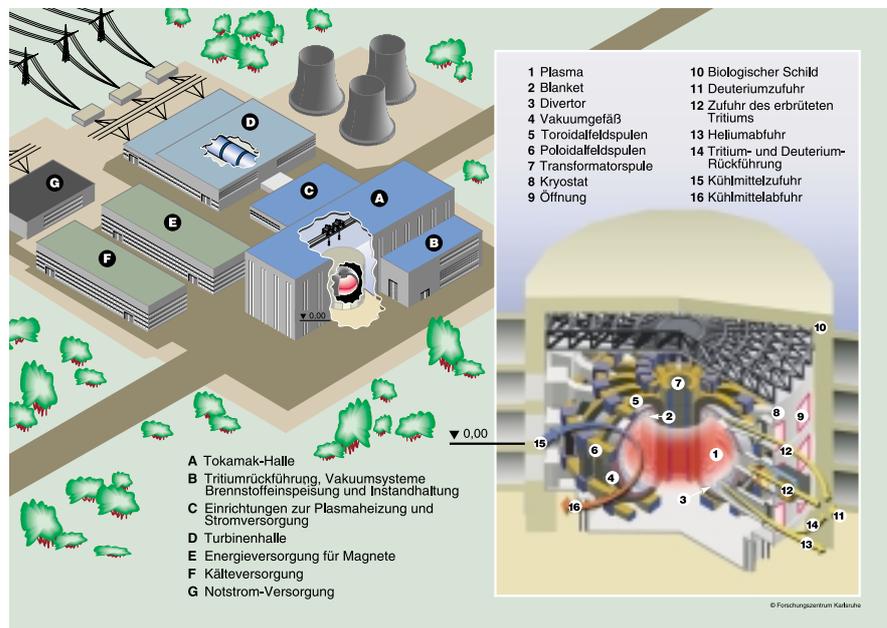


Das Fusionskraftwerk

Aufbau und Funktion

Kernstück eines Fusionskraftwerks ist eine ringförmige Brennkammer. Sie enthält das heiße Deuterium-Tritium-Plasma, das durch Magnetfelder von der innersten, sogenannten „ersten Wand“ ferngehalten wird. Bis zur Zündung führt eine Startheizung dem Plasma für einige Sekunden eine Leistung von etwa 50 bis 100 Megawatt zu. Die schnellen Heliumkerne, die bei den nun einsetzenden Fusionsreaktionen entstehen, sind als geladene Teilchen im Magnetfeld gefangen und geben ihre Energie über Teilchenstöße an das Plasma ab. Schließlich kann die äußere Heizung abgeschaltet werden; das Plasma brennt selbständig weiter und hält die hohen Fusionstemperaturen per Selbstheizung aufrecht. Über den Divertor werden die entstehenden Heliumteilchen - zusammen mit Verunreinigungen aus den Gefäßwänden - laufend aus dem Plasma entfernt, um ein Erlöschen des Fusionsfeuers zu verhindern. Die Fusionsneutronen dagegen können den Magnetfeldkäfig wegen ihrer elektrischen Neutralität ungehindert verlassen.

Das Plasmagefäß ist umgeben von einem lithiumhaltigen Mantel, dem „Blanket“. Hier erzeugen die einfallenden Fusionsneutronen aus Lithium den Fusionsbrennstoff Tritium. Er wird aufgesammelt und über Zwischenspeicher dem brennenden Plasma zusammen mit dem zweiten Brennstoffmaterial Deuterium wieder zugeführt. Etwa 20 Gramm Tritium pro Stunde verbraucht ein Kraftwerk von 1000 Megawatt elektrischer Leistung. Im



Grafik: Forschungszentrum Karlsruhe

Blanket wird außerdem die Energie der einfallenden Neutronen aufgenommen: Die schnellen Teilchen werden im Blanketmaterial abgebremst, das sich auf diese Weise erwärmt. Diese Wärmeenergie wird dann über Kühlmittel, Wärmetauscher, Dampferzeuger und Turbogenerator in elektrische Energie umgewandelt. Das Blanket wiederum ist von einer abschirmenden Hülle umgeben. Sie hält Strahlung und Neutronen aus dem Plasma von den supraleitenden Magnetspulen, den Heizapparaturen und der übrigen Umgebung weitgehend fern. Den gesamten Kraftwerkskern umgibt schließlich eine äußere Sicherheitshülle. Einen Überblick über typische Daten eines Tokamak-Kraftwerks gibt die Tabelle (zum Stellarator-Kraftwerk siehe Seite 66).

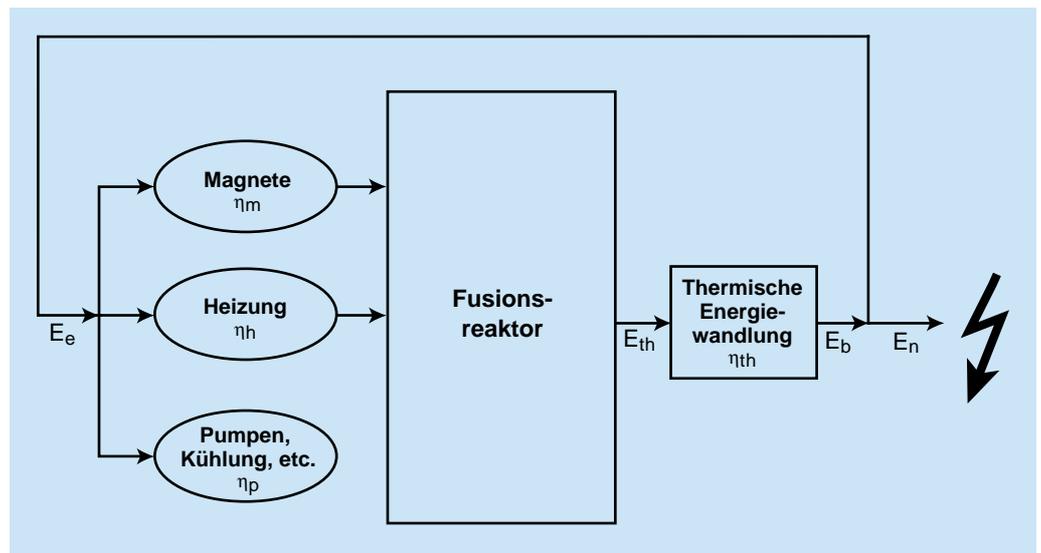
Schematische Darstellung eines Fusionskraftwerks

