

Stand der Fusionstechnik

Günther Hasinger

1. Das Energie-Dilemma
2. Möglicher Beitrag verschiedener Energien zum zukünftigen Strombedarf.....
3. Fusionsreaktionen.....
4. Magnetischer Einschluss.....
5. Der Weg zu einem Fusionskraftwerk
6. Quellen

1. Das Energie-Dilemma

Der mittlere Pro-Kopf-Verbrauch der Welt liegt derzeit bei etwa 2.200 Watt (W) Primärenergie pro Person. Das ist zu vergleichen mit der Leistung von etwa 200 W, die ein Mensch für das reine Überleben benötigt (denn jeder strahlt bereits etwa 100 W als Körperwärme ab). Dabei gibt es einen deutlichen Zusammenhang zwischen Reichtum und Energieverbrauch. Die große Mehrheit der Weltbevölkerung in den Entwicklungsländern muss mit einem Energieverbrauch von weit weniger als der Hälfte des heutigen Mittelwertes auskommen, während die reichen, entwickelten Länder etwa zwei bis drei Mal so viel verbrauchen, die USA und Kanada sogar etwa fünf Mal so viel wie der Durchschnitt. Bereits diese Relationen zeigen, dass zukünftige Einsparpotentiale durch Effizienzsteigerung und geringeren Energieverbrauch zwar sehr wichtig sind, jedoch das globale Energieproblem nicht lösen können: Würde man die gesamte entwickelte Welt mit etwa 500 Millionen Menschen komplett *abschalten*, würde der Anstieg des Energieverbrauches in den bevölkerungsreichen Entwicklungsländern (mehr als sechs Milliarden Menschen) dieses Einsparpotential schnell wieder kompensieren.

Neue Technologien zur Bereitstellung und zur Einsparung von Energie müssen deshalb in den Industrieländern entwickelt werden, um der gesamten Welt in Zukunft eine nachhaltige Energieversorgung zu ermöglichen. Es wird sich jedoch selbst bei größten Anstrengungen nicht vermeiden lassen, dass der zukünftige Pro-Kopf-Verbrauch ansteigt. Gelingen muss es jedoch, den Verbrauch langfristig auf 3 kW pro Person zu begrenzen; dafür müssen erhebliche Effizienzsteigerungen und Einsparpotentiale genutzt werden. Ein wichtiger Zusammenhang besteht auch zwischen dem mittleren Energieverbrauch und der menschlichen Lebenserwartung: In Ländern mit weniger als 3 kW/Kopf ist die mittlere Lebenserwartung geringer als siebzig Jahre, in Ländern mit höherem Energieverbrauch entsprechend länger. Auch deshalb scheint ein Wert von 3 kW/Kopf für eine allen Interessen nachkommende Entwicklung notwendig.

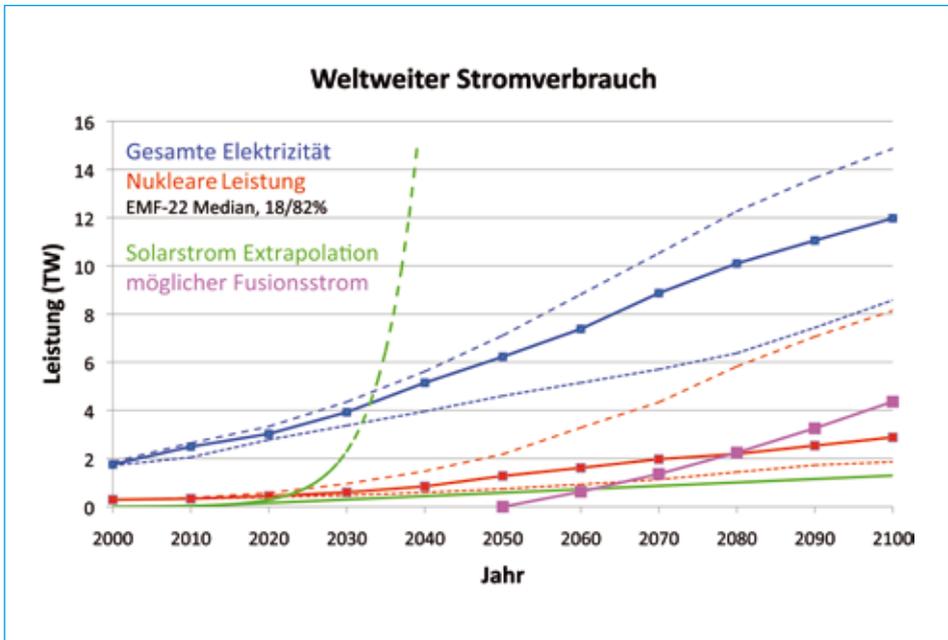


Abb. 1: Vorhergesagter Anstieg des globalen Strombedarfes bis zum Jahr 2100 und mögliche Beiträge verschiedener Energieformen (siehe Text). Die durchgezogenen Linien stellen Median-Werte über etwa hundert verschiedene Energieszenarien der EMF-22-Datenbank dar, die gestrichelten Linien entsprechen jeweils 18 % bzw. 82 % der Modelle. Für den möglichen solaren Beitrag (grüne Kurven) ist ein Modell mit exponentiellem Wachstum und ein Modell mit saturiertem Wachstum dargestellt. Für die Fusion wurde ab 2050 ein jährliches Wachstum von 1,2 % des globalen Elektrizitätsverbrauches angenommen.

Die besondere Dramatik der zukünftigen Energieversorgung ergibt sich aus dem weiteren Wachstum der Weltbevölkerung. Im 20. Jahrhundert ist die Menschheit um den Faktor drei gewachsen und liegt jetzt bei etwa 6,8 Milliarden. Die Vereinten Nationen [1] geben regelmäßig Vorhersagen über die Entwicklung der Weltbevölkerung heraus. Daraus erkennt man, dass in Europa das Bevölkerungswachstum bereits stagniert und in Nord- und Süd-Amerika deutlich gebremst ist, während die Bevölkerung in den Entwicklungsländern weiter stark ansteigt, vor allem in Asien und noch schneller in Afrika. Im 21. Jahrhundert wird sich das Bevölkerungswachstum im Vergleich zum vorigen Jahrhundert jedenfalls deutlich abschwächen. Wo sich die Weltbevölkerung letztendlich einpendelt, hängt vor allem von der Entwicklungsgeschwindigkeit in den Ländern mit dem größten Bevölkerungswachstum ab. Die Erwartung für die Weltbevölkerung im Jahr 2050 liegt bei etwa neun Milliarden Menschen mit einer Schwankungsbreite von etwa 1,5 Milliarden. Die Extrapolation in das Jahr 2100 ist natürlich sehr unsicher. Optimistische Schätzungen gehen davon aus, dass der Scheitelpunkt der Kurve dann überschritten sein wird und sich die Bevölkerung wieder reduziert, die

pessimistischen Schätzungen sagen sogar eine Steigerung auf etwa 14 Milliarden vorher. Für die Abschätzung des Energiebedarfes der Zukunft wird im Folgenden eine Weltbevölkerung von 10 Milliarden im Jahr 2100 angenommen.

Für eine nachhaltige Energieversorgung im Jahr 2100 müssen also zehn Milliarden Menschen mit 3 kW pro Kopf versorgt werden, das ist ein Primärenergiebedarf von 30 Terawatt ($1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$). Im Vergleich zum heutigen Energieverbrauch ist das eine Verdoppelung. Die meisten Energieszenarien für die Zukunft gehen jedoch von einem wesentlich stärkeren Wachstum bei der Elektrizität aus. Der globale Stromverbrauch liegt heute bei etwa 2,4 TW, also 16 % des Primärenergieverbrauches. Betrachtet man eine ganze Schar von etwa hundert zukünftigen Energieszenarien, die von fünfzehn verschiedenen internationalen Wissenschaftlergruppen mit stark unterschiedlichen Annahmen erstellt wurden und in dem Datensatz *Energy Modelling Forum 22* (EMF-22) veröffentlicht wurden [2], so stellt man fest, dass der zukünftige globale Stromverbrauch unabhängig von den detaillierten Annahmen im Rahmen relativ geringer Schwankungsbreiten in allen Modellen etwa gleich vorhergesagt wird (Abbildung 1). Der Bedarf an Elektrizität wächst demnach in diesem Jahrhundert um etwa einen Faktor sechs auf einen Wert von etwa 12 TW und damit 40 % des Primärenergiebedarfes an (siehe auch [3]).

