

March 1971

Mögliche Typen des Fusionsreaktors,
reaktorphysikalische und -technische
Probleme bei seiner Entwicklung.

W. Dänner

A. Knobloch

IPP 4/83

März 1971

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Mögliche Typen des Fusionsreaktors,
reaktorphysikalische und -technische
Probleme bei seiner Entwicklung.

W. Dänner

A. Knobloch

IPP 4/83

März 1971

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

W. Dänner
A. Knobloch

Mögliche Typen des Fusionsreaktors,
reaktorphysikalische und -technische
Probleme bei seiner Entwicklung.
(in German)

IPP 4/83

March 1971

Abstract

The gradual approach to the Lawson criterion calls for fusion machines which because of their increasing size may become precursors of a fusion reactor. Three configurations of toroidal magnetic confinement investigated by the Max-Planck-Institut für Plasmaphysik at Garching and the specific problems of their development are explained. Their integration in a complete fusion reactor power plant is shown by means of a scheme which moreover shall demonstrate the various technologies necessary to be treated with particular engagement.

Some problems are obviously related to the technology of the today's nuclear reactors: the neutron physics, the radiation damage, and the liquid metal technology. The characteristic questionings in fusion reactor technology are presented for each of these topics. The different details and the common ones are pointed out. Finally some hints are given where known methods of nuclear physics and technology are applicable to fusion reactor research and where a parallel development is necessary utilizing as much experiences as possible.

Kurzvortrag anlässlich der Reaktortagung 1971 des Deutschen

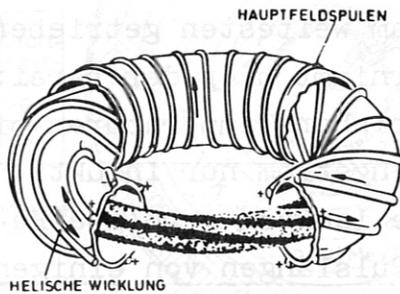
Atomforums in Bonn

Die erstmalig im Rahmen der Reaktortagung 1971 gebotene Gelegenheit soll dazu benutzt werden, auf einige denkbare Reaktorkonzepte und ihre speziellen physikalischen und technischen Voraussetzungen hinzuweisen, sodann aber näher auf diejenigen Fragestellungen beim Fusionsreaktor einzugehen, die denen in der herkömmlichen Reaktortechnik und -physik besonders ähnlich sind.

In jüngerer Zeit war in der Öffentlichkeit hin und wieder die Rede vom Fusionsreaktor, und naturgemäß kann auf dem noch derart im Werden begriffenen Gebiet der Fusionsphysik und -technologie in Darstellung und Beurteilung viel Spekulatives enthalten sein. Man sollte aber sehen, daß im Laufe der über zehnjährigen Bearbeitung der Plasmaphysik und -technik zum Fusionsreaktor auch in Deutschland eine Phase erreicht worden ist, in der die mit der schrittweisen Annäherung des Lawson-Kriteriums zunehmend größer werdenden Fusionsmaschinen mit magnetischem Plasmaeinschluß zu Vorläufern eines Fusionsreaktors werden [1, 2, 3].

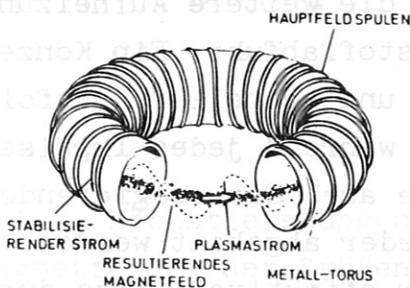
Die Forderung nach Lawson ist kurz die, z.B. ein Deuterium-Tritium-Plasma von 10 bis 20 keV Ionentemperatur - dies entspricht einigen 100 Millionen Grad - so lange festzuhalten, daß das Produkt aus Teilchendichte und Einschlußzeit größer als 10^{14} s/cm³ wird. Erst bei Überschreiten dieses Wertes kann damit gerechnet werden, daß die eingeleitete Fusionsreaktion sich selbst sowie eine kontinuierliche Energielieferung vorwiegend über schnelle 14-MeV-Neutronen dauernd aufrecht erhält. Die Eigenheizung des laufend erneuerten Gasgemisches soll dabei aus der Energie der entstehenden Heliumkerne erfolgen.

