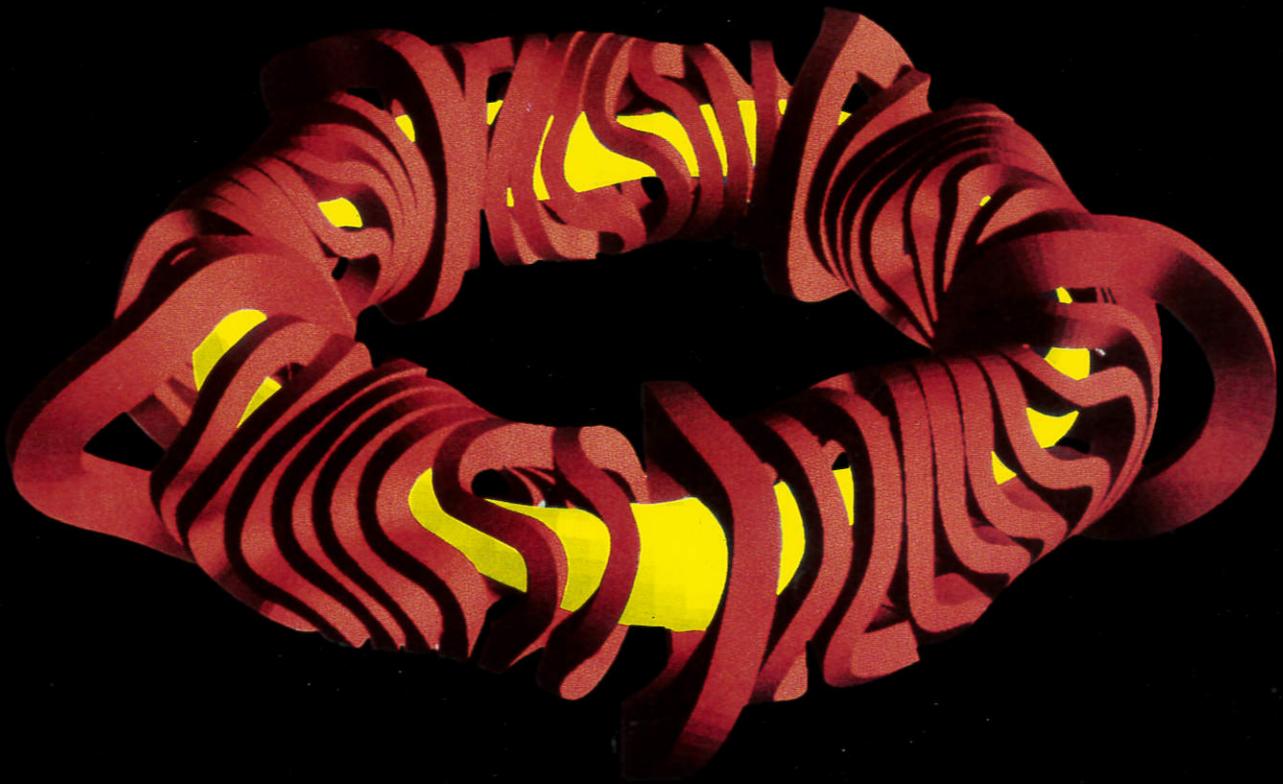


**MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK
GARCHING BEI MÜNCHEN**



J
64
1985/
1986

JAHRESBERICHT 1985/86

764

ZUM TITELBILD

Das Bild zeigt eine Computergraphik von Magnetspulenkranz und Plasma des Stellaratorexperimentes WENDELSTEIN VII-AS (AS = Advanced Stellarator), das derzeit in Garching gebaut wird. Das Experiment ist eine Ausbaustufe des im November 1985 beendeten WENDELSTEIN VII-A und soll Mitte 1987 in Betrieb gehen. Von seinem Vorgänger unterscheidet sich WENDELSTEIN VII-AS vor allem durch eine optimierte Magnetfeldstruktur und einen größeren Plasmadurchmesser. Anstelle der Hauptfeldspulen und helikalen Windungen des Vorgängers erzeugt nun ein einziger modularer Spulensatz von 45 Einzelspulen das gesamte Magnetfeld. Seine optimierte Struktur läßt ein Plasmagleichgewicht mit höherem Druck und eine weitere Reduktion der Transportverluste erwarten.