Wie alle Kraftwerke soll auch ein Fusionskraftwerk die freigesetzte Wärmeenergie mit möglichst hohem Wirkungsgrad in elektrische Energie umwandeln (oder direkt als thermische Energie nutzen). Dabei muss die Energiebilanz auch den Eigenbedarf des Kraftwerks berücksichtigen. Ein Teil der erzeugten elektrischen Bruttoenergie wird nämlich zur Deckung des elektrischen Eigenbedarfs benötigt, d.h. zum Betrieb der Hilfssysteme des Kraftwerkes verwendet. Hierzu gehören die Plasmaheizung, das

Großer Plasmaradius:	9 Meter
Plasmahöhe:	10 Meter
Plasmbreite:	6 Meter
Plasmavolumen:	760 Kubikmeter
Magnetfeld:	7 Tesla
Maximaler Plasmastrom:	28 Megaampere
Startheizung und Stromtrieb:	234 Megawatt
Wandbelastung durch Neutronen:	1,8 Megawatt pro m ²
Fusionsleistung:	3400 Megawatt
Brenndauer:	Dauerbetrieb

Charakteristische Daten eines Tokamak-Kraftwerks

(Quelle: D. Maisonnier et al., Power Plant Conceptual Study, 2002)



Magnetsystem, das System zum Stromtrieb (bei einem Kraftwerk vom Tokamak-Typ), Pumpen, Kühlung und die Anlagen zur Tritiumabtrennung. Da auch die Hilfssysteme nicht verlustfrei, sondern mit Wirkungsgraden η_m , η_h und η_p arbeiten, taucht nur ein Teil der zu ihrem Antrieb verwendeten Energie in der insgesamt vom Kraftwerk abgegebenen Wärmeenergie wieder auf. Diese Gesamtenergie wird in der thermischen Energie-wandlung, zum Beispiel in einem Dampfturbinenprozess, mit dem Wirkungsgrad η_{th} in die elektrische Bruttoenergie E_b umgewandelt. Die nutzbare elektrische Energie E_n ergibt sich daraus nach Abzug des Eigenbedarfes E_e des Kraftwerkes (siehe Abbildung oben).

Vereinfachtes Energieflussdiagramm eines Fusionskraftwerks. Dabei ist:

E_e = energetischer Eigenbedarf des Kraftwerks

E_{th} = thermische Fusionsenergie

E_b = elektrische Bruttoenergie

E_n = nutzbare elektrische Nettoenergie

η_m = Wirkungsgrad der Magnete

η_h = Wirkungsgrad der Plasmaheizung

η_p = Wirkungsgrad der Pumpen, Kühlung

η_{th} = Wirkungsgrad der thermischen Energie-wandlung

Sicherheits- und Umwelteigenschaften der Fusion

Aussagen über Sicherheit und zu erwartende Umwelteinflüsse eines späteren Fusionskraftwerks werden durch Kraftwerksentwürfe möglich, die in den letzten Jahren nahe an die Praxis herangerückt sind. Die Fusionsanlagen der nächsten Generation - zum Beispiel der Internationale Experimentalreaktor ITER - sollen Fusionsleistungen von mehreren hundert Megawatt liefern und entsprechen insofern beinahe schon einem Leistungsreaktor.

Auf Grundlage dieser Arbeiten kann man einem Fusionskraftwerk die folgenden günstigen Eigenschaften zusprechen:

- In einem Fusionskraftwerk ist ein Unfall mit katastrophalen Folgen unmöglich.
- Es gibt es keine Kettenreaktion oder ähn-

liche Leistungsanstiege, die zum „Durchgehen“ des Kraftwerks führen könnten.

- Die auftretenden radioaktiven Substanzen - Tritium sowie aktivierte Bauteile - haben ein relativ niedriges biologisches Gefährdungspotential.

- Langfristig sieht man die Möglichkeit, Menge und Aktivität der entstehenden radioaktiven Stoffe durch geeignete Materialentwicklung ganz erheblich zu vermindern. Nahezu vollständiges Rezyklieren des Abfalls könnte möglich werden.

- Es werden bei der Energieerzeugung keine Treibhausgase freigesetzt, ebensowenig Stick- oder Schwefeloxide.

Weder die von außen zugeführten Rohbrennstoffe - Deuterium und Lithium - noch ihr Reaktionsprodukt Helium sind radioaktiv. Sicherheitsüberlegungen werden jedoch nötig im Zusammenhang mit dem im Kraftwerk erzeugten radioaktiven Tritium. Hinzu kommt die Aktivierung der plasmanahen Bauteile -

insbesondere Brennkammerwand und Brutmantel - durch die bei der Fusion freigesetzten energiereichen Neutronen. Wie intensiv diese Aktivierung ausfällt, hängt sehr stark von den Materialien ab, auf die die Neutronen auftreffen. Anstelle der heute einsetzbaren Stahlsorten werden für die erste Wand und das Blanket spezielle Materialien mit niedrigem Aktivierungspotential entwickelt. Dabei arbeitet man an Stählen ohne störende Beimengungen, wie zum Beispiel Nickel, Kobalt und Molybdän, an Vanadiumlegierungen oder an nichtmetallischen Materialien wie Silizium-Carbid. Durch die Entwicklung geeigneter Baumaterialien und die Verringerung der im Kraftwerk vorhandenen Tritiummenge kann man deshalb bei der Fusion die Gefahr durch radioaktive Stoffe beeinflussen und ganz wesentlich reduzieren. Dies ist anders im Falle der Kernspaltung, wo die anfallende Radioaktivität durch die Spaltprodukte naturgesetzlich mit der erzeugten Energie verknüpft ist und zwangsläufig entsteht.

