

Kiel **Policy Brief**

Kernfusion – Die vernachlässigte Alternative

Dennis Wesselbaum

Nr. 30 | Juni 2011



Die aktuelle energiepolitische Debatte hat die längerfristigen Perspektiven einer nachhaltigen Energieversorgung allzu sehr aus dem Blick verloren. Vor allem die Potentiale der Kernfusion werden in der öffentlichen Diskussion kaum wahrgenommen. Dabei würden sich viele Probleme, die mit dem Ausstieg aus der konventionellen Kernenergie, dem Umstieg auf erneuerbare Energieträger und einer hohen industriellen und kulturindustriellen Dynamik verknüpft sind, lösen lassen, wenn es gelingen sollte, die Fusionstechnologie kommerziell nutzbar zu machen. Dies ist jedoch keine kurzfristig realisierbare Option. Allerdings werden die Weichen dafür, wie wir auf längere Sicht unsere Energieprobleme in den Griff bekommen können, heute gestellt.

Als Alternative zur Kernspaltung und den fossilen Brennstoffen werden hier nahezu ausschließlich die erneuerbaren Energien betrachtet. Dabei werden die Probleme der Verteilung und Speicherung, die mit diesen Technologien aufgrund ihrer intermittierenden Leistungsabgabe verbunden sind, nicht hinreichend genug betrachtet.¹ Des Weiteren stellt sich die Frage, ob die Haushalte den von der Dena (Deutsche Energie-Agentur) ermittelten Anstieg der Stromerzeugungskosten von 20 bis 30 Prozent tragen möchten. Bemerkenswert sind hier auch die absoluten Zahlen, die benötigt werden, um *ein* modernes Kraftwerk mit einer Leistung von 1.000 MW durch regenerative Technologien zu substituieren. Nach den Berechnungen von Ongena und Van Oost (2000) benötigt man hierfür 100 km² Photovoltaikanlagen oder 6.660 Windkraftträder mit einer Leistung von 150 kW oder Biogas von 800 Millionen Hühnern oder 30.000 km² Holz. Folgt aus diesen Überlegungen nun eine Rückkehr zu Gas und Kohle als stützende Säulen der Energieproduktion? Dies würde dem klimapolitischen Kurs widersprechen und wäre wohl nur schwer kommunizierbar, war doch Dekarbonisierung das Schlüsselwort der letzten Jahre.

In diesem Papier betrachten wir eine gegenwärtig recht vernachlässigte Technologie – zumindest in der öffentlichen Wahrnehmung – die sicher, umweltschonend und bedarfsgerecht in der mittelfristigen Zukunft Energie produzieren kann, die Kernfusion.

Theoretische Grundlagen der Fusion

Damit zwei Kerne fusionieren können, müssen sie sich so nahe kommen, dass die kurzreichende starke Wechselwirkung wirken kann. Dazu muss jedoch die abstoßende Coulombkraft (elektromagnetische Wechselwirkung) überwunden werden, die mit der Ordnungszahl des Atoms ansteigt. Ist der Abstand zwischen den Kernen kleiner als etwa 10^{-15} m, so wirken die kurzreichenden Kernkräfte und es kommt zur Fusion. Damit dies stattfinden kann,

¹ So schreibt das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit im Energiekonzept 2050: „Der Ausbau der Speicherkapazitäten wird im Laufe der Zeit immer wichtiger, um die steigenden Anteile erneuerbarer Energien in das Netz und die Stromversorgung zu integrieren.“ Die Dena (2011) beschreibt die fehlenden Verteilungskapazitäten in Deutschland und nach Dena Chef Kohler fehlen bis 2020 ungefähr 12.000 Megawatt an Energie. Des Weiteren zeigen Andor et al. (2010) die negativen Wohlfahrtseffekte der Vorrangregelung in der Produktion erneuerbarer Energien.