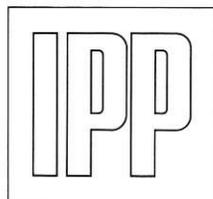
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

Garching bei München

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

22. Okt. 2012

Bibliothek



Jahresbericht 1985/86

0155 - 87

Inhaltsverzeichnis

25 Jahre Institut für Plasmaphysik	5	Allgemeine Arbeiten zur Fusion	50
Aufgaben des IPP	11	Plasma-Wand-Wechselwirkung	50
Auftrag	13	Theorie 1	51
Organisation	13	Theorie 2	51
Kernfusion – eine internationale Gemeinschaftsaufgabe	15	Theorie 3	52
Das Deutsche Fusionsprogramm	15	Technologie	52
Einführung in die Arbeiten des IPP	17	Informatik	53
Grundlagen der Kernfusion	19	Zusammenarbeit	55
Fusionsreaktionen	19	Zusammenarbeit mit den Hochschulen	55
Zündbedingungen	20	Internationale Zusammenarbeit	56
Beta	22	Zusammenarbeit mit der Industrie	56
Stöße und Verunreinigungen	22	Wissenschaftliche Infrastruktur	57
Instabilitäten	23	Rechenzentrum Garching	57
Plasmaheizung	23	Zentrale Technische Einrichtungen	58
Magnetfeldkonfiguration – Experimenttypen	25	Bibliothek	59
Der Tokamak	25	Verwaltung und Allgemeine Dienste	60
Der Stellarator	26	Personalabteilung	60
Elemente der Fusionsexperimente	27	Beschaffungsabteilung	61
Limiter	27	Finanzabteilung	61
Magnetischer Limiter	28	Rechts- und Patentabteilung	61
Divertor	28	Bauabteilung	61
Vakuumgefäß	29	Sozialabteilung	62
Brennstoffnachfüllung	29	Geschäftsführung und Wissenschaftlich-Technisches Büro	63
Plasmadiagnostik	30	Organisation und Revision	63
Sicherheits- und Umweltaspekte der Fusion	31	Betriebsärztlicher Dienst	63
Ergebnisbericht des IPP	33	Wissenschaftlich-Technisches Büro	63
Die Arbeitsbereiche des Instituts für Plasmaphysik	35	Sicherheit	63
Tokamaks	36	Öffentlichkeitsarbeit	64
ASDEX	37	Der organisatorische Aufbau des IPP	65
ASDEX Upgrade	39		
JET-Mitarbeit	40		
NET-Mitarbeit	42		
Stellaratoren	44		
WENDELSTEIN VII-A	45		
WENDELSTEIN VII-AS	46		
WENDELSTEIN VII-X	49		

25 Jahre Institut für Plasmaphysik

25 Jahre Institut für Plasmaphysik

Am 5. Juli 1985 feierte das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) in Garching bei München sein 25jähriges Bestehen. Das Institut wurde am 28. Juni 1960 als »Institut für Plasmaphysik GmbH« durch die Max-Planck-Gesellschaft und Werner Heisenberg als Gesellschafter gegründet und 1971 in das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik umbenannt.

Das Programm des Instituts war von Anfang an auf ein konkretes Ziel ausgerichtet: die Erforschung der thermonuklearen Fusion zum Zwecke der Energiegewinnung. Dabei konnte man auf den Erfahrungen mehrerer Arbeitsgruppen aufbauen, die alle bereits wesentliche Vorarbeit auf dem Gebiet der Plasmaphysik geleistet hatten: Zwei Gruppen – die Abteilung für theoretische Plasmaphysik sowie eine experimentelle Abteilung – kamen aus dem Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik in Göttingen, wo seit Mitte der fünfziger Jahre theoretische und experimentelle Plasmaphysik betrieben wurde. Außerdem wurde eine Gruppe des Laboratoriums für Technische Physik der Technischen Universität München, die dort mit stromstarken schnellen Gasentladungen experimentiert hatte, in das Institut eingegliedert, ferner eine experimentelle Gruppe der Universität Kiel, die sich mit der Physik von Bogenentladungen und Plasmadiagnostik beschäftigt hatte.

Das 25jährige Jubiläum feierte das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik am 5. Juli 1985 mit einem Festakt in Anwesenheit des Bundespräsidenten und zahlreicher Gäste aus Wissenschaft und Politik.

