Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 66 (1975)

Heft: 5

Artikel: Kernfusion : Energiequelle der Zukunft?

Autor: Knoepfel, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915264

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

4. Wirtschaftlichkeitsstudien

Förderversuche (Dauerbetrieb), Rentabilitätsberechnungen.

Der Verfasser ist der Ansicht, dass die Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein nutzbarer geothermischer Energieträger in der Schweiz mindestens so gross ist wie für Kohlenwasserstoffe (Erdöl, Erdgas), deren Prospektion gerade gegenwärtig energisch vorangetrieben wird.

Literatur

[1] *L. Rybach* (1973): Wärmeproduktionsbestimmungen an Gesteinen der Schweizer Alpen. Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Ser. 51.

[2] *A. L. Hammond, W. D. Metz* und *T. H. Maugh* (1974): Energie für die Zukunft. Umschau-Verlag, Frankfurt a. M.

[3] *G. Marinelli* (1974): L'énergie géothermique. La Recherche *49*, 827.

[4] *W. Kertz* (1974): Kann Erdwärme unseren Energiebedarf decken? Umschau *74*, 661.

[5] *P. Kruger* und *C. Otte* (1973: Geothermal Energy, p. 167. Stanford University Press.

[6] *S. P. Clark* und *E. Jäger* (1969): Denudation rate in the Alps from geochronologic and heat flow data. Am. J. of Sci. *267*, 1143.

[7] *R. v. Herzen, P. Finckh* und *K. J. Hsü* (1974): Heat-flow measurements in Swiss lakes. J. Geophys. *40*, 141.

[8] *J. Cadisch* (1931): Zur Geologie der Schweizer Mineral- und Thermalquellen. Verh. Natf. Ges. Basel *42*, 138.

[9] *L. Rybach* (1975): Geothermik, allgemeine und angewandte Aspekte. Neue Zürcher Zeitung, Beilage Forschung und Technik (im Druck).

[10] *K. Lemcke* und *W. Tunn:* (1956): Tiefenwasser in der süddeutschen Molasse und in ihrer verkarsteten Malmunterlage. Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u. Ing. *23*, 35.

Adresse des Autors:

Dr. *L. Rybach*, Privatdozent, Institut für Geophysik, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Postfach 266, 8049 Zürich.

Kernfusion – Energiequelle der Zukunft?

Von H. Knoepfel

Im nachstehenden Bericht, der in ähnlicher Form in der «Neuen Zürcher Zeitung» (27. Mai 1974) erschienen ist, werden die hauptsächlichen Forschungsrichtungen bei der Kernfusion erläutert und wird insbesondere auf die beiden wichtigsten Arbeitslinien, den Tokamak und die Trägheitseinschlußsysteme, näher eingegangen. Obschon noch viele Probleme ungelöst sind und auch nicht vorausgesagt werden kann, ob eine zufriedenstellende Lösung dieser Probleme überhaupt grundsätzlich möglich ist, können aus den bis heute erzielten Forschungsergebnissen doch einige Zukunftsperspektiven abgelesen werden. Die bis anhin noch zu überwindenden Schwierigkeiten werden erläutert.

Le rapport ci-dessous paru dans la Neue Zürcher Zeitung du 27 mai 1974 expose les visées essentielles de recherches dans le domaine de la fusion nucléaire et notamment dans les deux directions essentielles du Tokamak et des systèmes du confinement inertiel. Bien que de nombreux problèmes soient encore sans solution et que l'on ne puisse même prévoir s'ils sont susceptibles d'une solution satisfaisante, les résultats obtenus jusqu'ici permettent cependant d'en espérer quelque avenir. Les difficultés à vaincre jusque-là sont évoquées.

1. Einleitung

Die Verschmelzung leichter Atomkerne unter kontrollierten Bedingungen – im folgenden kurz *Fusion* genannt – stellt eine potentielle Energiequelle dar, die für die langfristige Deckung des Energiebedarfs der Weltbevölkerung grosse Bedeutung erlangen könnte. Für die praktische Energiegewinnung muss der aus *schwerem Wasserstoff*, namentlich Deuterium und Tritium, bestehende Fusionsbrennstoff auf Temperaturen von mindestens 10 keV gebracht werden, bei denen er sich im *vollionisierten Plasmazustand* befindet. (Die Temperaturen werden in der Fusion üblicherweise in Einheiten der mittleren kinetischen Energie ausgedrückt, wobei folgender Zusammenhang gilt: 1 keV [Kiloelektronvolt] = 11,4 Millionen Grad Celsius.) Systematische Untersuchungen auf dem auf die Fusion ausgerichteten Gebiet der Hochtemperatur-Plasmaphysik werden seit nahezu 25 Jahren durchgeführt. Schon ab Anfang der fünfziger Jahre arbeiteten Forscher in den *Vereinigten Staaten*, in der *Sowjetunion* und in *Grossbritannien* unter strenger Geheimhaltung am Problem der gesteuerten Kernfusion. Erst als sich das Problem viel schwieriger erwies, als erwartet worden war, begann ab 1956 die Veröffentlichung der bereits durchgeführten Arbeiten. Diese Periode erreichte ihren spektakulären Höhepunkt 1958 an der zweiten internationalen Konferenz in Genf über die friedliche Anwendung der Kernenergie, an der die USA dem breiten Publikum einen Grossteil ihrer Fusionsexperimente im Betrieb vorstellten. In dieser Zeit wurde die Fusion auch in verschiedenen europäischen Staaten aufgegriffen. In dieser Hinsicht verdient die von 1957 bis 1960 wirkende «*CERN Study Group on Nuclear Fusion*» erwähnt zu werden, die sich um die Förderung und um die Koordination der im Entstehen begriffenen europäischen Fusionsforschung sehr bemühte. Diese Rolle wurde dann von *Euratom* übernommen, der auch heute die Koordination und die Förderung der Fusion innerhalb der Europäischen Gemeinschaft obliegt.

In der *Schweiz* wurden Vorschläge für eine Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet schon 1956 von einigen jungen Mitarbeitern am Physikalischen Institut der ETH unterbreitet. Trotz der tatkräftigen Unterstützung durch den damaligen Institutsleiter *Prof. Paul Scherrer* gelang es aber nicht, diese neue Tätigkeit damals zu beginnen. Erst später (1961) wurde dann in Lausanne mit der Unterstützung verschiedener Persönlichkeiten aus Industrie und Forschung, insbesondere Prof. Hans Staubs, und mit finanziellen Beiträgen des Schweizer Nationalfonds ein Plasma-Laboratorium gegründet, das nun der ETH Lausanne angegliedert wurde.

Nach einer nahezu 25jährigen Anstrengung, die trotz den Rückschlägen und den sich auftürmenden Schwierigkeiten immer von einem bemerkenswerten Optimismus begleitet war, kann man heute vom Beginn einer *neuen entscheidenden Phase in der Fusionsforschung* sprechen.

