

# INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Entwicklungs- und Forschungsprogramm  
"Fusionsreaktor"

1. Bericht des Reaktorausschusses

G. Grieger, H. Herold, M. Kaufmann,  
A. Knobloch, G. Lehner, K.H. Schmitter,  
H. Vernickel

IPP/4

November 1970

*Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem Institut für Plasmaphysik GmbH und der Europäischen Atomgemeinschaft über die Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.*

## FUSIONSREAKTOR-ENTWICKLUNG

### Inhalt

1. Einleitung
2. Ausgangsbedingungen
3. Aufbau und Dimensionierung
4. Aufgaben
  - 4.1 Stabiler Einschluß und Heizung des Plasmas
    - 4.1.1 Pulsator
    - 4.1.2 Screw-Pinch
    - 4.1.3 Wendelstein-Stellarator
      - 4.1.3.1 Plasmaheizung
    - 4.1.4 Hoch- $\beta$ -Stellarator
      - 4.1.4.1 Stoßwellenheizung
  - 4.2 Brennstoffeinschuß
    - 4.2.1 Neutrалеinschuß
    - 4.2.2 Plasmaerzeugung durch Laser
  - 4.3 Vakuum- und Wandprobleme
    - 4.3.1 Zerstäubung
    - 4.3.2 Eingeschossenes Gas
    - 4.3.3 Desorption (thermisch und durch Bestrahlung)
  - 4.4 Vakuum-Pumpen
  - 4.5 Divertor
  - 4.6 Erste Mantelzone (Vakuummwand, Brut- u. Moderatorzone)
  - 4.7 Zweite Mantelzone (Thermische Isolation u. Abschirmung)

- 4.8       Magnetfelderzeugung
- 4.8.1     Normalleitende Magnetfeldsysteme
- 4.8.2     Supraleitende Systeme
- 4.8.3     Hybride Systeme
  
- 4.9       Tritium-Technologie
  
- 4.10      Thermodynamischer Kreislauf
  
- 4.11      Reaktorregelung
  
- 5.        Ablaufplan

## 1. EINLEITUNG

Die gesteuerte Kernverschmelzung (Fusion) wäre nicht nur ein Schlüssel zu den größten Energiereserven der Erde, sondern auch der im Sinne des Umweltschutzes gefahrloseste Prozeß zur friedlichen Nutzung der Kernenergie. Die Forschung auf diesem Gebiet hat heute einen Stand erreicht, der eine vorausschauende Planung des weiteren Ablaufs der Arbeiten zum Fusionsreaktor erfordert. Der Stand der reaktororientierten Arbeiten wurde erstmals auf der internationalen "Nuclear Fusion Reactor Conference" 1969 in Culham zusammenfassend behandelt. Anschließend fand im IPP eine mehrmonatige Seminarreihe zum gleichen Thema statt. In der vorliegenden Studie werden zunächst in groben Zügen der Stand der Fusionsforschung, der prinzipielle Aufbau eines möglichen Fusionsreaktors und die zugehörigen technisch-physikalischen Probleme erläutert. Davon ausgehend wurde ein Plan erarbeitet, der den voraussichtlichen Ablauf der Entwicklung zum Fusionsreaktor beschreibt.

## 2. AUSGANGSBEDINGUNGEN

Der Fusionsreaktor verspricht, eine allen bisherigen Methoden überlegene Art der Energieerzeugung zu werden. Die wichtigsten Argumente dafür sind:

- Für die D-T-Reaktion werden als Ausgangsstoffe Deuterium und Tritium benötigt. Tritium kann aus  $\text{Li}^6$  gebrütet werden. Der momentan bekannte  $\text{Li}^6$ -Vorrat auf der Erde entspricht in D-T-Reaktoren  $6 \cdot 10^6 Q$ , wobei  $Q$  eine Energiemenge von  $2,93 \cdot 10^{14}$  kWh darstellt. Der Deuteriumvorrat ist etwa  $10^3$ mal größer. Demgegenüber steht der Weltenergieverbrauch zur Zeit bei etwa  $0,2 Q$  pro Jahr. Man schätzt, daß dieser Verbrauch noch bis auf etwa  $3 Q$  pro Jahr ansteigen wird. Damit ist der Brennstoffvorrat für Fusionsreaktoren praktisch unerschöpflich.
- Die Stromerzeugungskosten in Fusionskraftwerken werden, weil die Brennstoffkosten vernachlässigbar sind, überwiegend von den Kapitalkosten abhängen. Abschätzungen der zu erwartenden Reaktorbaukosten deuten darauf hin, daß Fusionsreaktoren gegenüber allen anderen Energiequellen auch wirtschaftlich wettbewerbsfähig sein werden.
- Eine wichtige Eigenschaft des D-T-Reaktors ist die kurze Tritium-Verdoppelungszeit von vermutlich einigen Monaten. Kurze Verdoppelungszeiten werden eines Tages erforderlich sein, um mit dem wachsenden Energiebedarf Schritt zu halten. Brennstoffbrütende Reaktoren mit Verdoppelungszeiten, die länger sind als die des Weltenergiebedarfs, werden die zukünftigen Energieversorgungsprobleme nicht lösen.
- Das mit dem Betrieb des Fusionsreaktors verbundene direkte und indirekte Risiko ist sehr gering, denn Fusionsreaktoren enthalten nur geringe Mengen von Tritium (einige kg für einen

5000 MW<sub>th</sub>-Reaktor. Die im Reaktor vorhandene Aktivität ist etwa 10<sup>6</sup> mal geringer als die in Spaltreaktoren. Dementsprechend sind die Fusionsreaktoren bei weitem weniger gefährlich. Das im Reaktor gebrütete radioaktive Tritium wird in einem geschlossenen Brennstoffkreislauf geführt. Fusionsreaktoren erzeugen keinen radioaktiven Abfall und keine für die Herstellung von Kernwaffen geeigneten spaltbaren Materialien.

- D-T-Reaktoren werden voraussichtlich durch ihren Betrieb die Umwelt weniger beeinträchtigen als andere, mit thermischer Konversion arbeitende Energieerzeugungsverfahren. Wegen des hohen Prozeßwirkungsgrades trägt der Fusionsreaktor weniger zur thermischen Belastung der Luft und des Wassers bei. In einer ständig enger werdenden Welt und bei dem zunehmenden Bewußtsein für Umweltfragen werden diese Gründe sehr für den Fusionsreaktor sprechen.
- In fernerer Zukunft wird es vielleicht möglich sein, D-D-Reaktoren zu bauen. Dann ergäbe sich die Möglichkeit der direkten Energiekonversion und damit einer noch weiteren thermischen Entlastung der Umwelt.

Die gegenwärtige Fusionsforschung ist aus breitangelegter Grundlagenforschung in der Plasmaphysik herausgewachsen.

Heute lassen sich in der Fusionsforschung drei Hauptentwicklungslinien erkennen, nämlich:

- a) Die Erzeugung von sehr d i c h t e n P l a s m e n , deren Einschluß eventuell nur durch Trägheitskräfte bewirkt wird. Dazu gehören die lasererzeugten Plasmen und der Plasmafokus.
- b) Magnetischer Einschluß von Plasmen in o f f e n e n K o n f i g u r a t i o n e n , zum Beispiel in Spiegelmaschinen oder in linearen Theta-Pinchen.

c) Magnetischer Einschluß von Plasmen in geschlossenen Konfigurationen, z.B. in toroidalen Pinchen und Stellaratoren.

Die größten Anstrengungen wurden bisher in den beiden letzten Arbeitsrichtungen unternommen mit dem Ziel, das Plasmaverhalten in den betreffenden Anlagen zu verstehen und den Reaktorbedingungen schrittweise näherzukommen.

Gegenwärtig neigt man dazu, den geschlossenen Konfigurationen die besten Chancen zur Verwirklichung eines Reaktors zu geben. Die fusionsgerichteten Experimente des IPP gehen fast ausschließlich in diese Richtung. Die nachfolgende Tabelle gibt eine schematisch geordnete Einteilung der Konfigurationen und der dazugehörigen Projekte im IPP.

|   | Niedriges $\beta$   | Hohes $\beta$   |
|---|---|---|
|   | T o k a m a k   | S c r e w P i n c h   |
| Axialsymmetrische Konfigurationen, Rotationstransformation erzeugt durch Plasmaströme         | Pulsator I<br>Torus 1,4 m $\emptyset$<br>im Bau   | Isar III und Isar IV<br><br>Experimente an linearen und toroidalen Anordnungen mit 100 kJ-Energiespeichern werden durchgeführt                                  |
|   | S t e l l a r a t o r   | H o c h - $\beta$ -<br>S t e l l a r a t o r  |
| Nicht-axial-symmetrische Konfigurationen, Rotationstransformation erzeugt durch äußere Ströme | Wendelstein<br>W II und W VII<br><br>Experimente an Torren 1 m $\emptyset$ werden durchgeführt,<br>Torus 4 m $\emptyset$ im Bau | Isar I (linear)<br>Isar T1 (toroidal)<br><br>Experimente an linearen Anordnungen mit 2,7 MJ-Energiespeicher wurden durchgeführt, Torus 2,7 m $\emptyset$ im Bau |