Zur Zeit der Institutsgründung war jedoch noch völlig offen, auf welchem Weg das gesteckte Ziel – ein »gezündetes« Fusionsplasma, die Energiequelle eines späteren Reaktors – am besten zu erreichen sei. Die zu lösenden Probleme waren vielfältiger Art: Es galt zu untersuchen, mit welchen Heizmethoden ein Plasma in den Bereich der zur Fusion nötigen hohen Temperaturen geführt, wie es eingeschlossen und stabil gehalten, auf welche Weise das Plasmagefäß vor der Zerstörung durch das heiße Plasma geschützt und umgekehrt das Plasma vor Verunreinigungen aus der Gefäßwand bewahrt werden kann.

Angesichts der großen Spannweite der Problemkreise waren die theoretischen und experimentellen Arbeiten des Instituts in den Anfangsjahren so breit wie möglich angelegt: So studierte man das Verhalten des Plasmas sowohl in stromstarken Bogenentladungen als auch mit den verschiedenen Methoden magnetischen Plasmaeinschlusses in geradlinigen Anordnungen (Spiegelmaschinen und Pinche) sowie in ringförmigen Konfigurationen (Stellaratoren). Hinzu kamen Untersuchungen zur magnetohydrodynamischen Energieumwandlung (bis 1972) und Studien an relativistischen Plasmaringbeschleunigern (bis 1979). 1967 begann man mit Grundlagenforschungen zur Laserfusion, die 1976 in das heutige Max-Planck-Institut für Quantenoptik ausgegliedert wurden.





Für die ersten Laboratorien und Büroräume wurden im Frühjahr 1960 drei Baracken aufgestellt. Umfangreichere Bauarbeiten begannen dann im Juli 1960.

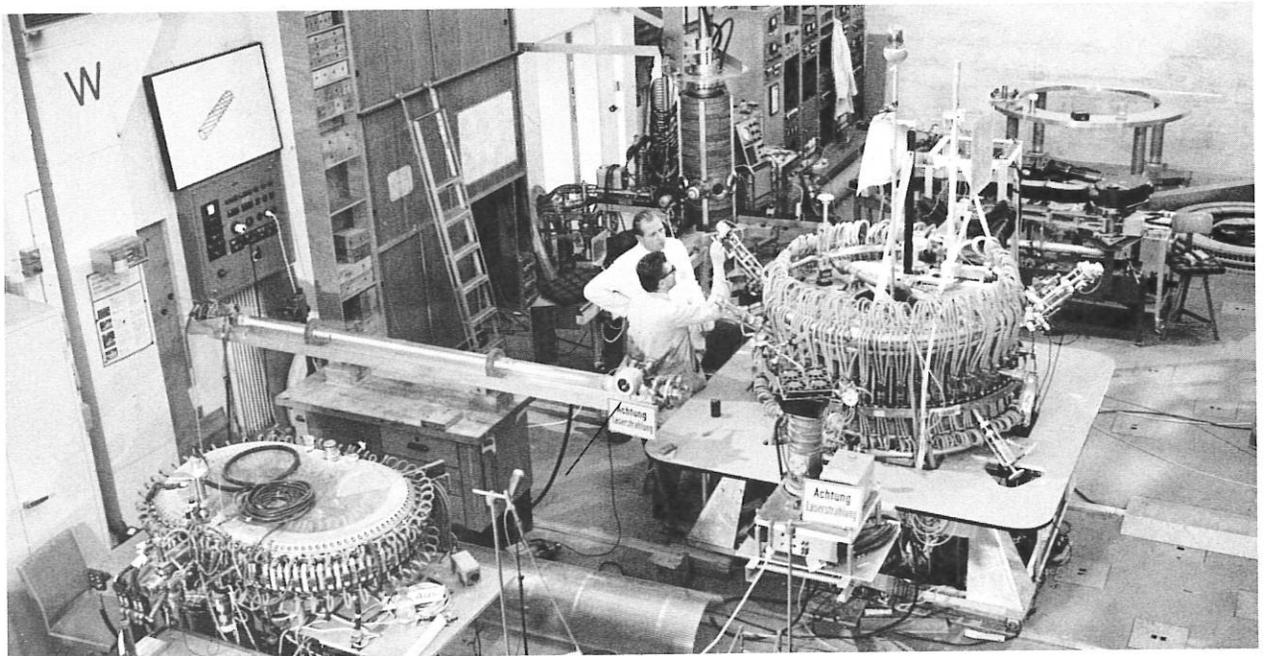
Noch im Gründungsjahr 1960 ging der erste Stellarator »WENDELSTEIN Ia« in Betrieb, ein ringförmiger Aufbau mit magnetischem Plasmaeinschluß. Die Abbildung zeigt das Experiment (unten links) mit einem seiner Nachfolger WENDELSTEIN IIa. In diesen ersten Stellarator-Experimenten der WENDELSTEIN-Serie wurden mit relativ kalten und dünnen Modellplasmen – Metalldampfplasmen zum Beispiel aus Barium oder Cäsium – die grundsätzlichen Einschlußigenschaften eines Stellarator-Magnetfeldes untersucht.