2. Fusionsplasma

2.1 Fusionsenergie

Die Fusionsenergie ergibt sich aus der Verschmelzung einiger leichter Atomkerne. Unter den wichtigsten Kernreaktionen, die praktisch in Frage kommen, sind zu erwähnen:

$D + D \rightarrow {}^3He\ (0{,}82\ MeV) + n\ (2{,}45\ MeV)$
$D + D \rightarrow T\ (1{,}01\ MeV) + p\ (3{,}03\ MeV)$
$D + T \rightarrow {}^4He\ (3{,}52\ MeV) + n\ (14{,}06\ MeV)$
$D + {}^3He \rightarrow {}^4He\ (3{,}67\ MeV) + p\ (14{,}67\ MeV)$

Die Fusionsenergie wird in Form von *kinetischer Energie der Reaktionsprodukte* frei (in Klammern ist jeweils der zugehörige Anteil angegeben). Zum Beispiel wird die bei der Verschmelzung von einem Deuteron ($D \equiv {}^2H$) mit einem Triton ($T \equiv {}^3H$) freigesetzte Kernenergie zu 80 % vom entstehenden Neutron fortgetragen. Zweck und Ziel der Fusionsforschung ist es, Anordnungen zu bestimmen, in denen ein Wasserstoffplasma so aufgeheizt werden kann, dass genügend Fusionsreaktionen eingeleitet werden, um eine ökonomische Leistungsausbeute zu sichern. Die Häufigkeit (Reaktionsrate), mit der bei sonst gleichen Bedingungen eine der oben erwähnten Kernreaktionen stattfindet, ist dem in Fig. 1 angegebenen Reaktionsparameter proportional. Der Vorteil des Brennstoffs, bestehend aus Deuterium und Tritium (dafür wird im folgenden der Ausdruck *DT-Brennstoff* benützt), ist damit einleuchtend. Dies ist auch der Grund, weshalb heute im wesentlichen nur der DT-Zyklus für einen Fusionsreaktor in Frage kommt, da Deuterium allein mit seiner etwa 200mal kleineren Reaktionsrate als Fusionsbrennstoff, trotz verschiedenen Vorteilen, noch nicht zu gebrauchen ist.

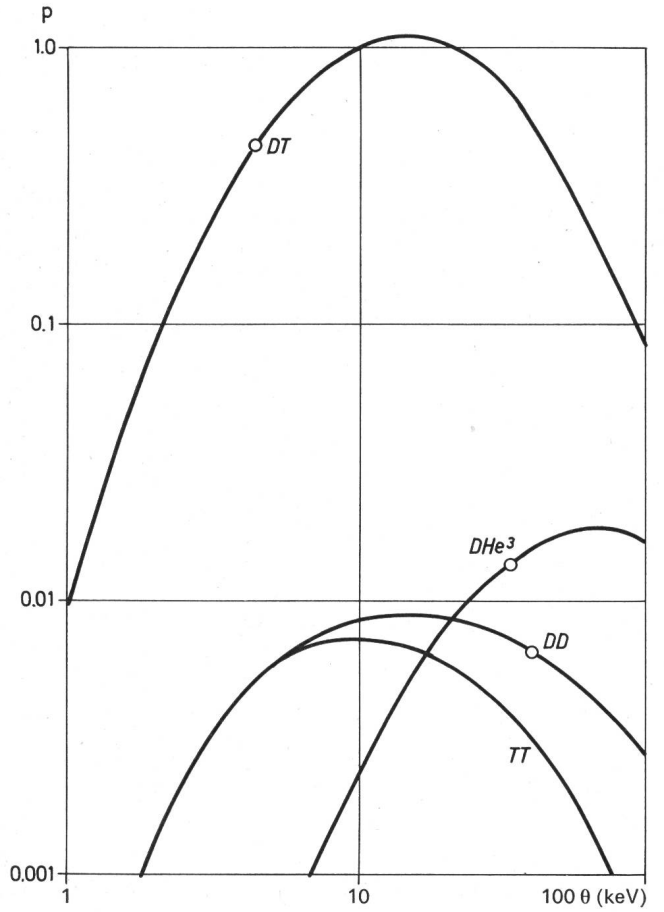

Fig. 1 Reaktionsparameter p der wichtigsten Fusionsbrennstoffe, in willkürlichen Einheiten, in Abhängigkeit der Plasmatemperatur in keV

Die Kreise auf den Kurven entsprechen den minimalen Temperaturen, bei denen eine Zündung des Plasmas noch möglich ist (beim TT-Brennstoff liegt die Zündtemperatur bei über 100 keV)

2.2 Betriebsbedingungen

Wichtige allgemeine Fusionsbedingungen werden durch die über der *Einschlusszeit* τ des Plasmas berechneten Energiebilanz bestimmt. Auf der einen Seite steht die freigesetzte *Kernenergie* zu Buche, anderseits die *Verluste* und die Energie, die zur *Aufheizung* des Plasmas nötig ist. Etwas realistischer werden diese Betrachtungen, wenn sie, versehen mit den jeweils nötigen thermischen Wirkungsgraden, auf geschlossene Reaktorsysteme angewendet werden. Die einfachste derartige Bilanz (sie berücksichtigt als Verluste aber nur die Bremsstrahlung) wurde von Lawson aufgestellt. Um einen positiven Reaktorbetrieb mit DT-Brennstoff zu ermöglichen, folgt daraus eine Bedingung *(Lawson-Kriterium)* in bezug auf das Produkt aus *Teilchendichte* η und *Energieeinschlusszeit* τ,

$$\eta\tau \gtrsim 10^{20}\ s/m^3,$$

wobei sich gleichzeitig die *Temperatur* in der Umgebung des Betriebsoptimums befinden soll (15 keV aus Fig. 1). Dieses Kriterium kann nur als grober Markstein dienen, da er wesentliche Verlustterme unberücksichtigt lässt. Genauere Abschätzungen bezüglich eines quasistationären Fusionsreaktors ergeben $\eta\tau$-Minimalwerte, die über eine Grössenordnung höher sind.

2.3 Verlustprozesse

Einige der wichtigsten Verlustprozesse sind in Fig. 2 zusammengestellt. Die als Folge der Elektronenbewegung im Plasma erzeugte *Brems-* und *Zyklotronstrahlung* bestimmt unter anderem die nicht unbedeutenden, aber gut abschätzbaren *Strahlungsverluste*. Wären *Wärmeleitung* und *Teilchendiffusion* als klassische Transportprozesse aufzufassen, so könnten sie ebensogut abgeschätzt werden. Da die Frequenzen der klassischen Stossprozesse im Plasma mit steigender Temperatur abnehmen, würden sich sogar bei Reaktorbedingungen relativ bescheidene Energie- und Massenverluste ergeben. Diese Überlegungen haben die *anfänglich optimistischen Erfolgsaussichten* der Fusion mitgeprägt. Leider haben aber die in den letzten 15 Jahren durchgeführten Experimente gezeigt, dass im Plasma durch sogenannte *Mikroinstabilitäten* anomale Transporteigenschaften entstehen, die zu erheblich höheren Verlustraten führen.

2.4 Forschungsrichtungen

Die wichtigsten experimentellen Anordnungen, an denen heute gearbeitet wird, sind der Tokamak, der Stellarator, der Thetapinch, die Spiegelmaschinen und die Trägheitseinschlußsysteme.