Die Bedingungen an ein Plasma zur Erzielung eines technisch verwertbaren Energieüberschusses aus Fusionsreaktionen sind weitgehend bekannt: Plasma aus Wasserstoffisotopen mit Temperaturen von einigen 100 Millionen  $^{\circ}\text{K}$  ( $\approx 10$  keV) muß durch magnetische Felder solange eingeschlossen werden, daß das Produkt  $n \cdot \tau$  aus Dichte und Einschlußzeit des Plasmas einen bestimmten Mindestwert erreicht, der für einen D-T-Fusionsreaktor etwa bei  $10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}$  liegt. Dieser Wert folgt aus einer Energiebilanz, in der die aus thermonuklearen Reaktionen erzeugte Energie die Deckung von Heizenergie und Bremsstrahlungsverlusten gerade überschreitet. Als Konversionswirkungsgrad wird dabei 30 % angenommen. In Abb. 1 sind die Lawson-Bedingungen für Null-Energie-Reaktoren sowie  $n \cdot \tau$ -Werte und die derzeit erreichten Ionentemperaturen für einige Experimente dargestellt. Zunächst ist klar ersichtlich, daß der D-T-Fusion der Vorzug zu geben ist. Ihr Wirkungsquerschnitt ist beträchtlich größer, und die Zündtemperatur liegt viel niedriger. Bei den Experimenten wurden vor allem solche aufgenommen, die gegenwärtig Hoffnung zur Extrapolation auf Fusionsbedingungen zulassen. Einige dieser Experimente werden am IPP durchgeführt. Es wäre falsch, die Aussichten einer Entwicklungslinie allein am Lawson-Kriterium zu messen. Beispielsweise würden die Stellaratoren dann als nicht sehr aussichtsreich erscheinen, obgleich bei ihnen - erstmalig in Garching am Experiment Wendelstein II - ein besonders günstiges Einschlußverhalten gefunden wurde. Außerdem bietet voraussichtlich nur das Stellaratorprinzip die Möglichkeit, den technisch-ökonomisch günstigen stationären Reaktorbetrieb zu verwirklichen.

In den meisten Experimenten der Abb. 1 wurden Teilcheneinschlußzeiten festgestellt, die beträchtlich höher sind, als aufgrund der sogenannten Bohm-Diffusion zu erwarten wäre. Noch vor wenigen Jahren befürchtete man, daß alle Anstrengungen für einen Fusionsreaktor an der vermeintlich unvermeidbaren Bohm-Diffusion scheitern müßten.



Wichtige Versuche zu diesem Problem wurden am IPP an den "Wendelstein"-Stellaratoren durchgeführt, die gezeigt haben, daß Bohm-Diffusion zumindest in thermischen Plasmen nicht notwendig auftritt und die Einschlußzeiten dadurch nicht begrenzt sein müssen. In Abb. 1 sind für einige Experimente die Werte für das Verhältnis zwischen gemessener Einschlußzeit und Bohm-Diffusionszeit ( $\alpha = \tau / \tau_B$ ) eingetragen. Für einen Fusionsreaktor muß  $\alpha$  einen Wert  $> 100$  erreichen.

Aus der Darstellung ist ersichtlich, daß jedes der gegenwärtigen Experimente die Fusionsbedingungen in dem einen oder anderen der Parameter: Dichte, Temperatur und Einschlußzeit noch nicht annähernd erreicht. Die Verwirklichung dieser Bedingungen setzt jedoch voraus, daß noch grundlegende plasmaphysikalische Probleme wie Stabilität, Gleichgewicht und Heizung für die jeweilige Konfiguration gelöst werden. Es steht also noch ein weiter und mühsamer Weg bis zum Bau eines energieliefernden Fusionsreaktors bevor.

### 3. AUFBAU UND DIMENSIONIERUNG

Wesentliche Funktionen eines Fusionsreaktors sind kaum von der speziellen Einschlußkonfiguration abhängig und auch nicht davon, ob es sich um ein offenes oder geschlossenes System handelt. Nachfolgend werden der grundsätzliche Aufbau und die Funktion eines D-T-Reaktors an einem Beispiel erläutert.

Abb. 2 zeigt einen Querschnitt durch den Kern eines Fusionsreaktors. Das heiße Plasma liegt, gehalten und isoliert durch ein Magnetfeld, das aus Gründen der Wirtschaftlichkeit zum überwiegenden Teil durch supraleitende Spulen erzeugt wird, im Zentrum des Reaktorrohrs. Das Rohr kann auch zu einem Torus gebogen sein. Die energieliefernde Fusionsreaktion  $D + T \rightarrow (He^4 + 3,52 \text{ MeV}) + (n + 14,06 \text{ MeV})$  erzeugt schnelle Neutronen und geladene  $\alpha$ -Teilchen. Letztere bleiben im Plasma eingeschlossen und können, falls sie genügend Zeit zur Energiedissipation finden, die Verluste decken und das Plasma weiter aufheizen. Die schnellen Neutronen durchdringen das Magnetfeld und die Vakuumwand und gelangen in den Reaktormantel. Dort soll auf dem Weg über elastische und unelastische Stöße in einem Moderator die kinetische Energie der Neutronen als technisch verwertbare Wärmeenergie an eine Kühlflüssigkeit übertragen werden. Außerdem muß im Reaktormantel Tritium gebrütet werden. Im Prinzip kann natürliches Lithium alle diese Aufgaben übernehmen.  $Li^6$ , das im natürlichen Lithium zu 7,5 % enthalten ist, dient gemäß der Reaktion  $Li^6 + n \rightarrow T + He^4 + 4,79 \text{ MeV}$  zum Brüten des Tritiums. Das im natürlichen Lithium enthaltene  $Li^7$  trägt nach:  $Li^7 + n \rightarrow T + n + He^4 - 2,47 \text{ MeV}$  ebenfalls zum Brutprozeß bei. Allerdings kann die endotherme Reaktion nur durch nicht zu stark moderierte Neutronen mit Energien  $> 2,8 \text{ MeV}$  ausgelöst werden. Vervielfältigt man den Neutronenfluß weiter durch  $(n, 2n)$  Reaktionen an  $B_e^9$  oder besser an  $Nb^{93}$ , so können Brutraten von 1,3 bis 1,5 erzielt werden. Das Brüten des Tritiums im Mantel selbst ist notwendig, weil Tritium in der Natur nicht vorkommt und weil es keine

vergleichbar wirtschaftliche Erzeugungsmethode für Tritium gibt. Die relativ hohen Brutraten erlauben Brennstoffverdopplungszeiten bis herunter zu einigen Monaten und geben einen gewissen Spielraum für die Ausführung und Zusammensetzung des Mantels. In den äußeren Schichten des Mantels müssen die aus  $(n, \gamma)$  Prozessen stammenden Gammastrahlen absorbiert und schließlich die außen liegenden Magnetfeldspulen thermisch isoliert werden.

Insgesamt scheinen die Konstruktion und die Reaktormantelneutronik keine unüberwindlichen Schwierigkeiten zu bieten. Allerdings werden die letztlich einmal auszuführenden Reaktormäntel eine komplizierte und vielschichtige Struktur haben. Dabei kommt es vor allem darauf an, die ohnehin erheblichen Abmessungen möglichst klein zu halten. Solche Strukturen können mit den für Spaltreaktoren entwickelten numerischen Methoden durchgerechnet und optimiert werden.

Das durch die Neutronenenergie hochoberhitzte und flüssige Lithium mit Temperaturen um  $1000^{\circ}$  C führt auch die Wärme nach außen zur weiteren Verarbeitung ab. Das Flüssigmetall wird außerhalb des Mantels in einem besonderen Verfahren von dem gelösten Helium und Tritium befreit. Das letztere wird dem Brennstoffkreislauf wieder zugeführt. Die Umsetzung der Wärme in elektrische Energie erfolgt auf dem Weg über Wärmeaustauscher und Turbinen in bekannter Weise. Wie bei projektierten Hochtemperaturspaltreaktoren bringt dabei die vorgeschaltete Hochtemperaturstufe (K oder He) eine wesentliche Verbesserung des thermodynamischen Wirkungsgrades.

Abb. 3 zeigt den schematischen Aufbau eines Kraftwerkes mit einem sog. stationären (s.u.) Fusionsreaktor.

Bis hierher wurde nur das für fast alle Reaktorentwürfe gleichbleibende Grundsystem beschrieben. Mit den sehr verschiedenartigen Methoden zur Herstellung, Aufheizung und zum Einschluß des Plasmas ändert sich die Betriebsweise des Reaktors. Damit sind jeweils verschiedene zusätzliche Reaktorkomponenten nötig. In den sogenannten stationären Reaktoren braucht das Plasma nur einmal (selten) aufgeheizt zu werden. Sind die Einschlußzeiten für die leichten Kerne und die  $\alpha$ -Teilchen genügend lang, so kann die Reaktionsenergie der  $\alpha$ -Teilchen neuzugeführten Brennstoff aufheizen und die Energieverluste durch Bremsstrahlung im Plasma decken. Brennstoff (D+T) muß laufend zugeführt und Reaktionsprodukte und Verunreinigungen, die von der Vakuumwand her in das Plasma gelangen, müssen in einen "Divertor" abgeführt werden. Beide Probleme sind zumindest in toroidalen Konfigurationen sehr schwierig.

Bei gepulsten Reaktoren bestehen diese Probleme nicht. Bei ihnen wird in jedem Arbeitszyklus das Gasgemisch eingefüllt, aufgeheizt und solange eingeschlossen, bis ein wesentlicher Anteil der Füllung (10 - 20 % der Teilchen) Kernverschmelzung erfahren hat. Dann wird die Einschlußfeldkonfiguration wieder abgebaut. Dabei muß die Energie des Magnetfeldes möglichst verlustlos für den nächsten Arbeitszyklus zwischengespeichert werden. Die Ökonomie der Plasmaaufheizung und der Energiespeicherung spielt bei diesem System die entscheidende Rolle.