müsste nach den Gesetzen der klassischen Mechanik ein Kern mindestens die Energie besitzen, die ihn den Coulombwall überwinden lässt. Jedoch spielt auf atomarer resp. subatomarer Ebene der quantenmechanische Tunneleffekt eine entscheidende Rolle. Er ermöglicht es auch Teilchen geringerer Energie, den Coulombwall zu überwinden. Um diesen Effekt zu verstehen, müssen wir uns zunächst erinnern, dass in der Quantenmechanik die Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen zu einer gegebenen Zeit an einem bestimmten Ort zu finden, durch eine Wellenfunktion beschrieben wird. Die Lösung der Schrödingerschen Wellengleichung beschreibt somit, wie sich der Zustand eines physikalischen Systems über die Zeit entwickelt. Beim Tunneleffekt nimmt nun die Wahrscheinlichkeitsdichte exponentiell in der Potentialbarriere ab. So sinkt zwar die Wahrscheinlichkeit, Teilchen in der Barriere zu finden, allerdings ist sie nicht Null. Es kann weiterhin gezeigt werden, dass die Transparenz der Barriere, also die Chance der Durchtunnelung, stark mit der Ordnungszahl und der Masse eines Teilchens sinkt, der Grund, weshalb in der technischen Umsetzung der Kernfusion vorrangig sehr leichte Kerne benutzt werden. Die Fusion von Deuterium und Tritium (DT-Fusion)²



bei der die Energiemenge von 17.6 MeV freigesetzt wird, scheint die vielversprechendste Fusionsreaktion zu sein, um Energie zu erzeugen. Ihr Vorteil liegt in der geringen Ordnungszahl ($Z = 1$), und des damit verbundenen höchsten Wirkungsquerschnittes – also der höchsten Wahrscheinlichkeit des Eintretens der Fusion, auch aufgrund der höheren Tunnelwahrscheinlichkeit.

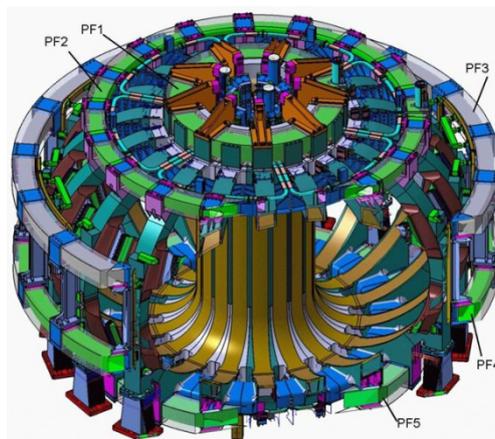
Wie kann man nun dieses theoretische Konzept in die Praxis umsetzen? Die einfachste Möglichkeit, Deuterium auf Tritium zu schießen, die sog. „Beam Fusion“, stellt eine schlechte Alternative da, da die Teilchen im Coulombwall sehr viel Energie verlieren, bevor es zur eigentlichen Fusion kommt. Daher wird in den derzeitigen Forschungsprojekten auf den magnetischen Einschluss von Plasmen gesetzt. Hierbei werden die Kerne auf sehr hohe Energien gebracht, was man am einfachsten in sehr heißen Gasen erreicht. Die Temperatur, die hierfür benötigt wird, liegt in einer Umgebung von 150 Millionen Grad Celsius. Bei diesen Temperaturen ionisiert sich das Gas vollständig und geht in den Plasmazustand über. Die Atomkerne erhalten so aufgrund der hohen thermischen Bewegung hinreichend viel kinetische Energie, um den Coulombwall zu überwinden. Das Plasma verliert jedoch konstant an Energie, so dass erst ab einer Grenztemperatur von 4 keV die Nettobilanz einer DT-Fusion der Energieproduktion positiv ist.

Aufgrund der Energieverluste durch das Entweichen von Ionen muss dafür gesorgt werden, dass diese ausreichend lange im Plasma bleiben um neue Fusionen auszulösen. Um dieses Lawson-Kriterium zu erfüllen, muss das Plasma hinreichend lange zusammengehalten

² Bei der sich die Energie aufgrund des Impulserhaltungssatzes im umgekehrten Verhältnis auf die Massen der Endprodukte verteilt.