Die erste und die letzte der hier aufgeführten Arbeitslinien, die auf sich zusammen etwa 80 % der Aufwendungen der Fusionsforschung vereinigen, sollen im folgenden etwas näher untersucht werden. Der Unterschied der fünf aufgeführten Anordnungen (die sich eigentlich auf vier reduzieren, da der Stellarator plasmaphysikalisch dem Tokamak ähnlich ist) bezieht sich vorwiegend auf die benützten *Heiz-* und *Plasmaeinschlussmethoden*. Mit den ersten vier oben aufgeführten *magnetischen Einschlussanordnungen* (im folgenden kurz mit *magnetischer Fusion* bezeichnet), insbesondere mit dem Tokamak, braucht man Einschlusszeiten von typisch $\tau = 10$ s, um im Sinne des Lawson-Kriteriums mit Temperaturen von 15 keV und Dichten von $\eta = 5 \cdot 10^{20}$ Teilchen pro Kubikmeter auszukommen (dies entspricht einem Gas, das bei Zimmertemperatur

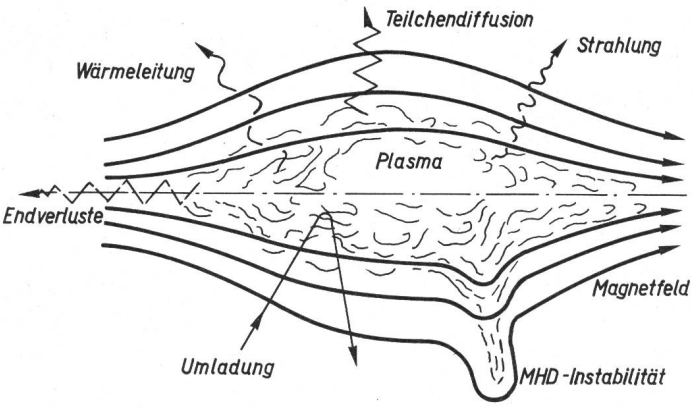

Fig. 2 Schematische Darstellung einiger wichtiger Energieverluste eines magnetisch eingeschlossenen Plasmas
Wärmeleitung und Teilchendiffusion sind heute noch wesentlich durch anomale Transportprozesse bestimmt (sog. Mikroinstabilitäten). Beim Umladungsprozess dringt ein kaltes neutrales Atom in das heisse Plasma ein, überlässt ein Elektron einem energiereichen Plasmaion, welches nun ungestört durch das Magnetfeld entwischen kann.

einen Druck von 15 Millitorr aufweist). Wenn man sich anderseits nur auf den *Trägheitseinschluss* verlässt (wie bei der im folgenden beschriebenen *Laserfusion*), wird $\tau = 10^{-9}$ s, und η muss Werte annehmen, die mindestens der *Festkörperdichte* entsprechen.

3. Magnetische Fusion

3.1 Magnetischer Einschluss

Zur Vermeidung eines jeglichen Kontakts mit festen Wänden muss das heisse Plasma durch ein Magnetfeld *räumlich eingeschlossen werden*. Dabei ist aber ein Magnetfeld alles andere als eine dichte Wand. Wie schon in Fig. 2 gezeigt, gibt es verschiedene Prozesse, die zu einem Plasma- oder Energieverlust führen können. Daher ist es unter Umständen entweder gar nicht möglich, das Plasma auf die nötigen Betriebstemperaturen zu bringen, oder aber das heisse Plasma geht vor dem Ablauf der nötigen Einschlusszeit τ verloren. Um wenigstens die Endverluste zu beseitigen, werden heute fast ausschliesslich *toroidale*, das heisst in sich geschlossene Magnetfeldkonfigurationen benützt (vgl. Fig. 3).

3.2 Tokamak

In der Tokamak-Konfiguration setzt sich das für *Gleichgewicht* und *Stabilität* benötigte Magnetfeld aus einem durch äussere Spulen erzeugten toroidalen *Hauptfeld* H_T und dem *poloidalen Feld* H_P des im Plasma induzierten toroidalen Stroms zusammen; zusätzlich ist zur Bestimmung der Gleichgewichtslage des Plasmarings noch ein zur Symmetrieebene *senkrechtes Feld* H_V nötig (vgl. Fig. 3). Der *Plasmastrom* wird durch ein Transformatorsystem induziert; der Plasmaring stellt die Sekundärwicklung dar, wobei die Kopplung zur Primärwicklung entweder über einen Eisenkern erfolgt oder aber im Sinne eines eisenfreien Transformators ausgelegt ist. Im Tokamak dient der im Plasma fliessende Strom zusätzlich zur *Aufheizung*. Diese Kopplung der beiden Hauptvorgänge eines Fusionsexperiments ist als Nachteil zu betrachten, besonders in der gegenwärtigen Experimentierphase. Trotzdem erfreut sich diese Anordnung eines grossen Erfolgs, auch wenn die gegenwärtigen Resultate noch ziemlich weit von den notwendigen Reaktorbedingungen entfernt sind, wie Tabelle I zeigt. Die Tokamak-Anordnung wurde seit Ende der fünfziger Jahre in der UdSSR entwickelt, und obschon sie auch an der Kernenergiekonferenz von 1966 in Genf ausführlich beschrieben wurde, beachtete man sie in den andern Ländern wegen angeblicher prinzipieller Nachteile kaum, bis plötzlich, für viele unerwartet, 1968 gute experimentelle Resultate bekanntgegeben wurden. 1975 sind *23 grössere Experimente* dieses Typs entweder im Betrieb oder im Bau: in den USA (7), der UdSSR (7), in Grossbritannien (1), Frankreich (3), Deutschland (2), Italien (1), Japan (2). Fünf bis acht weitere Grossanlagen sind geplant.

Tokamak-Konfiguration Tabelle I

Parameter		Für Reaktorbetrieb notwendig	1974 experimentell erreicht
Plasmadichte	m^{-3}	$5 \cdot 10^{20}$	$5 \cdot 10^{10}$
Ionentemperatur	keV	10	1
Einschlusszeit	s	10	0,02
Plasmavolumen	m^3	> 300	1

3.3 Plasmaaufheizung

Die Entwicklung der Tokamak-Linie befindet sich in einer sehr dynamischen und interessanten Phase. Viele Probleme gilt es anzupacken und zu lösen. Eines der wichtigsten für den weiteren Fortschritt betrifft die *Heizung*. Da der *Ohmsche Widerstand* eines Plasmas mit zunehmender Temperatur sehr rasch abnimmt, wird die Heizungsleistung im heissen Plasma immer geringer. Heute scheint leider festzustehen, dass diese einfache Heizungsmethode nicht genügt, um ein Tokamak-Plasma auf thermonukleare Temperaturen zu bringen. Somit müssen *andere Methoden* angewendet werden, worüber man heute nur geringe Erfahrungen besitzt. Bei der gegenwärtig aussichtsreichsten *Zusatzheizung* wird ein Strahl neutraler, energiereicher Wasserstoffatome durch das Einschlussfeld in ein bereits aufgeheiztes Plasma eingeschossen; werden die Atome durch Stösse mit den Plasmateilchen ionisiert, so bleiben sie nunmehr im Magnetfeld als energiereiche Ionen eingeschlossen und verteilen ihre kinetische Energie auf das Plasma, womit dieses aufgeheizt wird. In den gegenwärtigen Experimenten hat der Strahl eine Energie von 25 keV und einen äquivalenten Strom von 20 A; zur Aufheizung des Plasmas in einem Fusionsreaktor sind voraussichtlich Werte von 1000 keV und 50 A nötig.