2. Möglicher Beitrag verschiedener Energien zum zukünftigen Strombedarf

Regenerative Energien

Die Stromerzeugung der regenerativen Energien, insbesondere Wind- und Solarenergie, zeigt in den letzten Jahren beeindruckende globale Wachstumsraten. Sie werden in Zukunft sicher zu den wichtigsten Elektrizitätsquellen gehören. Allerdings kann der Beitrag der regenerativen Energien zur globalen Stromversorgung – aus verschiedenen Gründen – sehr wahrscheinlich nicht über gewisse Grenzen hinaus wachsen.

Abbildung 2 zeigt das eindrucksvolle Wachstum der regenerativen Energien aus Wind und Sonne über die letzten Jahre sowie die Projektionen der Energiewirtschaft für die nähere Zukunft. Wenn man zum Beispiel die Werte für den jährlichen Zuwachs bei der Photovoltaik exponentiell in die Zukunft extrapoliert, erhält man die dramatische Wachstumskurve in Abbildung 1. Danach ließe sich bereits im Jahr 2032 der weltweite Strombedarf alleine mit Sonnenenergie decken. Realistische Wachstumskurven verlaufen allerdings nur stückweise exponentiell und tatsächlich sieht man an beiden Datensätzen bereits eine Sättigung des exponentiellen Wachstums deutlich unterhalb des zur Deckung der gesamten Elektrizitätsnachfrage nötigen Wertes von 0,11 TW/a. Die untere grüne Kurve in Abbildung 1 nimmt eine Sättigung des Zuwachses an Solarenergie im Jahr 2020 an, wie sie sich in Abbildung 2 andeutet, und danach ein lineares

Wachstum. Damit könnten etwa zehn Prozent des zukünftigen globalen Elektrizitätsverbrauchs durch Sonnenenergie gedeckt werden. Bei Windstrom kommt man auf ähnliche Ergebnisse.

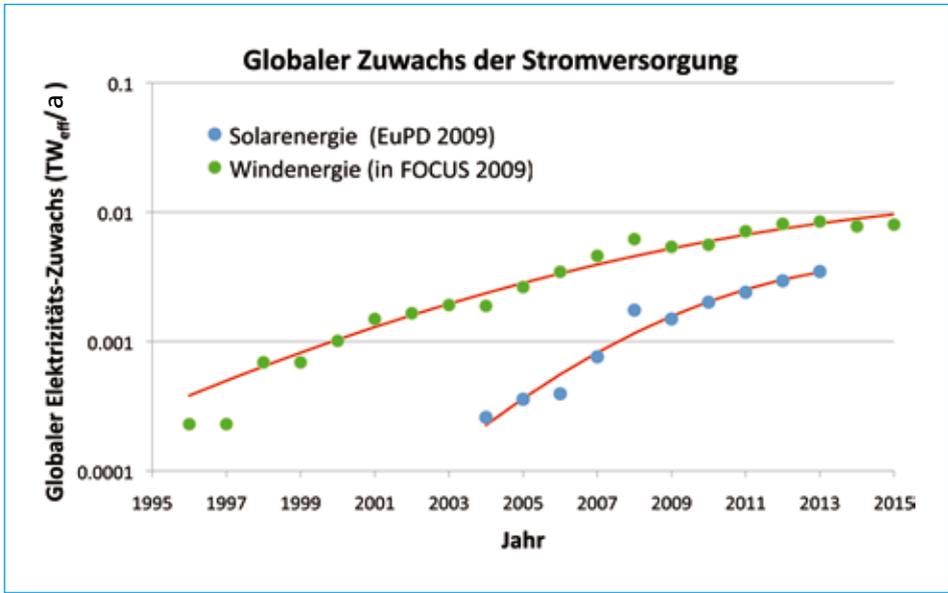


Abb. 2: Jährliches Wachstum der Stromerzeugung aus Windkraft und Solarenergie. Für den effektiven Beitrag von Wind- und Sonnenenergie wurden jeweils optimistische Werte von 2.000 bzw. 2.500 Volllaststunden pro Jahr angenommen. Beide Kurven zeigen anfänglich ein exponentielles Wachstum, das aber bereits innerhalb einer Dekade deutlich abgebremst wird. Um den globalen Strombedarf bis zum Jahr 2100 zu decken, würde man ein jährliches Wachstum von etwas mehr als 0,1 TW/Jahr benötigen. Die Extrapolation der hier dargestellten Modelle kommt auf etwa zehn bis zwanzig Prozent dieses Wertes.

Neben den Grenzen des Wachstums in der Produktion gibt es allerdings noch weitere wichtige Faktoren, die den Beitrag der regenerativen Energien zum Energiemix der Zukunft limitieren. Der erste Faktor hängt mit der niedrigen Energiedichte der Sonnen- bzw. Windenergie und dem damit verbundenen großen Flächenverbrauch zusammen. Betrachten wir zum Beispiel die weltweit größten solarthermischen Anlagen, die Andasol-Kraftwerke in der spanischen Provinz Granada: In der Endausbaustufe sollen drei einzelne Komplexe von jeweils etwa zwei Quadratkilometern Fläche insgesamt eine Spitzenleistung von 150 MW erzeugen. Jeder einzelne Komplex erzeugt damit eine maximale Leistung von 50 MW und unter optimistischer Annahme der Sonnenscheindauer eine mittlere Leistung von 14 MW. Wollte man den gesamten Strombedarf am Ende des Jahrhunderts mit derartigen solarthermischen Kraftwerken decken, bräuchte man dazu insgesamt 850.000 ähnliche Anlagen in den sonnenreichsten Regionen der Erde. Da es bis zum Jahr 2100 noch etwa 33.000 Tage gibt, müsste man an

jedem Tag im Mittel 25 solcher Komplexe ans Netz bringen – jede Stunde einen. Das scheint selbst bei optimistischer Betrachtung unmöglich. Selbst die vorher avisierten zehn Prozent dieses Wertes stellen eine gewaltige Herausforderung dar. Eine ähnliche Betrachtung kann man für Windturbinen anstellen: Es gibt bereits Pläne, riesige Windturbinen mit 10 MW Spitzenleistung zu bauen, etwa das Doppelte der größten heute betriebenen Turbinen. Nimmt man optimistisch 2.000 Volllaststunden pro Jahr an, würde man bis zum Jahr 2100 mehr als fünf Millionen solcher Windkraftanlagen benötigen, also im Mittel eine Windmühle alle zehn Minuten.

Eine zusätzliche Begrenzung der regenerativen Energien ergibt sich durch die zeitlichen Schwankungen der natürlichen Energieflüsse wie Sonne, Wind und Wasser. Größere und intelligente Netze können zwar einen erheblichen Teil dieser Fluktuationen ausgleichen, aber nicht komplett verhindern. Die Möglichkeit, Elektrizität mit den für einen sicheren Netzbetrieb notwendigen riesigen Kapazitäten zu speichern, ist heute noch Zukunftsmusik und benötigt große Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen in den nächsten Jahrzehnten. Alles in allem ist durch die hier beschriebenen Faktoren der Beitrag regenerativer Energien in diesem Jahrhundert realistisch auf zwanzig bis dreißig Prozent beschränkt.