werden. Zu diesem Zweck schließt man das nach außen hin neutrale Plasma mithilfe von Magnetfeldern ein. Graphik 1 verdeutlicht einen möglichen Aufbau einer Anordnung von toroidalen Magneten, das Tokamak-Prinzip.³ Hier werden die Feldlinien schraubenförmig um den Torus geführt, damit alle Feldlinien Bereiche des schwachen und starken Magnetfeldes durchlaufen. Dies ist notwendig, da das Magnetfeld auf inneren Feldlinien höher ist als auf äußeren, was zu einem sofortigen Zerfall des Plasmaringes führen würde. Es bilden sich schlussendlich ineinander geschachtelte magnetische Flächen, die das Plasma einschließen. Beim Tokamak-Prinzip wirkt nun das Plasma als Sekundärspule zu der zentralen Transformatorspule. Der Plasmastrom wird von 18 toroidalen und sechs poloidalen Magnetspulen umgeben. Diese Spulen erzeugen die Verdrillung der Magnetfeldlinien, wobei das poloidale Magnetfeld den Plasmaschlauch einschließt und von den Wänden fernhält. Die Gasatome und die Ionen würden durch Stöße mit den Wandatomen Energie verlieren und das Plasma abkühlen und es zusätzlich mit schweren Atomkernen verunreinigen. Der Tokamak wird zunächst gepulst betrieben um den toroidalen Strom zu führen. Es besteht allerdings die Möglichkeit z. B. durch Hochfrequenzwellen den Strom so zu leiten, dass der Tokamak auch stationär betrieben werden kann.

Graphik 1: Magnetischer Einschluss mit Hilfe des Tokamak am ITER



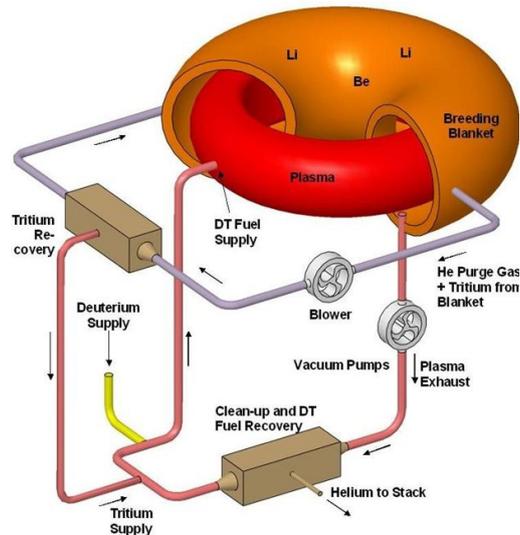
Quelle: ITER Organization.

Kommen wir nun abschließend zu einem möglichen Aufbau eines Fusionskraftwerkes, dargestellt in Graphik 2. In einem Vakuumgefäß, das das sog. Blanket beinhaltet, wird ein stationärer Plasmastrom erzeugt. Diesem wird kontinuierlich Deuterium und Tritium zugeführt, so dass die Fusion nicht erlischt. Die durch die Fusion entstehenden Neutronen werden im Blanket abgebremst, erbrüten dort – durch den Neutroneneinfang von Lithium –

³ Bei einer linearen Anordnung würden Verluste an den Enden der Plasmaröhre auftreten. Vgl. Bosch und Bradshaw (2001).

Tritium, welches dem Plasma dann zugeführt wird.⁴ Die Neutronen erhitzen das Kühlmittel, welches zu einem Wärmetauscher geleitet wird, dort Dampf produziert, der dann die Turbinen antreibt und Strom erzeugt. Dem Plasma wird durch den Divertor nicht verbranntes Tritium, Hitze und das zweite Endprodukt, Helium, entzogen. Das Helium wird gesammelt, während das Tritium dem Plasma wieder zugeführt wird, so dass ein Kreislauf entsteht.

Graphik 2: Darstellung des Brennstoffzyklus am ITER



Quelle: ITER Organization.

Sicherheit und Wirtschaftlichkeit

Die Frage der Sicherheit spielt eine entscheidende Rolle für die Akzeptanz einer Kernkraft-technologie in der Gesellschaft und damit ihrer Zukunft im Energiemix.