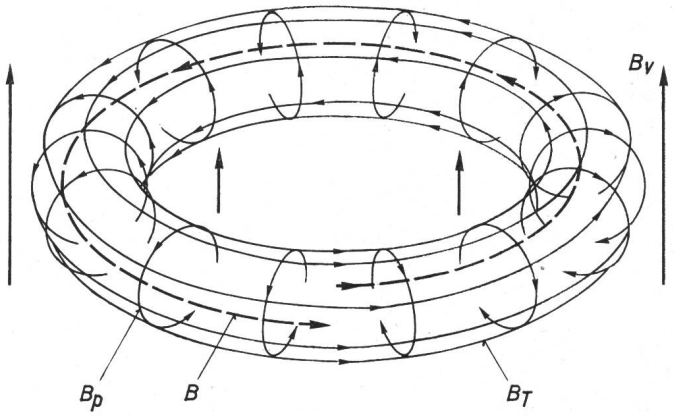

Fig. 3 Tokamak-Magnetfeldkonfiguration
Das poloidale Feld B_p wird durch den im Plasma induzierten toroidalen Strom erzeugt, das toroidale Hauptfeld B_T und das senkrechte Feld B_V durch äussere (nicht eingezeichnete) Spulen.

Parameter einiger toroidaler Experimente Tabelle II

Bezeichnung, Ort Tokamak	In-betrieb-nahme	Radien des Plasmatoruses		Plasma-strom	Toroi-dales Magnet-feld
		gross (cm)	klein (cm)	(kA)	(Tesla)
T-4, Moskau	1970	100	17	290	5
ST, Princeton	1970	109	14	180	5
TFR, Font.-aux-Roses	1973	98	20	490	6
PLT, Princeton	1975	130	45	1400	4,5
FT, Frascati	1976	82	22	1100	10
JET, Europa	(1980?)	280	160	3000	3
TFTR, Princeton	(1980?)	270	95	2500	4,3
Stellarator					
Wendelstein VII, Garching	1976	200	35	–	4,5

3.4 Zukunftsprojekte

Die bisher erhaltenen experimentellen und theoretischen Resultate versprechen längere Einschlusszeiten und höhere Temperaturen durch grössere Plasmaströme und Radien. Daher besteht der Trend zu immer grösseren Maschinen, wie dies Tabelle II zeigt. Als Zukunftsbeispiel sei das Projekt des *Joint European Tokamak* (JET) genannt. Das mit dieser Maschine angestrebte Ziel ist eine sinnvolle Annäherung des *Lawson-Kriteriums*. Ferner soll bei der eventuellen Benützung von Tritium der Einschluss der durch die DT-Reaktion entstehenden energiereichen Alphateilchen möglich sein, um damit die endotherme Aufheizung eines Fusionsplasmas einzuleiten und zu untersuchen. Die in der Tabelle II angegebenen Abmessungen einer solchen Maschine sind eindrücklich. Man beachte auch, dass der JET während des Betriebs (Impulsdauer von etwa 20 s) eine maximale elektrische Leistung von ungefähr 250 MW aufnimmt, was der Leistung eines *mittelgrossen Kraftwerks* entspricht.

In Garching bei München ist ein grosses Stellarator-Experiment mit der Bezeichnung *Wendelstein VII* im Bau. Der *Stellarator*, der von 1954 bis 1968 in den USA entwickelt wurde, ist als Fusionskonzept eher einfacher als der *Tokamak*, da bei ihm die Magnetfeldkonfiguration nur durch *äussere* Leiter erzeugt wird. Leider waren die Resultate im Vergleich mit denjenigen des Tokamaks bisher eher bescheiden. Durch Anwendung der durch die Tokamak-Experimente in den letzten Jahren gesammelten Erfahrungen hofft man aber auch mit dieser Anordnung einen markanten Fortschritt zu erzielen.

Eine immer wichtigere Rolle in der Fusionsforschung spielt der Computer. Die *numerische Plasmasimulation* kann in zwei Klassen aufgeteilt werden: *hydrodynamische Simulation* und *Teilchensimulation*. Bei der ersteren wird angenommen, dass das Verhalten des Plasmas durch ein System hydrodynamischer Gleichungen, vervollständigt mit teils empirischen Beziehungen (z. B. für die elektrische Leitfähigkeit, die Viskosität usw.), beschrieben werden kann. Schon heute ist die Verwendung von solchen numerischen Plasmamodellen für das Verständnis der sehr komplizierten toroidalen Experimente von entscheidender Bedeutung. Bei den Teilchenmodellen wird die Bewegung einer grossen Anzahl von geladenen Teilchen verfolgt, die einzig unter dem Einfluss ihrer elektrischen und magnetischen Wechselwirkung stehen. Solche Rechnungen haben bereits wichtige, besonders nichtlineare Plasmaeigenschaften aufgezeigt, doch ist ihre Anwendbarkeit wegen der Kapazität der heutigen Computer auf ideale Fälle beschränkt. Man kann sagen, dass heute eine hydrodynamische Simulation eines Tokamakexperiments *etwa gleich viel kostet* wie das Experiment (d. h. eine Entladung).

4. Laserfusion

4.1 Trägheitseinschluss

Bei der Anwendung der Laser nach dem Konzept des Trägheitseinschlusses wird der Laserstrahl auf ein *DT-Kügelchen* fokussiert, das durch Absorption der Strahlungsenergie aufgeheizt wird. Die *Einschlusszeit* τ des so erzeugten DT-Plasmas, während der die Fusionsreaktionen ablaufen kann, wird nur durch die durch Trägheitskräfte verzögerte Ausdehnung der DT-Masse bestimmt: einige Nanosekunden für einen Kugeldurchmesser von ungefähr 1 cm. Um ein DT-Eiskügelchen mit Festkörperdichte ($\eta = 5 \cdot 10^{28}$ m^{-3}) unter diesen Umständen auf Fusionstemperaturen zu bringen, werden Laser mit Energien von 10^8 bis 10^9 Joule benötigt, das heisst Laser, die auch in ferner Zukunft schwerlich zu haben sind. Anhand von numerischen Modellen wurde aber von amerikanischen Forschern gezeigt, dass durch eine raffinierte Anwendung desselben Laserstrahls eine *Kompression* des Eiskügelchens auf 10^3- bis 10^4mal seine Normaldichte theoretisch möglich ist. Da die Reaktionsrate mit dem Quadrat der Dichte geht, würde damit der Ablauf der Fusionsreaktion ganz erheblich beschleunigt und die Ausbeute verbessert. Zum Betrieb eines Fusionsreaktors wären daher voraussichtlich Laserimpulse mit einer Energie von nunmehr 10^5 bis 10^6 Joule in etwa 1 ns erforderlich.

