

Johann Lingertat

Gesteuerte Kernfusion

Kurzfassung eines Vortrages, der im Arbeitskreis Energie-Rohstoff-Versorgung der Leibniz-Sozietät am 4. März 2005 gehalten wurde.

Vorbemerkungen

Das Zeitalter der Verbrennung fossiler Rohstoffe zum Zweck der Energieerzeugung geht in absehbarer Zeit zu Ende. Zum einen sind die erschließbaren Vorräte begrenzt, zum anderen erfordert der durch die CO₂ – Emission verursachte Klimawandel bereits jetzt, die Energieerzeugung mittels Verbrennung zu reduzieren.

Das materielle und kulturelle Lebensniveau der Bevölkerung jedes Staates ist eng mit der verfügbaren Energie pro Kopf korreliert. Das hat zur Folge, daß hoch industrialisierte Länder das Niveau ihrer Energiekonsumption mit allen Mitteln verteidigen und Übergangsländer ihre Energieproduktion mit allen Mitteln erweitern. Die Energiepolitik jedes Landes ist integraler Bestandteil seiner Machtpolitik und wird zusätzlich von international agierenden ökonomischen Machtstrukturen bestimmt. Tatsächliche oder auch schon vermeintliche Engpässe in der Bereitstellung von Energieträgern haben das Potential, zu massiven sozialen Verwerfungen zu führen. Heute sehen wir schon die Vorboten in Form von völkerrechtswidrigen Aggressionskriegen.

Aus dem Gesagten folgt, daß alle Industriestaaten, denn nur sie sind dazu uneingeschränkt in der Lage, Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf den Gebieten Energieerzeugung, effektiver Energieeinsatz und Reduktion von Schadstoffemissionen mit höchster Priorität durchführen müssten. Dazu wäre es unter anderem notwendig, *alle* Möglichkeiten der Energieerzeugung gleichermaßen zu untersuchen bzw. zu entwickeln. Das heute unter Fachleuten wie auch unter Politikern zu beobachtende Vertreten partikulärer Interessen, zum Beispiel hier die „regenerativen Energien“, dort die „Kernenergie“, ist in höchstem Maße verantwortungslos und schädlich für das Finden von Lös-

ungen, die ein „energetisches“ Überleben der Menschheit gewährleisten sollen.

Kernfusionsforschung

Die Umwandlung von Masse in kinetische Energie bei der Fusion leichter Kerne ist ein natürlicher Prozeß, der den Energiehaushalt von Fixsternen und damit auch der Sonne dominiert. Mit der Entdeckung des Mechanismus der Kernfusion in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts begannen Überlegungen zur Nutzung dieser Reaktion für die Energiegewinnung. Erst in den letzten 20 Jahren ist die Verwirklichung dieser Idee in greifbare Nähe gerückt.

Unter den möglichen Fusionsreaktionen zeichnet sich die Reaktion zwischen Deuterium und Tritium dadurch aus, daß ihr Wirkungsquerschnitt am größten ist und das Maximum des Wirkungsquerschnittes bei der niedrigsten Teilchenenergie erreicht wird. Damit verspricht die Wahl dieser Reaktion die einfachste technische Lösung für ein Fusionskraftwerk.

Bei der D-T Reaktion entsteht ein Neutron mit einer Energie von 14,1 MeV und ein vollionisierter Heliumkern (α -Teilchen) mit 3,5 MeV, so daß die Nettoausbeute 17,6 MeV pro Reaktion beträgt:



Die zur Erzielung eines großen Wirkungsquerschnittes erforderliche Teilchenenergie wird durch Erhitzen eines D-T Gasgemisches auf Temperaturen von 10 – 20 keV (entspricht etwa 100 – 200 Millionen °C) erreicht. Bei derartigen Temperaturen sind alle Atome des Gasgemisches ionisiert. Dieser Zustand des Gases, es besteht dann vorwiegend aus Ionen und Elektronen, wird als vollionisiertes Plasma bezeichnet.

Das Aufheizen des Gasgemisches geschieht in der Regel mittels Stromdurchgang (Ohmsche Heizung), mittels Injektion hochenergetischer Deuterium- oder Tritiumatome (Neutralteilcheninjektion) oder mittels Injektion von Hoch- bzw. Höchsthochfrequenzenergie (Ionen- bzw. Elektronenzyklotronheizung). Es kann auch eine beliebige Kombination der genannten Verfahren zum Einsatz kommen.