Das zentrale Thema ist die inhärente Sicherheit eines Fusionskraftwerkes. Hier zeichnet sich das Fusionskraftwerk durch ein Höchstmaß an Sicherheit aus. Wie bereits erläutert, wird dem Plasma konstant Deuterium und Tritium zugeführt, so dass zu einem gegebenen Zeitpunkt nur eine sehr geringe Menge an Brennstoff im Plasmagefäß enthalten ist (nur ein paar Gramm sind im Plasma enthalten und nur 100 kg Deuterium und 150 kg Tritium werden pro Jahr benötigt). Eine Kettenreaktion ist prinzipiell ausgeschlossen, da je ein Deuterium- und ein Tritiumkern zu einem Neutron und einem Alphateilchen verschmelzen, ein erheblicher Sicherheitsvorsprung gegenüber Fissionskraftwerken. Bedingt durch die Anforderungen an die Erhaltung des Plasmas, führt jede Störung dieses stationären, aber potentiell instabilen, Systems zu einem Erlöschen der Fusionsreaktionen, da das System den Bereich der benö-

⁴ Da die natürlichen Mengen an Tritium nicht ausreichend sind, um ein Fusionskraftwerk zu betreiben, wird aus Lithium durch Neutroneneinfang Tritium erbrütet, gemäß

$${}^6\text{Li} + n \longrightarrow {}^4\text{He} (2.05 \text{ MeV}) + \text{T} (2.73 \text{ MeV}).$$

tigten Parameterwerte verlässt; somit schaltet sich das Kraftwerk selbstständig ab. Selbst wenn die gesamte Kühlung ausfallen sollte, so ist eine Kontamination der Umwelt ausgeschlossen. Dies liegt daran, dass die Schmelztemperatur der Metalle nie erreicht werden kann, da die Energiedichte des Plasmas und auch die Nachwärme der aktivierten Strukturen zu gering ist (Leistungsdichte etwa einer Glühbirne), um die Strukturen signifikant zu schädigen.

Aufbauend auf der Studie von Ongena und Van Oost (2000) können wir festhalten, dass die Brennstoffe nicht die Umwelt verschmutzen und die Ozonschicht angreifen und dass kein Kohlenstoffdioxid erzeugt wird. Weder die zugrundeliegenden Brennstoffe (Deuterium und Lithium) noch die Abfallprodukte (Helium-Isotope) sind radioaktiv. Allerdings ist das im Reaktorgefäß verwandte Tritium radioaktiv (Halbwertszeit: 12,3 Jahre) und es kommt durch die Neutronenbestrahlung zu einer Aktivierung der umgebenden Metallstrukturen.⁵ Die Studie der EFDA (2005) zeigt, dass bei dem schlimmsten anzunehmenden Unfall die maximal freigesetzte radioaktive Dosis 18 mSv nicht übersteigen wird.⁶ Die Fusionsabfälle sind dabei im Gegensatz zum Fissionskraft durch eine deutlich kürzere Halbwertszeit gekennzeichnet. Nach etwa 100 Jahren hat sich die Aktivität der Materialien um das Vierfache reduziert. Die Studie von Raeder et al. (1995) zeigt, dass über den Lebenszyklus eines Fusionskraftwerkes die äquivalente Menge an aktivierten Materialien zu einem Fissionskraftwerk entsteht. Bosch und Bradshaw (2001) zeigen, dass nach den 100 Jahren ca. 40 Prozent der aktivierten Materialien normal entsorgt werden können, während die restlichen 60 Prozent entweder vollständig (oder teilweise) rezykliert oder endgelagert werden können. Jedoch ist die langfristige Radiotoxizität wesentlich geringer, da so gut wie keine langlebigen radioaktiven Spaltprodukte anfallen.

Sollte es dennoch zu einer Freisetzung von Tritium kommen, so könnte es – aufgrund seiner chemischen Äquivalenz zu Wasserstoff – zu einer Aufnahme in den menschlichen Körper kommen. Die biologische Halbwertszeit von Tritium beträgt gleichwohl nur etwa zehn Tage und ist es nur schwach radioaktiv, so dass die gesundheitlichen Schäden nicht mit denen einer Aufnahme von Spaltprodukten von Fissionskraftwerken vergleichbar sind.

Nachdem wir festgestellt haben, dass ein Fusionskraftwerk ein Höchstmaß an Sicherheit bietet und prinzipiell katastrophensicher ist, wollen wir uns nun mit den wirtschaftlichen Eigenschaften der Fusion beschäftigen.