Fossile Energien

Eine weitere Möglichkeit zur CO₂-armen Stromerzeugung besteht in der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der anschließenden chemischen Abscheidung und Sequestrierung des dabei entstehenden Kohlendioxids (*Carbon Capture and Storage* – CCS). Mögliche Lagerstätten für verflüssigtes CO₂ sind zum Beispiel aufgegebene Kohleflöze und leere Öl- und Gaskavernen. Tatsächlich gibt es bei letzteren bereits umfangreiche technische Erfahrungen, weil CO₂ zum Teil benutzt wird, um restliches Öl oder Gas aus den leer werdenden Lagerstätten herauszupumpen. Die größte Speicherkapazität besitzen allerdings so genannte saline Aquifere, das sind unterirdische poröse Gesteinsformationen, in denen stark salzhaltiges Wasser gespeichert ist. Wenn derartige Formationen von Ton- oder Salzschiefern umschlossen sind, eignen sie sich zur Einlagerung von CO₂. Die gesamte globale Speicherkapazität für CO₂ wird mit 2.000 bis 3.000 Gigatonnen abgeschätzt. Wenn es also gelingt, CCS großtechnisch im globalen Maßstab einzusetzen und das Treibhausgas sicher einzuschließen, ist die Reichweite dieser Methode dennoch nur auf einige Jahrzehnte beschränkt. Würde man bis 2100 etwa vierzig Prozent des globalen Stromverbrauches mit fossilen Brennstoffen und anschließender CO₂-Einlagerung erzeugen, wären die heute bekannten Endlagerstätten weitgehend erschöpft. Außerdem ist zu beachten, dass CO₂-Emissionen auf diese Weise nicht komplett vermieden werden könnten, sondern eine *Leckrate* von etwa dreizehn Prozent bleibt. Um den dabei entstehenden CO₂-Überschuss klimafreundlich abzubauen, müsste man wohl in großem Stil Biomasse zufeuern (Bio-CCS), wodurch der CO₂-Gehalt der Atmosphäre reduziert werden kann (siehe dazu auch die Diskussion von Goldston [3]).

Nukleare Technologien

Wenn der Beitrag der Erneuerbaren auf dreißig Prozent und der fossilen Brennstoffe auf etwa vierzig Prozent limitiert ist, werden immer noch etwa dreißig Prozent aus anderen CO₂-freien Energiequellen benötigt. Die einzige derzeit dafür zur Verfügung stehende Möglichkeit ist der Einsatz nuklearer Technologien. Tatsächlich gehen die meisten der oben diskutierten Energieszenarien davon aus, dass der Beitrag der nuklearen Technologien zur Stromversorgung, der derzeit weltweit etwa siebzehn Prozent beträgt, in Zukunft deutlich wachsen wird. In Abbildung 2 sind aus den Modellen der EMF-22-Gruppe der Median, sowie die 18 %- und 82 %-Quantile des nuklearen Beitrages zur künftigen Stromversorgung dargestellt (rote Linien). Im Vergleich zur Gegenwart steigt der erwartete Beitrag der nuklearen Elektrizität bei fast allen Modellen um etwa einen Faktor 10 an. Eine ganze Reihe von Szenarien nehmen noch deutlich höhere Steigerungsraten an. Das wirft erhebliche Fragen auf: zur Versorgung mit Brennstoff, zur nuklearen Sicherheit und zur geologischen Endlagerung der nuklearen Abfälle (die ebenfalls von Goldston [3] im Detail diskutiert werden). In jedem Fall werden neue und intrinsisch sichere Kraftwerkstechnologien der Generation III und IV benötigt. Aber auch damit stellt der Ausbau der nuklearen Kapazitäten ein erhebliches Risiko dar, vor allem bei der Proliferation nuklearen Materials.

Wenn es nun gelingt, die Versprechen der Kernfusion als saubere, sichere, bezahlbare und fast unbegrenzte Energiequelle in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts einzulösen, könnte sie sukzessive die problematischen Kern- und Kohlekraftwerke ersetzen. Im Verhältnis zu Spaltkraftwerken sind die nuklearen Sicherheitsrisiken deutlich geringer: ein geologisches Endlager wird nicht benötigt. Der Fusionskurve in Abbildung 1 liegt die Annahme zugrunde, dass ab 2050 jährlich Fusionskraftwerke zugebaut werden können, die jeweils eine Kapazität von einem Prozent des globalen Strombedarfs decken können – eine ähnliche Steigerungsrate, wie sie weltweit beim Aufbau der Kernspaltungskraftwerke in den siebziger und achtziger Jahren des 20. Jahrhunderts erreicht wurde. Bis etwa 2080 könnte man damit alle Kernspaltungskraftwerke ersetzen und bis 2100 etwa dreißig Prozent der globalen Elektrizität liefern – mit steigender Tendenz. Spätestens im nächsten Jahrhundert, wenn alle CO₂-Speicher gefüllt sein werden, wird diese Energiequelle dringend benötigt.

3. Fusionsreaktionen

Drei Minuten nach dem Urknall im frühen Kosmos wurden aus freien Protonen und Neutronen die ersten chemischen Elemente gebildet, zunächst die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium, vor allem aber Helium und die leichten Elemente Beryllium und Lithium. Dabei wurden die zu diesem Zeitpunkt noch vorhandenen freien Neutronen weitgehend in stabile Elemente eingebaut, bevor die Neutronen mit einer Halbwertszeit von etwa elf Minuten zerfallen waren. Das überschwere Wasserstoffisotop Tritium, das für Fusionsreaktoren auf der Erde eine wichtige Rolle spielt, zerfällt nach einer Halbwertszeit von 12,5 Jahren und kommt deshalb in der Natur nicht vor.

Die Sonne verbrennt in ihrem Zentrum Wasserstoff zu Helium. Dies läuft in drei Schritten ab: Zunächst stoßen zwei Protonen zusammen und verschmelzen unter Abgabe eines Positrons und eines Elektron-Neutrinos zu dem schweren Wasserstoffisotop Deuterium. Dieser Prozess hat einen sehr geringen Wirkungsquerschnitt. Deshalb dauert es im Mittel etwa eine Milliarde Jahre bis ein Proton mit einem anderen zusammenstößt. Dazu ist eine Temperatur von etwa fünfzehn Millionen Kelvin und eine Dichte nötig, die etwa 150 Mal größer als die von Wasser ist. Die elektrisch positiv geladenen Teilchen stoßen sich durch die Coulomb-Kraft gegenseitig umso stärker ab, je näher sie sich kommen. Dennoch können bei diesen Temperaturen und Dichten die Protonen den abstoßenden Coulomb-Wall durch den quantenmechanischen Tunneleffekt überwinden, so dass im Sonneninneren jede Sekunde etwa 10^{38} Protonen zu Deuterium fusionieren. Im nächsten Schritt verschmelzen die Deuterium-Kerne mit einem weiteren Proton unter Abgabe eines Gamma-Quants zu Helium-3 (^3He), einem Isotop, das aus zwei Protonen und einem Neutron besteht. Der Wirkungsquerschnitt ist für diese Reaktion im Sonneninnern sehr hoch, so dass sie im Mittel nur eine Sekunde dauert. Zwei ^3He -Kerne verschmelzen innerhalb etwa einer Million Jahre zu ^4He , wobei die beiden überschüssigen Protonen wieder frei werden. Insgesamt wird pro Reaktion eine Energie von 26,2 MeV frei.

Die schwereren Elemente, vor allem Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff können erst bei den entsprechend höheren Temperaturen und Drücken entstehen, wie sie in den Zentren von Roten Riesen herrschen. Am Ende des Lebens sehr massereicher Sterne entstehen in deren Zentrum in sehr rascher Folge alle schwereren Elemente bis hin zum Eisen, das die höchste Bindungsenergie besitzt (Abbildung 3).

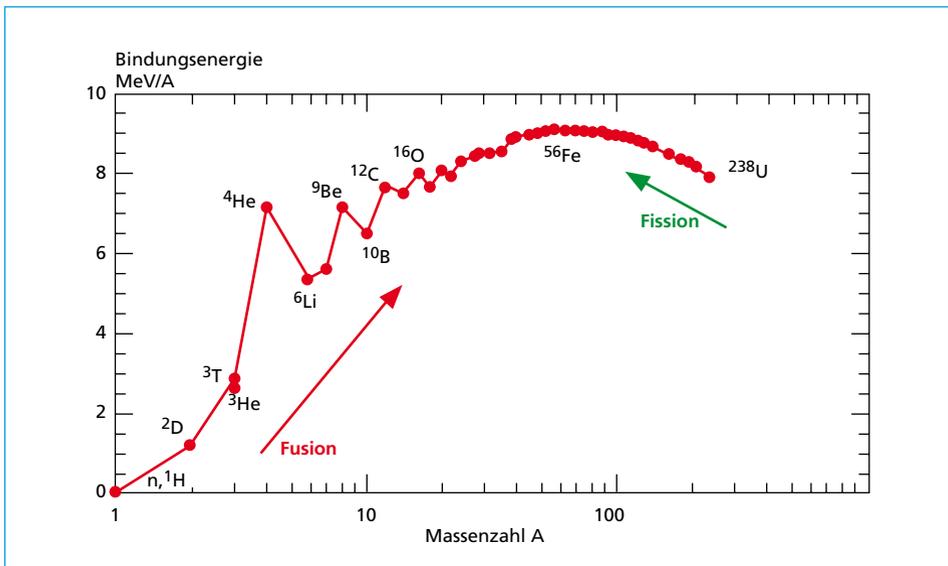


Abb. 3: Bindungsenergie der Atomkerne in Abhängigkeit von der atomaren Massenzahl A. Für Kerne leichter als Eisen kann durch Verschmelzung Energie gewonnen werden. Schwerere Kerne können unter Energiegewinn gespalten werden.