Zwischenlösungen, also gepulste Reaktoren mit langer Pulsdauer, aber mit Brennstoffeinschuß, haben möglicherweise eine günstigere Energiebilanz.

Aus bisherigen Reaktorstudien folgt, daß es aus Gründen der Wirtschaftlichkeit erforderlich sein wird, die höchstmögliche Bruttoleistungsdichte im Reaktorkern (Plasma + Mantel) zu erreichen. Deshalb kommt der Belastbarkeit des plasmanächsten Bauelements, der Vakuumwand, zentrale Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit des Reaktors zu.

Ein weiterer wesentlicher Parameter ist  $\beta$ , das Verhältnis des Plasmadrucks zum Druck des einschließenden Magnetfeldes. Es läßt sich zeigen, daß  $\beta$  einen Mindestwert von etwa 5 % für einen stationären Reaktor unter Berücksichtigung des gegenwärtigen Standes der Supraleitungstechnik nicht unterschreiten darf. Kleinere  $\beta$ -Werte würden magnetische Feldstärken von mehr als 100 kG erfordern, Werte, die mit bekannten Materialien noch nicht zuverlässig erreicht werden können. Zugleich scheint die Anwendung höherer Felder auch wegen der damit verbundenen starken Zunahme der magnetischen Kräfte in der Struktur unwirtschaftlich zu werden. Mit  $\beta = 5 \%$ , dem Mindestwert für stationäre Reaktoren, und der maximalen Magnetfeldstärke von 100 kG liegt die Leistungsdichte im Plasma um  $30 \text{ W/cm}^3$ . Berechnungen zur Neutronenökonomie, zum Strahlenschutz und zur Magnetfeldspule ergeben eine Mindestmanteldicke von 1,75 - 2,0 m.

Wie man aus Abb. 2 ableiten kann, hat ein Reaktor des gezeigten Querschnittes die maximale Leistungsdichte im Reaktorkern, d.h. das geringste Volumen, wenn der kleine Radius der Vakuumwand gleich der Manteldicke (einschließlich Magnetspulen) wird. Die Belastungsfähigkeit der Vakuumwand, bezogen auf die gesamte Fusionsleistung wird nach vorläufigen Überlegungen mit  $1300 \text{ W/cm}^3$  angenommen. Dies ergibt bei der obengenannten Mindestmanteldicke eine Bruttoleistungsdichte im Fusionsreaktorkern von ca.  $3 \text{ W/cm}^3$ , einen kleinen Durchmesser von 7,5 - 8 m und eine thermonukleare Leistung pro laufendem Meter Reaktorlänge am Torusumfang von 140 - 160 MW. Um die Geometrie der Magnetfeldwicklung nicht zu sehr entarten zu lassen, muß ein freier Innendurchmesser

des Torus von 4 - 5 m gewählt werden. Damit ist der große Torusdurchmesser mit 11 - 13 m und eine thermokernleare Leistung zwischen 5000 und 7000 MW<sub>th</sub> festgelegt. Diese Leistung erscheint zunächst sehr hoch, aber man muß daran erinnern, daß Fusionsreaktoren - wenn sie eines Tages gebaut werden können - Anlagen für den Bedarf des Jahres 2000 sein werden. Im Vergleich dazu werden schon heute in Deutschland Kernkraftwerke mit einer Leistung von über 1000 MW<sub>e</sub> errichtet.

## 4. AUFGABEN

### 4.1 Stabiler Einschluß und Heizung des Plasmas

Die zentrale Aufgabe bei der Entwicklung eines Fusionsreaktors ist die Erzeugung, die Heizung und der stabile Einschluß des Plasmas, in dem die Fusionsreaktionen ablaufen sollen. Die zur Lösung dieses Problems vorgesehenen Apparaturen sind bereits in der Tabelle S. 6 aufgeführt, aus der auch ihre gegenseitige Verwandtschaft deutlich wird; sie werden hier noch einmal im einzelnen beschrieben.

#### 4.1.1 Tokamak-Pulsator

Rotationssymmetrische Anordnungen, wie der Pulsator, erfordern für das Plasmagleichgewicht die Anwesenheit meridionaler Komponenten des Magnetfeldes. Zu diesem Zweck wird ein azimuthaler Strom im Plasma selbst induziert, dessen Feld im Zusammenwirken mit einer Metallschale hoher Leitfähigkeit und einem vertikalen Feld dann das Gleichgewicht erzeugt. Daraus folgt, daß eine solche Anordnung prinzipiell nur gepulst betrieben werden kann, was sie z.B. vom Stellarator unterscheidet. Andererseits haben die rotationssymmetrischen Experimente den Vorzug, daß sie grundsätzlich relativ leicht realisiert und interpretiert werden können.

Eine Diskussion der Stabilität zeigt, daß die Konfiguration stark instabil wird, wenn der azimuthale Strom einen bestimmten Wert, die "Kruskal-Shafranov-Grenze" übersteigt. (Schwächere Instabilitäten könnten auch unterhalb der K.-S.-Grenze vorhanden sein.) Bei allen Tokamakexperimenten bleibt man mit dem azimuthalen Strom unter dieser Grenze. Der azimuthale Strom dient gleichzeitig zur Ohm'schen Aufheizung des Plasmas. Man ist deshalb bestrebt, ihn möglichst groß zu machen. Da die Kruskal-Shafranov-Grenze dem azimuthalen Hauptmagnetfeld proportional ist, muß auch dieses möglichst hoch gewählt werden.

Das am IPP im Aufbau befindliche Tokamak-Experiment "Pulsator" ergibt sich aus diesen Forderungen. Seine Parameter wurden so gewählt, daß es durch Verwendung einer bereits vorhandenen Energiequelle für das Hauptfeld möglichst schnell und billig aufgebaut werden kann.

In einer zweiten Ausbaustufe ist die Hinzunahme einer adiabatischen Kompression des Plasmas geplant. Diese erfordert ein schnell ansteigendes Magnetfeld (etwa  $10^4$  Gauss  $\text{sec}^{-1}$ ) und soll die Möglichkeit bieten, den "Limiter" (d.h. die das Plasma von der Wand isolierende Blende, die zum Tokamakbetrieb zur Zeit noch nötig ist) zu ersetzen. Das ist deshalb wichtig, weil man in einem Reaktor einen Limiter nicht benutzen kann. Insbesondere kann damit die Frage untersucht werden inwieweit der Limiter für das relativ stabile Verhalten des Plasmas in den gegenwärtigen Tokamak Experimenten verantwortlich ist.

#### 4.1.2 Screw-Pinch

Auch der Screw-Pinch gehört zu den rotationssymmetrischen Apparaturen mit einem azimuthalen Strom zur Erzeugung der meridionalen Felder. Allerdings wird hier das Plasma durch rasch ansteigende Magnetfelder komprimiert und eingeschlossen. Der Unterschied zu den Tokamakexperimenten besteht deshalb darin, daß die Aufheizung des Plasmas durch Stoßwellen und adiabatische Kompression erfolgt. Diese Heizmethoden haben sich an linearen Vorexperimenten sehr gut bewährt. Stoßwellenheizung erfordert hohes  $\beta$  (d.i. das Verhältnis des Plasmadrucks zum magnetischen Druck) und dieses wiederum einen azimuthalen Strom über der Kruskal-Shafranov-Grenze für das Gleichgewicht. Dadurch wird der Pinch instabil und man muß versuchen, die Instabilitäten durch andere Methoden zu beseitigen. Das kann möglicherweise durch radiale Magnetfeldprofile hoher Verschönerung (sogenannte "Feldprogrammierung") oder durch dynamische Stabilisierung oder durch beides gemeinsam erreicht werden. Beide Stabilisierungsmethoden werden z.Z. am IPP an Screw-Pinch-Experimenten untersucht.



#### 4.1.3 Wendelstein-Stellarator

Beim Stellarator werden die Plasmagleichgewicht und -stabilität erzeugenden Magnetfelder durch außerhalb des Vakuumgefäßes stationär fließende Ströme erzeugt und durch im Plasma fließende Ströme höchstens schwach modifiziert, aber in ihren Eigenschaften nicht grundsätzlich geändert. Aus diesem Grunde ist der Stellarator momentan die einzige toroidale für den Fusionsreaktor vorgesehene Apparatur, die stationären Betrieb zuläßt. Die in mehreren der jetzt existierenden Vertreter dieses Typs mit Plasmen vergleichsweise niedriger Temperatur gemessenen Einschlußzeiten stimmen weitgehend mit den klassisch berechneten Zeiten überein und sind nicht durch anomale Plasmaverluste bestimmt.

Es ist jetzt die Aufgabe, die Experimente auf Plasmen höherer Temperatur auszudehnen und die Stärke des einschließenden Magnetfeldes zu erhöhen. Neben der CLEO in Culham, Großbritannien und dem URAGAN in Charkow, UdSSR, befindet sich zu diesem Zweck im IPP der noch größere Wendelstein VII im Bau, der zur Erzeugung des toroidalen Hauptmagnetfeldes bereits mit supraleitenden Spulen ausgerüstet wird. Damit wurde auch diese für einen Fusionsreaktor wichtige technische Entwicklung in Angriff genommen.