Betrachten wir zunächst die elementaren Brennstoffe. Deuterium lässt sich aus herkömmlichem Wasser durch bereits existierende Technologien gewinnen und ist daher in nahezu unerschöpflicher Menge vorhanden. Tritium lässt sich durch Neutroneneinfang aus Lithium erbrüten. Lithium ist ebenfalls in fast unerschöpflicher Menge erhalten. Nach Ongena

⁵ Es gibt u.a. aber auch die Möglichkeit der Proton-Bor Fusion, die keine radioaktiven Stoffe beinhaltet, allerdings auch weniger Energie freisetzt.

⁶ Die International Commission on Radiological Protection empfiehlt eine Evakuierung ab einer Dosis von 50 mSv.

und Van Oost (2000) reichen die bekannten Reserven 3000 Jahre lang und das im Wasser vorhandene Lithium würde für weitere 60 Millionen Jahre ausreichen. Es gibt also keine Knappheit in der Versorgung mit Brennstoffen und es sind auch keine geopolitischen Konflikte zu erwarten, da die Rohstoffe gleichmäßig verteilt sind. Das Abfallprodukt Helium kann weiterverwertet werden, da es ein sehr nützlicher Input für die Industrie ist.

Ein weiterer relevanter Punkt ist die Wettbewerbsfähigkeit der Fusionskraft, oder die Kosten eines Fusionskraftwerkes. Die EFDA (2005) Studie unterscheidet hier zwischen internen und externen Kosten. Die externen Kosten der Energieerzeugung beziehen sich auf die Menge an benötigten Brennstoffen sowie deren Aktivierung.⁷ Die Studie zeigt, dass die Kosten zwischen 0.06 und 0.08 Eurocent/kWh liegen. Zum Vergleich liegen die externen Kosten der Windkraft bei 0.05 Eurocent/kWh. Der Grund dieser niedrigen externen Kosten liegt in der Sicherheit und den Umwelteigenschaften der Fusion. Auf der anderen Seite fallen interne Kosten an, welche hauptsächlich durch die Konstruktion der Anlage bedingt werden. Hier ermittelt die Studie Kosten von 0.03 bis 0.05 Eurocent/kWh für ein bereits ausgereiftes Kraftwerk. So dass die gesamten Kosten zwischen 0.09 und 0.13 Eurocent/kWh liegen würden.⁸ Die endgültigen Kosten sind heute jedoch nur sehr eingeschränkt abschätzbar, da der technologische Fortschritt – und damit auch das Kostensenkungspotential – hier schwer vorhersehbar ist. Darüber hinaus sind ebenfalls Kostensenkungen in den erneuerbaren Energien zu erwarten, so dass eine Voraussage der Wettbewerbsfähigkeit nur sehr eingeschränkt möglich ist.

Wie könnte nun die Rolle aussehen, die die Fusionskraft in einem zukünftigen Energiemix spielen soll? Aufbauend auf der Studie von Lako et al. (1999), bleibt der Schluss, dass die Fusionskraft als Erzeuger der Grundlast genutzt werden kann. Regenerative Technologien sind hierzu aufgrund ihrer intermittierenden Leistungsabgabe nicht geeignet. So kann die Fusion als komplementär zu den regenerativen Technologien angesehen werden. Des Weiteren könnten Fusionskraftwerke in stark urbanisierten Gebieten mit einer gut ausgebauten Infrastruktur benutzt werden, während in eher ländlichen Gebieten regenerative Technologien eine wichtigere Rolle spielen könnten. Die Studien von Lako et al. (1998) und Smith und Ward (2005) zeigen weiterhin, dass die Fusion dann eine entscheidende Rolle im Energiemix der Zukunft spielen wird, sofern es eine Restriktion der Emission von Kohlenstoffdioxid gibt.⁹

Der Weg zu einem Fusionskraftwerk

Kommen wir abschließend zu dem derzeitigen Stand und der Roadmap der Forschung hin zu einer wirtschaftlichen Nutzung der Kernfusion. Das in diesem Papier zugrunde gelegte

⁷ Genauer sind nach dem ExternE Projekt der Europäischen Kommission die externen Kosten alle die Kosten, die einen Einfluss auf die ökonomische Aktivität – anderer – haben.

⁸ Nach Lako et al. (1999) liegen die Kosten des zehnten Kraftwerkes zwischen 0.06 und 0.1 Euro/kWh.

⁹ Die Effizienzschwelle liegt momentan bei 30 Euro/Tonne Kohlenstoff.