Tritium, die schwerste und einzige radioaktive Variante des Wasserstoffs, besitzt eine Halbwertszeit von 12,3 Jahren. Durch die Höhenstrahlung entstehen auf natürliche Weise ständig geringe Mengen an Tritium; das Weltinventar wird auf etwa sieben Kilogramm geschätzt. Eine europäische Richtlinie, die radioaktive Stoffe nach ihrer Schadenswirkung in vier Klassen - sehr hohe Radiotoxizität, hohe, mäßige und niedrige - einteilt, ordnet Tritium in Klasse vier ein: niedrige Radiotoxizität. Seine radioaktive Strahlung - Beta-Strahlung, das heißt Elektronen - ist zu energieschwach, um menschliche Haut durchdringen zu können. Für Lebe-



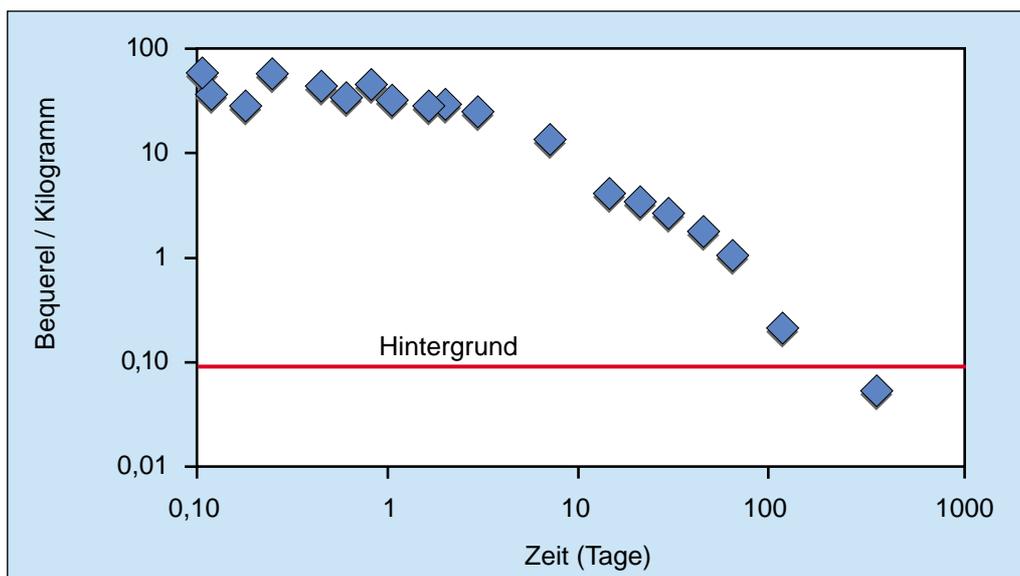
Foto: JAERI, Naka

wesen wird sie schädlich, wenn das Tritium durch Einatmen, Essen, Trinken oder Diffusion durch die Haut vom Körper aufgenommen wird. Einmal in den Körper gelangt, besitzt Tritium dort eine effektive biologische Halbwertszeit von etwa zehn Tagen. Im Ökosystem verdünnt sich Tritium schnell (siehe Abbildung unten) und kann Landstriche nicht für längere Zeit kontaminieren. Ebenso wenig gibt es Anzeichen für eine Tritiumanreicherung in der Nahrungskette.

Radioaktive Belastung im Normalbetrieb

Da das sehr flüchtige Tritium erst an Ort und Stelle im Brutmantel aus Lithium-haltigen Materialien erzeugt wird, läuft der Brennstoff für die Fusion nur im Inneren des Kraftwerks um. Sicherheitstechnisch ist dies von Vorteil. Insgesamt wird ein Fusionskraftwerk einige Kilogramm Tritium enthalten, wovon ein

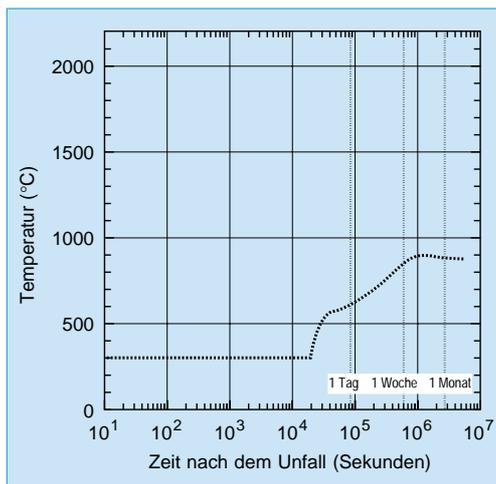
In der Fusionsneutronenquelle FNS in JAERI, Japan, wird unter Neutronenbestrahlung die Aktivierung und Neutronenabschirmung von Fusionsmaterialien untersucht.



Experiment zum Verhalten von Tritium in der Umwelt: Freigesetzt wurden zehn Milligramm Tritium. Die im Boden in einer Tiefe von 0 bis 20 Zentimeter gemessenen Tritiumkonzentration nahmen im Laufe eines Jahres schnell ab.

(Quelle: R.M. Brown et al., Field Studies of HT Oxidation and Dispersion in the Environment II. The 1987 June Experiment at Chalk River; Canadian Fusion Fuels Technology Project, CFFTP-G-88007, Ontario Hydro, Canada, October 1988.)

Temperaturverlauf nach einem Unfall - vollständiger Stromausfall, d.h. Verlust der gesamten Kühlung - im Innern eines Fusionskraftwerks (aus niedrig aktivierbarem Stahl). Die Temperaturen bleiben stets weit unterhalb des Schmelzpunktes von Stahl (etwa 1400 °C).



großer Teil fest in Speichern und Metallen gebunden ist. Sicherheit und Umwelteinflüsse hängen entscheidend von der Rückhaltung des Tritiums im Kraftwerk ab. Hierzu dient ein System von mehrfach überwachten, ineinander geschachtelten Umhüllungen. Nach bisherigen technischen Erfahrungen nimmt man an, dass im Normalbetrieb etwa ein Gramm Tritium pro Jahr aus dem Kraftwerk entweichen kann.

