

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 Energiewandlungs-technik - 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

eigenständige große Programme in den USA, in Japan sowie in der Gemeinschaft Unabhängiger Staaten (GUS). In kleinerem Umfang betreiben auch andere Länder - so Australien, China und Südkorea - Fusionsforschung. Zwischen den Programmen gibt es zahlreiche Wechselwirkungen. Herausragend ist dabei die seit 1988 bestehende Zusammenarbeit der großen Fusionsprogramme, die gemeinsam den nächsten großen Schritt in der Fusionsforschung, den internationalen Testreaktor ITER planen, der erstmals ein längere Zeit energielieferndes Plasma erzeugen soll.

Historischer Überblick

1929 vermuteten Atkinson und Houtermans, dass Verschmelzungsreaktionen leichter Atome die Energiequelle von Sonne und Sternen seien. Als die Teilchenbeschleuniger genügend hohe Energien erreichen konnten, um im Laboratorium leichte Kerne zur Reaktion zu bringen, gelang es 1934 Rutherford, die Fusion von Deuteronen nachzuweisen. 1939 waren die Kenntnisse bereits so weit gediehen, dass Bethe und Weizsäcker eine quantitative Beschreibung des Fusionszyklus der Sonne geben konnten. Erste Untersuchungen mit dem Ziel, die Kernverschmelzung zur Energiegewinnung auf der Erde nutzbar zu machen, begannen Ende der 40er Jahre, vor allem in den USA, Russland und Großbritannien.

Blickt man von einem der modernen Fusionsexperimente zurück in diese Vergangenheit, so nehmen sich die Anfänge der Fusionsforschung sehr bescheiden aus: Die Plasmen der ersten Experimente waren mit wenigen Litern klein, die Magnet- und Vakuumtechnik war nicht entwickelt, experimentelle Erfahrung und theoretisches Verständnis des Plasmaverhaltens fehlten ebenso wie leistungsfähige Heizapparaturen, ausgefeilte Messverfahren zum Beobachten und schnelle Computer zum Berechnen des komplexen Plasmaverhaltens.

Es ist daher wenig verwunderlich, dass die ersten Einschätzungen

des physikalisch-technischen Problems der Aufgabe nicht gerecht wurden: Wenige Jahre hielt 1952 das für Fusion zuständige amerikanische Kontrollgremium für ausreichend, um zu entscheiden, ob die Kernfusion realisierbar sei. Nur vier experimentelle Schritte sah das Fusionsprogramm des amerikanischen Fusionsforschers Lyman Spitzer in Princeton vor: Der Erfinder des Stellarators wollte mit einem ersten Experiment, Modell A genannt, ein ein Millionen Grad heißes Stellaratorplasma untersuchen. Die kleine Anlage, die auf einem Labortisch Platz fand, ging 1952 in Betrieb. Auf die jeweils größeren und leistungsfähigeren Modelle B und C sollte Modell D folgen, das bereits energieliefernde Fusionskraftwerk. Im Unterschied zu dem ambitionierten Princetoner Programm war man andernorts bescheidener. In Los Alamos zum Beispiel war bereits der Name des dort geplanten Experiments - Perhapsatron („Vielleicht-Maschine“) - Ausdruck dieser Vorsicht.

Tatsächlich zeigten sich bald massive Schwierigkeiten und die Hoffnung auf einen schnellen Durchbruch musste aufgegeben werden. Neben normalen technischen Rückschlägen zeigten sich grundlegende Probleme: Zum Beispiel waren die Plasmen durch Wandmaterial stark verunreinigt; die erwarteten Gesetze der klassischen stoßbedingten Diffusion galten überraschend nicht, d.h. die Plasmateilchen verließen den Magnetkäfig wesentlich schneller, als vorhergesehen und überdies zeigten sich eine ganze Reihe verschiedenster Instabilitäten, die den magnetischen Einschluss zerstörten. Ende der 50er Jahre setzte sich daher die Erkenntnis durch, dass zur Entwicklung der Fusion ein Langzeitprogramm mit intensiver Grundlagenforschung nötig sei. Die theoretischen und experimentellen Arbeiten wurden nun sehr breit angelegt und mit einer Vielzahl von Anlagentypen - lineare und ringförmige Pinche verschiedenster Bauart, Stellaratoren, Multipole, Spiegelmaschinen, usw. - experimentiert. Schwerpunkt war zunächst die Suche nach geeigneten Magnetfeldkäfigen, die ein Plasma stabil und wärmeisoliert einschließen können. In Deutschland begannen Überlegungen zu einer Ausweitung der Fusionsforschung Ende der 50er Jahre.

