

# Wann kommt die Fusionsenergie ?

von Joachim Grawe

e-mail [Joachim.Grawe@energie-fakten.de](mailto:Joachim.Grawe@energie-fakten.de)

## Hier die Fakten - vereinfachte Kurzfassung

Für die künftige Energieversorgung der Menschheit werden große Hoffnungen in die Kernfusion gesetzt. Diese ahmt kernphysikalische Prozesse in der Sonne und allen anderen aktiven Sternen technisch nach. Dort werden bei der Verschmelzung (Fusion) von Kernen von Wasserstoff-Atomen zu Kernen des Heliums nach der Einsteinschen Formel Energie gleich Masse mal Quadrat der Lichtgeschwindigkeit winzige Mengen an Materie (Elementarteilchen) in riesige Mengen an Energie umgewandelt.

Auf der Erde lässt sich der enorme Druck im Inneren der Sonne von 100 Milliarden (Mio.) bar nicht erreichen. Deshalb wird die – leichtere – Verschmelzung von Kernen zweier Isotope (d. h. Atome mit einer abweichenden Anzahl von Neutronen im Kern) des Wasserstoffs angestrebt, nämlich des Deuteriums (dessen Kern aus 1 Proton wie beim „normalen“ Wasserstoff und 1 Neutron besteht) und des Tritiums (1 Proton + 2 Neutronen). Deuterium ist in den Weltmeeren mit 140 g je t reichlich vorhan-

den. Tritium kann aus dem häufig vorkommenden Metall Lithium durch Einfangen von Neutronen „erbrütet“ werden.

Zur Inangsetzung („Zündung“) des Fusionsprozesses muss das Deuterium-Tritium-Gemisch in ein sog. Plasma überführt werden, bei dem die Atomkerne von den – sie normalerweise umgebenden – Elektronen getrennt sind. Das Plasma muss auf mindestens 100 Mio. °C erhitzt, stark verdichtet und eine Zeitlang gut wärme-isoliert eingeschlossen werden. Dabei muss verhindert werden, dass das Plasma mit den Wänden des dieses einschließenden Gefäßes, eines als „Torus“ bezeichneten zu einem Kreis geschlossenen Hohlrohres, in Berührung kommt. Das wird durch sehr starke Magneten bewirkt.

Erstmals gelang 1951 der Einschluss eines Plasmas. 1997 wurde in der europäischen Versuchsanlage JET in Culham (GB) kurzzeitig eine Wärmeleistung von 16 Megawatt erzeugt, halb so viel, wie für das Experiment aufgewandt werden musste. In

weltweiter Zusammenarbeit soll ab 2007 in Cadarache (F) der ITER entstehen, ein großer Test-Reaktor. Er soll erstmals einen deutlichen Energieüberschuss liefern. Mit ihm sollen zehn Jahre lang Erfahrungen gesammelt werden. Bei positiven Ergebnissen soll anschließend die Planung für den ersten Demonstrations-Reaktor beginnen. Bei dieser „DEMO“ genannte Anlage soll der Energiegewinn das Vierzigfache des Inputs betragen.

Ab etwa 2060 könnte die Kernfusion einen spürbaren Beitrag zur Energieversorgung der Menschheit leisten. Sie stellt eine Weiterentwicklung der Kerntechnik und gewissermaßen die „Reserve-Variante“ zur Kernspaltung dar, für die von der sog. Generation IV ab etwa 2020 entscheidende weitere Fortschritte in Bezug auf die Reaktorsicherheit erwartet werden.