Ohne weitere Vorkehrungen würden die hochenergetischen Ionen und Elektronen das Volumen, in dem sie erzeugt werden, schnell verlassen, und es würde nur selten zu Fusionsreaktionen kommen. Auf der Sonne behindert die starke Gravitationskraft ein „Auseinanderfliegen“ des Plasmas. Die Gravitationskraft der Sonne ist um den Faktor 3×10^5 größer als die der Erde.

In Fusionsexperimenten besteht eines der üblichen Verfahren darin, die Gravitationskraft durch eine elektromagnetische Kraft zu ersetzen. Die Ionen

und Elektronen werden durch geeignet geformte starke Magnetfelder zusammen gehalten.

In den vergangenen Jahrzehnten wurden verschiedene Magnetfeldkonfigurationen untersucht, die sich durch ihre topologische Struktur und die Art ihrer Erzeugung unterscheiden. Das beste Verhalten zeigten dabei Experimentieranlagen vom Typ Tokamak und Stellarator. Das erfolgreichste Fusionsexperiment ist zweifellos der Tokamak Joint European Torus (JET) in Culham/Großbritannien [1]. Der Wendelstein 7-AS in Garching gehörte zu den erfolgreichsten Stellaratorexperimenten. Das Folgeexperiment Wendelstein W-7X befindet sich gegenwärtig in Greifswald im Bau [2].

Eine hohe Energieausbeute im Fusionsexperiment, d.h. das Auftreten möglichst vieler Fusionsreaktionen pro Volumeneinheit, setzt das gleichzeitige und stationäre Erreichen bestimmter Werte von drei Plasmaparametern voraus: Temperatur $T = 10 - 20$ keV, Dichte ca. $n = 1-5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ und Energieeinschlußzeit $\tau = 1-2$ s. τ ist im stationären Fall als Quotient von innerer Energie des eingeschlossenen Plasmas und dem Plasma zugeführte Heizleistung definiert, und damit ist es ein Maß für die Qualität des Plasmaeinschlusses. Vereinfacht wird die Qualität eines Fusionsexperimentes mittels des Wertes des sogenannten Tripelproduktes α aus Temperatur, Dichte und Einschlußzeit beschrieben. Beginnend mit den ersten Fusionsexperimenten in den fünfziger Jahren mit $\alpha \approx 10^{14} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}$ ist man heute bei $\alpha > 10^{21} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}$ angelangt. Für den Betrieb eines Fusionsreaktors ist ein Wert von $\alpha \approx 5 \times 10^{21} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}$ erforderlich [3].

Der Fusionsreaktor

In einem zukünftigen Fusionsreaktor wird ein D – T Gemisch in eine Vakuumkammer, die sich ihrerseits in einem geeignet konfigurierten Magnetfeld befindet, eingelassen und durch externe Energiezufuhr aufgeheizt. Die in Fusionsreaktionen entstehenden hochenergetischen Neutronen verlassen nahezu ungeschwächt die Vakuumkammer, unbeeinflusst durch das einschließende Magnetfeld. Ihre Energie wird im sogenannten Blanket, das die Vakuumkammer umgibt, absorbiert und zum größten Teil in Wärme umgewandelt. Diese Wärme wird zum Antrieb konventioneller Dampfturbinen genutzt. Die α -Teilchen können wegen ihrer elektrischen Ladung den Bereich des einschließenden Magnetfelds nicht verlassen und geben ihre Energie durch Stöße an das Plasma ab. Ist die dem Plasma extern zugeführte Heizleistung gleich der im Plasma erzeugten Fusionsleistung, spricht man vom Erreichen des „break

even“. Am JET wurde dieser Zustand 1997 nahezu erreicht. Dabei wurde bei einer Heizleistung von etwa 26 MW eine Fusionsleistung von 16 MW erzeugt.

Kompensiert die von den energiereichen α -Teilchen an das Plasma übertragene Heizleistung gerade die Energieverluste des Plasmas, kann die äußere Energiezufuhr abgeschaltet werden. Das Plasma befindet sich dann im Bereich der „Zündung“.