4.2 Stand der Forschungsprogramme

Obschon seit mehr als 10 Jahren auf dem Gebiet des Trägheitseinschlusses teilweise mit Erfolg gearbeitet wurde (z. B. im *Plasma-Laboratorium in Frascati*), kam der entscheidende Durchbruch zu diesem Fusionskonzept erst vor 3 Jahren mit dem speziellen Kompressionseffekt. Die Hoffnungen auf die Laserfusion beruhen denn auch ganz wesentlich auf dem experimentellen Nachweis, dass die vorgeschlagene Kompression mit dem Laserstrahl in der Praxis auch wirklich in dem nötigen Umfang eintritt. Irgendwie erinnert die heutige Lage der Laserfusion an diejenige der magnetischen Fusion gegen Ende der fünfziger Jahre. Ähnlich wie damals bestehen heute für dieses

AEC-Programme für gepulste Hochleistungslaser Tabelle III

Anwendungsgebiet	Programm
Fusionsmaterie (D, T, Li usw.)	Laser in thermonuklearen (TN) Waffen TN-Waffen: nicht destruktive Tests und Simulation struktureller Effekte TN-Fusionsantrieb für Raumfahrt Friedliche Energieerzeugung durch TN-Fusion
Inerte Materie	Simulation von X-Strahlen-Effekten auf nukleare Waffen Modellversuche für nukleare Waffen Isotopentrennung und chemische Prozesse
Fortpflanzung in Atmosphäre, Meer und Raum	Waffensysteme für kurze Reichweiten (Land, Meer, Luft) Waffensysteme für grosse Reichweiten (Raum)

Einige Parameter eines idealen, toroidalen DT-Reaktors Tabelle IV

Abmessungen und Magnetfeld	
Vakuumwandradius	2 m
Dicke des Reaktormantels (inkl. Spule)	2 m
Toroidaler Hauptradius	6,5 m
Toroidales Magnetfeld	10 Tesla
Thermische Leistung	
Pro Längeneinheit	150 MW/m
Total	6000 MW
Brennstoff	
Tritiumverbrauch	1 kg/Tag
Tritiumreaktorinventar	10 kg
Lithiumverbrauch	2 kg/Tag
Einwirkung auf Vakuumwand	
14 MeV Primärneutronenfluss	$4 \cdot 10^{18}$ Neutronen/s/m²
Totaler Leistungseinfall	13 MW/m²
Leistungsaufnahme einer 5 mm dicken Niobiumwand	2 MW/m²

Fusionskonzept angeblich klare *Modellvorstellungen,* doch fehlen noch die wesentlichen *experimentellen Resultate* zur realistischen Beurteilung dieser Vorstellungen. Allerdings wird die Entwicklung hier viel rascher vorangetrieben werden, schon wegen des Einsatzes grosser technischer Mittel, und es wäre deshalb durchaus möglich, dass es der Laserfusion noch vor der magnetischen Fusion gelänge, die Lawson-Fusionsbedingungen zu erreichen. Ist der Stand der magnetischen Fusion das Ergebnis einer stetigen, oft mühsamen und ziemlich in sich abgeschlossenen Forschungsanstrengung über mehr als 20 Jahre, so profitiert die Laserfusion von der grossen *bewaffnungstechnisch bedingten Laserentwicklung,* besonders in den USA und in der UdSSR. In den Laserprogrammen der *Atomic Energy Commission* (AEC) nimmt denn auch, wie Tabelle III zeigt, die Anwendung auf die Fusion eine untergeordnete Stellung ein, obschon sie anderseits im Umfang beinahe dem magnetischen Fusionsprogramm entspricht (siehe Tabelle VII). Allein die technische Entwicklung gepulster Hochleistungslaser, wie sie in diesem Programm benötigt werden, kostet die AEC etwa 250 Millionen $, welche nicht dem Fusionsprogramm belastet werden.

5. Fusionsreaktor

5.1 Allgemeines

Obschon die plasmaphysikalischen Probleme der Aufheizung und des Einschlusses eines Plasmas von thermonuklearer Bedeutung noch nicht gelöst sind und nicht mit Sicherheit feststeht, ob eine befriedigende Lösung dieser Probleme *überhaupt prinzipiell möglich ist,* sind die wesentlichen *Anforderungen* und die daraus resultierenden technischen Schwierigkeiten eines möglichen Fusionsreaktors bereits deutlich erkennbar. Diese Probleme müssen schon heute behandelt werden, da sie einerseits *langwierige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten* erforderlich machen und da sie anderseits in steigendem Masse bei der Auswahl und *Auslegung* zukünftiger *Grossexperimente* mitberücksichtigt werden müssen. Es werden deshalb beachtliche Anstrengungen auf diesem Gebiet unternommen, und es besteht die Absicht, in den nächsten Jahren etwa 30 % der Forschungsmittel für reaktortechnische Probleme einzusetzen. Die bisher gemachten, teilweise auch sehr detaillierten Studien beziehen sich sowohl auf den für die Laserfusion geeigneten *gepulsten Reaktor* als vor allem auch auf den *stationären oder quasistationären Reaktor* (bei dem die Brennzeit viel länger als die Totzeit zwischen zwei Zyklen ist) mit toroidalem magnetischem Plasmaeinschluss. Im folgenden sollen einige typische Probleme des letzteren Typs erwähnt werden, von denen aber mehrere auch den gepulsten Reaktor betreffen.

5.2 Reaktorabmessungen

Der Aufbau eines toroidalen Reaktors folgt auf Grund sehr allgemeiner und logischer Überlegungen. Aus technischen und ökonomischen Gründen ist es wichtig, zunächst die *minimal zulässigen Abmessungen* des Reaktors zu bestimmen. Diese werden festgelegt durch die zulässige *Einstrahlleistung* an der *ersten* das Plasma umschliessenden *Vakuumwand,* durch welche die gesamte Reaktorleistung fliessen muss. Lässt man die relativ hohe Einstrahlleistung von 13 MW/m² zu, so folgen die in Tabelle IV angegebenen Reaktorparameter. Es ist allerdings zu bemerken, dass realistischere Modellvorstellungen (unter anderem mit kleineren Einstrahlleistungen) zu etwa doppelten Hauptdurchmessern führen und, entsprechend, zu höherer Leistung und grösserem Brennstoffverbrauch. Die *Wechselwirkung* eines thermonuklearen Plasmas mit der Vakuumwand ist sehr intensiv und mannigfaltig, wie in Fig. 4 schematisch gezeigt wird; sie führt zu den wichtigsten reaktortechnischen und plasmaphysikalischen Problemen, die in nächster Zeit zu lösen sind.