Die von den Fusionsneutronen aktivierten Strukturmaterialien besitzen Halbwertszeiten im wesentlichen zwischen einigen Monaten und einigen Jahren. Sie sind alle als feste Metalle in die innere Kraftwerkskonstruktion eingebunden. Auch Korrosionsprodukte spielen hier keine große Rolle, so dass die aktivierten Bauteile im Normalbetrieb wenig zur Freisetzung von Radioaktivität an die Umwelt beitragen.

Die von allen Freisetzungen an Tritium und aktiviertem Strukturmaterial hervorgerufene radioaktive Belastung führt zu einer Dosis von weniger als einem Prozent der natürlichen radioaktiven Belastung von etwa 2

Millisievert pro Jahr in Deutschland. Sie liegt damit deutlich unterhalb der Dosischwankung der natürlichen Radioaktivität von Ort zu Ort. Berechnet wurde dies für eine Person, die sich ständig in einem Kilometer Entfernung vom Kraftwerk aufhält und alle Nahrungsmittel aus unmittelbarer Kraftwerksumgebung bezieht.

Störfälle

Zukünftige Fusionskraftwerke lassen eine große Sicherheit vor Unfällen erwarten, die die Umgebung gravierend belasten könnten:

Die Brennstoffmenge in der Plasmakammer ist - mit etwa einem Gramm - sehr klein und reicht nur für rund eine Minute Brenndauer aus. Ebenso sind die Leistungsdichten im Plasma und Blanket mit etwa drei bzw. zwanzig Watt pro Kubikzentimeter gering. Sie entsprechen in etwa der Leistungsdichte normaler Glühbirnen.

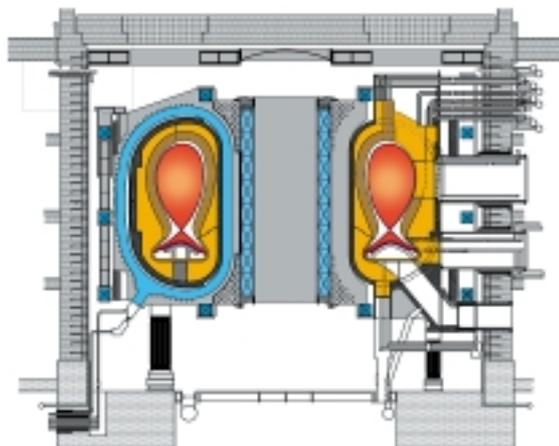
Ein unkontrollierter starker Leistungsanstieg ist nicht möglich, denn jede Änderung der Betriebsbedingungen bringt über Plasmainstabilitäten den Brennvorgang sehr schnell zum Erlöschen.

Auch die Nachwärme nach Abschaltung des Kraftwerks reicht nicht aus, um ganze Bauteile zu schmelzen (siehe Abbildung oben). Das gleiche gilt für die restlichen in der Anlage gespeicherten Energien, wenn man daran festhält, als Brutmaterial kein reines Lithium in flüssiger Form zu verwenden.

Die wichtigste Folgerung aus diesen naturgesetzlich gegebenen Eigenschaften ist: Ein Fusionskraftwerk kann so konstruiert werden, dass es keine Energiequellen enthält, die seine Sicherheitshülle von innen zerstören könnten. Konstruktionsziel kann es damit sein, die Folgen eines Störfalls auf das Innere der Anlage zu beschränken.

In Studien zu möglichen Störfällen und ihren Folgen werden diese grundsätzlichen Eigenschaften genauer untersucht, insbesondere auch im Rahmen des internationalen ITER-Projekts. Viele technische Details des zukünftigen Kraftwerks sind heute noch nicht festgelegt. Die Analysen, deren Ergebnisse die Planung fortwährend beeinflussen, sollen zunächst dazu dienen, mögliche Störfallursachen zu erkennen und durch passive Mechanismen auszuschalten: Eine Gefahrensituation wäre gegeben, wenn durch einen Unfall Tritium oder auch aktiviertes Material der Bauteile - als Metallstaub oder nach längerem Ausfall der Kühlung als

Querschnitt durch ein Fusionskraftwerk. Pläne ähnlicher Art liegen den System- und Sicherheitsstudien zugrunde.

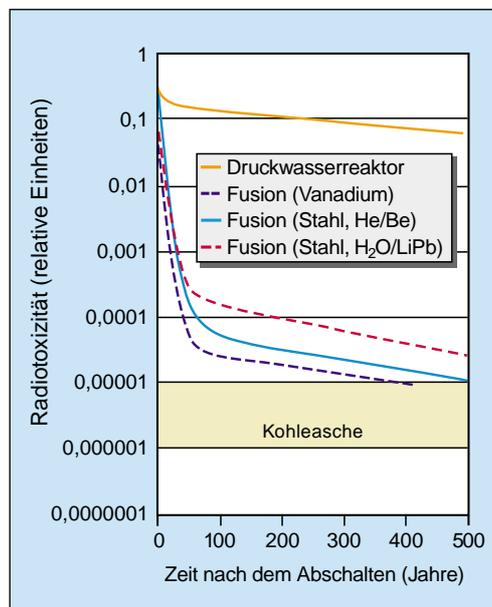


flüchtige Oxide - innerhalb des Gebäudes freigesetzt würden. Es ist heute noch nicht genau bekannt, wieviel festes Material auf diese Weise mobilisiert werden könnte. Grobe Abschätzungen ergeben mehrere Kilogramm Metallstaub. Genauere Daten hierzu soll das ITER-Experiment liefern. Die freisetzbare Tritiummenge will man vor allem durch die Reduktion des insgesamt in der Anlage vorhandenen Tritiums begrenzen sowie durch dessen Unterteilung in getrennte Teilinventare.