# Wann kommt die Fusionsenergie ?

von Joachim Grawe

e-mail [Joachim.Grawe@energie-fakten.de](mailto:Joachim.Grawe@energie-fakten.de)

## Hier die Fakten - Langfassung

1. Die Spaltung sehr großer Atomkerne der Elemente Uran und Thorium setzt rd. 2,7 Millionen mal so viel Energie frei wie die Verbrennung der entsprechenden Menge Steinkohle. Die hohe Energiedichte und der aus ihr folgende geringe Ressourcenverbrauch sind gewichtige Gründe für die seit nunmehr 50 Jahren praktizierte Energiegewinnung aus Kernenergie. Noch attraktiver ist unter diesem Aspekt die Kernfusion. Die Energiemenge, die bei der Verschmelzung der leichtesten Atomkerne, nämlich derjenigen des Wasserstoffs, entsteht, ist im Vergleich zur Kernspaltung noch knapp fünffach höher. Allerdings kann – wie bei allen Energiequellen – in der Praxis nur ein Teil der Energie genutzt werden.

2. In der Natur finden zu jedem Zeitpunkt fast unendlich viele Kernfusionsreaktionen statt. Auf ihnen beruht die Strahlung, bes. auch die Licht- und Wärme- (Infrarot-)Strahlung, aller „lebenden“ Sterne im Universum, darunter nicht zuletzt unserer Sonne.

In deren Inneren verschmelzen ständig riesige Mengen an Wasserstoffkernen, die jeweils nur aus einem elektrisch positiv geladenen Proton bestehen, bei einer Temperatur von 15 Millionen (Mio.) Grad Celsius und einem Druck von rd. 100 Milliarden bar zu Kernen des Heliums. Helium ist das nach Wasserstoff zweitleichteste Element. Sein Kern wird aus 2 Protonen und 2 elektrisch neutralen Neutronen gebildet. Bei der Verschmelzung (Fusion) wird ein Teil der Kernbindungsenergie frei. Entsprechend der Einsteinschen Formel  $E = m \cdot c^2$  (Energie gleich Masse mal dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit) werden je kg Materie (Elementarteilchen) gut 7 g umgewandelt in gut 200 Mio. Kilowattstunden (kWh) Wärme. Nur rd. ein Milliardstel davon erreicht die Oberfläche der Erde und bildet dort die Grundlage allen Lebens.

3. Um die technische Nachahmung und Nutzung dieses natürlichen kernphysikalischen Prozesses geht es bei der kontrollierten

Kernfusion. Jedoch kann der ungeheure Druck in der Kernzone der Sonne nicht künstlich erzeugt werden. Deswegen ist es auf der Erde nicht möglich, die „eigentlichen“ Wasserstoff-Atomkerne zu verschmelzen. Statt dessen dienen als Ausgangsstoffe zwei Isotope (d. h. Atome mit unterschiedlicher Anzahl von Neutronen) des Wasserstoffs, nämlich: das Deuterium (Kern aus 1 Proton und 1 Neutron) und das Tritium (Kern aus 1 Proton und 2 Neutronen).

Deuterium ist im Meerwasser zu 0,014 % enthalten. Von rd. 2.000 Wasserstoffatomen des Meerwassers haben im Mittel drei einen Deuterium-Kern. Das bedeutet: In 1 t Meerwasser finden sich 140 g Deuterium. Das - radioaktive - Tritium ist sehr viel seltener. Es lässt sich aber aus dem drittleichtesten Element, dem in der Erdkruste überall und häufig vorkommenden Metall Lithium (Kern aus 3 Protonen und 3 Neutronen), „erbrüten“, indem bei dem Fusionsprozess frei gewordene

## LANGFASSUNG

Neutronen eingefangen werden. 1 kg Lithium ergibt 500 g Tritium.

4. Voraussetzung für das Funktionieren einer kontrollierten Kernfusion ist die Überführung des Deuterium-Tritium-Gemischs in ein sehr heißes „Plasma“, bei dem die positiv geladenen Atomkerne von den negativ geladenen (und damit die elektrische Neutralität des gesamten Atoms sichernden) Elektronen getrennt worden sind. Das Plasma muss

- auf mindestens 100 Mio. °C erhitzt,
- auf die für ein Plasma hohe Dichte von mehr als 100 Milliarden (Mrd.) Teilchen pro  $\text{cm}^3$  komprimiert und
- einige Sekunden lang gut wärme-isoliert eingeschlossen werden

Diese 3 Bedingungen werden als „Lawson-Kriterium“ bezeichnet.