Im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik werden einige reaktororientierte Einschließungskonfigurationen mit besonderem Nachdruck entwickelt. Es sind der stationär betriebene Stellarator, das langfristig gepulste Tokamak und der rasch gepulste schnelle Stellarator (Abb. 1).



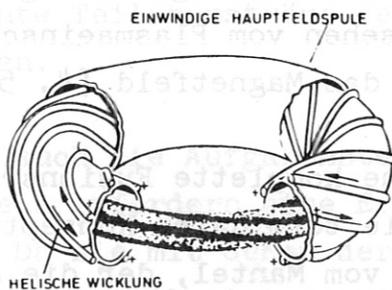
Stellarator

	Experiment (C-Stell.)	Reaktorentwurf Text(n.CLM R85)
T_e [keV]	0,1	20
T_i [keV]	0,15	20
n [cm ⁻³]	5×10^{12}	$2,8 \times 10^{14}$
τ [s]	10^{-3}	0,6
nT [scm ⁻³]	5×10^9	$1,68 \times 10^{14}$
β	10^{-4}	$4,5 \times 10^{-2}$



Tokamak

	Experiment (T3)	Reaktorentwurf Golovin
T_e [keV]	1	15
T_i [keV]	0,4	15
n [cm ⁻³]	5×10^{13}	3×10^{14}
τ [s]	2×10^{-2}	0,7
nT [scm ⁻³]	10^{12}	$2,1 \times 10^{14}$
β	10^{-3}	0,245



Schneller Stellarator

	Experiment Isar I(linear)	Reaktorentwurf Ribe
T_e [keV]	0,4	10
T_i [keV]	4,5	10
n [cm ⁻³]	$1,5 \times 10^{16}$	$2,4 \times 10^{16}$
τ [s]	10^{-5}	$2,5 \times 10^{-2}$
nT [scm ⁻³]	$1,5 \times 10^{11}$	6×10^{14}
β	1	1

Jede der drei Konfigurationen zeigt ein ringförmiges, plasmaerfülltes Reaktionsvolumen in einem ebenfalls toroidalen Magnetfeld. Zusätzliche poloidale Feldkomponenten - bei den Stellaratoren durch separate Wicklungen erzeugt, beim Tokamak durch einen Ringstrom im Plasma - vervollständigen die Einschließungsgeometrie. Beim Stellarator-konzept liegt das gegenwärtige Problem hauptsächlich in der Erzielung höherer Plasmadichten

und Temperaturen. Das Konzept ist attraktiv wegen seines einfachen Aufbaues und der prinzipiell stationären Betriebsweise. Diese kann jedoch nur dann aufrecht erhalten werden, wenn geeignete Start-Heizverfahren gefunden werden. Gelingt das nicht, so käme man bei etwa gleichen Plasmaparametern auch vom Stellarator her zur Tokamakkonfiguration, in der die Annäherung an das Lawson-Kriterium bisher am weitesten getrieben werden konnte. Die Plasmaheizung übernimmt hier der bereits erwähnte Ringstrom im Plasma, wobei bisher Temperaturen bis 1 keV erreicht worden sind. Da der Ringstrom nur induktiv erzeugt werden kann, ergibt sich eine langsam gepulste Betriebsweise des Tokamakreaktors mit Pulslängen von einigen bis zu 20 Minuten und einigen Sekunden Unterbrechungszeit. Problematisch ist hier vorläufig noch die weitere Aufheizung über ca. 1 keV hinaus sowie die Brennstoffabfuhr. Ein Konzept mit geringer relativer Einschaltdauer und schneller Pulsfolge ist der schnelle Stellarator, bei dem während jedes Impulses sowohl die Einschließungsgeometrie wie auch das reagierende Plasmavolumen vollständig auf- und wieder abgebaut werden. Die Plasmaheizung erfolgt hier in sehr effektiver Weise durch sog. adiabatische Kompression durch das ansteigende Magnetfeld; problematisch ist hier - abgesehen vom Plasmaeinschluß - vor allem die Energieversorgung für das Magnetfeld [4, 5, 6].