##### 4.1.3.1 Plasmaheizung

Eine im niedrigen Temperaturbereich effektive Heizung ist die Ohm'sche Heizung durch einen parallel zum Magnetfeld induzierten Strom. Dabei erlaubt es das Stellaratorprinzip durch Zusammenwirken der vom Plasmastrom erzeugten Felder mit geeignet abgestimmten helikalen Feldern, die Magnetfeldgeometrie und dabei insbesondere die Größe der Rotationstransformation des Magnetfeldes auf günstige Werte einzustellen und diese festzuhalten, selbst wenn man zu einer Wechselstromheizung und damit zu einer kontinuierlichen Heizung des Plasmas überginge.

Zur weiteren Heizung des Plasmas werden in Zusammenarbeit mit den Instituten in Culham und Grenoble Versuche zum Transit Time Magnetic Pumping vorbereitet. Der Wirkungsgrad dieser Heizmethode steigt mit zunehmender Temperatur des Plasmas und wird deswegen bei höheren Temperaturen interessant. Ihr wird vor anderen Methoden deswegen ein großer Vorzug gegeben, weil die Energie primär nicht dem zum Magnetfeld senkrechten Freiheitsgrad der Teilchen zugeführt wird, sondern dem parallelen. Damit wird die Wahrscheinlichkeit für die Anregung von Instabilitäten herabgesetzt.

Für einen später stationär brennenden Fusionsreaktor bereitet das Nachfüllen des Brennstoffes einige Probleme. Hier sieht man die aussichtsreichste Lösungsmöglichkeit im Einschuß hochenergetischer Neutralteilchen. Auch zu diesem Komplex werden Versuche vorbereitet, um dieses Prinzip im Wendelstein VII zu erproben.

#### 4.1.4 Hoch- $\beta$ -Stellarator (Isar-Torus)

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für einen Fusionsreaktor zeigen, daß der  $\beta$ -Wert des Plasmas möglichst hoch sein soll und wohl oberhalb von 5 % liegen muß. Allein aus diesem Gesichtspunkt erscheint es sinnvoll, Stellaratorexperimente auf das Hoch- $\beta$ -Gebiet auszudehnen. Dazu kommt, daß ein Hoch- $\beta$ -Plasma sehr wirkungsvoll durch Stoßwellen aufgeheizt werden kann(s.u.). Sowohl Unterschiede im technisch-experimentellen Aufbau, als auch spezifische physikalische Probleme machen es dabei notwendig, daß beim jetzigen Stand der Entwicklung Hoch- $\beta$ -Experimente an einer vom Niedrig- $\beta$ -Experiment getrennten Anlage durchgeführt werden.

Das Hauptproblem der MHD-Stabilität von Stellaratorgleichgewichten im Hoch- $\beta$ -Bereich scheint lösbar zu sein. Hierauf weisen sowohl neuere theoretische Arbeiten, die am IPP und an anderer Stelle durchgeführt worden sind, als auch ebenfalls am IPP durchgeführte

lineare Vorversuche hin. Im Jahre 1971 werden im IPP Experimente an einer größeren toroidalen Apparatur (Durchmesser 2,7 m) beginnen können. Es ist aber schon jetzt notwendig, den Bau einer noch größeren Anlage vorzubereiten. Deren Energieinhalt sollte dem zur Zeit im Bau befindlichen Scyllac-Experiment (Los Alamos) vergleichbar sein. Neben der Untersuchung der MHD-Stabilität wird an der Anlage Isar T1 insbesondere das Problem der Ausgleichsvorgänge entlang der Feldlinien studiert werden müssen. In diesem Punkt ist ein qualitativer Unterschied gegenüber den bisher realisierten Niedrig- $\beta$ -Experimenten zu erwarten. Im Hinblick auf die andersartigen Ausgleichsvorgänge können die anzustrebenden Gleichgewichte als "M+S-artig" bezeichnet werden.

#### 4.1.4.1 Stoßwellenheizung

Die Stoßwellenheizung stellt eine wirksame und im Ganzen gesehen überschaubare Methode dar, ein Plasma auf höchste Temperaturen aufzuheizen. Bei diesem Verfahren erzeugt ein schnell ansteigendes Magnetfeld im vorliegenden Plasma eine konzentrische Stoßwelle, deren Energie sich im weiteren Verlauf in thermische Energie umwandelt.

Die Stoßwellenheizung wurde bisher vor allem bei Theta-Pinch-Experimenten erfolgreich eingesetzt. Dabei konnten Temperaturen von maximal 60 Mio. Grad erreicht werden. Genauso wirksam sollte die Heizmethode bei toroidalen Hoch- $\beta$ -Experimenten, wie Screw-Pinch (s.u.) und Hoch- $\beta$ -Stellarator, benutzt werden.

Die mit der Aufheizung der Freiheitsgrade senkrecht zum Magnetfeld verbundenen Instabilitäten wurden experimentell untersucht und scheinen für einen toroidalen Einschluß keine ernsthaften Schwierigkeiten entstehen zu lassen. Das mit der Heizmethode verbundene hohe Kompressionsverhältnis macht es für die weitere Entwicklung eventuell notwendig, eine Kombination mit anderen Methoden zu untersuchen.

## 4.2 Brennstoffeinschuss

### 4.2.1 Neutraleinschuss

Hier besteht das grundsätzliche Problem, den Brennstoff d.h. einige  $10^{23}$   $\frac{\text{Atome}}{\text{s}}$  durch das Magnetfeld in das Innere des Reaktors zu bringen. Neutrale Atome dringen als Folge von Ionisation und Ladungsaustausch nicht tief genug in das Fusionsplasma ein. Dies gilt auch für Zusammenballungen einer großen Anzahl von Atomen, sogenannten "Clusters". Einen Ausweg scheint der Einschuss makroskopischer Teilchen aus Deuterium-Tritium-Eis zu bieten. Möglicherweise schirmen solche Teilchen durch eine Hülle kalten Gases weitgehend gegen den hohen Energiefluß im Plasma ab, so daß sie bis ins Innere des Reaktors vordringen können.

Bis heute ist dieser Methode noch wenig Aufmerksamkeit gewidmet worden. Vor der endgültigen Konzipierung eines Fusionsreaktors sind theoretische und vor allem experimentelle Untersuchungen in erheblichem Umfang notwendig.

### 4.2.2 Plasmaerzeugung durch Laser

Für die Erzeugung und Startheizung eines Plasmas, können vorteilhaft Hochleistungslaser verwendet werden. Bei dieser Methode werden Partikel aus festem Deuterium-Tritium mit dem Laser bestrahlt und in Zeiten, die kleiner als die Einschusszeit der betreffenden Anlage sind, verdampft, ionisiert und auf hohe Temperaturen geheizt.

Bisher wurden für Versuche dieser Art vorwiegend Neodymglasslaser verwendet. Wie die Entwicklung der letzten Zeit gezeigt hat, sind Energien der geforderten Größenordnung (ca.  $10^8$  Joule) jedoch eher von  $\text{CO}_2$ -Lasern oder chemischen Lasern zu erwarten. Chemische Laser haben dabei den Vorteil, daß ihre Strahlungsenergie mit hohem Wirkungsgrad direkt aus chemischer Energie gewonnen wird. Chemische Laser machen damit einen separaten teuren Energiespeicher überflüssig.

$\text{CO}_2$ -Laser und chemische Laser ermöglichen wegen ihrer größeren Wellenlängen auch die Heizung von Plasmen geringer Dichte. Für diese Aufgaben müssen extrem leistungsfähige Lasersysteme entwickelt werden.

#### 4.3 Vakuum- und Wandprobleme (Oberflächenphysik)

Die in einem Fusionsreaktor auftretenden Vakuum- und Wandprobleme hängen ab vom Reaktorkonzept und von den plasmaphysikalischen Daten: Jeder Fusionsreaktor und jedes Plasmaexperiment hat sein eigenes Wandproblem. Die folgenden Ausführungen können daher nur pauschal sein. Niob wird zur Zeit als günstigstes Material für die erste Wand angesehen, alle Zahlenangaben beziehen sich deshalb auf Niob.

##### 4.3.1 Zerstäubung von Wandmaterial und Strahlenschäden durch Ionenbeschuß.

Das Ziel ist, für ein gegebenes Reaktorkonzept die Wanderosion und die resultierende Verunreinigung des Plasmas angeben zu können und geeignete Materialien auszuwählen. Auf diesem Gebiet sind im großen und ganzen bekannt die Zerstäubungsraten, sowie Ladungszustand und Winkelverteilung des abgestäubten Materials. Kaum (und bei Zerstäubung mit leichten Ionen -  $H^+$ ,  $D^+$ ,  $T^+$ ,  $He^+$  - gar nicht) bekannt ist die Energieverteilung der Neutralen, und das sind ca. 90% aller abgestäubten Teilchen. Die durch den Ionenbeschuß in der Oberflächenschicht erzeugten Strahlenschäden heilen bei der voraussichtlichen Betriebstemperatur aus. Die Abtragung der Wand in einem Reaktor ohne Divertor (Teilchenbeschuß  $10^{16}$  Ionen/cm<sup>2</sup> sec) würde 5 bis 10 mm in 20 Jahren betragen (Zerstäubungsausbeute  $4 \cdot 10^{-3}$  für 20 keV  $D^+ \rightarrow Nb$ ), wenn man die Zerstäubung durch schwere Verunreinigung des Plasmas vernachlässigen kann. Wichtig ist also die Messung der Energieverteilung. Man braucht sie, um die Eindringtiefe der abgestäubten Teilchen ins Plasma zu berechnen. Daneben muß die Messung noch fehlender Zerstäubungsausbeuten erfolgen.