Alle noch schwereren Elemente bis hin zum Uran können nur durch Zuführung von Energie fusioniert werden. Bei den Supernova-Explosionen am Lebensende eines massereichen Sternes wird ein Teil der frei werdenden Gravitationsenergie in die Bindungsenergie schwerer Atomkerne gesteckt.

Die Proton-Proton-Kette in der Sonne dauert viel zu lange, um mit ihrer Hilfe ein Fusionsfeuer auf der Erde zu entfachen. Wenn wir also behaupten, *das Sonnenfeuer auf die Erde zu holen*, ist das zwar im Prinzip richtig, allerdings nur dann, wenn man die astrophysikalisch bereits *vorprozessierten* Wasserstoffisotope Deuterium (D) und Tritium (T) sowie deutlich höhere Temperaturen als im Sonneninneren verwendet. Der Wirkungsquerschnitt der für Fusionsreaktoren nötigen D-T-Reaktion ist etwa um 24 Größenordnungen größer, als derjenige der p-p-Reaktion und hat sein Maximum bei etwa 200 Millionen Grad, etwa 8 mal höher als im Kern der Sonne. Tritium ist radioaktiv mit einer Halbwertszeit von 12,5 Jahren. Für Forschungszwecke im Labor verwendet man deshalb meist die D-D-Reaktion, deren Querschnitt etwa um eine Größenordnung geringer ist. Tabelle 1 zeigt verschiedene Fusionsreaktionen. Bei der D-T-Reaktion verschmelzen die beiden Wasserstoffisotope unter Abgabe eines Neutrons direkt zu ${}^4\text{He}$. Dabei wird eine Energie von 17,6 Megaelektronenvolt (MeV) frei, das ist etwa drei Millionen mal mehr als bei der Knallgasreaktion, der Verbrennung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser, frei wird. Das Neutron trägt dabei mit 14,1 MeV den größten Teil der frei werdenden Fusionsenergie nach außen, wo seine kinetische Energie zunächst in Wärme und danach in elektrischen Strom umgewandelt werden kann. Außerdem muss das Fusionsneutron im Mantel des Fusionsreaktors noch das Tritium erbrüten. Die *Asche* der Fusionsreaktion, der entstandene Heliumkern, erhält eine kinetische Energie von 3,5 MeV und bleibt wegen seiner elektrischen Ladung im Plasma gefangen, wo er signifikant zu dessen Heizung beiträgt. Am so genannten *Divertor* werden diese Alpha-Teilchen schließlich gezielt abgekühlt und unter Zugabe zweier Elektronen zu neutralen Helium-Atomen umgewandelt, damit sie aus der Plasmakammer abgepumpt werden können.

Tab. 1: Fusions- und Brutreaktionen

Fusion			
D + T	→	${}^4\text{He} + \text{n}$	+ 17,6 MeV
D + D	→	${}^3\text{He} + \text{n}$	+ 3,3 MeV
D + D	→	T + p	+ 4,0 MeV
D + ${}^3\text{He}$	→	${}^4\text{He} + \text{p}$	+18,3 MeV
Tritium-Brüten			
${}^6\text{Li} + \text{n}$	→	${}^4\text{He} + \text{T}$	+ 4,8 MeV
${}^7\text{Li} + \text{n}$	→	${}^4\text{He} + \text{T} + \text{n}'$	- 2,5 MeV
Neutronenvermehrung			
${}^9\text{Be} + \text{n}$	→	2 (${}^4\text{He}$) + 2 n	- 1,6 MeV
Pb + n	→	... + 2 n	

Das stabile Isotop Deuterium stammt direkt aus dem Urknall und ist z.B. im Wasser der Meere in großen Mengen vorhanden (etwa jedes 7.000te Wassermolekül enthält ein Deuterium-Atom). Das Wasserstoffisotop Tritium hat eine Halbwertszeit von 12,5 Jahren und kommt deshalb in der Natur nicht in größeren Mengen vor. Es entsteht im Wesentlichen durch die kosmische Strahlung. Gewisse Vorräte an Tritium werden aber beim Betrieb von so genannten CANDU-Reaktoren (CANada Deuterium Uranium Schwerwasser-Reaktoren) gebildet und können für Testzwecke in Fusionsexperimenten wie JET und ITER verwendet werden.

Ein zukünftiges Fusionskraftwerk muss jedoch sein für die Fusion notwendiges Tritium selbst aus Lithium *erbrüten*. Diese Brutreaktionen sind ebenfalls in Tabelle 1 dargestellt. Je nachdem, welches natürliche Lithium-Isotop verwendet wird, kann bei der Spaltung durch das Fusionsneutron zusätzliche Energie entstehen, oder ein Teil der Energie des Neutrons absorbiert werden. Um die Fusionsreaktion aufrechtzuerhalten, muss jedes Fusionsneutron mindestens einen Tritiumkern *erbrüten*, möglichst sogar mehr, um einen gewissen Vorrat an Tritium zu generieren. Das ist allerdings wegen der Neutronenverluste, zum Beispiel aufgrund der unvollständigen Abdeckung der Fusionskammer durch den Mantel aus Brut-Blanket-Elementen (siehe unten) problematisch. Monte-Carlo-Simulationen haben ergeben, dass jedes Fusionsneutron im Mittel etwa 1,15 Tritium-Atome erzeugen muss. Ein höheres Brutverhältnis kann man zum Beispiel durch eine geeignete Isotopenmischung von Lithium erreichen. Das natürliche Verhältnis zwischen den Isotopen ${}^6\text{Li}$ und ${}^7\text{Li}$ ist etwa 7,5 % zu 92,5 %. Bei der Spaltung von ${}^7\text{Li}$ in Helium und Tritium bleibt das Fusionsneutron mit geringerer Energie vorhanden und kann im Prinzip ein weiteres Lithiumatom spalten. Bei geeigneter Mischung der Lithium-Isotope kann man also das Brutverhältnis beeinflussen. Allerdings geht dabei Energie verloren, die später nicht zur Stromproduktion zur Verfügung steht. Des Weiteren kann man Elemente beimischen, die zur Neutronenvermehrung beitragen, so zum Beispiel Beryllium oder Blei (Tabelle 1). Insgesamt ist aber das Brutproblem in einem Fusionsreaktor noch nicht gelöst. Bei dem internationalen Experimentalreaktor ITER (siehe unten) sollen zum ersten Mal Brut-Blankets experimentell untersucht werden. Dabei werden von den jeweiligen internationalen Partnern verschiedene Konstruktionen verfolgt. Ein Problem für eine spätere Fusionsökonomie ist auch, dass – um die Effizienz der Brutreaktion zu gewährleisten – viel mehr Lithium-Atome (u.U. auch Beryllium und Blei) im Mantel vorhanden sein müssen als im Lauf der Reaktion *verbraucht* werden. Die Verfügbarkeit dieser Elemente stellt deshalb ein gewisses Nadelöhr dar. Wenn es allerdings gelingt, Lithium aus dem Meerwasser zu gewinnen, sind die Ressourcen praktisch unbegrenzt. Der Brennwert von zehn Litern Meerwasser entspricht ungefähr dem von einem Liter Öl.