Das folgende Schema (Abb. 2) für eine komplette Fusionsreaktorstation gilt im wesentlichen für alle toroidalen Konzepte. Der reagierende Plasmaring wird umgeben vom Mantel, der die Aufgabe der Energieumwandlung, Tritiumbrütung und Schirmung hat. Periphere Anlagen betreffen den Brennstoffkreislauf, den Wärmeaustausch, die Stromversorgung der Magnetfelder sowie Heiz- und Regeleinrichtungen. Das Schema soll auf die Tatsache aufmerksam machen, daß die Technik eines Fusionsreaktors mehr noch als die bekannte Reaktortechnik gekennzeichnet ist durch eine Kombination zahlreicher Technologien, die zeitlich paral-

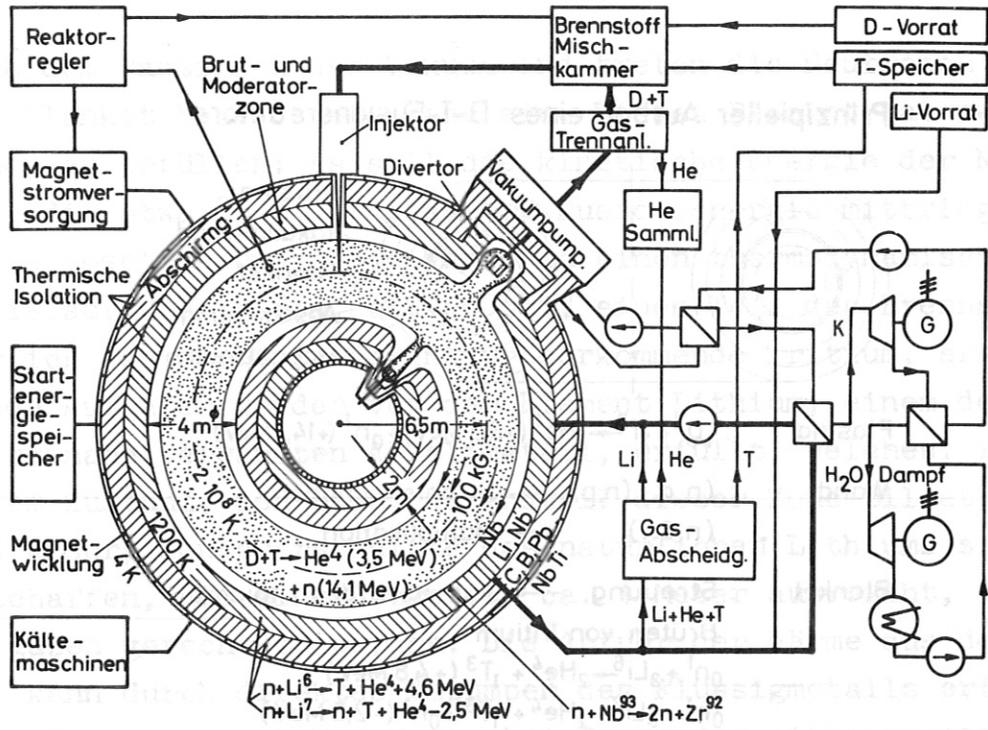


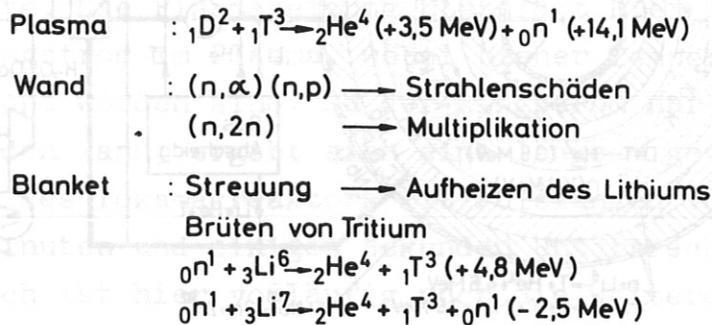
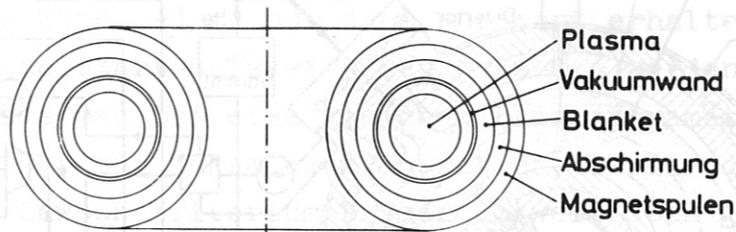
Abb. 2

1el zu Höchstleistungen entwickelt werden müssen. Z.B. werden Magnetfelder der Größenordnung 50 - 100 kG in Volumina von einigen 100 m³ und zur Brennstoffzufuhr Injektoren für äquivalente Teilchenströme der Größenordnung 100 A erforderlich werden.

