ein Elektron ein (inverser Betazerfall), wobei sich ein Proton in ein Neutrum umwandelt und so ein Lithium-7-Kern entsteht mit 3 Protonen und 4 Neutronen. Der Lithium-7-Kern zerfällt nach dem Einfang eines Protons in zwei Helium-4-Kerne und ein Positron (Antielektron). Der pp-II-Zyklus liefert Energie bis etwa 23 Millionen Kelvin.

Ein Bild, das Diagramm, Reihe, Screenshot enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung pp-II-Zyklus Wikipedia

Bei noch höheren Temperaturen setzt dann der pp-III-Zyklus ein. Ab 23 Millionen Kelvin haben die Protonen so viel kinetische Energie, dass sie den Potenzialwall der Beryllium-7-Kerne durchtunneln können. Unter Abgabe von Gammastrahlung kann sich dann ein Bor-8-Kern aus 5 Protonen und 3 Neutronen bilden. Dieser zerfällt durch Abgabe eines Positrons und eines Neutrinos, also durch Umwandlung eines Protons in ein Neutrum in einen Beryllium-8-Kern, der nicht stabil ist, und in zwei Helium-4-Kerne zerfällt.

Ein Bild, das Diagramm, Reihe enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung pp-III-Zyklus Wikipedia

Der Anteil der drei pp-Zyklen an der Energieerzeugung in unserer Sonne beträgt für den pp-I-Zyklus etwa 83,3%, für den pp-II-Zyklus 16,68%. Der pp-III-Zyklus trägt nur zu 0,02% zur Energieerzeugung unserer Sonne bei.

In der Schule bzw. Chemie erlebt man, dass elementare Reaktionen praktisch schlagartig ablaufen. Da unsere Sonne aber bereits seit 4,5 Milliarden Jahren scheint, kann das im Kern der Sonne nicht der Fall sein, sondern die Prozesse müssen „langsam“ ablaufen, sonst wäre unsere Sonne beim Einsetzen der Kernreaktionen in einer gigantischen Explosion zerrissen worden. Die Astrophysiker rechnen mit folgenden Zeiträumen:

Im Mittel treffen sich alle 14 Milliarden Jahre zwei Protonen im Kern, um einen Deuteriumkern zu bilden. Diese langsame Reaktion bestimmt praktisch die Lebensdauer der Sonne. Sollte jemandem diese Zahl utopisch vorkommen, so kann man leicht nachrechnen:

Im Kern der Sonne haben wir nach unseren Schätzungen Protonen. Das ergibt Protonenpaare.

Bei der angegebenen mittleren Bildungszeit ergeben sich Deuteronen pro Jahr oder

Deuteronen pro Sekunde. Diese Zahl korreliert recht brauchbar mit den angenommenen Protonen, die wir nach unseren Abschätzungen zur Aufrechterhaltung der Energieerzeugung im Kern brauchen. Die Bildung von Helium-3 aus den Deuteronen erfolgt praktisch schlagartig nach nur 1 Sekunde. Danach dauert es durchschnittlich 1 Million Jahre bis sich zwei Helium-3-Kerne treffen und einen Helium-4-Kern bilden. Da die restlichen Reaktionen im Vergleich zur Bildung der Deuteronen in sehr kurzer Zeit stattfinden, bestimmt die Deuteronenbildung die Lebensdauer der Sonne.

Die Reaktionen im Inneren der Sonne lassen sich aus der Energie der erzeugten Neutrinos erschließen. Die Neutrinos verlassen den Kern der Sonne weitgehend ohne mit dem „Sonnengas“ wechselzuwirken und erreichen bei fast Lichtgeschwindigkeit nach ca. 2s die Sonnenoberfläche und nach weiteren 8 Minuten die Erde, wo sie mit viel Mühe nachgewiesen werden können. Die Neutrinos aus dem pp-I-Zyklus haben eine Energie von 0,26MeV, 90% der Neutrinos aus dem pp-II-Zyklus besitzen eine Energie von 0,86MeV, 10% die Energie 0,38MeV und die pp-III-Neutrinos haben 14,06MeV. Lange Zeit hat man auf der Erde allerdings nur die Hälfte der eigentlich erzeugten Sonnenneutrinos nachgewiesen und war deshalb nicht sicher, ob die Kernfusion tatsächlich so abläuft, wie angenommen. Dieses Rätsel der Sonnenneutrinos wurde erst gelöst, als man nachweisen konnte, dass die Elektronneutrinos, die im Kern der Sonne entstehen, sich auf ihrem Weg zur Erde in zwei andere Neutrinoarten, nämlich Tauneutrinos und Myonneutrinos, umwandeln, die nicht nachgewiesen werden können.