5.3 Reaktortechnische Probleme

Bei der Auslegung eines Fusionsreaktors wird eine Reihe fundamentaler Probleme aufgeworfen, die einfachheitshalber in drei Gruppen aufgeteilt werden können:

- Probleme der Plasmaerzeugung
- Materialprobleme, insbesondere der Vakuumwand
- Brennstoff- und Kühlkreisprobleme

Zur ersten Gruppe gehören die verschiedenen *Aufheizeinrichtungen,* der *Injektor* zum Einschiessen von frischem Brenn-

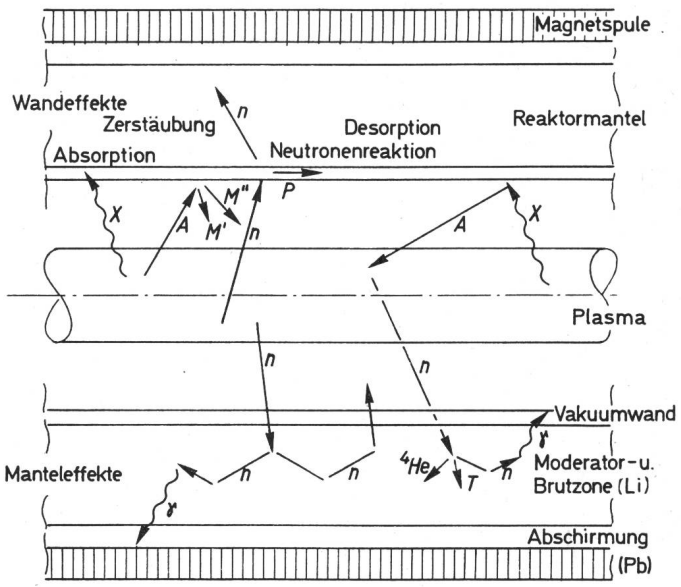

Fig. 4 Einige typische Plasma-Wand-Wechselwirkungen
Der Reaktormantel enthält Lithium als Moderator und Brutelement sowie einen Bleimantel zur Abschirmung der äusseren Magnetspule. Zeichenerklärung, n: Neutron; p: Proton; A: Gasatom; M: Metallatom; X: Röntgenstrahlung; γ: Gammastrahlung

stoff in das Fusionsplasma und der sogenannte *Divertor*, der zur laufenden Extraktion der aus Alphateilchen und Verunreinigungen bestehenden Asche dient. Die *Materialprobleme* betreffen insbesondere die Vakuumwand. Ganz besonders kritisch ist die *Neutroneneinstrahlung*, da beim Fusionsprozess 4,5mal mehr Neutronen pro Energieeinheit entstehen als bei der Kernspaltung. Die Härte des Spektrums, hervorgerufen durch die primären 14-MeV-Neutronen, stellt ein grosses, heute fast unlösbar erscheinendes Problem dar, da die dadurch in Metallen erzeugte Konzentration von *Fehlstellen* und *Helium-Gasblasen* um eine bis zwei Grössenordnungen über dem liegt, was man in den schnellen Spaltungsreaktoren schon mit Sorge erwartet. Die dritte Gruppe umfasst das Problem der *Tritium-Herstellung*, da dieses betaaktive Wasserstoffisotop mit Zerfallshalbwertzeit von 12,5 Jahren nicht in genügenden Mengen in der Natur vorkommt. Durch Neutronenbeschuss von *natürlichem Lithium* (Zusammensetzung: 92,6 % ^{7}Li, 7,4 % ^{6}Li) kann diese Brennstoffkomponente aber im Reaktormantel gebrütet werden, und zwar nach den Reaktionen

$$^6\mathrm{Li} + n \rightarrow {}^4\mathrm{He} + \mathrm{T} + 4{,}78\ \mathrm{MeV}$$

$$^7\mathrm{Li} + n \rightarrow {}^4\mathrm{He} + \mathrm{T} + n' - 2{,}47\ \mathrm{MeV}$$

Da zusätzlich die ursprünglichen 14-MeV-Neutronen durch verschiedene $(n, 2n)$-Reaktionen leicht vermehrt werden können, kann mehr Tritium hergestellt werden, als im Plasma verbraucht wird. Es ergeben sich daher *Verdoppelungszeiten* für die Brennstoffladung eines Fusionsreaktors von wenigen Monaten.

6. Forschungsaufwand und Zielsetzung

6.1 Allgemeine Angaben

Einen ersten Hinweis auf den Forschungsaufwand verschiedener Länder für die *magnetische Fusion* vermittelt Tabelle V. Allerdings müssen solche vergleichende Angaben in bezug auf die Genauigkeit mit einer gewissen Vorsicht aufgenommen werden, denn selbst wenn sie von einer internationalen Behörde zusammengestellt worden sind, beruhen sie oft auf nicht identischen Voraussetzungen (wie z. B. in bezug auf die Definition des Forschungspersonals oder auf die Abgrenzung gegenüber kriegstechnisch bedingten Forschungsaufwendungen). Wie ersichtlich, werden die grössten Anstrengungen von der *Sowjetunion* und von den *Vereinigten Staaten* unternommen, doch

Magnetische Fusion. Programme im Jahr 1973 Tabelle V

Land	Forscher [1])	Grössere Experimente [1])	Ausgaben (Mio $)
Australien	21 [2])	8 [2])	2
Deutschland (BR)	250+32 [2])	21+3 [2])	22
Frankreich	114	15	16
Grossbritannien	167	16	18
Italien	37+28 [2])	2+2 [2])	5
Japan	61+111 [2])	10+24 [2])	–
Kanada	10+15 [2])	1+2 [2])	3
Niederlande	56	11	3
Schweiz	17 [2])	4 [2])	1
Sowjetunion	420	44	–
Schweden	10 [2])	4 [2])	1
USA	233+132 [2])	23+23 [2])	50
Andere	23+56 [2])	5+9 [2])	–
Total	1371+422 [2])	164+63 [2])	–

[1]) Teilweise abgeleitet aus einer Übersicht der IAEA, Wien 1973.
[2]) Forscher und Experimente im Rahmen von Universitätsprogrammen.

Einige Forschungs- und Entwicklungsausgaben der öffentlichen Hand im Kalenderjahr 1973 (Mio $) Tabelle VI

	Fusion	Schnelle Brüter	Hochenergiephysik
USA	85	etwa 150	130
Europa	58	etwa 300	320

Amerikanische und europäische Fusionsbudgets Tabelle VII

		Budgets in Mio $ Fiskaljahr			Vorschlag
	1971	1972	1973	1974	1975–79
AEC-Programme, USA					
Magnetische Fusion	28,4	31,0	37,0	60	1200
Laserfusion	9,5	19,4	35,1	42,9	500
Total	37,9	50,4	72,1	102,9	1700
EWG-Länder, Europa					
Magnetische Fusion	40	50	55	60	?

unterhalten auch die *europäischen Staaten* beachtliche Fusionsprogramme. Zu diesen Zahlen sind noch diejenigen der *Laserfusion* zu addieren. In den USA schätzt man die auf diesem Gebiet im Jahre 1973 eingesetzten Forscher auf etwa 200, und in der UdSSR dürften es ebenso viele sein. In Europa gibt es gegenwärtig kein vergleichbares Programm. Ein Ansatz zu einem grösseren Laserforschungsprogramm in Garching (BRD) wurde kürzlich abgebrochen, während ein entsprechendes französisches Programm in Limeil noch ganz im Rahmen der kriegstechnischen Forschung läuft. Die *gesamten Forschungsausgaben* für die nicht kriegstechnisch motivierte Fusionsforschung im Jahre 1973 dürften bei etwa 300 Millionen $ liegen, und die dabei eingesetzten Forscher sind über 2000 an der Zahl. Tabelle VI gibt einen Vergleich mit andern Forschungs- und Entwicklungsausgaben.