Anwendungskonzept der Fusion bezieht sich auf das ITER (*International Tokamak Experimental Reactor*) Projekt.¹⁰ Konkretes Ziel dieses multinationalen Projektes ist es, ein Fusionsprodukt von zehn über einen Zeitraum von mehr als 400 Sekunden zu erreichen.¹¹ Dies bedeutet, dass die erzeugte Energie die zunächst aufgewendete Energie um einen Faktor von zehn übersteigt. Des Weiteren soll der stationäre Betrieb ohne zu großen Energieaufwand gezeigt werden. Darüber hinaus werden Versuche unternommen, einen höheren Plasmadruck zu erreichen, da die Energieerzeugung im Quadrat des Druckes steigt. Im Allgemeinen soll das ITER die Potentiale der Zusammenarbeit von Physik und Ingenieurstechnik auf dem Niveau kommerzieller Fusionskraftwerke beweisen. Der Bau des ITER begann im Jahr 2009 in dem nahe vor Marseille gelegenen Cadarache. Der Beginn des Zusammenbaus des Tokamak wird für das Jahr 2015 erwartet, so dass man momentan damit rechnet, im November 2019 das erste Plasma zu erzeugen. Jedoch wird zum Beginn des Betriebes zunächst reiner Wasserstoff verwendet und erst ab 2026 Deuterium und Tritium. Die Operationsphase von ITER wird insgesamt geschätzte 20 Jahre dauern. Die gesamten Kosten des Projektes belaufen sich derzeit auf etwa zehn bis fünfzehn Milliarden Euro.¹² Nach ITER (2006) beläuft sich der Anteil von EURATOM, der europäischen Atomgemeinschaft, während der Konstruktionsphase des ITER auf ungefähr 45 Prozent der gesamten Ausgaben, die sich wiederum auf etwa sieben Milliarden Euro belaufen. Die verbleibenden sechs ITER-Parteien teilen sich die restlichen Kosten, so dass jede dieser Nationen etwa 9 Prozent der Kosten trägt. In den folgenden drei Phasen trägt EURATOM 34 Prozent der anfallenden Kosten, die sich zusammen auf etwa eine Milliarde Euro belaufen. Im Rahmen des 7. EU-Forschungsrahmenprogramms erhält EURATOM für den Zeitraum von 2007-2011 etwa zwei Milliarden Euro. Allerdings gibt es bei EURATOM eine Finanzierungslücke für die Jahre 2012 und 2013 von etwa 1,4 Milliarden Euro, so dass eine Aufstockung des Budgets nötig ist.¹³ Diese Aufstockung soll ebenfalls aus dem 7. EU-Forschungsrahmenprogramm stammen. Eine Verzögerung der Zahlungen würde zu einer erheblichen Verschiebung des Zeitplanes führen und das ITER Projekt um etwa drei Jahre nach hinten verschieben.

¹⁰ Eine weitere Möglichkeit des Plasmaeinschlusses stellt der Stellarator dar, bei dem die Verdrillung der Feldlinien allein durch dreidimensional versetzte Spulen erzeugt wird. Die nächste Generation des Stellarators befindet sich zurzeit am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik im Bau und soll die Ebenbürtigkeit zum Tokamak aufzeigen. Es gibt des Weiteren den Weg der Trägheitsfusion. Hierbei wird z.B. ein DT Gemisch durch einen Laser innerhalb kürzester Zeit zur Zündung gebracht; die Trägheit des Plasmas ist ausreichend, um das Lawson-Kriterium zu erfüllen. In den USA (NIF) und in Frankreich (Laser Megajoule) wird in der näheren Zukunft dieses Prinzip weiter erforscht und Fragen zum Driver (dem Zünder des Plasmas) und zu dem repetierenden Einschusses von DT Kapseln in das Reaktorgefäß beantwortet.

¹¹ Die ITER-Nationen sind: China, EURATOM, Indien, Japan, Südkorea, Russland und die USA. Zu EURATOM zählen Belgien, Deutschland, Frankreich, Italien, Luxemburg und Deutschland.

¹² Der Kostenanstieg von sechs auf knapp 15 Milliarden lässt sich durch größere Designänderungen und der Koordinierung der Länder (China und Indien sind erst später zum ITER Projekt gestoßen) erklären.

¹³ Vgl. Europäische Kommission (2010).