Aber auch die Aufgabenstellungen im Bereich des Fusionsreaktor-mantels erfordern eine Erweiterung des heutigen Kenntnisstandes. Da sie mit denen der bekannten Reaktorphysik und -technik zumindest teilweise verwandt sind, werden sie im folgenden etwas eingehender behandelt.

Zu diesem Zweck soll zunächst in kurzen Zügen erläutert werden, wie der Mantel eines Fusionsreaktors aussieht und was in ihm geschieht. Abb. 3 zeigt den schematischen Aufbau eines toroidalen Reaktors. Im Prinzip ist dieser Aufbau völlig unabhängig von der gewählten Einschlußmethode.

Prinzipieller Aufbau eines D-T-Fusionsreaktors



Abschirmung: gegen Neutronen + Gammastrahlung

P 263

Abb. 3

Im Inneren befindet sich das Plasma. Hier läuft die Fusionsreaktion ab, bei der Deuterium und Tritium reagieren unter Bildung eines Heliumkernes und eines Neutrons. Während der Heliumkern (oder das Alpha-Teilchen) aufgrund seiner Ladung im Magnetfeld verbleibt und dort seine Energie von 3,5 MeV an den kalt nachgefüllten Brennstoff abgibt, werden die Neutronen die Plasmazone mit einer Energie von 14,1 MeV verlassen. Sie durchdringen zunächst die Vakuumbwand, welche den Reaktionsraum von den übrigen Anlageteilen trennt. Hier werden sie vorwiegend gestreut; die für die Wand in Frage kommenden Materialien, die nicht ausschließlich unter neutronenphysikalischen Gesichtspunkten ausgewählt werden können, weisen aber auch spürbare Wirkungsquerschnitte für (n, α) - und (n, p) -Reaktionen auf, was zusammen mit der zu erwartenden Defektbildung bei den hier auftretenden Neutronenflüssen zu einer erheblichen Strahlenschädigung führen wird. Die in diesem Energiebereich ebenfalls wirksame Neutronenmultiplikation ist hingegen eine durchaus erwünschte Erscheinung.

Nach dem Passieren der Vakuumwand treten die Neutronen in die als Blanket bezeichnete Zone ein. Dieses Blanket hat zwei Aufgaben zu erfüllen: es soll die kinetische Energie der Neutronen, die etwa 80 % der gesamten Fusionsenergie mitbringen, in Wärme umsetzen und diese Wärme an einen thermodynamischen Kreislauf übertragen, und es soll einen Teil des Brennstoffes, nämlich das nicht in der Natur vorkommende Tritium, erbrüten. Beide Aufgaben werden von dem Element Lithium, einem dem Natrium nahe verwandten Alkalimetall, erfüllt, welches, in flüssigem Zustand, den Hauptbestandteil dieser Zone bildet. Streu- und Absorptionsquerschnitte des natürlichen Lithiums sind so beschaffen, daß eine Dicke von ca. 1 Meter ausreicht, beiden Aufgaben gerecht zu werden. Die Abfuhr der Wärme aus dem Blanket kann durch direktes Umpumpen des Flüssigmetalls erfolgen; es existieren auch Konzepte, bei denen der Lithiummantel von einem Rohrsystem durchzogen ist, durch welches Helium strömt. Beide Konzepte erfordern eine überlegte konstruktive Gestaltung hinsichtlich der Kühlmittelführung und in Verbindung damit einen gewissen Anteil an Strukturmaterial. Die unterschiedlichen Kühlsysteme können natürlich auch zu einer Typisierung herangezogen werden, wenngleich die Unterschiede hier nicht so drastisch hervortreten wie im Spaltreaktorbau; denn auch im gasgekühlten Blanket kann auf das Flüssigmetall nicht verzichtet werden.

Hinter dem Blanket liegt schließlich noch die Zone der Abschirmung, welche den Neutronenfluß noch so weit abbauen soll, daß weder eine biologische Gefährdung der Umgebung auftreten kann noch die Funktion der außen liegenden supraleitenden Magnetspulen beeinträchtigt wird. Darüber hinaus soll sie die im Blanket erzeugte Gammastrahlung absorbieren.