6.2 Gegenwärtige amerikanische Fusionsforschung

Es lohnt sich, die Anstrengungen der *Vereinigten Staaten* etwas genauer anzuschauen, da dieses Land beabsichtigt, die Fusionsforschung im Rahmen der besonderen Anstrengungen auf dem Energiesektor gewaltig zu fördern. Die *magnetische Fusion* wird immer mehr in den beiden Zentren von *Oak Ridge* und *Princeton* konzentriert, die sich auf die *Tokamak-Konfiguration* spezialisiert haben; in *Los Alamos* wird noch am toroidalen Thetapinch und in *Livermore* an der magnetischen Spiegelmaschine gearbeitet. Die Anwendung der Laser auf die Fusion wird in den beiden letzteren Zentren untersucht, wobei in Livermore im wesentlichen die *Neodym-Glaslaser-Linie* und in Los Alamos die *CO_2-Gaslaser-Linie* verfolgt wird. Getreu dem Konkurrenzprinzip lässt die Atomic Energy Commission (AEC) zusätzlich noch kleinere Programme zu, die in direktem Wettbewerb mit dem Hauptprogramm eines andern Zentrums stehen. Die totalen Aufwendungen für die Fusionsforschung nahmen in den USA in den letzten Jahren um etwa 50 % jährlich zu, wobei, wie Tabelle VII zeigt, diese starke Zunahme wesentlich von der Laserfusion bedingt wurde.

6.3 Zukünftige amerikanische Fusionsforschung

Die Aufwendungen der AEC im Fiskaljahr 1975 für die gesamte Kernfusion werden auf 179 Millionen $ geschätzt (als Vergleich sei erwähnt, dass im gleichen Zeitraum für den

natriumgekühlten schnellen Brüter 475 Millionen $ eingesetzt werden und für die Sonnenenergie-Forschung 51 Millionen $). Diese Ausgaben gehören in das für dieses Fiskaljahr vorgesehene Budget für die allgemeine Energieforschung von 1,8 Milliarden $, wobei dies die erste Tranche eines Budgets von 10 Milliarden $ in den nächsten 5 Jahren darstellt. Die AEC beabsichtigt, davon etwa *einen Zehntel* für die Fusionsforschung einzusetzen. Ob diese gewaltigen Summen in den nächsten Jahren auch tatsächlich aufgebracht werden oder ob sie sogar noch übertroffen werden, hängt von der Entwicklung der Wirtschaft und ganz besonders von der gegenwärtig ausführlichen politischen Diskussion über den Sinn und Zweck des *Project Independence* ab. (Es handelt sich um das Projekt des ehemaligen Präsidenten Nixon, die Vereinigten Staaten auf Anfang der achtziger Jahre von ausländischen Energiequellen im wesentlichen unabhängig zu machen.)

Die *zukünftige Entwicklung* bis zur praktischen Anwendung der Fusionsenergie lässt sich auf Grund allgemeiner Merkmale in *vier Stufen* einteilen, wie Tabelle VIII zeigt. Das bisherige Ziel der AEC war, Stufe I in den Jahren 1980 bis 1982 und Stufe II im Zeitraum 1986 bis 1988 zu erreichen. Als Folge der vermehrten Forschungskredite glaubt sie jetzt, den Zeitplan kürzen zu können, indem Stufe II eng anschliessend an die erste Stufe eingeplant wird, so dass noch vor 1985 abgeklärt werden könnte, ob die *Fusion physikalisch und technisch* möglich ist. Die übernächste Generation von Tokamak-Maschinen (z. B. der Toroidal Fusion Test Reactor – TFTR – in Princeton, vgl. Tabelle II) muss diesen Plänen entsprechend so ausgelegt werden, dass damit voraussichtlich nicht nur das *Lawson-Kriterium* erreicht werden kann, sondern dass auch den plasma-

Entwicklungsstufen zum Fusionskraftwerk Tabelle VIII

Stufe	Wesentliches Merkmal
I Physikalische Durchführbarkeit	Sinnvolle Annäherung des Lawson-Kriteriums mit H- oder D-Plasma
II Physikalischer Testreaktor (1–10 MW_{th})	DT-Plasma mit entsprechender endothermer Alphateilchen-Aufheizung und Neutronenerzeugung
III Experimentelle Leistungsreaktoren (100 MW_{th})	Praktische Materialerprobung, insbesondere des Reaktormantels mit Wärmeabfuhr und Tritiumkreislauf
IV Versuchskraftwerk (10 GW_{th})	Beweis der technischen und der ökonomischen Konkurrenzfähigkeit

physikalischen Bedingungen der *Alphateilchen-Heizung* und den *strahlungsbedingten Anforderungen* der Stufe II nachgekommen werden kann. Die Entwicklungsstufen betreffend die Laserfusion sind der verschiedenen physikalischen Problemstellung entsprechend etwas anders gelagert, doch hat die AEC einen Zeitplan aufgestellt, mit dem noch eher früher als bei der magnetischen Fusion der Nachweis der *physikalischen und technischen Durchführbarkeit* erbracht werden sollte. Technische Voraussetzung für solche entscheidende Experimente ist die Bereitstellung von Lasermehrstrahlsystemen mit Lichtimpulsen, deren Energie grösser als 10 kJ ist und deren Impulsdauer weniger als 1 ns beträgt. Nd-Glas- und CO_2-Gas-Lasersysteme mit diesen Eigenschaften soll es schon ab 1976 geben und 2 Jahre später andere Lasersysteme mit noch wesentlich besseren Leistungen. Damit hofft die AEC noch vor Ende dieses Jahrzehnts den experimentellen Nachweis erbringen zu