Von den beiden zum Betrieb eines Fusionsreaktors notwendigen Brennstoffen D und T kommt letzterer in der Natur nur selten vor. Tritium ist ein kurzlebige instabiles Isotop des Wasserstoffs und zerfällt mit einer Halbwertszeit von ca. 12,3 Jahren. Deswegen ist es notwendig, das Tritium im Blanket des Reaktors zu erbrüten. Dazu dient Lithium, dessen natürliche Isotope über die Reaktionen



in einer insgesamt exothermen Reaktion in T und He umgewandelt werden.

Damit sind D und Li die zum Betrieb eines Fusionsreaktors notwendigen primären Brennstoffe. Beide Elemente lassen sich aus Seewasser relativ einfach extrahieren. Lithium kommt auch ausreichend in der Erdkruste vor. Die bekannten Reserven für eine Weltenergieproduktion auf dem Niveau der 90iger Jahre reichen für einen Zeitraum von größer als 10^7 Jahren und können somit als unerschöpflich betrachtet werden. Beide Brennstoffe sind einfach zu handhaben und nicht umweltschädlich. Die notwendigen Mengen sind wegen der hohen Energieausbeute sehr gering. Aus ungefähr 100 kg D und 150 kg Li lassen sich 1 GW elektrischer Leistung ein Jahr lang erzeugen.

Die „Asche“ eines Fusionskraftwerkes, He, ist weder toxisch, noch stellt es in irgendeiner Form eine Belastung der Umwelt dar. CO_2 wird von einem Fusionskraftwerk nicht emittiert.

Das in einem internen Kreislauf erzeugte und wieder verbrauchte T ist radioaktiv und kann bei extremen Störfällen zu einer radioaktiven Verseuchung der Umgebung eines Fusionsreaktors führen. Jedoch ist die vom T ausgehende potentielle Gesundheitsgefährdung um Größenordnungen geringer als die des Brennstoffes und der Zerfallsprodukte eines konventionellen Kernkraftwerkes. Das liegt vor allen Dingen an der kurzen biologischen Halbwertszeit des T von etwa 10 Tagen.

Der Beschuß der inneren Konstruktionsmaterialien eines Fusionsreaktors mit Neutronen führt zu einer unerwünschten Bildung verschiedener radioaktiver Isotope, die bei der Stilllegung eines Fusionskraftwerkes eine „Abkühlphase“ von ca. 100 Jahren erfordern. Auch hier sind die Entsorgungsprobleme

um Größenordnungen geringer als bei einem konventionellen Kernkraftwerk. Außerdem ist es möglich, durch Entwicklung spezieller Konstruktionswerkstoffe die Bildung problematischer radioaktiver Isotope weitgehend zu vermeiden.

Das „Durchgehen“ eines Fusionsreaktors, das heißt Unfälle vom Tschernobyl-Typ, sind aus inhärenten physikalischen Gründen nicht möglich. Der momentane Brennstoffvorrat im Fusionsreaktor ist sehr gering. Er reicht, im Unterschied zu einem konventionellen Kernreaktor, nur für eine Brenndauer von einigen zehntel Sekunden. Externe oder interne Störungen des Betriebsablaufes eines Fusionsreaktors führen in jedem Fall zu einem unmittelbaren Abbruch der Fusionsreaktion. Selbst der in konventionellen Kernkraftwerken problematische Störfall des kompletten Verlusts der Kühlung hätte keine Zerstörung des Fusionsreaktors zur Folge.

Als Nachteil eines künftigen Fusionsreaktors wird vielfach dessen minimale Baugröße von einigen GW elektrischer Leistung angesehen. Die Ursache für diesen hohen Wert der Ausgangsleistung liegt in der Skalierung der Energieeinschlußzeit mit den geometrischen Abmessungen des Plasmas begründet. Die Plasmaverluste sind etwa der Plasmaoberfläche proportional, während die Energieerzeugung dem Plasmavolumen proportional ist, so daß die Energieeinschlußzeit mit zunehmenden geometrischen Abmessungen des Plasmas zunimmt. Tatsächlich sind heutzutage Kraftwerksleistungen im Bereich von GW für die Grundlastversorgung durchaus üblich.