Der zweite Grundstein für ein zukünftiges Fusionskraftwerk ist das IFMIF (*International Fusion Material Irradiation Facility*) Projekt. Wie bereits diskutiert wurde, kommt es durch die hohen Temperaturen und die Neutronenbelastung zu einer enorm hohen Belastung der strukturellen Materialien im Fusionsreaktor. Dies bedeutet, dass die dem Plasma zugewandten Materialien und der Divertor aus besonderen Materialien bestehen müssen. Die Aufgabe des IFMIF ist es, Materialien zu entwickeln, die strahlungsresistent sind und im Verlauf nur schwach aktiviert werden. Zu diesem Zweck entwickelt das IFMIF eine bis dato nicht existierende Quelle für hochenergetische Neutronen, um die Belastung der Materialien eines zukünftigen Fusionsreaktors zu simulieren. Die geschätzten Kosten dieses Projektes belaufen sich auf 800 Millionen Euro. Der Bau der Anlage begann im Jahr 2009, wobei die erste Operationsphase wahrscheinlich im Jahr 2016 beginnen wird. Das Ende des Projektes wird für das Jahr 2022 anvisiert.

Sowohl ITER als auch IFMIF sind wichtige Entwicklungsstufen auf dem Weg zu einem Fusionskraftwerk. Der nächste Schritt ist DEMO (*Demonstration Power Plant*), das im Gegensatz zum ITER stationär Energie erzeugen soll, die auf dem Niveau eines modernen Kraftwerkes liegt. Die Erkenntnisse der jetzigen und zukünftigen Forschung fließen in die Planungsphase von DEMO ein, die bis Anfang der 2020'er Jahre abgeschlossen sein soll. Der Baubeginn ist für die Mitte der 2020'er Jahre geplant, so dass damit gerechnet wird, in den 2030'er Jahren mit der operativen Phase zu starten. Konishi et al. (2002) zeigen, dass – der Erfolg von ITER und den parallel laufenden Programmen vorausgesetzt – DEMO einen stationären Output von 2,3 GW an Fusionsenergie leisten könnte, mit einem Fusionsprodukt größer als 30.

Der übernächste und letzte Schritt nach dem Erfolg von DEMO, das PROTO-Projekt. Dieses Projekt wäre dann das erste Fusionskraftwerk, das sich einer ausgereiften Technologie bedient und den Grundstein für die erste Generation kommerzieller Fusionskraftwerke legen würde. Es ist allerdings nicht vor 2050 mit einer Umsetzung zu rechnen.

Ausblick und Empfehlungen

Wir haben gezeigt, dass die Nutzung der Fusion zur Energiegewinnung fundamentale Vorteile gegenüber anderen Technologien – insbesondere der Fission – bietet. Die inhärente Katastrophensicherheit, die Unerschöpflichkeit der Brennstoffe und der schonende Umgang mit der Umwelt zeichnen diese Technologie aus. Zwar zeigt die EFDA (2005) Studie, dass die Fusion kompetitive Energieerzeugungskosten zulässt, allerdings ist eine exakte Schätzung der Kosten zum jetzigen Zeitpunkt aufgrund der Unvorhersehbarkeit der Geschwindigkeit des technologischen Fortschrittes nur sehr eingeschränkt möglich. Darüber hinaus muss ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass es sich hier nicht um eine kurzfristig verfügbare Technologie handelt, sondern voraussichtlich erst in 30 bis 40 Jahren eine Alternative darstellen wird. Die Zukunft dieser Technologie liegt nichtsdestoweniger in der Bereitstellung der Grundlast, so dass sie als komplementäre Technologie zu den regenerativen Technologien angesehen werden kann.