4. Magnetischer Einschluss

Wie gelingt es nun, ein derart heißes Gas mit einer guten thermischen Isolation in ein Gefäß einzuschließen? Dafür gibt die Sonne das Beispiel: Sie zeigt nicht nur, wie durch Fusion in ihrem Kern Masse in Energie umwandelt wird, sondern auch, wie in ihrer Chromosphäre heißes Plasma in magnetischen Schläuchen stark gebündelt und eingeschlossen wird. Hoch aufgelöste Filme, die mit Röntgenkameras

auf dem SOHO-Satelliten der ESA, auf dem TRACE-Satelliten der NASA, sowie in jüngster Zeit auf dem HINODE-Satelliten der japanischen Raumfahrtagentur JAXA aufgenommen wurden, zeigen, wie aus den dunklen Sonnenflecken in Eruptionen heiße Gasfontänen herausgeschleudert und durch Magnetfelder in hell leuchtende Bögen eingeschlossen werden. Die elektrisch geladenen Teilchen können sich im Magnetfeld nur auf Spirallinien entlang der Feldlinien bewegen und bleiben deshalb in den magnetischen Bögen gefangen. Ein ähnliches Phänomen beobachtet man auch im Magnetfeld der Erde, wo in den so genannten *Van Allen-Strahlungsgürteln* elektrisch geladene Teilchen, die aus dem Sonnenwind stammen, eingefangen werden und bei großen Sonneneruptionen auch in den Polarregionen der Erde als Polarlichter sichtbar werden.

In einem magnetisch eingeschlossenen Fusionsplasma – bestehend aus elektrisch negativ geladenen Elektronen und positiv geladenen Ionen – lassen sich die Teilchen durch geeignete Formgebung der Magnetfeldspulen deshalb ringförmig einschließen (Abbildung 4). Weil in einem reinen Ringfeld die Teilchen schnell nach außen an die kalte Wand driften würden, muss dem Magnetfeld jedoch eine schraubenförmige (helikale) Struktur aufgeprägt werden, um das Plasma stabil zu halten. Es gibt zwei prinzipielle magnetische Konfigurationen, um dies zu erreichen, den in Russland unter anderem durch Andrej Sacharow entwickelten Tokamak und den in den USA von Lyman Spitzer entwickelten Stellarator. Beim Tokamak wird die spiralförmige Drehung des Magnetfeldes durch einen Strom erzeugt, der im Plasma selbst fließt. In gewissem Sinne baut sich das Plasma durch diesen Strom seinen Käfig selbst auf. Dieser Strom wird durch einen Transformator induziert, dessen *Eisenkern* in der mittleren Spindel zu sehen ist. Da dieser Strom durch ein Wechselfeld im Transformator induziert werden muss, kann der Tokamak prinzipiell nur gepulst arbeiten. Es gibt aber Bemühungen, den Tokamak auf sehr lange Pulse oder sogar auf Dauerbetrieb hin zu züchten. Sämtliche Spulen im Tokamak sind eben, haben also relativ einfach zu konstruierende und herzustellende Formen. Unter anderem deshalb ist der Tokamak bis heute das am weitesten entwickelte magnetische Einschlusskonzept. Die derzeit größte experimentelle Fusionsanlage, die auch den Weltrekord in der erzeugten Fusionsenergie hält, ist der *Joint European Torus* (JET) in Culham, England.

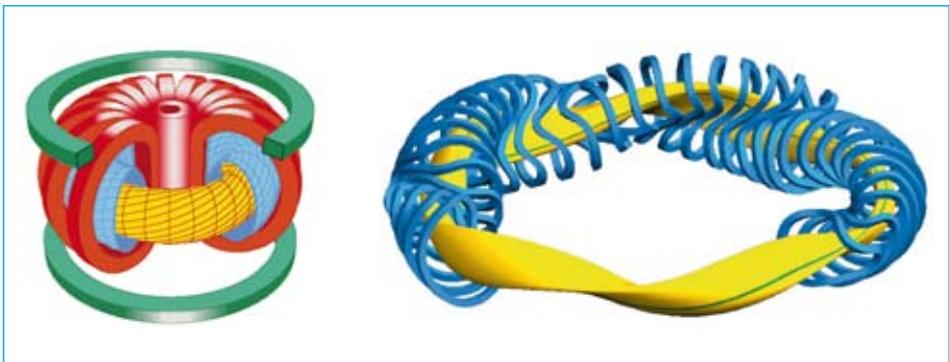


Abb. 4: Zwei verschiedene Konzepte des magnetischen Einschlusses von Fusionsplasmen: Tokamak (links) und Stellarator (rechts)

Die größte deutsche Fusionsanlage ASDEX Upgrade (Abbildung 5, links) steht am Standort Garching des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik (IPP). Die in Garching entwickelte Geometrie von ASDEX Upgrade mit seinem D-förmigen Querschnitt und dem unten liegenden Divertor, wo das Plasma gezielt in Kontakt mit der Wand kommt, hat sich inzwischen für alle großen laufenden und zukünftigen Tokamaks durchgesetzt, vor allem bei JET und ITER. Besonders hervorzuheben ist, dass ASDEX Upgrade die weltweit einzige Maschine ist, deren Plasmagefäß vollständig mit Wolfram-ausgekleidet ist. Das Element Wolfram hat den höchsten Schmelzpunkt aller Metalle. Die Entscheidung, zu Wolfram überzugehen, war vor einigen Jahren weltweit umstritten, weil dadurch der Plasmabetrieb deutlich komplizierter wird als zum Beispiel in einer Kohlenstoff-Maschine. In der Tat gab es einige Komplikationen bei dem Betrieb mit der Wolfram-Wand, die aber inzwischen alle gelöst werden konnten. Wolfram wird deshalb nun als das attraktivste Material für zukünftige Fusionsreaktoren angesehen und auch in JET sowie wahrscheinlich in ITER eingebaut.



Abb. 5: Die Plasmakammer des Tokamaks ASDEX Upgrade in Garching (links) und der im Aufbau befindliche Stellarator Wendelstein 7-X in Greifswald (rechts)

Beim Stellarator wird die spiralförmige Drehung der Magnetfeldlinien durch eine spezielle Form der Magnetfeldspulen erzeugt (siehe Abbildung 4). Der Vorteil des Stellarators ist, dass er keinen inneren Strom benötigt und deshalb prinzipiell zum Dauerbetrieb fähig ist. Der Einschluss schneller Teilchen in den frühen, in den USA entwickelten Stellaratoren hat sich allerdings zunächst als ungenügend herausgestellt, so dass diese Linie weltweit zugunsten des Tokamaks vernachlässigt wurde. Erst mit der Entwicklung der modernen Supercomputer gelang es mit Hilfe aufwändiger numerischer Simulationen, den Stellarator in seiner heutigen, optimierten Form zu entwickeln. Für die Stellaratoren-Linie *Wendelstein* wurde die Kunst der Supercomputer-Simulation insbesondere am Rechenzentrum in Garching vorangetrieben. Derzeit gibt es weltweit zwei große Stellaratorprojekte. Der japanische Stellarator *Large Helical Device* (LHD) in Nagoya ist 1998 in Betrieb gegangen. Der Stellarator Wendelstein 7-X wird derzeit am Standort Greifswald des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik aufgebaut. Das Design des Stellarators Wendelstein 7-X (Abbildung 4, rechts) ist komplex: vor allem die dreidimensional geformten supraleitenden Spulen stellten von Anfang an eine große Herausforderung dar. Inzwischen sind die

Anfangsschwierigkeiten des Projektes überwunden. Alle siebzig supraleitenden Spulen wurden inzwischen in einer speziellen Testanlage des Commissariat a l'Énergie Atomique (CEA) in Saclay bei Paris im kalten, supraleitenden Zustand erfolgreich getestet und sind bereits in die Anlage in Greifswald eingebaut (siehe Abbildung 5, rechts). Obwohl noch eine ganze Reihe technischer Herausforderungen zu bewältigen sind, steht der geplanten ersten Inbetriebnahme im Jahr 2014 nichts entgegen. Nach seinem Endausbau bis 2019 soll Wendelstein 7-X die prinzipielle Kraftwerkstauglichkeit des Stellarator-Konzepts und gleichzeitig dessen Dauerbetriebsfähigkeit demonstrieren.

Um die Fusionsreaktion aufrecht zu erhalten, muss ein Plasma auf etwa 200 Millionen Grad erhitzt und bei einer Dichte von etwa 10^{14} Teilchen pro Kubikzentimeter mindestens zwei Sekunden lang thermisch isoliert eingeschlossen werden. Der Parameter, der die Energieausbeute eines Fusionsplasmas beschreibt – das so genannte *Fusions-Tripelprodukt*, das sich aus der Multiplikation von Temperatur, Dichte und Einschlusszeit ergibt – hat sich in den letzten vierzig Jahren um etwa den Faktor 100.000 verbessert (Abbildung 6). Der eindrucksvolle Anstieg dieser Größe ist damit durchaus mit dem Moore'schen Gesetz der Computer vergleichbar.