Ein weiterer Fusionsprozess ist der sog. CNO-Zyklus oder Bethe-Weizäcker-Zyklus, der zwar bei 14 Millionen Kelvin einsetzt, aber voraussetzt, dass bereits „größere“ Mengen von Kohlenstoff im Kern gebildet wurden. Deshalb ist er bei massereichen Sternen der wichtigste Energieerzeugungsprozess. In unserer Sonne trägt er nur wenig zur Energieerzeugung bei.

Kohlenstoff ist bei diesem Prozess der Katalysator, der die Fusion von 4 Protonen zu einem Heliumkern auslöst. Der Prozess startet mit dem Einbau eines Protons in einen Kohlenstoffkern, der dadurch zu einem Stickstoff-13-Kern wird. Durch Einfang von 2 weiteren Protonen und einem entsteht ein Stickstoff-15-Kern, der durch Einfang eines weiteren Protons schließlich zu einem Helium-4-Kern und dem Ausgangprodukt Kohlenstoff-12 zerfällt.

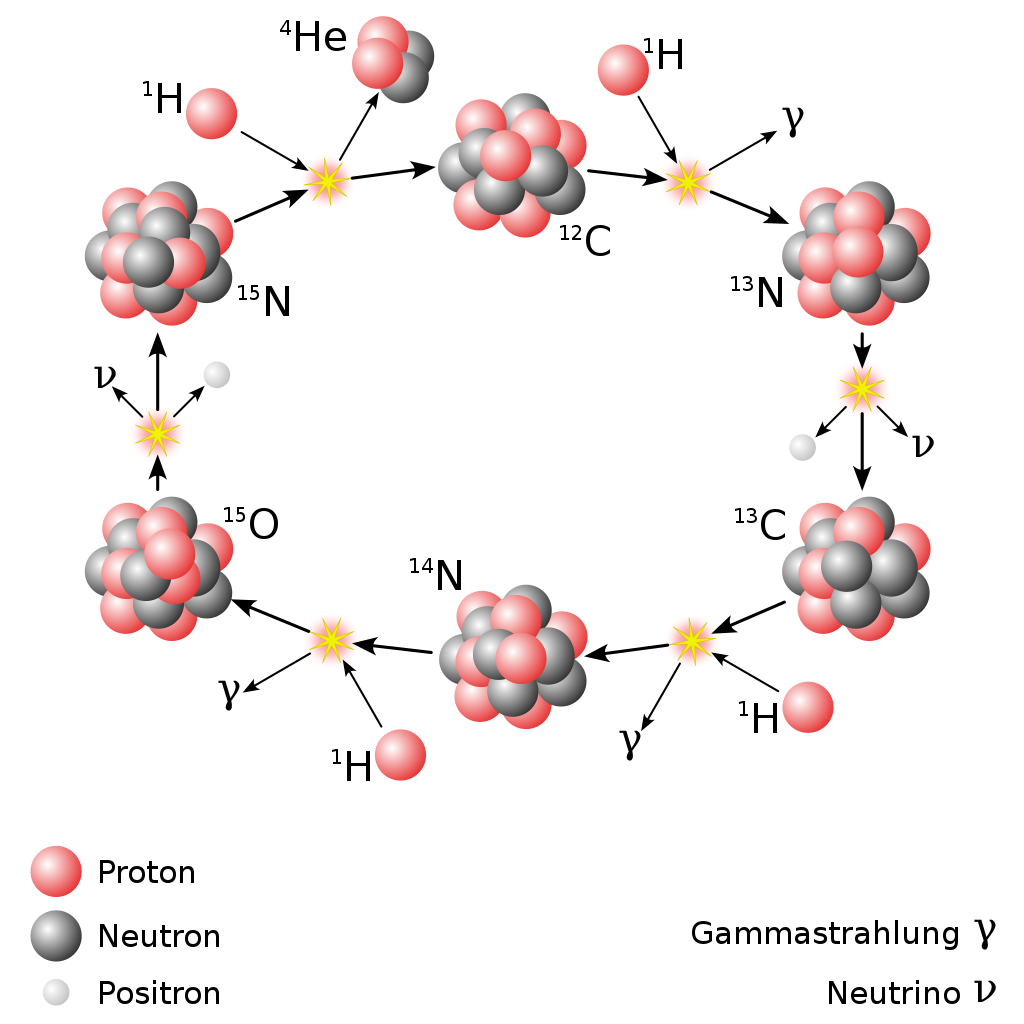
Der CNO-Zyklus liefert in der Gesamtbilanz mit 25MeV pro Heliumkern etwas weniger Energie als der pp-Zyklus, da die Energie der erzeugten Neutrinos geringer ist.

Abbildung CNO-Zyklus Wikipedia