Da das Kraftwerk seine Sicherheitshülle von innen nicht durchbrechen kann, hätten diese Unfälle geringe Auswirkungen nach außen. Für die schwersten Unfälle in der Anlage ergeben detaillierte Abschätzungen maximale Dosiswerte in der Höhe der natürlichen radioaktiven Belastung. Die in Deutschland geltenden Richtwerte sowohl für die Genehmigung der Anlage als auch für die Einleitung von Evakuierungsmaßnahmen nach einem Unfall würden also deutlich unterschritten. Für die Anlagengenehmigung gilt in Deutschland ein Dosisgrenzwert von 50 Millisievert für die sogenannten „Auslegungstörfälle“. Dabei wird die sich in fünfzig Jahren ergebende Gesamtdosis der meistbelasteten Person durch alle Einwirkungsmöglichkeiten, d.h. Bestrahlung, Einatmen und Nahrungsaufnahme, unter den ungünstigsten Wetterbedingungen zugrunde gelegt. Eine Evakuierung ist zu erwägen, wenn die Gesamtdosis der am meisten belasteten Person durch Bestrahlung und Einatmen während einer Woche am Ort der höchsten Belastung 100 Millisievert übersteigt.

Auch äußere Einwirkungen - zum Beispiel Erdbeben oder Flugzeugabsturz - werden durch die Sicherheitshülle abgefangen. Es bleibt jedoch eine verschwindend kleine, aber dennoch denkbare Wahrscheinlichkeit, dass eine äußere Katastrophe extremer Stärke eintritt, zum Beispiel ein unvorhersehbar starkes Erdbeben, das die Sicherheitshülle beschädigt. Auch für diesen äußersten, auslegungsübergreifenden Störfall wurden Abschätzungen gemacht: Schadensobergrenze in diesem Fall wäre etwa ein Kilogramm Tritium, das in die Umgebung freigesetzt würde. Bei ungünstigen Wetterbedingungen - d.h. Wind, der konstant aus einer Richtung bläst - könnte dann in einem in Windrichtung orientierten, etwa zwei Quadratkilometer großen Landsektor in der Nähe der Anlage die Belastung bis zu 450 Millisievert betragen (Gesamtdosis der am meisten belasteten Person durch Bestrahlung und Einatmen während

einer Woche). Jenseits dieses Bereiches liegt die Belastung wieder unter dem Evakuierungsrichtwert von 100 Millisievert. Angesichts dieser moderaten Werte ist davon auszugehen, dass die von der äußeren Einwirkung in der Umgebung hervorgerufenen Schäden die durch das Fusionskraftwerk hinzugefügten Schäden um ein Vielfaches übertreffen würden.



Abfall

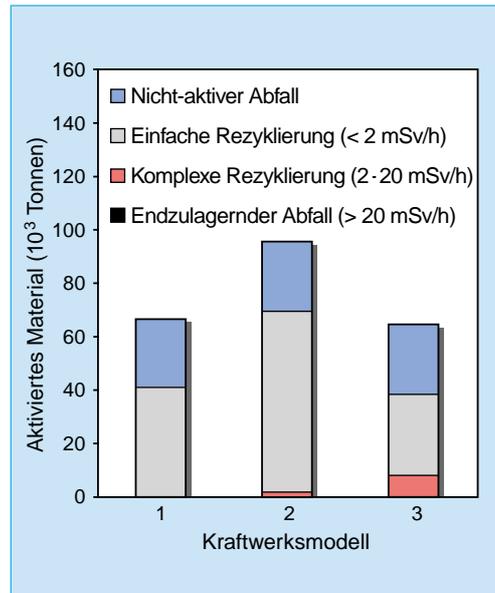
Während der etwa 30jährigen Lebenszeit der Anlage werden der Divertor, die erste Wand und das Blanket aufgrund der hohen Belastung und des Abbrandes mehrfach ausgetauscht werden. Zusammen mit den aktivierten Bauteilen, die nach Betriebsende zurückbleiben, erzeugt ein Fusionskraftwerk je nach Bauart insgesamt zwischen 65 000 und 95 000 Tonnen radioaktiven Materials. Ein Fusionskraftwerk würde damit etwa das gleiche bis doppelte Volumen an radioaktivem Abfall erzeugen wie Spaltreaktoren vergleichbarer Energieerzeugung - je nachdem, ob der Spaltabfall endgelagert oder wieder aufgearbeitet wird. (Keine Entsprechung bei der Fusion gibt es für die pro Spaltkraftwerk anfallenden 1,5 Millionen Kubikmeter Erzreste aus dem Uranabbau. Sie müssen sorgfältig abgedeckt werden, weil sie sonst längerfristig größere Mengen des radioaktiven Gases Radon und radioaktive Stäube freisetzen.)

Die Umwelteigenschaften von Fusions- und Spaltabfall sind jedoch sehr verschieden: So sind die Halbwertszeiten der wesentlichen Fusionsrückstände bedeutend kleiner - ein bis fünf Jahre gegenüber 100 bis 10 000 Jahren

Radiotoxischer Inhalt verschiedener Kraftwerkstypen gleicher elektrischer Energieabgabe, bezogen auf die Nahrungsaufnahme (Ingestion). Aufgetragen ist in relativen Einheiten die zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität nach Stilllegung der Anlage (einschließlich ausgetauschter Bauteile):

- 1) Fusionskraftwerk aus niedrig aktivierbarem Stahl und wassergekühltem Blanket,
- 2) Fusionskraftwerk aus niedrig aktivierbarem Stahl und heliumgekühltem Blanket,
- 3) Fusionskraftwerk aus einer Vanadiumlegierung,
- 4) Druckwasserreaktor und
- 5) Kohlekraftwerk.

Verwertungsmöglichkeiten des Fusionsabfalls für verschiedene Kraftwerksmodelle: Heliumgekühltes Blanket aus Vanadiumlegierung (1), wassergekühltes Blanket aus niedrig aktivierbarem Stahl (2), Heliumgekühltes Blanket aus niedrigaktivierbarem Stahl (3).



im Falle der Kernspaltung. Das biologische Gefährdungspotential oder der radiotoxische Inhalt der Fusionsabfälle klingt rasch ab und ist im Vergleich zu Spaltabfall nach hundert Jahren bereits mehr als tausendfach geringer. Nach hundert bis fünfhundert Jahren ist es vergleichbar mit dem Gefährdungspotential der gesamten Kohleasche aus einem Kohlekraftwerk gleicher Energieerzeugung. (Kohleasche enthält stets natürliche radioaktive Stoffe wie Uran, Thorium und ihre Tochterelemente, allerdings in wesentlich verdünnter Form.)