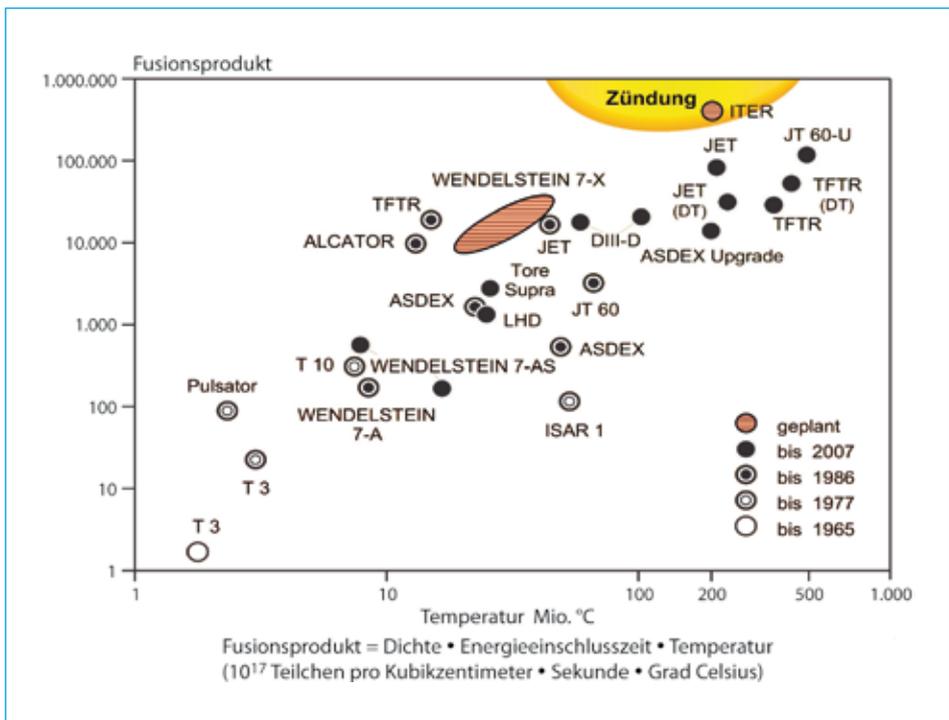


Abb. 6: Die Entwicklung des Tripelproduktes der Fusion über die letzten vierzig Jahre

Quelle: Bradshaw, A.: In: Gruss, P.; Schüth, F.: Die Zukunft der Energie. C. H. Beck, 2008, S. 295

Zur Heizung des Plasmas stehen mehrere Methoden zur Verfügung. So kann man mit Strom heizen. Wie bei einer Herdplatte erzeugt der durch das Plasma geschickte Strom über den elektrischen Widerstand Wärme. Das funktioniert besonders gut, so lange das Plasma noch relativ kalt ist, danach jedoch sinkt der Widerstand rapide ab. Die zweite Methode ist die Mikrowellenheizung. Ähnlich wie beim Mikrowellenherd im Haushalt, der mit Wellen einer bestimmten Frequenz die Wassermoleküle im Essen in Schwingung versetzt und damit aufheizt, werden bei Fusionsanlagen elektromagnetische Wellen in das Plasma eingestrahlt, die auf die Resonanzfrequenzen der Elektronen (60 bis 150 GHz), bzw. der Ionen (10 bis 100 MHz) abgestimmt sind und diese entsprechend aufheizen. Eine dritte Methode ist die Neutralteilchenheizung, bei der geladene Ionen außerhalb der Plasmakammer stark beschleunigt werden und, damit sie ungehindert in den Magnetfeldkäfig eindringen können, mit speziellen Methoden neutralisiert werden. In den letzten Jahrzehnten konnte auf diese Weise insbesondere die Temperatur des eingeschlossenen Plasmas immer weiter erhöht werden, bis auf Werte von 200 Millionen Grad und mehr, wie sie zur Zündung benötigt werden (Abbildung 6).

Auch die relativ geringe erforderliche Dichte des eingeschlossenen Plasmas stellt keine Schwierigkeit dar. Die größte Herausforderung liegt in der noch deutlich zu kurzen Energie-Einschlusszeit des Plasmas. Diese Einschlusszeit kann man sich als die Zeitspanne veranschaulichen, in der ein Plasma seine Temperatur aufrecht erhält, wenn es nicht mehr weiter geheizt wird – ähnlich wie die Isolation einer Thermoskanne den Kaffee nur eine bestimmte Zeit heiß hält. Die Einschlusszeit ist bei den derzeit besten Experimenten immer noch etwa um eine Größenordnung zu klein, verglichen mit den Anforderungen für ein Energie lieferndes Plasma. Der Energieverlust aus dem Plasma ist wesentlich größer als in den frühen optimistischen Abschätzungen angenommen – das ist auch der wesentliche Grund, warum der Weg zu einem Fusionskraftwerk wesentlich länger dauert, als ursprünglich erhofft. In den Experimenten der siebziger und achtziger Jahre zeigte sich nämlich, dass turbulente Fluktuationen senkrecht zu den Magnetfeldlinien den Wärmetransport aus dem Plasma dominieren und dieses wesentlich schneller abkühlen, als durch Strahlung und durch Stöße. Man spricht deshalb von anomalem Transport.

Die einfachste Möglichkeit, den Energieeinschluss zu steigern, liegt in der Vergrößerung des Plasmavolumens: der Energieinhalt eines Plasmas steigt mit dem Volumen, also mit der dritten Potenz des Radius an, während der Energieverlust mit der Oberfläche, also der zweiten Potenz des Radius, langsamer ansteigt. Die Energieeinschlusszeit wächst demnach mit dem Radius. Das ist auch der Grund, warum ein Eisbär in der Polarregion leben kann, während z.B. eine Maus dort erfrieren würde. Zukünftige Fusionskraftwerke müssen deshalb wesentlich größer werden, als ursprünglich angenommen. Allerdings wurde am IPP 1982 die so genannte H-Mode entdeckt. Dabei handelt es sich um eine Transportbarriere am Plasmarand, die spontan und selbstorganisiert entsteht und sich dem Energieverlust durch Turbulenz entgegen stellt. Damit verbessert sich die Wärmeisolation des Plasmas um einen Faktor 2 und der Energieinhalt im Plasmazentrum

steigt deutlich an. Mit der H-Mode kann deshalb die Zündung bereits in einem wesentlich kleineren Volumen erfolgen. Seit ihrer Entdeckung basieren deshalb fast alle Betriebsszenarien der magnetischen Fusion auf der H-Mode.

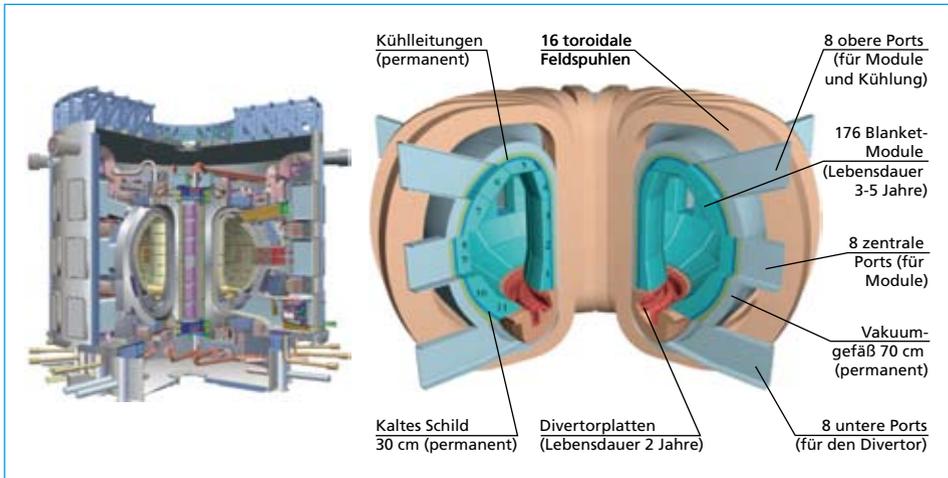


Abb. 7 : Links: Der internationale Experimentierreaktor ITER, der derzeit in Cadarache, Südfrankreich, aufgebaut wird. Die Größe des Vakuumschiffes mit einer Höhe von 29 m wird im Vergleich zu der menschlichen Figur unten links eindrucksvoll klar. Rechts: Wichtigste Komponenten eines zukünftigen Fusionskraftwerkes