Trotz beachtlicher Kenntnisfortschritte blieben die experimentellen Resultate während der 60er Jahre weltweit unbefriedigend: Fast alle Anlagentypen litten unter Instabilitäten und zeigten einen zu starken Teilchenverlust - die berühmte Bohm-Diffusion. Eine der wenigen Ausnahmen war

WENDELSTEIN 1a,
der erste Stellarator
im IPP, ging 1960 in
Betrieb (vorne),
rechts hinten:
WENDELSTEIN 1b,
links: **WENDELSTEIN 4.**





Fusionslaboratorien in Europa

- | | |
|--|---|
| <p>1 Niederlande
- Instituut voor Plasmafysica, Nieuwegein
- NRG (Energy Research Foundation ECN - KEMA)</p> <p>2 Culham Laboratory, United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA), Abingdon, Großbritannien</p> <p>3 Irland
- Universität Dublin, Irland
- Dublin Institute for Advanced Studies
- University College Cork,</p> <p>4 EFDA - The European Fusion Development Agreement, Garching, Deutschland</p> <p>5 ITER - European Joint Work Site, Garching, Deutschland</p> <p>6 Belgien
- Ecole Royale Militaire, Plasma Physics Laboratory, Brüssel
- Université Libre de Bruxelles
- Centre d'étude de l'Energie Nucléaire, Mol</p> <p>7 Le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), Département de Recherches sur la Fusion Contrôlée, Cadarache, Frankreich</p> <p>8 Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente (ENEA), Italien
- Centro Ricerche Energia, ENEA, Frascati
- Istituto di Fisica del Plasma, CNR, Mailand
- Consorzio RFX, Padua</p> <p>9 Naturvetenskapliga Forskningsrådet, Stockholm, Schweden
- Royal Institute of Technology, Alfvén Laboratory, Stockholm
- Chalmers University of Technology, Göteborg</p> <p>10 National Technology Agency (TEKES), Helsinki, Finnland</p> <p>11 Risø National Laboratory, Roskilde, Dänemark</p> <p>12 Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Deutschland
- Garching
- Teilinstitut Greifswald</p> | <p>- Bereich Berlin</p> <p>13 Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Plasmaphysik, Jülich, Deutschland</p> <p>14 Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Programm Kernfusion, Karlsruhe, Deutschland</p> <p>15 Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Schweiz</p> <p>16 Österreichische Akademie der Wissenschaften (ÖAW), Wien
- Technische Universität Wien
- Universität Innsbruck
- Österreichisches Forschungszentrum, Seibersdorf
- Technische Universität Graz</p> <p>17 Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Madrid, Spanien</p> <p>18 Instituto Superior Técnico, Technische Universität Lissabon, Lissabon, Portugal.</p> <p>19 Griechenland
- National Technical University of Athens, Athen
- Demokritos, National Centre for Scientific Research, Athen
- The University of Ioannina, Greece
- Foundation for Research and Technology - Hellas</p> <p>20 The Hungarian Academy of Sciences, Budapest, Ungarn
- Budapest University of Technology and Economics, Budapest</p> <p>21 Tschechien
- Academy of Sciences of the Czech Republic, Prag
- Czech Technical University, Prag
- Charles University Prag
- J. Heyrovsky Institute of Physical Chemistry, Prag</p> <p>22 Agentia Nationala pentru Stiinta, Tehnologie si Inovare, Rumänien</p> |
|--|---|

der kleine WENDELSTEIN-Stellarator in Garching, das „Munich mystery“. Ende der 60er Jahre meldeten dann sowjetische Fusionsforscher außerordentlich gute Ergebnisse ihres Tokamak-Experimentes T3. Die russische Erfindung sollte wesentlich bessere Einschluss- und Stabilitätseigenschaften besitzen als alle bisherigen Konfigurationen. Auch die erreichten Plasmatemperaturen waren erheblich höher. Nach anfänglichen Zweifeln an den russischen Angaben bestätigte ein englisches Team, das nach Russland gereist war und nachgemessen hatte, die Angaben. Diesem Wissenschaftlerteam stand ein damals neues Hilfsmittel zur Bestimmung von Temperatur und Dichte im Plasma zur Verfügung - ein leistungsstarker Laser. Die Bestätigung war der Auslöser für ein weltweites Tokamak-Fieber. Schnell entstanden überall neue Tokamaks. Auch das bisherige Stellaratorzentrum der USA, Princeton, stellte sich um und verwandelte seinen glücklosen C-Stellarator in einen Tokamak.