##### 4.3.2 Eingeschossenes Gas: Rückstreuung und Rückdiffusion, Aufsammeln und Blasenbildung.

Der Zustrom von kaltem Neutralgas, das zu Umladungsverlusten und zu Wandbeschuß mit schnellen Neutralteilchen führt, muß klein gehalten werden, Wandkorrosion infolge

Blasenbildung ist zu vermeiden. Möglicherweise diffundiert das eingeschossene Gas weiter in die Wand hinein; dann muß die Änderung der mechanischen Eigenschaften durch Einbau dieses Gases bekannt sein. Außerdem soll die in der Wand gespeicherte Tritium-Menge möglichst klein bleiben.

Die Energieverteilung und der Ladungszustand der zurückgestreuten Teilchen sind nur oberhalb von 5 bis 10 keV bekannt. Aufsammeln, Löslichkeiten und Diffusionskoeffizienten sind dagegen bereits gemessen; ob sich diese Daten bei gleichzeitiger intensiver Bestrahlung ändern, ist offen. Der Effekt der Blasenbildung ist an vielen Materialien beobachtet, der Mechanismus ist aber noch weitgehend ungeklärt.

Die Löslichkeit und Beweglichkeit von Wasserstoff in Niob ist hoch. Je nach Wandtemperatur und Gasdruck kann daher die im Niob gespeicherte Tritium-Menge beziehungsweise der Gasverlust aus dem Vakuumgefäß unzulässig große Werte erreichen.

Weitere Untersuchungen der Einzeleffekte, insbesondere der Energieverteilung der neutral zurückgestreuten Teilchen sollten erfolgen. Kombinierte Effekte müssen direkt an Plasmaexperimenten oder an Kernreaktoren untersucht werden.

#### 4.3.3 Desorption (thermisch und durch Bestrahlung).

a) Von adsorbiertem Wasserstoff: Dieser Effekt, der bei derzeitigen Experimenten oft erheblich stört, wird voraussichtlich nicht auftreten, da die Wandtemperatur über der Desorptionstemperatur liegen dürfte, bzw. im Fall des Niob der Wasserstoff gelöst wird. Kaltflächen, die das Plasma "sieht", sind allerdings unzulässig.

b) Von Verunreinigungen: Desorbierte Verunreinigungen erhöhen die Abstrahlungsverluste. Dies ist besonders in der Heizphase möglichst zu vermeiden. Bei laufendem

Reaktor wird vermutlich die zulässige Verunreinigung durch die Belastbarkeit der Vakuumwand begrenzt werden.

Die thermischen Desorptionsenergien sind meist bekannt oder nach Standardmethoden meßbar. Teilweise liegen sie so hoch, daß eine thermische Reinigung der Reaktorwand nicht möglich ist (Sauerstoff auf Nb benötigt etwa 2300 K). Die Verunreinigungen sind teilweise im Material gelöst, daher erfolgt bei mittleren und höheren Temperaturen eine Nachlieferung (Sauerstoff in Nb!). Die Desorption durch Beschuß und Bestrahlung, insbesondere kombinierte Prozesse, sind nur unvollständig bekannt.

Die Desorption der Verunreinigungen durch Beschuß und Strahlung muß untersucht werden. Mit Hilfe der Reaktordaten muß dann ermittelt werden, wie kritisch der Effekt wird. Gegebenenfalls müssen Reinigungsmethoden untersucht werden.

#### 4.4 Vakuum-Pumpen

Die Pumpen müssen die "Asche" abführen. Bei einem Abbrand von 3% ergibt sich für den 5 GW<sub>th</sub>-Reaktor eine Gasmenge von ca.  $10^{23}$  Teilchen/s; das entspricht etwa 2 l/s bei Normalbedingungen. Die Pumpgeschwindigkeit ergibt sich dann aus dem zulässigen Neutralgasdruck und der Gas-temperatur. Die vom Gas mitgeführte Leistung von einigen 100 MW muß vor dem Pumpen abgeführt werden.

Im Hochvakuumbereich kann man höchstens eine Pumpgeschwindigkeit von 30 l/s·cm<sup>2</sup> für die Wasserstoffisotope erreichen. Da die Vakuumwand des Reaktors eine Fläche von  $6 \cdot 10^6$  cm<sup>2</sup> hat, könnte man mit idealen Pumpen, die die gesamte Reaktorwand einnehmen, einen Druck von etwa  $10^{-5}$  Torr erzeugen. Daraus folgt, daß ein stationärer Reaktor mit Hochvakuum zwischen Plasma und Wand ohne Divertor nicht denkbar ist.

Auch bei einem zulässigen Druck von  $10^{-4}$  Torr im Divertor werden noch 100 der derzeit größten Öldiffusionspumpen gebraucht, die dann in drei Reihen dicht andicht um den

ganzen Reaktor stehen.

Auch mit dem Divertor dürfte es daher nicht einfach sein, die Pumpen so anzuordnen, daß weder das Magnetfeld noch die Tritiumbrütung negativ beeinflußt werden. Das gilt auch bei Anwendung von Getterpumpen. Bei ihnen muß das aufgesammelte Gas durch Ausheizen von Zeit zu Zeit ausgetrieben werden. Das Problem der Treibmittelrückströmung, das bei Öldiffusionspumpen kritisch werden kann, ist wahrscheinlich bei Getterpumpen leichter zu beherrschen.

Sollte allerdings ein Druck von  $10^{-2}$  Torr zulässig sein, ist das Problem wesentlich einfacher. Dann würden z.B. drei große Rootspumpen zum Abpumpen des Gases ausreichen.



#### 4.5 Divertor

In einem Fusionsreaktor muß die Wand des Vakuumgefäßes weitgehend vor dem Beschuß mit geladenen Teilchen geschützt werden, schon um die Verunreinigungen des Plasmas auf einem tolerablen Maß zu halten. Deswegen ist der Einbau eines Divertors unerläßlich. In einem Stellarator klassischer Art mit getrennten Spulen zur Erzeugung des toroidalen Haupt- und des helikalen Zusatzfeldes ist die Einführung eines Divertors schwierig und stört die Symmetrieeigenschaften der Apparatur. Da jedoch ein Fusionsreaktor in der Magnetfeldgeometrie nicht flexibel zu sein braucht, bietet hier das Torsatron-Prinzip, die französische Variante des Stellarators, eine vergleichsweise einfache und vielversprechende Lösung des Problems. Dabei wird eine feste Kombination des Haupt- und des helikalen Feldes mit nur einem Satz helikal um das Vakuumrohr laufender Spulen erzeugt. Außerhalb des Einschlusses des Plasmas laufen dann alle Feldlinien durch enge Schlitze zwischen den Wicklungen hindurch nach außen und laufen in dem dort feldschwächeren Gebiet weit auseinander. Dort lassen sich dann ohne Störung der Symmetrieeigenschaften der Apparatur relativ großflächige und damit nicht übermäßig belastete Absorberflächen anbringen wobei zusätzlich die Spiegelfelder eine Rückdiffusion der geladenen Teilchen erheblich reduzieren.

#### 4.6 Erste Mantelzone (Vakuummwand, Brut- u. Moderatorzone)

Während die thermische und mechanische Wandbelastung im wesentlichen Probleme der Dimensionierung sind, stellen die Strahlenbelastung durch schnelle Neutronen ( $14 \text{ MeV}, \phi = 10^{14} \text{ n/cm}^2\text{s}$  über 20 Jahre) und die Verträglichkeit mit dem Moderator die entscheidenden Kriterien für die Materialauswahl dar. Der Einfluß der Strahlenschädigung auf die Eigenschaften der in Frage kommenden Materialien (Niob und Molybdän bis zu ca.  $1000^\circ\text{C}$ , ferritischer Stahl bis zu ca.  $600^\circ\text{C}$ ) ist noch weitgehend unbekannt.

Flüssiges Lithium ist der Hauptbestandteil der ca. 1-2 m dicken Brut- und Moderatorzone. Beimischung von Natrium erhöht die Energiefreisetzung auf Kosten der Tritium-Brutrate, für die ein Wert von mindestens 1.15 anzustreben ist. Zur Auffindung der ökonomisch sinnvollsten Materialzusammensetzung sind eingehende Untersuchungen mit Hilfe von geeigneten Computer-Programmen und in entsprechenden Versuchen notwendig. Konzepte zur Wärmeabfuhr, insbesondere in toroidaler Geometrie, sind theoretisch und experimentell zu untersuchen unter besonderer Berücksichtigung der Probleme strömender Flüssigmetalle in Magnetfeldern. Die Auswahl des geeigneten Strukturmaterials hat unter den gleichen Gesichtspunkten wie die des Wandmaterials zu erfolgen. Dabei sind Überlegungen zu einer günstigen Neutronenökonomie und geringer Aktivierung einzubeziehen.

#### 4.7. Zweite Mantelzone (Thermische Isolation u. Abschirmung)

Die zweite Mantelzone enthält nach innen (zur ersten Mantelzone) und nach außen (supraleitende Spule) jeweils eine Vakuumisolierschicht, wobei auf der Außenseite noch ein auf Stickstoff-Temperatur liegender Strahlungsschild hinzukommt. Diese thermischen Isolationen stellen im wesentlichen Dimensionierungsaufgaben dar.