Hieraus ist zu erkennen, wo die Berührungspunkte mit der Physik und der Technologie der Spaltreaktoren liegen. Sie sollen hier

nochmals durch drei Stichworte gekennzeichnet werden, bevor auf die spezifische Problematik bei den einzelnen Punkten eingegangen wird. Es sind

1. die Neutronenphysik,
2. die Strahlenschädigung,
3. die Flüssigmetall-Technologie.

Zu Punkt 1: Neutronenphysik [7, 8, 9] (s. Abb. 4)

Die Problematik des Fusionsreaktor-Blankets und der Abschirmung ist im Vergleich zu den neutronenphysikalischen Problemen der Spaltreaktoren eine einfachere, wenn man sie von Seiten der Theorie betrachtet, eine schwierigere hingegen aus experimenteller Sicht. Wodurch ist das Problem gekennzeichnet?

Man hat eine in erster Näherung homogene, isotrope Quelle monoenergetischer Neutronen der Energie 14,1 MeV. Diese Quelle ist umgeben von einem Mantel, welcher die Neutronen abbremsen und absorbieren soll, so daß die aus dem Mantel noch austretende Intensität einen vorgegebenen Betrag nicht überschreitet - ein typisches Abschirmproblem!

Die Lösung wird allerdings durch eine Reihe von Nebenbedingungen erschwert, deren wichtigste die optimale Erfüllung der beiden Aufgaben des Blankets, nämlich die der Energiewandlung und des Tritiumbrütens, sind. Von entscheidender Bedeutung, da wirtschaftlich am schwerwiegendsten, ist die Tritium-Brutrate. Obwohl bei der Fusionsreaktion, d.h. pro ein verbrauchtes Tritiumatom, nur ein Neutron entsteht, sind in einem reinen Lithium-Blanket dennoch Brutraten bis zu 2,0 zu erreichen. Die Verluste durch Absorption in Wand- und Strukturmaterial werden z.T. kompensiert durch die Neutronenmultiplikation in diesen Materialien und durch die Tatsache, daß die Brutreaktion in dem schweren Lithiumisotop $\text{Li}7$ die Neutronenbilanz überhaupt nicht beein-

Neutronenphysikalische Probleme des Fusionsreaktor-Mantels

Quelle	Mantel	Umgebung								
homogen isotrop monoenergetisch (14,1 MeV)	Energiewandlung Tritium-Brüten: BR=1÷2	Containment Supraleiter								
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Brutrate</th> <th>Verd. Zeit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1,5</td> <td>2 a</td> </tr> <tr> <td>1,3</td> <td>2,5a</td> </tr> <tr> <td>1,15</td> <td>5 a</td> </tr> </tbody> </table>	Brutrate	Verd. Zeit	1,5	2 a	1,3	2,5a	1,15	5 a	
Brutrate	Verd. Zeit									
1,5	2 a									
1,3	2,5a									
1,15	5 a									

Weitere Fragen:



P 266

Abb. 4

trächtigt. Auf diese Weise sind immer noch Brutraten möglich, welche zu Brennstoff-Verdopplungszeiten führen, die diejenige von Schnellen Brütern weit unterbieten. Eine hohe Brutrate geht jedoch stets zu Lasten der Energiefreisetzungsrates. Es wurde deshalb an anderer Stelle empfohlen, auf eine feste, ökonomisch vertretbare Tritium-Brutrate hinzuarbeiten, die bei etwa 1,15 liegen dürfte, und die Energieausbeute eventuell durch Zugabe geeigneter Materialien, z.B. Natrium zu optimieren. Neben der Tritium-Brutrate und der Energiefreisetzungsrates im Lithium interessieren des weiteren das Transmutationsverhalten, die Aktivierung, die Bildungs-rates für Wasserstoff und Helium aufgrund der (n,p)- und (n,α)-Reaktionen, sowie die Wärmefreisetzungsrates durch Gamma-Absorption, und zwar für die Vakuumbwand als auch für die Strukturmaterialien innerhalb des Blankets. Eine weitere Frage richtet sich nach der zweckmäßigen Zusammensetzung der Abschirmung.

Allen diesen Bedingungen übergeordnet ist die Forderung nach einer möglichst raum- und kostensparenden Bauweise.