Die gewonnenen Erfahrungen führten schließlich in den 70er Jahren zu einer

Konzentration der Arbeitsgebiete und zu größeren, leistungsstärkeren Experimenten. Der Tokamak setzte sich dabei als weltweit führender Experimenttyp durch. Mit seiner Hilfe wurden zunächst die zentralen physikalischen Fragen - insbesondere Einschluss und Aufheizung eines Fusionsplasmas - untersucht. Ein wesentlicher Erfolg war 1982 die Entdeckung des H-Regimes - ein Plasmazustand mit besonders guter Wärmeisolation - am Tokamak ASDEX in Garching. Große Tokamakexperimente wurden während der folgenden Jahrzehnte in den USA, Japan und vor allem in Europa gebaut, wo JET, der Joint European Torus, 1983 in Betrieb ging. 1991 gelang es hier, in einem zunächst noch „verdünnten“ Deuterium-Tritium-Plasma über ein Megawatt an Fusionsleistung zu erzeugen. Zum zweiten Mal gelang dies Ende 1993 mit dem amerikanischen Fusionsexperiment TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) in Princeton, das rund sechs Megawatt Fusionsleistung freisetzte und sich später auf zehn Megawatt steigern konnte. 1997 schließlich gelang JET die Erzeugung von 14 Megawatt

Wichtigste laufende und geplante Fusionsexperimente des Europäischen Fusionsprogramms

Experiment	Typ	Laboratorium	Aufgabe	Betriebsbeginn
JET	Tokamak	Europäisches Gemeinschaftsunternehmen	Plasmaphysik in der Nähe der Zündung	1983
TEXTOR-94	Tokamak	Forschungszentrum Jülich (D)	Plasma-Wand-Wechselwirkung	1982
TORE SUPRA	Tokamak	CEA Cadarache (F)	Test supraleitender Spulen, stationärer Betrieb	1988
FT-Upgrade	Tokamak	ENEA Frascati (I)	Plasmaphysik bei hohen Dichten	1989
ASDEX Upgrade	Tokamak	IPP Garching (D)	Plasmaphysik unter kraftwerksähnlichen Bedingungen, ITER-Vorbereitung	1991
WENDELSTEIN 7-AS	Stellarator	IPP Garching (D)	Test der Prinzipien des „Advanced Stellarator“	1988
WENDELSTEIN 7-X (im Bau)	Stellarator	IPP-Teilinstitut Greifswald (D)	Test der Kraftwerkstauglichkeit des „Advanced Stellarator“	ca. 2010
ITER (geplant)	Tokamak	Internationales Gemeinschaftsunternehmen	Testreaktor, brennendes Plasma, Technologie-Erprobung	ca. 2014

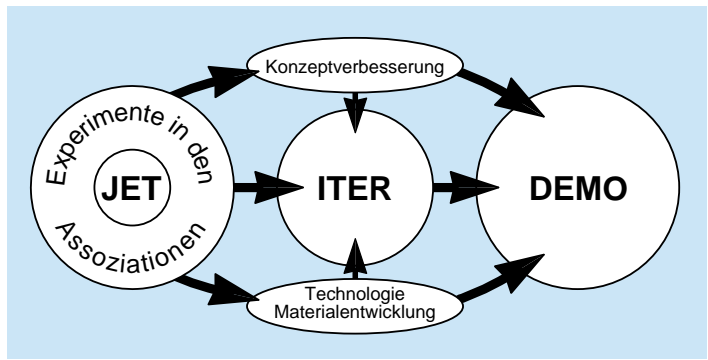
Fusionsleistung für zwei Sekunden; 65 Prozent der zum Heizen aufgewandten Leistung wurden dabei per Fusion zurückgewonnen.

Neben den Tokamaks wurde in geringerem Umfang auch mit anderen Experimententypen gearbeitet, von denen sich in den letzten Jahren der Stellarator als besonders leistungsfähig erwiesen hat.