Nur wenn sie alle drei erfüllt sind, wird der Widerstand der Atomkerne gegen die Verschmelzung überwunden, der auf der gegenseitigen Abstoßung kraft ihrer jeweils positiven Ladung beruht, und nur dann finden genügend Fusionsreaktionen statt, d. h.: das Plasma „zündet“.

5. Die Temperatur von 100 Mio. Grad Celsius hält kein Werkstoff aus. Das Plasma darf somit nicht in Berührung mit der Wand des Gefäßes kommen, in dem es sich befindet. Dies sicherzustellen ist eine zentrale Herausforderung an die Fusionsforscher. Zu diesem Zweck werden um das Gefäß herum sehr starke Elektro-Magnete installiert. Die Magnete sind zur Kühlung in

einer großen Kühlkammer („Kryostat“) untergebracht. Es entstehen „Magnetfeld-Käfige“. Die Magnetfelder zwingen die Plasma-Teilchen in der Mitte des Gefäßes zusammen.

Das Gefäß ist ein Hohlrohr, das zu einem Ring geschlossen wird, mit einem Vakuum im Inneren: ein sog. Torus. Experimentiert wird mit zwei unterschiedlichen Torus-Typen, dem „Tokamak“ und dem „Stellator“. Ersterer ist international vorherrschend. Deutsche Forscher verfolgen aber auch die Alternative „Stellator“. Auf die Unterschiede kann im Rahmen dieses Beitrags nicht eingegangen werden.

6. 1951 gelang erstmals der Einschluss eines Plasmas. Seither wurden große Fortschritte erzielt. Alle drei Bedingungen des Lawson-Kriteriums konnten jeweils einzeln erfüllt werden. Die europäischen Staaten arbeiten seit längerem in der Fusionsforschung zusammen. 1983 wurde in Culham (England) die gemeinsame Versuchsanlage JET (Joint European Torus) in Betrieb genommen. Dort gelang es 1997, für zwei Sekunden eine Wärmeleistung von 16 Megawatt (MW) zu erzeugen, etwa halb so viel Energie, wie in das Experiment hineingesteckt wurde. Für die Erzielung eines Energieüberschusses ist die Anlage mit einem Plasma-Volumen von  $80 \text{ m}^3$  zu klein.

7. Fusionsforschung erfordert große Einrichtungen und Maschinen. Sie ist teuer. Daher wollen die führenden Länder USA, Russland, Japan und die Europäische Union den nächsten Schritt gemeinsam tun. In Ca-

darache (Frankreich) soll die große Testanlage ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) entstehen. Deutschland hatte sich unter der rot-grünen Bundesregierung aus dem Standort-Wettbewerb „ausgeklinkt“. ITER soll alles in allem (Bau und 20 Jahre Betrieb) 10 Mrd. US-\$ kosten. Die entsprechenden Vertragstexte wurden am 23. 05. 2006 paraphiert (von den Unterhändlern abgezeichnet). Bis zur allseitigen Ratifizierung wird noch einige Zeit vergehen. Der Baubeginn ist für 2007, die Inbetriebnahme für 2017 geplant.

ITER ist mit einem Plasma-Volumen von  $830 \text{ m}^3$  gut zehnmal so groß wie JET. Er soll bei einem Energieaufwand von 50 MW eine Fusionsleistung von 500 MW erbringen und damit die Machbarkeit der Kernfusion mit Energieüberschuss beweisen. Mit ihm sollen zehn Jahre lang Erfahrungen gesammelt werden. Ein Leistungsreaktor, d. h. ein für die Stromerzeugung bestimmtes Kraftwerk, ist ITER noch nicht.