Die Abschirmung des Fusionsreaktors gegen Neutronen und  $\gamma$ -Strahlung ist mit der des Spaltreaktors vergleichbar. Eine genauere Kenntnis des Spektrums der aus der Moderatorzone austretenden Neutronen und der in ihr erzeugten  $\gamma$ -Strahlung ist erforderlich, um die Abschirmschichten dimensionieren zu können.

An experimentellen Arbeiten zu den beiden Mantelzonen sind Untersuchungen über die Strahlenschädigung von Materialien, über Materialverträglichkeiten und zur Technologie flüssiger Metalle in hohen Magnetfeldern vorgesehen. Diese Untersuchungen müssen bald beginnen. Zu einem späteren Zeitpunkt werden Versuche zur Wärmeabfuhr und Mantelexperimente notwendig. Rechnungen zur Mantel-Neutronik einschließlich Abschirmung sowie zur Wärmeabfuhr müssen ebenfalls begonnen werden; weitere theoretische Arbeiten betreffen die thermische und mechanische Wandbelastung sowie allgemeine Reaktorentwürfe und deren laufende Ergänzung entsprechend dem Stand des Wissens.

## 4.8 Magnetfelderzeugung

Die Einrichtungen zur Erzeugung des einschließenden Magnetfeldes werden voraussichtlich den größeren Teil der für den Reaktorkern aufzuwendenden Kosten beanspruchen. Das gilt sowohl für die kurzzeitig gepulsten als auch für die langfristig gepulsten oder stationären Systeme. Die Wirtschaftlichkeit eines Fusionsreaktors hängt damit stark vom Fortschritt der Magnetfeldtechnik ab.

### 4.8.1 Normalleitende Magnetfeldsysteme

Normalleitende Magnetfeldsysteme werden voraussichtlich für den Betrieb kurzzeitig gepulster Reaktoren und für den Reaktorstart angewandt werden. Kurzzeitig gepulste Reaktoren werden nur dann ökonomisch sein, wenn es gelingt:

- die magnetische Energie im Reaktor so klein wie möglich zu halten
- die Verluste im Spulensystem und im Energiespeicher gegenüber dem heutigen Stand der Technik erheblich zu vermindern.

Hieraus lassen sich eine Reihe technischer Aufgaben ableiten, deren Bearbeitung im Zusammenhang mit den im Betrieb bzw. in der Planung befindlichen plasmaphysikalischen Experimenten schon jetzt aufgenommen wurde:

- Entwicklung verlustarmer Energiespeicher hoher Energiedichte
- Entwicklung zuverlässiger, verlustarmer Hochleistungsschalter (z.B. Funkenstrecken) und Elemente zum Energietransport
- Untersuchung an normalleitenden Spulenmaterialien insbesondere hinsichtlich geringen Neutroneneinfangquerschnitts und hoher Dauerstandsfestigkeit bei intensiver Neutronenbestrahlung.

#### 4.8.2 Supraleitende Systeme

Die einschließenden Magnetfelder stationärer Fusionsreaktoren können aus ökonomischen und technischen Gründen nur supraleitend erzeugt werden. Supraleitende Spulensysteme werden aber auch schon in größeren stationären Plasmaexperimenten Anwendung finden müssen. Ein erstes Beispiel dafür wird die toroidale "Wendelstein"-Apparatur W VII in Garching mit einem Magnetfeldvolumen von  $10 \text{ m}^3$  und einer Maximalfeldstärke von 40 000 Gauss sein. Die entsprechenden Magnetfelddaten erster Fusionsreaktor-entwürfe mit  $1000 \text{ m}^3$  und 100 kGauss sind nicht unproblematisch, weil:

- die sehr große magnetische Feldenergie von etwa  $10^{10} \text{ Ws}$  auch bei spontanen lokalen Übergängen von der Supraleitung zur Normalleitung sicher beherrscht werden muß
- die auftretenden magnetischen Kräfte mit handelsüblichen Supraleitern und der bisherigen Wickeltechnik zu Wicklungsquerschnitten führen würden, die an einem Torus nicht mehr untergebracht werden können.
- die Begrenzung der Wärmeeinströmung zur supraleitenden Wicklung über die für große Kräfte zu bemessenden Abstützungen sehr schwierig sein wird. Umfangreiche Materialuntersuchungen im Tieftemperaturbereich sind hierzu erforderlich.

#### 4.8.3 Hybride Systeme

Die bekannten Hochfeldsupraleiter sind für die Erzeugung von Impulsfeldern wegen der Magnetisierungs- und Wirbelstromverluste gar nicht oder nur bedingt tauglich. Deshalb beabsichtigt man bei kurzzeitig gepulsten Systemen mit der sogenannten "sustained field Methode" zu arbeiten. Dabei wird das Magnetfeldprogramm

durch Überlagerung eines kurzzeitig gepulsten normalleitenden Magnetfeldes und eines stationären supraleitenden Feldes erzeugt. Für den supraleitenden Magneten ist dieser Betrieb nur dann möglich, wenn es gelingt, ihn gegen die schnellen Feldänderungen so gut abzuschirmen, daß die durch das Restfeld entstehenden Verluste noch schnell genug abgeführt werden können. In geringerem Maße besteht dieses Problem auch bei langfristig gepulsten Reaktoren mit hybriden Magnetfeldsystemen. Im IPP Garching sind seit etwa 3 Jahren Untersuchungen zum Verhalten von Supraleitern unter dem Einfluß schnell veränderlicher äußerer Magnetfelder im Gange. Die bisher gewonnenen Erkenntnisse sollen beim Bau supraleitender Spulen für das hybride Magnetfeldsystem des Experiments W VII angewendet werden.

#### 4.9 Tritium-Technologie

Ein Fusionsreaktor enthält größere Mengen an Tritium. Wegen dessen Radioaktivität ( $\beta$  - Strahler, Halbwertszeit ca. 12 Jahre), die vorwiegend bei Inkorporation eine Gefährdung darstellen kann, und wegen der Diffusionseigenschaften ist der Tritium-Technologie besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Dies gilt insbesondere für die beiden Tritium-Kreisläufe: den Divertor-Kreis und den Mantel-Kreis. Im Divertor-Kreis wird das unverbrannte Deuterium-Tritium-Gemisch von dem Reaktionsprodukt Helium gereinigt durch Anwendung semipermeabler Membrane oder der Methode der fraktionierten Destillation. Im Mantel-Kreis muß der Moderator von dem aus Lithium-Reaktionen entstandenen Tritium befreit werden. Die dazu notwendigen Verfahren hängen stark von der Art des Moderators ab. Gegenwärtig existieren lediglich Vorstellungen über Trennverfahren für Salzschnmelzen-Moderatoren ( $\text{LiF-BeF}_2$ ). Entsprechende Verfahren für Flüssigmetall-Moderatoren sind noch zu entwickeln.

#### 4.10 Thermodynamischer Kreislauf

Mit Hilfe des thermodynamischen Kreislaufs wird die im Mantel erzeugte Wärme mit möglichst hohem Wirkungsgrad in elektrische Energie umgesetzt. Neben der Anwendung eines Gaskreislaufes zur Kühlung des Moderators, in direkter Schaltung mit einer Gasturbine, kommt vor allem ein Flüssigmetallkreislauf mit dem Moderator selbst als Arbeitsmittel und einem nachgeschalteten konventionellen Dampfprozeß in Frage. Dabei sind Wirkungsgrade um 45 % bei wesentlich niedrigeren Temperaturen ( $550-600^\circ\text{C}$ ) als bei Gaskreisläufen ( $800-900^\circ\text{C}$ ) zu erreichen.

Die Vorschaltung einer Hochtemperaturstufe (Kalium topping cycle:  $1050^{\circ}\text{C}$ ) eröffnet Wirkungsgradbereiche bis zu 60 %. Theoretische Kreislaufstudien, Flüssigmetall-Technologie, Entwicklung von Kreislaufkomponenten und "topping cycles" sind bald in Angriff zu nehmende Problemkreise.

#### 4.11 Reaktorregelung

Ausgehend von einer möglichst genauen Beschreibung der Vorgänge im reagierenden Plasma und der Einflußgrößen, die eine Veränderung der Plasmadaten erlauben (Injektion, Magnetfeld, Verunreinigungen, Heizung) muß ein Überblick über die Reaktordynamik und die möglichen Regelverfahren geschaffen werden.

Erste Rechnungen für ein kontinuierlich arbeitendes Reaktormodell (Mills) zeigen, daß ein Reaktor mit  $\alpha$ -Teilchen-Heizung bei der bezüglich Leistungsgabe optimalen Temperatur von 12 keV nicht ohne Zuhilfenahme eines Regelmechanismus betrieben werden kann.

Sie zeigen die besondere Eignung eines Regelverfahrens, bei dem die D-T-Brennstoffmischung in Abhängigkeit von der Elektronentemperatur beeinflußt wird.

Abgesehen von der im Laufe der Zeit möglichen Bestimmung der regeltechnischen Parameter von Reaktorkomponenten ist die laufende Verfeinerung der Rechenprogramme zur Reaktordynamik wesentlich, wobei für die Betriebsbedingungen letztlich die im Experiment zu ermittelnden tatsächlichen Einschlußzeiten maßgebend sein werden.



## 5. Ablaufplan

Dieser Abschnitt dient der Erläuterung des in der Anlage beigefügten Ablaufplanes. Ausgehend vom heutigen Stand des Wissens soll dargestellt werden, wie sich der zeitliche Ablauf der Entwicklung des Fusionsreaktors vermutlich vollziehen wird.