Von der Gesamtmasse des Fusionsabfalls können nach 50 Jahren 30 bis 40 Prozent unbeschränkt freigegeben werden. Weitere 60 Prozent können nach fünfzig bis hundert Jahren fernbedient rezykliert und in neuen Kraftwerken wiederverwendet werden (siehe Abbildung oben). Längerfristig gelagert werden müssten nach heutigem Wissen lediglich wenige - ein bis einige - Prozent des Materials. Gemäß derzeitiger EU-Regelung müsste das Endlager wegen der vergleichsweise geringen Radiotoxizität wohl nicht tiefer als etwa 50 Meter sein.

Da die Recyclingtechnik für Fusionsabfall noch nicht entwickelt und ihre Wirtschaftlichkeit daher gegenwärtig nicht prüfbar ist, wurden trotz der Möglichkeit, die Materialien wiederzuverwenden, auch ihre Eigenschaften in einem Endlager untersucht. Hier wäre die geringe Nachwärme von Vorteil, da sie eine größere Packungsdichte ermöglicht. Die maximale Nachwärme pro Kilogramm Fusionsabfall ist hundert mal niedriger als bei Spaltabfall. Der Platzbedarf ist also wesentlich geringer.

Es ist noch unbekannt, ob es langfristig gelingen kann, anstelle der Deuterium-Tritium-Fusion andere Fusionsreaktionen wie Deuterium-Deuterium, Deuterium-Helium-3 oder Proton-Bor (siehe Seite 9) technisch nutzbar zu machen. Hier würde die Tritiumherstellung im Kraftwerk und die Neutronenaktivierung noch einmal vermindert werden oder nahezu ganz verschwinden.

Sozio-ökonomische Arbeiten zur Fusion

Auch wenn es bis zur technischen und wirtschaftlichen Einsatzbereitschaft von Fusionskraftwerken noch einige Zeit dauern wird, ist schon heute zu fragen, welche Eigenschaften diese Anlagen besitzen und wie sie sich im Vergleich zu anderen Energiewandlungstechniken darstellen werden. Dabei ist ganz allgemein zu berücksichtigen, dass Energie einer der zentralen Produktionsfaktoren der modernen Volkswirtschaften ist und in ihrer guten oder mangelhaften Verfügbarkeit den Lebensstil einer Gesellschaft grundlegend prägen kann.

Analysen dieser Art sind die Aufgabe der SERF-Aktivitäten (Socio-Economic Research on Fusion), die 1998 im Rahmen des Europäischen Fusionsprogramms ins Leben gerufen wurden. Dazu muss zunächst ein realistisches Bild eines Fusionskraftwerks entwickelt werden. Sodann ist zu beschreiben, wie die zukünftige Energiewirtschaft insgesamt aussehen könnte und welche Rolle insbesondere Umwelt- und Sicherheitseigenschaften darin spielen.

Die Eigenschaften eines künftigen Fusionskraftwerks werden in Systemstudien unter den verschiedensten Fragestellungen, insbesondere Kosten und Umweltaspekte, untersucht. Da das ITER-Experiment einem späteren Kraftwerk bereits sehr nahe kommt, folgen auch aus den Planungen für ITER wesentliche Informationen.

Kosten des Fusionsstroms

Die Stromgestehungskosten der Fusion lassen sich vorerst nur mit großen Unsicherheiten angeben. Die Grundlagen dafür liefern Systemstudien sowie die für den Testreaktor ITER abgeschätzten Kosten. Letztere sind besonders aussagekräftig, weil sie in engem Zusammenwirken mit der Industrie erarbeitet wurden. Zudem werden die Kosten der Fusion stark von den physikalischen und

technischen Fortschritten beeinflusst werden, die in den nächsten Jahrzehnten erzielt werden können.

Die Stromgestehungskosten eines jeden Kraftwerks setzen sich zusammen aus den Investitionskosten, den Betriebs- und Brennstoffkosten sowie den Kosten für den Abbau der Anlage und die Lagerung der Abfälle. Eine Abschätzung der Investitionskosten für die wesentlichen Elemente eines Fusionskraftwerks gibt die Abbildung unten. Zugrunde gelegt sind dabei Annahmen, die mit den heute erreichten Werten gut in Einklang zu bringen sind. Zugleich sind die physikalischen Grenzen bei weitem noch nicht ausgeschöpft, so dass für die Zukunft Raum für Verbesserungen bleibt.

Der Vergleich der Kraftwerkskosten mit den entsprechenden Kosten bei ITER zeigt eine gute Übereinstimmung. Neben den Brennstoffkosten - die bei der Fusion vernachlässigbar niedrig sind - und den reinen Betriebskosten gehören dazu die Kosten für den Austausch des Blankets und der Divertorplatten, die während der Betriebszeit des Kraftwerkes mehrfach ausgetauscht werden müssen. Die Anlagenkosten sind jedoch nicht statisch, sondern sinken mit der Zeit durch sogenannte Lerneffekte. Auch die Anlagengröße spielt eine Rolle: Die spezifischen Kosten sind umso niedriger je größer die Anlagen sind, ebenso wenn zwei Anlagen sich die Infrastruktur teilen. Damit dürften die Stromgestehungskosten der Fusion - die Brennstoffgewinnung, Bau, Betrieb und Abbau des Kraftwerks sowie Lagerung der Rückstände berücksichtigen - bei der zehnten Anlage ihrer Art zwischen sechs und zehn Cent pro erzeugter Kilowattstunde liegen.