Die Arbeit von Bednyagin und Gnansounou (2011) zeigt auf, dass eine höhere Forschungsintensität durch mehr finanzielle Mittel und einem beschleunigten Bau von einem oder zwei DEMO Reaktoren einen substantiell höheren ökonomischen Ertrag generieren würde verglichen mit den damit verbundenen höheren Forschungskosten. Darüber hinaus verweisen die Autoren auf weitere positive externe Effekte der Forschung, wie z. B. technologische Spillover Effekte für andere Industriezweige. Die Entwicklungskosten der Kernfusion werden nach Grunwald et al. (2002) innerhalb der EU momentan auf etwa 20 bis 30 Milliarden Euro bis 2050 geschätzt. Im Vergleich steigen die Kosten des Energiekonzeptes 2050 des BMU im Jahre 2017 auf drei Milliarden Euro jährlich. Verglichen mit der Größe des Energiemarktes von etwa 4,5 Billionen U.S.-Dollar p.a. und den hohen Opportunitätskosten, scheinen die Entwicklungskosten der Fusion als angemessener Preis für eine vielversprechende Technologie. Die Finanzierungslücke in den Jahren 2012/2013 sollte schnellstmöglich geschlossen werden, um eine Verzögerung des Projektes zu verhindern.

Klimapolitische Ziele verbunden mit einer sicheren Produktion und Verteilung von Energie erfordern in der Zukunft eine Technologie, die sowohl sicher und umweltschonend als auch effizient ist. Die Kernfusion stellt hier eine überaus interessante Möglichkeit dar, die es Wert ist, weiter erforscht zu werden. Die bemerkenswerten Forschungsergebnisse der letzten Jahre und das Fehlen ebenbürtiger Alternativen lassen den Schluss zu, dass unsere Gesellschaft es sich nicht erlauben kann, nicht in diese Technologie zu investieren.

Referenzen

- Andor, M., K. Flinkerbusch, M. Janssen, B. Liebau und M. Wobben (2010). Negative Strompreise und der Vorrang Erneuerbarer Energien. *Zeitschrift für Energiewirtschaft* 34(2): 91–99.
- Bednyagin, D., und E. Gnansounou (2011). Real options valuation of fusion energy R&D programme. *Energy Policy* 39: 116–130.
- Bosch, H.-St., und A. Bradshaw (2001). Kernfusion als Energiequelle der Zukunft. *Physikalische Blätter* 57(11): 55–60.
- Dena (Deutsche Energie-Agentur) (2011). Netzstudie II – Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung bis 2020.
- EFDA (European Fusion Development Agreement) (2005). A Conceptual Study of Commercial Fusion Power Plants. EFDA.RP-RE-5.0.
- Europäische Kommission (2010). ITER status and possible way forward. European Commission Communication, COM(2010) 226 final.
- Grunwald, A., R. Grünwald, D. Oertel, H. Paschen (2002). *Kernfusion*. TAB Sachstandsbericht 75. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin.
- ITER (International Tokamak Experimental Reactor) (2006). Final Report of Negotiations on the Joint Implementation of the ITER Project – Attachments. Tokyo.
- Konishi, S., S. Nishio und K. Tobita (2002). DEMO plant design beyond ITER. *Fusion Engineering and Design* 63/64: 11–17.
- Lako, P., J.R. Ybema, A. und J. Seebregts (1998). The Long Term Potential of Fusion Power in Western Europe. ECN Policy Studies, ECN-C--98-071.
- Lako, P., et al. 1999. Long-Term Scenarios and the Role of Fusion Power. Laborbericht ECN-C-98-095.
- Ongena, J. und G. van Oost (2000). Energy for Future Centuries Will Fusion Be An Inexhaustible, Safe And Clean Energy Source? *Transactions of Fusion Technology* 37(2): 3–15.
- Raeder, J., et al. (1995). Safety and Environmental Assessment of Fusion Power (SEAFP). European Commission, Report EURFUBRU XIII-217/95.
- Smith, C.L., und D. Ward (2005). Fusion. *Energy Policy* 36(12): 4331–4334.

Imprint

Publisher: Kiel Institute for the World Economy
Hindenburgufer 66
D – 24105 Kiel
Phone +49 (431) 8814–1
Fax +49 (431) 8814–500

Editorial team: Helga Huss
Prof. Dr. Henning Klodt
(responsible for content, pursuant to § 6 MDStV)
Dieter Stribny

The Kiel Institute for the World Economy is a foundation under public law of the State of Schleswig-Holstein, having legal capacity.

Sales tax identification number DE 811268087.

President: Prof. Dennis Snower, Ph.D.

Vice President: Prof. Dr. Rolf J. Langhammer

Supervisory authority: Schleswig-Holstein Ministry of Science,
Economic Affairs and Transport

© 2011 The Kiel Institute for the World Economy. All rights reserved.