Zur theoretischen Berechnung dieser, insgesamt betrachtet doch recht komplizierten Probleme sind die in der Reaktorphysik angewandten Neutronen-Transportcodes und Monte-Carlo-Codes prinzipiell geeignet, sofern sie in der Lage sind, die hier gestellten Fragen mit genügender Genauigkeit zu beantworten. In Ergänzung dazu besteht teilweise noch ein erheblicher Mangel an verbindlichen Wirkungsquerschnittsdaten, insbesondere für Materialien, die bisher in der Reaktortechnik keine besondere Rolle gespielt haben, und bei diesen natürlich vorwiegend im oberen Energiebereich, der ja selbst den Bereich Schneller Reaktoren noch übersteigt. Auf theoretische Berechnungen ist man in der Fusionsreaktortechnik jedoch vorläufig noch angewiesen, solange man auf wirtschaftlich arbeitende intensive 14-MeV-Neutronenquellen verzichten muß. Diese letzte Tatsache ist die Schwierigkeit bei der Betrachtung aus experimenteller Sicht.

Zu Punkt 2: Strahlenschädigung - Bestrahlungsexperimente [10,11,12]
(s. Abb. 5)

Auch das Gebiet der Strahlenschädigung stellt sich beim Fusionsreaktor wesentlich komplexer dar als beim Spaltreaktor, weil die Bestrahlungsbedingungen völlig andere sind. Die Vakuumwand z.B. ist dem vollen, hochenergetischen Neutronenfluß ausgesetzt, das Strukturmaterial einem möglicherweise geringeren und niederenergetischeren Fluß je nach der Position im Blanket. Beide müssen ihre Funktionen während der gesamten Lebensdauer eines Reaktors erfüllen, da aus rein konstruktiven Gründen kaum eine Möglichkeit zum Auswechseln bestimmter Bauelemente innerhalb der Blanketzone besteht. Die Betriebstemperatur im Blanket liegt bei 1000°C und darüber.

Probleme der Strahlenschädigung

Bestrahlungsbedingungen:

	Fluß	Energie	Dosis	Temperatur
Vakuumbwand	10^{15}	14,1 MeV	$>10^{23}$ n/cm ²	> 1000 °C
Strukturmaterial	$10^{13} - 10^{15}$	$\approx 14,0$ MeV	$\approx 10^{23}$ n/cm ²	≈ 1000 °C

Bestrahlungsexperimente:

Reaktoren : hohe Dosis / niedrige Energie

Beschleuniger : niedrige Dosis / hohe Energie

P 265

Abb. 5

Aus verschiedenen Gründen kommen als Werkstoffe für Wand und Blanketstruktur hauptsächlich die Hochtemperaturmaterialien Niob und Molybdän sowie deren Legierungen in Frage; unter bestimmten Bedingungen sind innerhalb des Blankets auch Stähle verwendbar. Leider liegen für Molybdän und Niob heute nur sehr spärliche Bestrahlungsergebnisse vor, die sich zudem keinesfalls auf die hier auftretenden Neutronenenergien beziehen. Es wird also notwendig sein, ein völlig neues Bestrahlungsprogramm zu entwickeln.

Ein solches Bestrahlungsprogramm ließe sich relativ leicht verwirklichen, wenn wirtschaftlich arbeitende, intensive 14-MeV-Neutronenquellen zur Verfügung stünden, mit denen sich die gewünschten Dosen in angemessener Zeit erreichen ließen. Da dies nicht der Fall ist, muß auf die heute verfügbaren Neutronenquellen - Reaktoren und Beschleuniger - zurückgegriffen

werden. Dabei fallen den Reaktoren im wesentlichen die Untersuchung der Effekte zu, die mehr von der Neutronendosis, weniger von ihrer Energie abhängen, den Beschleunigern die Untersuchung derjenigen Effekte, die mehr von der Energie als von der Dosis abhängen. In beiden Fällen fallen somit jeweils nur Teilergebnisse an. Es ist deshalb unerlässlich, für einen umfassenden theoretischen Überbau der Strahlenschädigung zu sorgen. Ansätze zu einer solchen Theorie, die zumindest das Problem der Defektbildung erfaßt und eine Extrapolation auf höhere Neutronenenergien erlaubt, sind bereits vorhanden.