Die internationale Entwicklung läßt zum gegenwärtigen Zeitpunkt klar erkennen, daß sich das Schwergewicht der reaktororientierten Arbeiten in der Plasmaphysik auf toroidal geschlossene Apparaturen konzentriert. Man hofft, daß sich das Problem des stabilen Einschlusses von Fusions-Plasmen in diesen Anordnungen am ehesten lösen läßt. Vier Grundkonfigurationen stehen im Mittelpunkt des Interesses. Entsprechende Apparaturen bilden den wesentlichen Teil des experimentellen Programmes des IPP:

- |                                |                                 |
|--------------------------------|---------------------------------|
| 1) Tokamak,                    | IPP: Pulsator I                 |
| 2) Screw-Pinch,                | IPP: Isar III und Isar IV       |
| 3) Stellarator,                | IPP: Wendelstein W II und W VII |
| 4) Hoch- $\beta$ -Stellarator, | IPP: Isar I                     |

Die bisherigen Erfahrungen in der Plasmaphysik haben gezeigt, daß Extrapolationen nur über einen begrenzten Parameterbereich vorgenommen werden können. Das "Funktionieren" der jeweils nächstgrößeren Stufe ist deshalb nur bei schrittweiser Vergrößerung der Apparaturen zu erwarten. Deswegen werden die vier genannten Linien zwar mit gegenseitiger Wechselwirkung, aber doch getrennt verfolgt werden müssen, mindestens bis die Ergebnisse über Heizung und Einschluß des Plasmas mit den nächsten größeren Apparaturen vorliegen. Dies sind bei den Stellaratoren Wendelstein VII (Garching) und CLEO (Culham), bei den Tokamaks T 10 (Moskau) oder eine vergleichbare europäische Apparatur und bei den Hoch- $\beta$ -Stellaratoren SCYLLAC (Los Alamos) oder eine vergleichbare

Garchingener Apparatur.

Nicht vor dieser Zeit wird man die Vor- und Nachteile und die Aussichten der einzelnen Konfigurationen hinreichend gegeneinander abwägen können. Es widerspräche aber aller Erfahrung, wenn zu dieser Zeit eines der Prinzipien in seinen Eigenschaften alle anderen so weit überragte, daß seine alleinige Auswahl zu rechtfertigen wäre. Wahrscheinlicher ist dagegen eine Konzentration auf z.B. zwei Linien, von denen jede durchaus Elemente der vier bisher verfolgten enthalten mag. Dabei ist es selbstverständlich, daß bei der Auswahl auch solche Ergebnisse zu berücksichtigen sind, die an anderen Instituten oder mit anderen Konfigurationen erarbeitet wurden.

Die nun auszuführenden Experimente - im Plan Fusionsexperimente genannt - werden die zuvor parallel betriebenen an Größe und Aufwand übertreffen; sie werden trotzdem von Instituten wie dem IPP bei nur mäßiger Vergrößerung gleichzeitig bearbeitet werden können. Nach dem Vorliegen gesicherter experimenteller Ergebnisse mit diesen Apparaturen gilt es dann, unter wesentlicher Berücksichtigung technisch-ökonomischer Aspekte, eine Auswahl zu treffen und einen Laborreaktor zu bauen. Aus Kostengründen und aus Gründen der experimentellen Flexibilität sollte dieser vorwiegend die Lösung der plasmaphysikalischen Fragen demonstrieren, also für eine vernünftige, extrapolierbare Zeit ein unter Fusionsbedingungen brennendes Plasma einschließen und insbesondere die Wirksamkeit der Alphateilchenheizung zeigen. Mit diesem Experiment lassen sich dann die genauen Daten festlegen (Magnetfeldgeometrie, Plasmaheizung, Brennstoffeinschuß usw.), unter denen der Reaktor von den plasmaphysikalischen Bedingungen her zuverlässig läuft. In einem noch nicht überschaubaren Umfang müssen dann wichtige Reaktorkomponenten, wie z.B. der Reaktormantel, bereits in dieser Stufe erprobt werden.

In den physikalischen Parametern kann die nächste Stufe, der Prototypreaktor, keine große Flexibilität mehr besitzen. Er muß unter dem Gesichtspunkt konstruiert werden, daß an ihm die weiteren Reaktorkomponenten, wie Mantel, thermodynamischer Kreislauf, Tritiumanlage usw., unter Betriebsbedingungen getestet werden können. Sind die Versuche bis zu diesem Punkt erfolgreich verlaufen und erlauben es die technischen Möglichkeiten, wird man nach dem Prototypreaktor einen Leistungsreaktor bauen, dem dann die industrielle Nutzung folgt.

Aus diesem Ablaufplan lassen sich zwei unterschiedliche technische Aufgabenbereiche erkennen. Der erste umfaßt die Probleme, deren Lösung bis zum Bau des Laborreaktors unerlässlich ist. Hierunter fallen die Fragen der Erzeugung, der Heizung und des Einschlusses des Plasmas, der Eigenschaften der Vakuumwand, des Divertors, der Magnetfelderzeugung usw. Diese technische Entwicklung muß notwendig in enger Wechselwirkung mit dem physikalischen Experiment erfolgen und sollte deswegen in den plasmaphysikalischen Instituten selbst oder, falls für umfangreiche Entwicklungen der Einsatz der Industrie notwendig wird, doch in intensiver Zusammenarbeit mit diesen Instituten vor sich gehen.

Die zweite Gruppe umfaßt dann solche Probleme, deren Lösung erst beim Übergang zum Prototypreaktor erforderlich wird. Hierunter fallen z.B. die mit dem Reaktormantel und der Leistungsabführung zusammenhängenden Fragen. Auf diesem Gebiet existiert bisher noch keine umfassende Erfahrung. Die hiermit zusammenhängenden Probleme sind aber zumindest teilweise verwandt mit denen, deren Lösung bei der Entwicklung von Spaltungsreaktoren erforderlich war oder noch ist. Man sollte deshalb versuchen, für diesen Themenkreis die Mitarbeit solcher Institute zu gewinnen, die sich bisher vorwiegend mit der Entwicklung von Spaltungsreaktoren befaßt

haben. Da weiterhin beim Übergang vom Laborreaktor zum Prototypreaktor bereits sehr detaillierte Vorstellungen z.B. über den Aufbau des Reaktormantels vorhanden sein müssen, ist die technische Entwicklung dieser Komponenten frühzeitig und wahrscheinlich bereits zum jetzigen Termin in Angriff zu nehmen. Der weitere Ablauf und die Richtung dieser Entwicklungen müssen dabei durch den Fortschritt der Fusionsexperimente bestimmt werden.

Beginnend mit dem Prototypreaktor, sollte eine zunehmende Beteiligung der Industrie vorgesehen werden, so daß ein reibungsloser Übergang zur industriellen Nutzung der Fusionsenergie gewährleistet ist. Im Interesse eines optimalen Ablaufens dieses Planes ist auch anzustreben, daß die Zusammenarbeit der einzelnen Institute zumindest innerhalb der Europäischen Gemeinschaft zunimmt.

Der Reaktorausschuß mit den Herren

G. Grieger  
H. Herold  
M. Kaufmann  
A. Knobloch  
G. Lehner  
K.H. Schmitter (Vorsitzender)  
H. Vernickel

wurde von der Wissenschaftlichen Leitung eingesetzt.  
Es fanden insgesamt 11 Sitzungen statt.

Außer den Autoren nahmen an je einer Sitzung als  
Gäste die Herren W. Dänner, G. Haas und S. Witkowski  
teil. Sie berieten den Ausschuß in Fragen der  
Vakuumwand, des Reaktormantels und der Brennstoff-  
injektion.