Nach dem schweren Rückschlag für die Stellaratoren in den 60er Jahren konnte 1980 das Experiment WENDELSTEIN 7-A weltweit zum ersten Mal das Stellaratorprinzip erfolgreich mit einem heißen Plasma demonstrieren. „Garching shows stellarators may be good after all“, meinte damals die Zeitschrift „Physics Today“: „Stellarators appear to be back in business.“ Aufbauend auf diesen Erfolgen wird im IPP das Experiment WENDELSTEIN 7-AS betrieben, das 1988 in Betrieb ging. Der verbesserte Nachfolger WENDELSTEIN 7-X, der die Kraftwerkstauglichkeit der Stellaratoren zeigen soll, entsteht gegenwärtig im IPP-Teilinstitut Greifswald. Er soll die Stellaratoren als leistungsfähige Alternative auf das Niveau der bislang bevorzugten Tokamaks heben. Gelingt dies, dann könnte das Demonstrationskraftwerk, das auf den in internationaler Zusammenarbeit geplanten Tokamak-Experimentalreaktor ITER folgen soll, auch ein Stellarator sein.

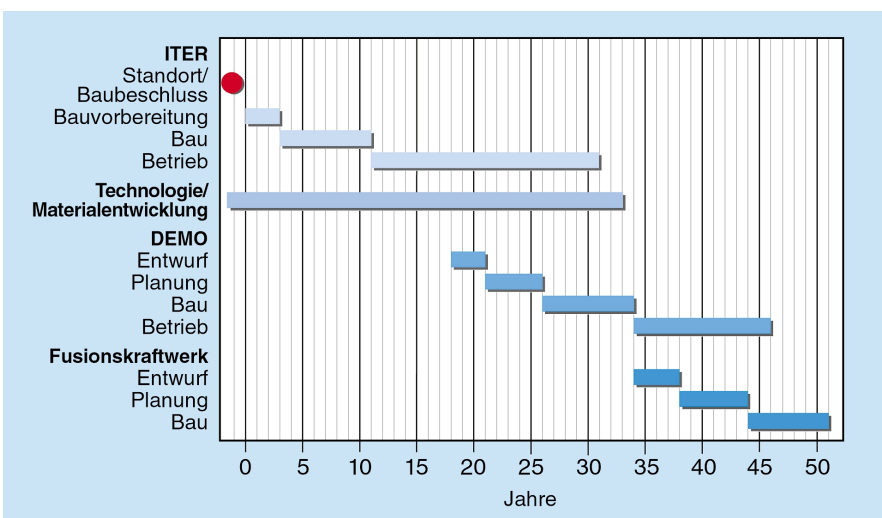
Nachdem die großen Fortschritte der Plasmaphysik in den letzten Jahren die physikalischen Probleme eines Fusionskraftwerks als lösbar erscheinen lassen, wird die Bearbeitung technischer Fragestellungen verstärkt. Schlüsselprobleme sind hier Materialentwicklung und Konzeption der „ersten“, das Plasma unmittelbar umgebenden Wand, die Entwicklung geeigneter Blanketmaterialien und der Tritiumtechnologie sowie der Bau großer supraleitender Magnete. Ebenso wichtig ist die Erforschung der Sicherheits- und Umweltfragen der Fusion. Diese technologischen Fragen werden in Europa in einem eigenen Technologieprogramm bearbeitet sowie in Zusammenhang mit der weltweiten ITER-Zusammenarbeit. ITER soll zeigen, dass es physikalisch und technisch möglich ist, durch Kernverschmelzung Energie zu gewinnen.

Parallel zu ITER wird an der Verbesserung



Die Struktur des Europäischen Fusionsprogrammes

des zugrundeliegenden Tokamakkonzeptes - vor allem in Hinblick auf den Dauerbetrieb - gearbeitet. Zusammen mit den Ergebnissen der Stellaratorforschung werden diese Arbeiten sowie die experimentellen Erfahrungen mit einem brennenden Plasma, die ITER liefern soll, dann in die Planung des Demonstrationskraftwerks DEMO einfließen. Er soll bereits alle Funktionen eines energiegewinnenden Kraftwerks erfüllen, ohne allerdings wirtschaftlich arbeiten zu müssen. Falls die Fusionsforschung nach diesem Plan voranschreitet, könnte - angesichts der für ITER und seinen Nachfolger DEMO nötigen Planungs-, Bau- und Betriebszeit - die Fusionsenergie etwa in der Mitte des Jahrhunderts wirtschaftlich nutzbar sein.



Zeitplan der Fusionsforschung beginnend mit dem Baubeschluss für ITER über DEMO bis zum ersten Fusionskraftwerk