Die Weiterführung dieser theoretischen Arbeiten und die Durchführung eines geschickt angelegten Bestrahlungsprogramms sind deshalb vordringliche Aufgaben für die technologische Entwicklung des Fusionsreaktors.

Zu Punkt 3: Flüssigmetall-Technologie

(s. Abb. 6)

Vergleichsweise einfach sind die Probleme der Flüssigmetall-Technologie, die sich in der Fusionsreaktortechnik naturgemäß auf Lithium konzentriert. Da Lithium aber dem Natrium sehr ähnlich, bezüglich seines Gefahrenpotentials sogar günstiger ist, wird die Entwicklung eine echte Parallele zur Natriumtechnologie darstellen. Neben der Gewinnung verbindlicher Stoffdaten - es sind heute noch manche Diskrepanzen festzustellen [13] - bedürfen vor allem die Probleme der Korrosion, der Reinhaltung und der Verträglichkeit mit Strukturwerkstoffen einer gründlichen Untersuchung. Weitere Aufgaben liegen in der Klärung thermohydraulischer Probleme in einer Geometrie, die mitunter von der üblichen Zylindergeometrie stark abweicht. Von besonderer Bedeutung sind ferner die Untersuchung von Verfahren zur Tritium-

Probleme der Lithium-Technologie

1. Physikalische Eigenschaften
2. Korrosion
3. Verträglichkeit mit Strukturwerkstoffen
4. Reinigungsverfahren
5. Thermohydraulik
6. Verfahren zur Tritium-Extraktion
7. Flüssigmetalle \leftrightarrow Magnetfelder

P 264

Abb. 6

Extraktion und vor allem - und das ist eine im Spaltreaktorbau unbekante Seite der Flüssigmetall-Technologie - das Studium des Verhaltens von strömenden Flüssigmetallen in starken Magnetfeldern. Gerade diese letzte Frage ist wichtig, da die zu den hydrodynamischen Druckverlusten hinzukommenden Wirbelstromverluste den Wirkungsgrad einer Fusionsreaktoranlage wesentlich beeinflussen können.

Literatur

- [1] MILLS, R.G.: Some engineering problems of thermonuclear reactors. Nuclear Fusion Vol.7 (1967), S.223-236.
- [2] CARRUTHERS, R., DAVENPORT, P.A., MITCHELL, J.T.D.: The economic generation of power from thermonuclear fusion. Culham: Report CLM-R 85, October 1967.
- [3] ROSE, D.J.: On the feasibility of power by nuclear fusion. Oak Ridge: Report ORNL-TM 2204, May 1968.
- [4] Nuclear fusion reactors conference, Sept. 1969. Proceedings produced by the UKAEA Culham Laboratory, Abingdon, Berks.
- [5] Fusion Technology. Presentations made at the 5th. Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Energy 70, Las Vegas, Nevada, September 1970.
- [6] H. HEROLD, A. KNOBLOCH: Der Weg zum Fusionsreaktor. Festschrift zum zehnjährigen Bestehen des IPP, 1970.
- [7] J.D. LEE: Tritium breeding and energy generation in liquid lithium blankets. Proceedings Nuclear Fusion Reactors Conference, September 1969, Culham.
- [8] S. BLOW, CROCKER, V.S., WADE, B.O.: Neutronics calculations for blanket assemblies of a fusion reactor. Proceedings Nuclear Fusion Reactors Conference, September 1969, Culham.
- [9] WERNER, R.W., MYERS, B., MOHR, P.B., LEE, J.D. and CHRISTOFILOS: Preliminary design considerations for an Astron power reactor system. Proceedings Nuclear Fusion Reactors Conference, September 1969, Culham.
- [10] ROBINSON, M.T.: The energy dependence of neutron radiation damage in solids. Proceedings Nuclear Fusion Reactors Conference, September 1969, Culham.
- [11] MYERS, B.: Some observations on 14 MeV neutron radiation effects on reactor materials. Proceedings Nuclear Fusion Reactors Conference, September 1969, Culham.
- [12] MARTIN, D.G.: An assessment of some radiation damage effects in the containment vessel of a thermonuclear reactor, Proceedings Nuclear Fusion Reactors Conference, September 1969, Culham.
- [13] FREUND, J.: Zusammenstellung der Stoffwerte für die Flüssigmetalle Li, Na, K, Rb, Cs. TUBIK-13, 1969.