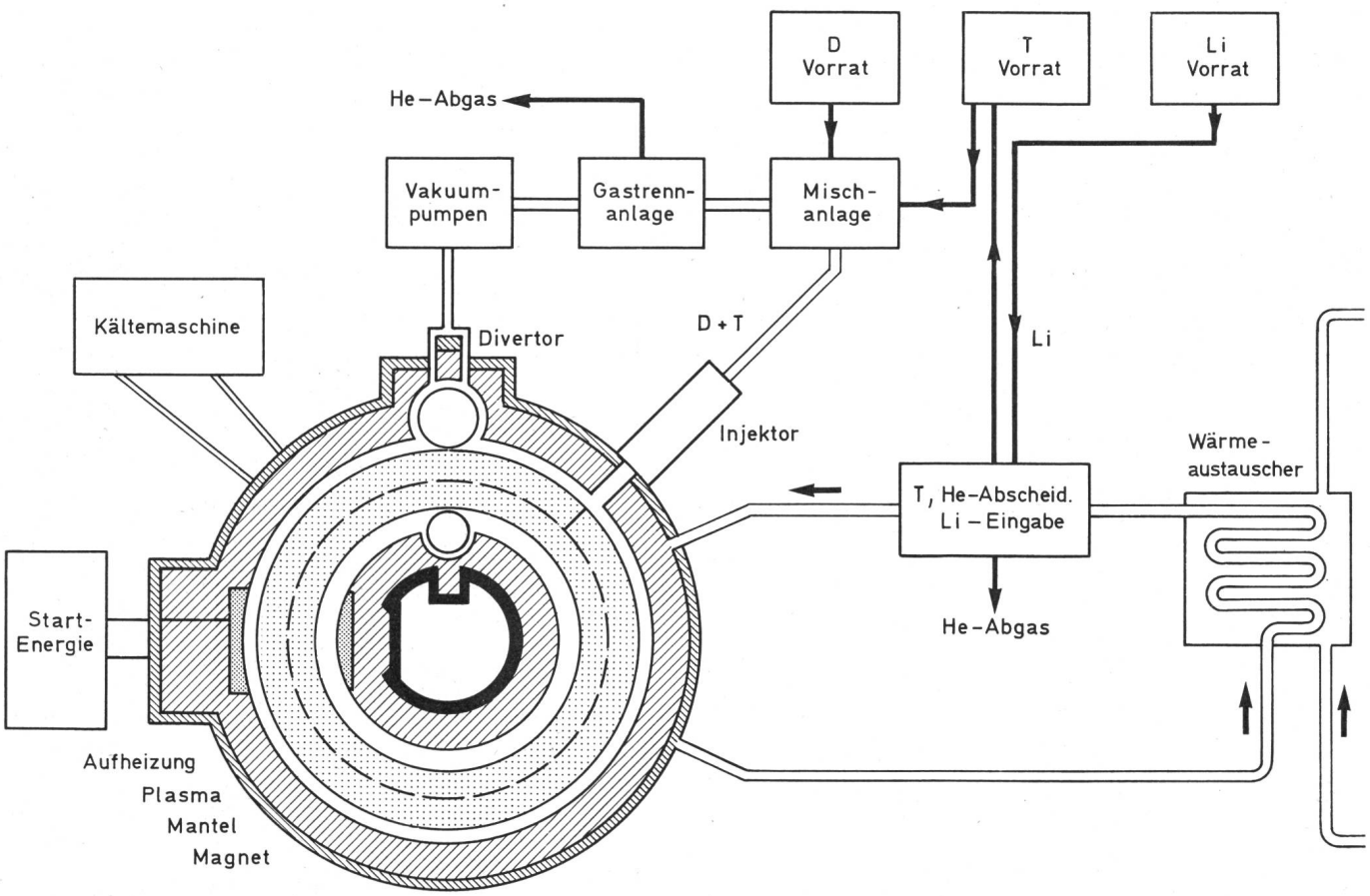

Fig. 5 Schematische Darstellung eines Tokamak-Fusionskraftwerkes

können, dass bei einer geeigneten Bestrahlung eines DT-Kügelchens mehr Fusionsenergie erzeugt werden kann, als Laserenergie eingestrahlt wird.

6.4 Europäische Fusionsprogramme

Die Fusionsprogramme der *europäischen, mit Euratom assoziierten Institute* unterstehen der Koordination durch die Kommission der EWG und erhalten von dieser einen Beitrag, der gegenwärtig im Mittel etwas weniger als 20 % ihrer Forschungsbudgets beträgt. Die gesamten Fusionsausgaben der neuen EWG-Länder im gegenwärtigen, im Jahre 1975 zu Ende gehenden Fünfjahresplan belaufen sich auf ungefähr 270 Millionen $. Die Ausgaben der letzten Jahre sind in Tabelle VII zusammengefasst, während die Aufteilung für einige Länder für das Jahr 1973 in Tabelle V erfolgt. Bei einer straffen Ausrichtung der Fusionsforschung bis zum Nachweis der technischen Durchführbarkeit und zum Bau eines Versuchskraftwerks innerhalb von 20 Jahren muss mit einer Gesamtausgabe für die europäische Fusionsforschung von mindestens 10 Milliarden $ (mit heutigem Wert) gerechnet werden. Dies ist eine gewaltige Aufgabe, die nur auf Gemeinschaftsebene gelöst werden kann und deren Zielsetzung und Motivierung dauernd zu überprüfen sind.

7. Zukunftsaussichten

Die Fusion bietet sich als eine potentiell interessante Energiequelle im Rahmen der langfristigen Lösung des weltweiten Energieproblems an. Der heute denkbare, auf DT-Brennstoff basierende Fusionsreaktor lässt sich am ehesten mit dem Spaltungsreaktor der Zukunft, dem *schnellen Brüter,* vergleichen. Ihm gegenüber zeigt der Fusionsreaktor einige Vorteile, insbesondere in bezug auf den geringen Anfall von radioaktiven Abfällen und auf die Betriebssicherheit. Vor- und Nachteile der beiden Systeme und ihre Konkurrenzfähigkeit mit andern Energiequellen können aber konkret und quantitativ nur auf der Stufe des Demonstrationsreaktors abgeklärt werden. Ein wesentliches Merkmal beider Systeme ist, dass sie den Energieverbrauch der Weltbevölkerung für Jahrtausende zu decken vermögen, da die von ihnen verbrauchten nuklearen Brennstoffe (Deuterium und Lithium für den Fusionsreaktor, Thorium und Uran für den schnellen Brüter) in genügenden Mengen vorhanden sind. Es muss allerdings vermerkt werden, dass im Falle des schnellen Brüters die technischen Grundlagen bereits vorhanden sind (einige Reaktoren dieser Art stehen bereits im Betrieb), während dies beim Fusionsreaktor *noch keineswegs der Fall ist.* Die Fusionsforschung muss noch ganz wesentliche Probleme lösen, um den Beweis der physikalischen und technischen Durchführbarkeit eines bestimmten Reaktorkonzepts erbringen zu können. Allerdings stehen entscheidende Etappen in diesem dynamischen und spannungsreichen Forschungsgebiet unmittelbar bevor. Die nächste Generation von Tokamak-Maschinen und von 10-kJ-Lasersystemen, die in 1 bis 2 Jahren in Betrieb kommen, werden das Vertrauen in die Fusion physikalisch untermauern müssen, wenn innerhalb der nächsten 5 bis 10 Jahre der erfolgreiche Betrieb eines Testreaktors demonstriert werden soll.

Adresse des Autors:
Dr. *H. Knoepfel,* Thermonuclear Division, Oak Ridge National Lab. POB Y, Oak Ridge, Tennessee 37830, USA.

Die Vorträge und Diskussionen, welche an der Tagung über «Hoffnungen und Grenzen nichtkonventioneller Energiequellen» vom 11. und 12. Oktober 1974 in Lausanne gehalten wurden, sind in einem Konferenzband veröffentlicht worden. Dieser Band kann beim Administrativen Sekretariat des SEV, Postfach, 8034 Zürich, zum Preise von Fr. 40.– (Fr. 20.– für Mitglieder) bezogen werden.

Un compte rendu des conférences et discussions tenues aux Journées d'information des 11 et 12 octobre 1974 à Lausanne sur le thème «Espoirs et limites des sources d'énergie non conventionelles» peut être obtenu au Secrétariat administratif de l'ASE, case postale, 8034 Zurich, au prix de frs 40.– (frs 20.– pour membres).