8. Bei positiven Ergebnissen von ITER ist für einen Zeitpunkt noch vor 2030 der Planungsbeginn für den ersten Demonstrationsreaktor mit dem Namen „DEMO“ ins Auge gefasst. Dieser soll einen 30- bis 40-fachen Energieüberschuss abwerfen. Nach Studien wird mit Stromerzeugungskosten von unter 10 EURO-Cents je kWh (mehr als doppelt so viel wie bei einem modernen Kohle-, Gas- oder Kernkraftwerk) gerechnet mit dem Potential einer Halbierung. Wenn alle Erwartungen eintreffen, könnten Fusionsreaktoren ab etwa 2060

## LANGFASSUNG

einen spürbaren Beitrag zur Energieversorgung der Menschheit leisten. Sie stellen damit keine Alternative zur Kernspaltung dar, sondern eine Weiterentwicklung der Kerntechnik und gewissermaßen eine „Reserve-Variante“.

Welche Bedeutung die Kernfusion für den Ressourcenverbrauch hat, zeigt folgendes Zahlenbeispiel: Wollte man den Jahresverbrauch einer deutschen Durchschnittsfamilie an elektrischer Energie von 3.500 kWh ausschließlich durch Strom aus Fusionskraftwerken decken, so müssten hierfür Ressourcen von 75 Milligramm (mg) Deuterium und 225 mg Lithium aufgewandt werden. Diese finden sich in rd. 1 Liter Meerwasser und 225 g Gestein.

9. Wie bei allen Energiequellen erfordert die Nachhaltigkeit der Kernfusion geringe Umwelt-Effekte und die Beherrschung etwaiger Risiken.

Bei der Kernfusion werden (wie schon bei der Kernspaltung) weder Luftschadstoffe noch Treibhausgase emittiert. Tritium könnte im Normalbetrieb aus dem System mit den Barrieren

Vakuum-Gefäß, Kryostat und Reaktorgebäude allenfalls in minimalen Mengen nach aussen dringen. Es nimmt am natürlichen Wasserkreislauf teil. Seine Halbwertszeit ist mit 12,3 Jahren verhältnismäßig kurz. Tritium ist ein niedrigerenergetischer Beta-Strahler. Seine Strahlen können die menschliche Haut nicht durchdringen. Es kann nur mit der Atemluft oder der Nahrung aufgenommen werden und verlässt den Körper ziemlich schnell wieder. In der Nahrungskette reichert es sich nicht an.

10. Ein Fusionsreaktor kann nicht „durchgehen“. In ihm befinden sich jeweils nur geringe Mengen an „Brennstoff“ (richtiger: Fusionsstoff, da in dem Reaktor ebensowenig etwas brennt wie in einer Kernspaltungsanlage). Fällt der „Nachschub“ aus, erlischt der Fusionsprozess. Bei extrem unwahrscheinlichen Störfällen könnten geringe Mengen Tritium freigesetzt werden (siehe dazu oben unter 9.).

11. Für die Entsorgung ist wichtig, dass weder Spaltprodukte entstehen noch ausgediente Brennelemente anfallen.

Der „Abfall“ der Fusionsreaktion ist Helium, ein nicht radioaktiver und wertvoller Rohstoff. Die innere Auskleidung des Plasmagefäßes muss jedoch wegen der Aktivierung durch die ständige Neutronenstrahlung nach fünf bis höchstens zehn Jahren ausgetauscht werden, also während der Lebensdauer der Anlage mehrmals. Etwa 80 % der aktivierten Materialien lassen sich nach rd. 100 Jahren wiederverwerten, müssen somit zeitweilig „zwischengelagert“ werden. Der Rest muss langfristig (einige hundert Jahre) durch unterirdische Endlagerung vom biologischen Kreislauf ferngehalten werden.

12. Die Nachhaltigkeit der Kernfusion kann unter diesen Umständen als gegeben angesehen werden.