Eine kritische Frage betrifft den Zeithorizont für die Entwicklung eines Fusionskraftwerkes. In der Vergangenheit gab es wiederholt diesbezügliche Prognosen, die sich als grobe Fehleinschätzungen herausstellten. Festzuhalten ist, daß es sich bei den Arbeiten zur gesteuerten Kernfusion bis heute weitgehend um Grundlagenforschung handelt. Grundlagenforschung kann aber per definitionem nur sehr ungenaue Vorhersagen über das zeitliche Eintreffen bestimmter Ergebnisse machen. Zu Beginn der Fusionsforschung spielte sicher eine gewisse Euphorie, beruhend auf der schnellen industriellen Umsetzung der Ergebnisse der Kernspaltungsforschung, eine Rolle. Später mag der ständige Konflikt zwischen notwendigen langfristigen Zielstellungen und dem relativ kurzen Zeithorizont politischer Zuwendungsgeber Forscher zu optimistischen Prognosen verleitet haben.

Gegenwärtig sind zwei wichtige Schritte in Richtung Fusionskraftwerk zeitlich ziemlich zuverlässig eingegrenzt: Der Bau des ITER Tokamaks (International Tokamak Experimental Reactor) [4] und des Stellarators Wendelstein 7-X.

Der ITER wird von der EU, von Rußland, Japan, Südkorea und den USA in Cadarache/Frankreich errichtet. Ein wichtiger Meilenstein für den Fortgang der Arbeiten war die Standortentscheidung vom Juni dieses Jahres. Mit dem Beginn der Bauarbeiten ist 2006 zu rechnen, mit der Inbetriebnahme 2016. Die Laufzeit des Projektes wird mit ca. 21 Jahren geschätzt. Parallel zum Bau und Betrieb des ITER sollen die Entwicklungsarbeiten für einen Demonstrationsreaktor fortgeführt werden, dessen Baubeginn sicher wesentlich von den mit ITER erzielten Ergebnissen abhängen wird. Erst nach erfolgreichem Betrieb des Demonstrationsreaktors in etwa 50 Jahren ist mit dem Bau und der Inbetriebnahme der ersten Fusionskraftwerke zu rechnen.

Das Ziel von ITER ist, die wissenschaftliche und technologische Machbarkeit eines Fusionskraftwerkes zu demonstrieren. Es ist geplant, mit ITER eine Fusionsleistung von etwa 500 MW mit einem Energieverstärkungsfaktor (Verhältnis von erzeugter Fusionsleistung zur Heizleistung) von > 10 unter quasistationären Bedingungen zu generieren. Mehr Details des umfangreichen Forschungsprogramms sind unter [4] zu finden.

Eine zum Tokamak alternative Linie, die Vorteile bei einer erfolgreichen Realisierung eines Kraftwerkskonzeptes verspricht, ist der Stellarator. Der im Bau befindliche W 7-X, der entscheidende Beiträge zur Physik und Technologie eines künftigen Kraftwerkes auf Stellaratorbasis liefern soll, wird ca. 2011 in Betrieb gehen. Er ist für eine Betriebszeit von 20 Jahren ausgelegt. Eine Entscheidung über die Fortführung der Stellaratorarbeiten wird sicher erst nach Vorliegen aller wichtigen Ergebnisse des W 7-X gefällt werden.

Kostenabschätzungen der mit einem Fusionskraftwerk erzeugten Elektroenergie sind wegen des fernen Zeithorizontes im Detail fragwürdig. Jedoch weisen alle bekannten Untersuchungen darauf hin, daß zum heutigen Stand vergleichbare Größenordnungen zu erwarten sind. Der Anteil der Brennstoffkosten an den Gesamtkosten wird sicher vernachlässigbar sein. Dominieren werden die Investitions- und Entsorgungskosten des Kraftwerkes.

Die weltweiten Forschungen zur gesteuerten Kernfusion sind eines der komplexesten und schwierigsten wissenschaftlichen und technischen Unternehmen, das die Menschheit für ausschließlich friedliche Zwecke in Angriff genommen hat. Der Ausgang ist noch ungewiß. Bis zu einem Erfolg dieses Unternehmens sind noch viele Jahre zäher Arbeit notwendig, um viele komplizierte wissenschaftliche und ingenieurtechnische Detailprobleme zu lösen.

Genauere Informationen zu den meisten hier nur angerissenen Problemen sind in der angegebenen Literatur zu finden.

Literatur

[1] www.jet.efda.org

[2] www.ipp.mpg.de

[3] J.Wesson, „Tokamaks“, Second Edition, Oxford Science Series No. 48, Clarendon press, Oxford 1997.

[4] www.iter.org