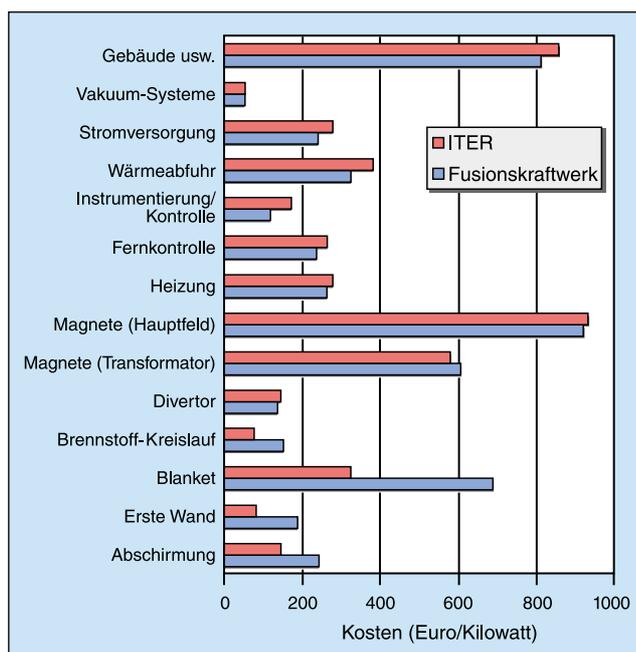
Die Fusion in der künftigen Energiewirtschaft

Die zukünftige Entwicklung der Energiewirtschaft ist aller Wahrscheinlichkeit nach durch eine deutlich steigende Nachfrage von Energie gekennzeichnet. Gründe sind vor allem das Anwachsen der Weltbevölkerung und das stetige Wachstum der wirtschaftlichen Aktivitäten weltweit, das sich wohl über das ganze Jahrhundert erstrecken wird. Steigerungen der Energienachfrage auf das Drei- bis Vierfache des heutigen Wertes scheinen dabei durchaus realis-

tisch zu sein; die Nachfragesteigerung bei elektrischer Energie wird nochmals deutlicher ausfallen.

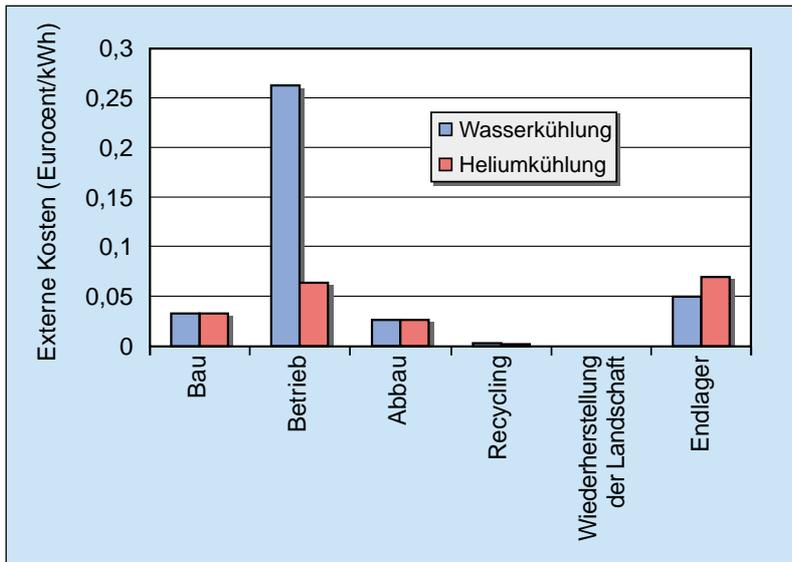
Wie diese Nachfrage unter verschiedenen Randbedingungen befriedigt werden könnte, untersuchte eine detaillierte SERF-Studie des niederländischen Energieinstitutes ECN (Energieonderzoek Centrum Nederland) über die Entwicklung des europäischen Energiemarktes. In einem Rechenmodell wurden Annahmen über die künftige Energienachfrage gemacht, über die Entwicklung der Energieressourcen, über die Entwicklung der Energietechnologien sowie über weitere Faktoren, die den Energiemarkt beeinflussen. Fusionskraftwerke standen in diesem Modell ab dem Jahr 2050 zur Verfügung. Die Dynamik des Modells wird durch eine Optimierung bestimmt, die die Gesamtkosten des Systems minimiert. Dabei werden Kosten, die erst in Zukunft anfallen, diskontiert.

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass Fusion als neue und kapitalintensive Technologie nur dann in den europäischen Markt eindringen kann, wenn eine Randbedingung der Energiewirtschaft ist, dass der Ausstoß des Treibhausgases Kohlendioxid deutlich reduziert werden soll. Dann könnte Fusion im Jahr 2100 etwa 20 bis 30 Prozent des europäischen Strombedarfes decken. Hauptkonkurrenten der Fusion sind dabei Kohle und Kernspaltung. Während ein starker Ausbau von Kohle- oder Kernspaltenergie die Ausbreitung der Fusion verhindern würde, entwickeln sich Fusion und Erneuerbare Energien parallel, was sich durch die sehr



Abschätzung der Investitionskosten für die wesentlichen Elemente eines Fusionskraftwerks.

(Quelle: T.C. Hender et al., Fusion Technology, Vol. 30, 12/1996).



Externe Kosten für die Erzeugung von Fusionsstrom. Mit wenigen Tausendstel Euro pro erzeugter Kilowattstunde liegt die Fusion im Bereich erneuerbarer Energietechniken wie Sonne und Wind.

(Quelle: T. Hamacher et al., Fusion Engineering and Design 56-57, 2001, Seite 95-103)

unterschiedliche Charakteristik der Techniken erklärt: Fusion bedient in erster Linie die Grundlast, wofür Wind- und Sonnenkraftwerke wegen ihrer intermittierenden Leistungsabgabe nicht geeignet sind, solange nicht Speicher mit großer Kapazität zur Verfügung stehen.