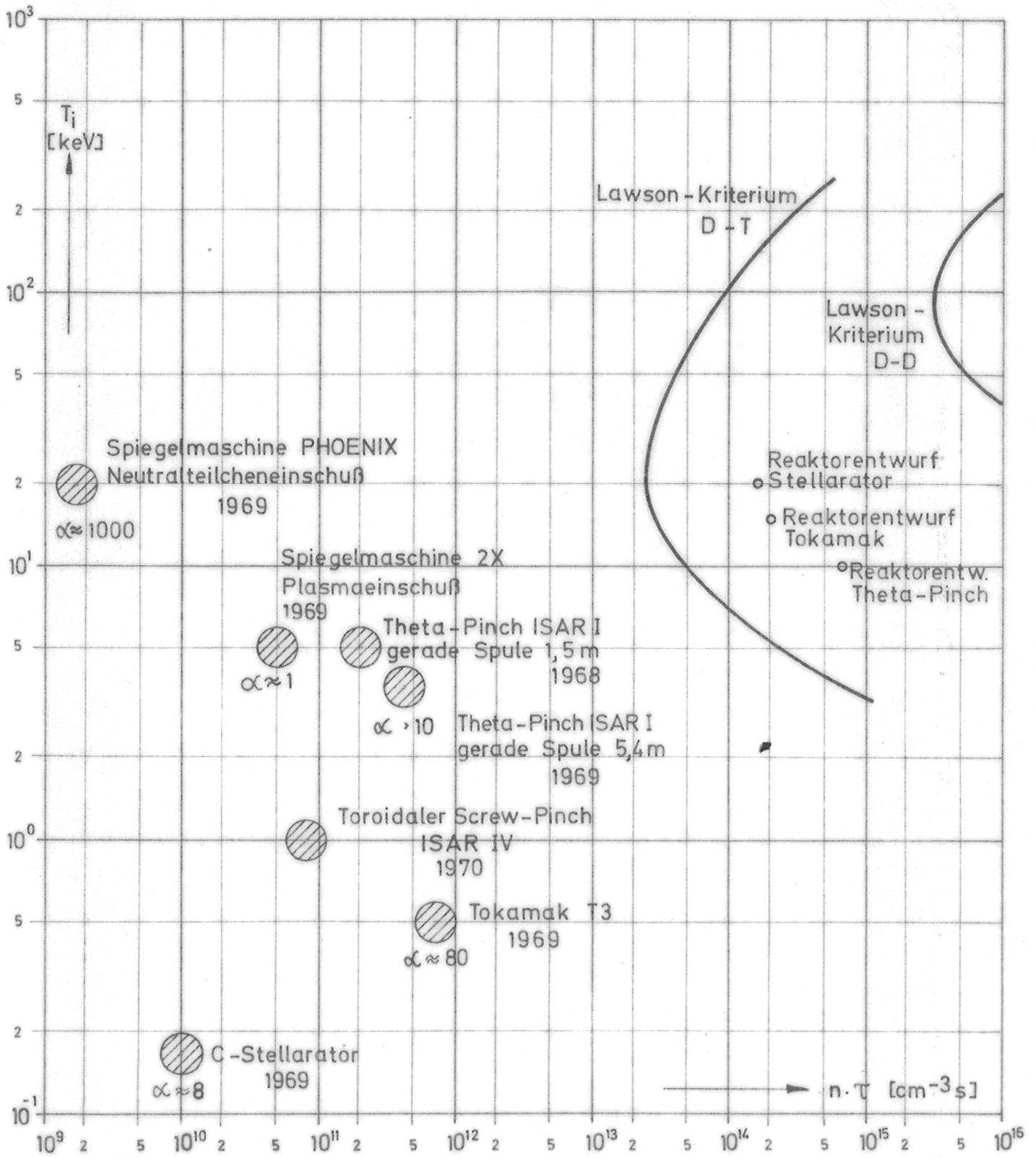
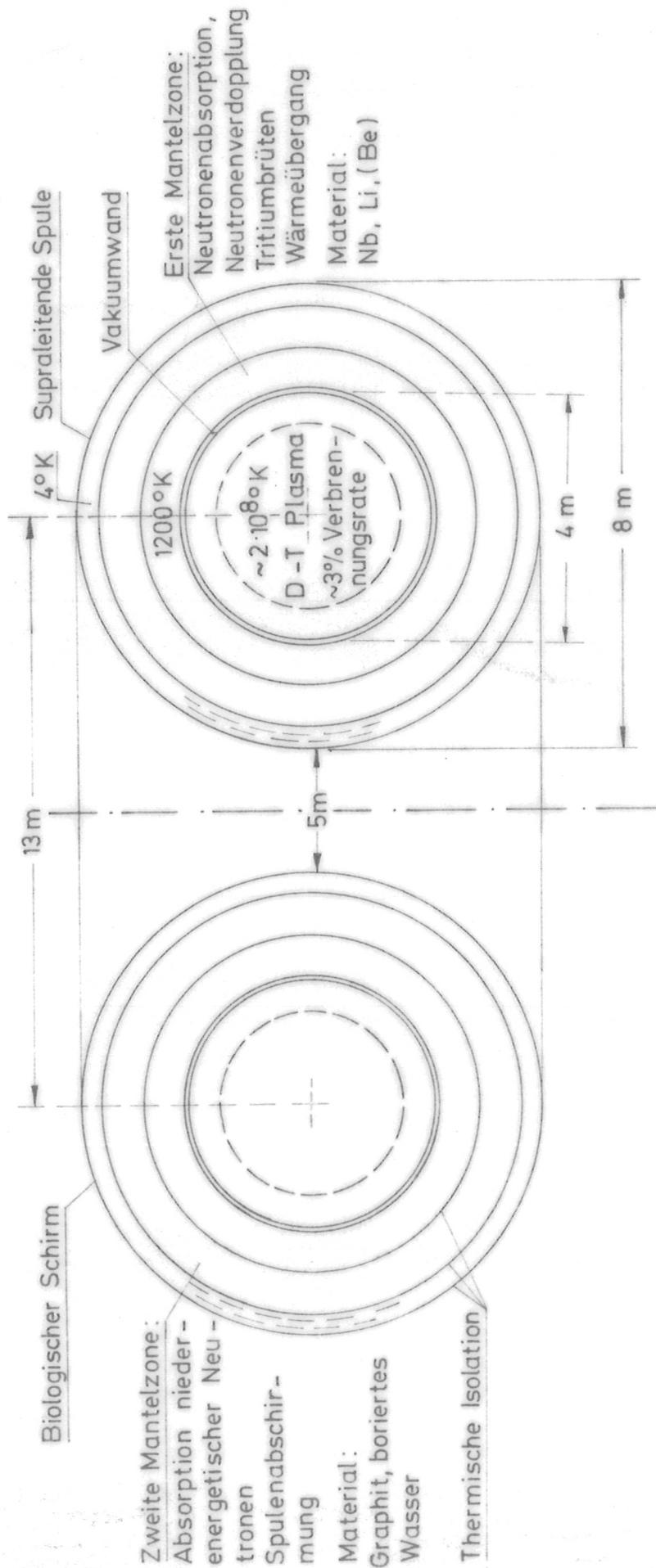


Abb. 1



Schnitt durch einen toroidalen D-T-Reaktor

Abb. 2

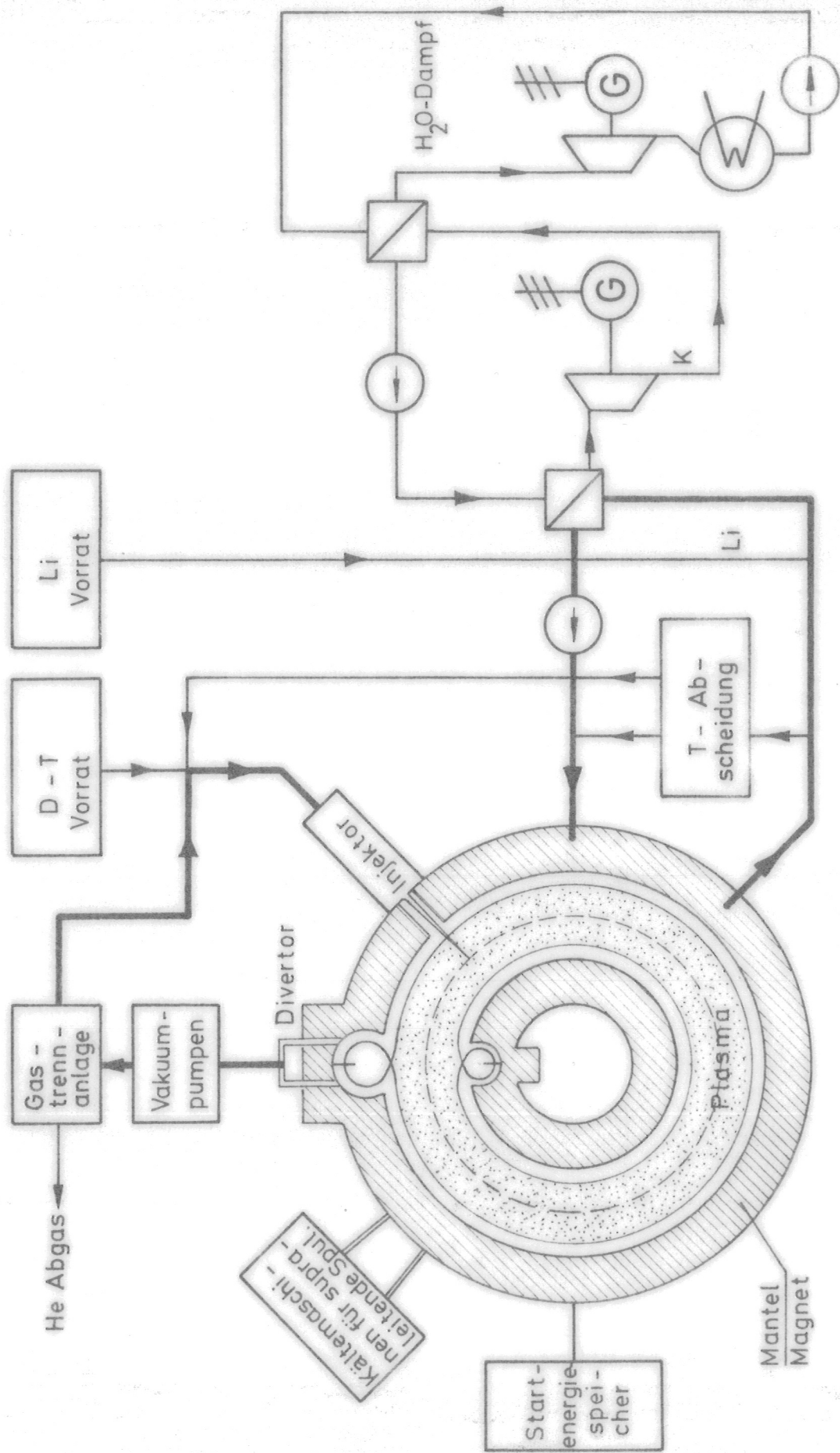


Abb. 3