Quelle: A conceptual study of commercial fusion power plants (PPCS), EFDA-RP-RE-5.0 (2004)

Der Weg von ASDEX Upgrade mit einem Plasmavolumen von 25 m^3 über JET mit 80 m^3 zu ITER mit 800 m^3 stellt eine Stufenleiter dar, auf der bei sehr ähnlicher Geometrie im Wesentlichen die Größe verändert wird. Experimentell bestimmte Skalierungsgesetze auf dieser Stufenleiter sind notwendig, um verlässlich zunächst zu ITER und später zu einem künftigen Kraftwerk extrapolieren zu können. Der derzeitige Weltrekordhalter JET hat 1997 für etwa eine Sekunde Bedingungen erreicht, die annähernd dem *Break-Even* entsprechen, d.h. die eingesetzte Heizleistung kann durch die freigesetzte Fusionsleistung wieder gewonnen werden ($Q = 0,67$, Q ist das Verhältnis von Fusionsleistung zu Heizleistung). Der nächste große Schritt auf dem Weg zu einem Kraftwerk ist die internationale Testanlage ITER, die derzeit in Cadarache in Südfrankreich entsteht und zum ersten Mal das Gebiet erreichen soll, in dem die Fusionsleistung wesentlich höher ist, als die zur Heizung des Plasmas verwendete Leistung. Für jeweils etwa fünf Minuten soll im Deuterium-Tritium-Betrieb eine Fusionsleistung von 500 MW ($Q = 10$) erreicht werden. Dabei wird zum ersten Mal die Selbstheizung des Plasmas durch die bei der Fusionsreaktion entstehenden Helium-Teilchen untersucht und damit ein für die Fusion wesentliches Gebiet der Grundlagenphysik experimentell zugänglich gemacht. Im so genannten Langpuls-Betrieb wird eine Leistungsverstärkung von $Q = 5$ für etwa fünfzehn Minuten angestrebt. Dabei wird ITER nukleare Technologien erproben, die für einen zukünftigen Fusionsreaktor essentiell sind, wie das oben diskutierte Erbrüten von Tritium aus Lithium oder das robotergestützte Hantieren mit großen Bauteilen. ITER befindet sich bereits im Bereich der für zukünftige Kraftwerke angenommenen Leistungsparameter und ist damit der

unabdingbare nächste Schritt auf dem Weg zu einem Fusionskraftwerk. Als hochkomplexe und einzigartige große Forschungsinfrastruktur ist das Projekt entsprechend teuer, weshalb sich zu seiner Verwirklichung eine globale Kooperation der wichtigsten Forschungsnationen zusammengeschlossen hat.¹

5. Der Weg zu einem Fusionskraftwerk

Bis zu einem ökonomisch nutzbaren Fusionskraftwerk sind noch erhebliche Anstrengungen nötig. Wesentlich ist zunächst die Entwicklung eines magnetischen Einschluss-Systems, das in einem Grundlastkraftwerk zuverlässig einsetzbar ist. Anlagen vom Typ *Tokamak* – die derzeitigen Zugpferde der Forschung – arbeiten bisher nur im gepulsten Betrieb. Wichtiges Forschungsziel sind daher so genannte *Advanced Szenarios*, die den Langpuls- oder sogar den Dauerbetrieb der Tokamaks möglich machen sollen. Eine attraktive Alternative bietet der von vornherein zum Dauerbetrieb fähige Bautyp *Stellarator*. Mit dem Aufbau des Stellarator-Experimentes Wendelstein 7-X in Greifswald liegt hier ein besonderer Schwerpunkt des deutschen Fusionsforschungsprogramms. Um die physikalischen Grundlagen für die Auslegung und den effizienten Betrieb künftiger Kraftwerke zu erarbeiten, müssen die bestehenden Experimente JET und ASDEX Upgrade optimal genutzt und die im Bau befindlichen Anlagen ITER und Wendelstein 7-X möglichst zügig fertiggestellt werden. Die experimentellen Arbeiten werden begleitet durch die theoretische Plasmaphysik, die nicht zuletzt wegen der rasanten Entwicklung moderner Hochleistungscomputer gewaltige Fortschritte gemacht hat. Viele experimentelle Ergebnisse können heute durch umfangreiche numerische Simulationen quantitativ nachvollzogen werden. Ziel ist letztlich ein numerisches Fusionskraftwerk, also Simulationen auf Super-Computern, welche die Experimente an Wendelstein 7-X und ITER auf das Demonstrationskraftwerk hin extrapolieren können.

Der Schritt nach ITER ist ein Demonstrationskraftwerk (DEMO), das erstmalig Strom aus Kernfusion erzeugen soll. DEMO muss alle wesentlichen Komponenten eines kommerziellen Fusionskraftwerks enthalten und soll eine elektrische Leistung im Bereich von 1 bis 1,5 Gigawatt liefern (siehe Abbildung 7 rechts und Abbildung 8). Parallel zur Klärung der grundlegenden physikalischen Voraussetzungen sind für die Realisierung eines Demonstrationskraftwerks wesentliche neue technologische Entwicklungen notwendig.

An erster Stelle ist hier die Entwicklung geeigneter Baumaterialien für die stark mit Neutronen belasteten Komponenten im Plasmagefäß (Brut-Blanket, Divertor) zu nennen. Durch die Bestrahlung mit energiereichen Neutronen (14 MeV) wird, ähnlich wie bei Kernkraftwerken, das Material der Fusionskammer aktiviert.

¹ ITER wird getragen von Europa mit 45 % der Baukosten, sowie China, Indien, Japan, Südkorea, Russland und USA mit jeweils 9 %. Die Kostenschätzungen für Europa haben sich in den letzten Jahren leider dramatisch erhöht, von ursprünglich 2,7 Milliarden Euro auf etwa 7 Milliarden Euro (Stand Juni 2010). Gründe für diese Kostensteigerung sind wichtige neue Elemente im Maschinenentwurf, die nach einer 2007 durchgeführten Begutachtung des 2001 eingefrorenen Designs nötig wurden, der extreme Preisanstieg bei Rohstoffen und Materialien in den letzten Jahren sowie ein sehr optimistischer Ansatz bei der Kostenschätzung des Jahres 2001.

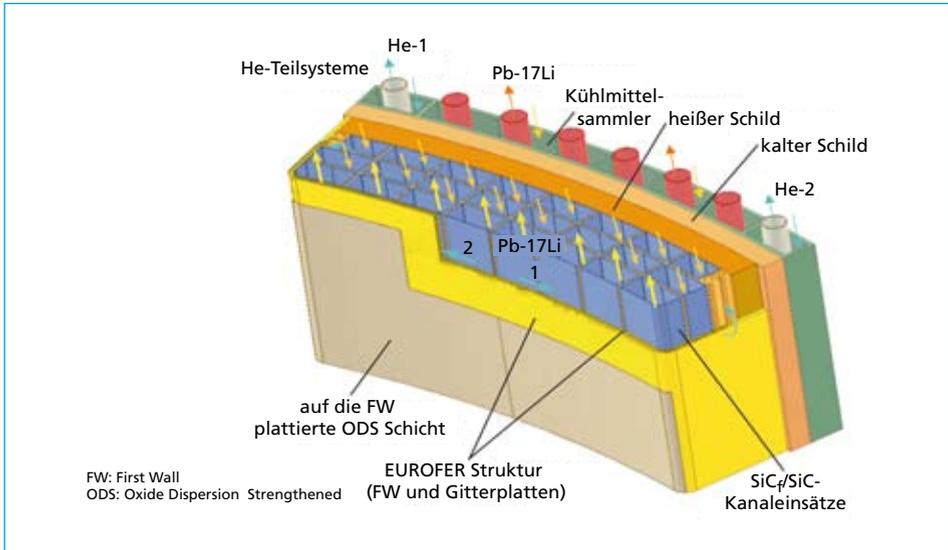


Abb. 8: Konzept eines Brutmantel-Elements, das bei etwa 650 °C mit zwei Flüssigkeiten gekühlt wird. Der Brutmantel, das Herz eines zukünftigen Fusionskraftwerkes, hat die Aufgabe, die energiereichen Fusionsneutronen aufzufangen, herunterzukühlen und dabei aus Lithium das für die Fusionsreaktion benötigte Wasserstoffisotop Tritium abzuspalten. Die aus der kinetischen Energie der Neutronen umgewandelte Wärme wird über einen klassischen Kühlkreislauf zur Stromerzeugung in einem Generator verwendet.