Die ECN-Studie zeigt, dass Fusion dort die meisten Marktanteile gewinnen wird, wo die geforderte Reduktion der Treibhausgase am striktesten ist. Zwar werden kurz- und mittelfristig Kohlendioxid-Einsparungen möglich, indem Kohle durch Gas ersetzt wird. In der zweiten Jahrhunderthälfte müssen die Gaskraftwerke aber ersetzt werden, wofür sich die Fusion anbietet. Im globalen Blickwinkel wird die Bedeutung der Option Fusion noch deutlicher: In Ländern wie Indien und China sind in den nächsten Jahrzehnten fast nur Kohlekraftwerke geplant. Kraftwerke und Infrastruktur sind auf Lebenszeiten von 30 bis

40 Jahren ausgelegt - zu dieser Zeit soll das Fusionsdemonstrationskraftwerk DEMO mit der Stromerzeugung beginnen.

Fusion in einer nachhaltigen Energiewirtschaft

Wie lassen sich die Umwelt- und Sicherheitsaspekte eines Fusionskraftwerks (siehe Seite 28) mit den Umwelt- und Sicherheitseigenschaften anderer Energiewandlungstechniken vergleichen? Einen möglichen Ansatz liefert das europäische „ExternE“-Projekt, das mit der Bestimmung der sogenannten „externen Kosten“ unterschiedlicher Technologien eine erste Vergleichsgrundlage schafft. Dabei versteht man unter externen Kosten all jene, die nicht von den eigentlichen Marktteilnehmern getragen werden. Zum Beispiel ist in dem Preis für ein Flugticket, das ein Fluggast kauft, keine Entschädigung für die Anwohner des Flughafens wegen Lärmbelästigung enthalten. Ebenso verursachen die Emissionen von Kraftwerken möglicherweise erhebliche Gesundheitsbeeinträchtigungen, die zwar vom Gesundheitswesen, nicht aber von den Stromkunden bezahlt werden.

Die ExternE-Methode versucht nun, alle Nebenwirkungen einer Energiewandlungstechnik aufzuspüren, ihre Auswirkungen zu beschreiben und schließlich monetär zu bewerten. Als Beispiel können die Schwefel-emissionen eines Kohlekraftwerkes dienen: Zuerst ist zu analysieren, wie viel Schwefeldioxid den Schornstein des Kraftwerkes verlässt, wie sich die Substanz ausbreitet und wo sie niedergeht. Sodann werden die Auswirkungen - Gesundheitsschädigung beim Menschen, Schäden an Fassaden, Auswirkungen auf die Ernte oder einen Wald, etc. -

Leistungsvermessung an einem Solarkraftwerk. Die Stromerzeugungskosten neuer Energiequellen wie Photovoltaik oder Fusion liegen etwas höher als die heutiger Techniken.



Foto: RWE

analysiert. Im letzten Schritt werden diese Schäden dann monetär bewertet. Für die Beeinträchtigung der Ernte ist dies einfach: der Geldwert des Ernteverlustes. Schwieriger ist es, Auswirkungen auf den Menschen oder ein Biosystem zu bewerten. In einem pragmatischen Ansatz versucht man den „Wert“ eines menschlichen Lebens abzuschätzen, indem man untersucht, was Menschen bereit sind auszugeben, um die Wahrscheinlichkeit eines tödlichen Unfalls herabzusetzen. Ebenso untersucht man Gehaltsstrukturen von Arbeitsplätzen mit erhöhtem Unfallrisiko um so herauszufinden, wie viel Geld ein Arbeitnehmer als Ausgleich für ein höheres Todesrisiko verlangt.

Um die verschiedenen Kraftwerksarten - Kohle, Erdgas, Kernspaltung, Biomasse, Wasser-, Wind- und Solarenergie sowie Fusion - zu vergleichen, wurden alle Auswirkungen im Brennstoff- und Lebenszyklus der jeweiligen Anlagen untersucht. Für die Fusion erstreckte sich diese Analyse von der Gewinnung der Rohbrennstoffe Deuterium und Lithium über die eigentliche Betriebsphase des Kraftwerks bis zur Lagerung der radioaktiven Reststoffe. Die Ergebnisse für



Foto: Norma Neuheiser, UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle

die Fusion - externe Kosten im Bereich weniger Zehntel Cent pro erzeugter Kilowattstunde - sind vielversprechend (siehe Abbildung links). Bezüglich der externen Kosten kann die Fusion damit leicht mit erneuerbaren Energietechniken wie Sonne und Wind konkurrieren.

Mit der ExternE-Methode versucht man, Nebenwirkungen einer Energiewandlungstechnik - hier der Landschaftsverbrauch durch die Braunkohlegewinnung - monetär zu bewerten und so vergleichbar zu machen.

Kernfusion - eine internationale Gemeinschaftsaufgabe

Fusionsforschung in Europa

In Deutschland liegt der Schwerpunkt der Fusionsforschung bei der „Entwicklungsgemeinschaft Kernfusion“. Von dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und dem Forschungszentrum Karlsruhe gegründet, werden hier arbeitsteilig Plasmaphysik (IPP) und Fusionstechnologie (FZK) untersucht. Seit 2000 ist auch das Forschungszentrum Jülich Mitglied. Die drei Institute sind zudem im „Programm Kernfusion“ der Helmholtz-Gemeinschaft organisiert. Beiträge zum deutschen Fusionsprogramm liefern außerdem zahlreiche Universitäten.

Die deutsche Fusionsforschung ist seit

ihren Anfängen Teil eines europäischen Forschungsverbundes, in dem die Fusionszentren der Europäischen Union und der Schweiz mit etwa 2000 Wissenschaftlern und Ingenieuren zusammengefasst sind. Koordiniert von der Europäischen Atomgemeinschaft EURATOM mit Sitz in Brüssel, stellen die Partner das europäische Programm auf, beteiligen sich an seiner Finanzierung und kontrollieren seine Ausführung in den arbeitsteilig forschenden nationalen Laboratorien (Abbildung Seite 39). Zusätzlich betreibt Europa seit 1983 ein gemeinsames Großexperiment, den „Joint European Torus“ (JET) im englischen Culham. Dieses weltweit größte Fusionsexperiment hat die Aufgabe, ein Plasma in der Nähe der Zündung zu untersuchen.

Neben dem europäischen Fusionsprogramm existieren weltweit noch drei weitere