Quelle: A conceptual study of commercial fusion power plants (PPCS), EFDA-RP-RE-5.0 (2004)

Bei einer Einsatzdauer von fünf Jahren unter kraftwerksähnlichen Bedingungen müssen diese Materialien einer Belastung von etwa 150 dpa (*displacements per atom*) standhalten, ohne zu verspröden². Hierbei spielt die Temperatur eine wesentliche Rolle. Die derzeit verfügbaren ferritischen Stähle (z.B. EUROFER) werden optimal bei Temperaturen von etwa 500 bis 700 Grad Celsius betrieben. Durch die Bestrahlung wird das umgebende Material außerdem aktiviert. Im Gegensatz zu den spaltbaren Brennstoffmaterialien eines Kernkraftwerkes haben die dabei entstehenden radioaktiven Stoffe jedoch relativ kurze Halbwertszeiten, so dass die Reststrahlung bereits nach etwa 100 bis 200 Jahren auf das biologische Gefährdungspotenzial der Asche eines Kohlekraftwerkes gleicher Leistung abgefallen ist. Damit wird keine geologische Endlagerung benötigt, sondern das Material kann nach einiger Zeit für neue Kraftwerke wiederverwendet werden. Eine wichtige Infrastruktur für die Qualifizierung künftiger Materialien ist die geplante *International Fusion Materials Irradiation Facility* (IFMIF), eine 14 MeV-Neutronenquelle und -bestrahlungsanlage, die gegenwärtig in einer europäisch-japanischen Kooperation vorbereitet wird. Weitere technologische Herausforderungen sind die Entwicklung des Brutprozesses zur Gewinnung des für

² Zum Vergleich: die Neutronenbelastung der entsprechenden Komponenten in ITER wird wegen der viel geringeren effektiven Betriebszeit insgesamt unter 2 dpa liegen.

die Fusionsreaktion benötigten Tritiums aus Lithium, des Brennstoffkreislaufs mit Tritium-Extraktion sowie von Hochtemperatur-Kühlungstechnologien und strahlungsunempfindlichen Diagnostiken. In all diesen Bereichen werden Konzepte in ITER getestet werden, die dann den gewonnenen Erkenntnissen entsprechend angepasst und auf DEMO-Bedingungen skaliert werden müssen. Als Beispiel ist in Abbildung 8 das Konzept eines mit zwei verschiedenen Flüssigkeiten gekühlten Brut-Blankets gezeigt, das *Herz* eines zukünftigen Fusionskraftwerkes.

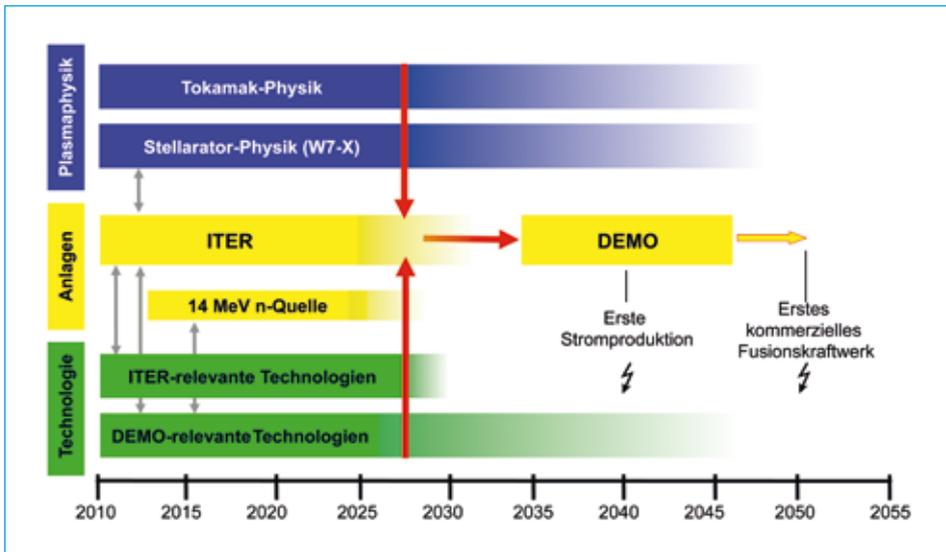


Abb. 9: Fahrplan für die Entwicklung der Fusion zur Energiequelle auf dem *Fast-Track*

Der Fahrplan für die Entwicklung der Fusion zu einer kommerziell nutzbaren Energiequelle ist gut vorgezeichnet (Abbildung 9). Er ist einerseits sehr ehrgeizig, und sieht zwischen ITER und einem kommerziellen Fusionskraftwerk nur noch einen Zwischenschritt DEMO vor (das wird als *Fast Track* bezeichnet). Andererseits liegt das Ziel wegen der für die einzelnen Schritte nötigen Zeit immer noch etwa vierzig Jahre in der Zukunft. Parallel zueinander müssen die physikalische Grundlagenforschung für Tokamaks und Stellaratoren, sowie die Entwicklung der notwendigen Materialien und Technologien auf ein Fusionskraftwerk hin optimiert und verstärkt werden. Die wichtigsten nächsten Meilensteine für die europäische Forschung sind: Inbetriebnahme (2014) und vollständiger Ausbau (2019) des Stellarators Wendelstein 7-X. Bei dem derzeit größten Tokamak JET wird, bevor das Experiment in den Ruhestand geht, für etwa 2015 ein weiteres wichtiges Deuterium-Tritium-Experiment geplant. Parallel dazu muss die Entwicklung der Neutronenbestrahlungsquelle IFMIF vorangetrieben werden, um die Struktur- und Wandmaterialien für ein Kraftwerk rechtzeitig vor dem Bau in der Hand zu haben. Die Inbetriebnahme von ITER ist für 2019 und das erste D-T-Experiment im Jahr 2026 geplant. Wenn alles gut geht, kann bereits parallel zum Betrieb von ITER mit der Planung und relativ kurz nach Abschluss

der wichtigsten ITER-Experimente mit dem Bau des Demonstrationsreaktors DEMO begonnen werden, der nach derzeitigem Kenntnisstand sehr wahrscheinlich ein Tokamak sein wird. Da jeder der internationalen ITER-Partner am Aufbau einer eigenen Fusionsökonomie interessiert ist, wäre es ideal, gemeinsam mit der Industrie der jeweiligen Länder mehrere verschiedene DEMOs parallel aufzubauen, unter denen durchaus auch ein Stellarator sein könnte. Der erste Fusionsstrom könnte bereits im Jahr 2040 ins Netz fließen. Für den Bau ökonomisch attraktiver kommerzieller Fusionskraftwerke wird jedoch sicherlich eine weitere Dekade notwendig sein. Insgesamt ist die in Abbildung 1 unterstellte Annahme realistisch, wenn auch sehr sportlich, dass Fusionsstrom ab 2050 zur Verfügung stehen und dann einen wesentlichen Anteil zum Energiemix in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts beitragen kann. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen wir unsere Anstrengungen noch verstärken und insbesondere eine neue Generation von Wissenschaftlern und Ingenieuren für die Energiegesellschaft der Zukunft ausbilden. Aber die Mühe lohnt sich.

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei seinen Kolleginnen und Kollegen im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik für die vielfältige Hilfe und Unterstützung, insbesondere aber bei Frau Professor S. Günter, Herrn Professor T. Klinger und Frau Isabella Milch für die kritische Durchsicht des Textes und wichtige Anregungen.

6. Quellen

- [1] United Nations: <http://esa.un.org/unpp/>
- [2] Clarke, L.; Edmonds, J.; Krey, V.; Richels, R.; Rose, S.; Tavoni, M.: International climate policy architectures: Overview of the EMF 22 International Scenarios. In: Energy Economics 31 (2009), S. 64-S81
- [3] Goldston, R.: Climate Change, Nuclear Power and Nuclear Proliferation: Magnitude Matters. Princeton University, www.pppl.gov/pub_report/2010/PPPL-4502.pdf