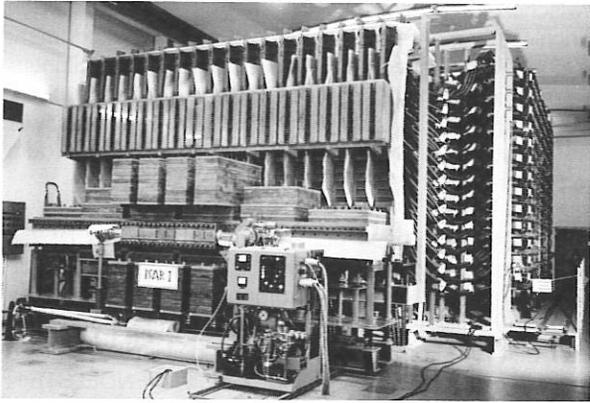
Mit Hilfe der Vielzahl unterschiedlicher Apparaturen konnten sowohl Plasmen mit langer Lebensdauer und niedrigen Temperaturen um 1000 Grad als auch Plasmen sehr hoher Temperatur um 10 Millionen Grad, aber extrem kurzer Lebensdauer von wenigen Millionstel Sekunden erzeugt und untersucht werden. Im Gegensatz zu den heutigen Großexperimenten des Instituts waren die damaligen Apparaturen von vergleichsweise geringem Umfang. Manche Plasmen füllten Gefäße, die kaum größer waren als eine Leuchtstoffröhre.

Die gewonnenen Erfahrungen führten dazu, daß einige Fragestellungen – zum Beispiel Spiegelmaschinen und Bogenentladungen – nicht weiter behandelt wurden. Die Ergebnisse an den linearen Entladungsapparaturen bestätigten außerdem, daß man guten Plasmaeinschluß nur in geschlossenen ringförmigen Anordnungen erreichen kann, aus denen das Plasma nicht durch Bewegung parallel zum Magnetfeld entweichen kann. Dabei entschloß man sich, die Problemkreise Heizung und Einschluß zunächst grundsätzlich und völlig unabhängig voneinander zu untersuchen. Erst spätere Experimente sollten dann auf hohe Temperatur und guten Plasmaeinschluß zugleich hinarbeiten. Die Plasmaaufheizung wurde in Pinch-Experimenten, der Einschluß in Stellaratoren studiert.

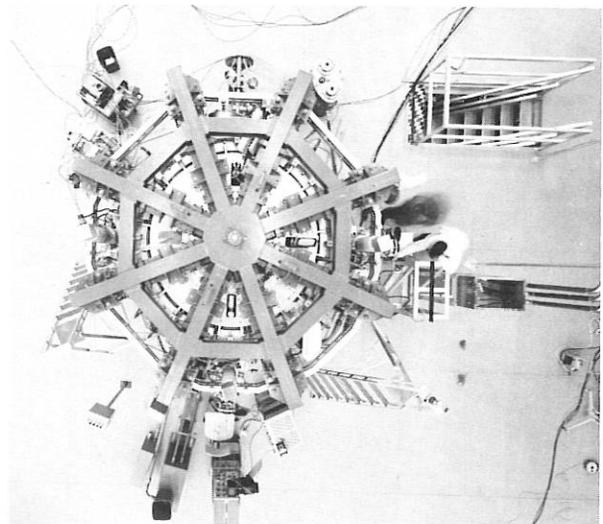
Ende der sechziger Jahre gaben die Erfolge bei der Untersuchung von Plasmaheizung und -einschluß den Anstoß, nun die Kombination beider Fragen zu versuchen, das heißt ein heißes und dichtes Plasma für längere Zeit einzuschließen. Als sich außerdem herausstellte, daß Fortschritte von der Größe der Experimente abhängen, wurden die Kräfte des Instituts auf die Untersuchung weniger, dafür aber größerer Apparaturen konzentriert.

Das Institut arbeitete nunmehr auf drei Arbeitsrichtungen: Im Stellarator-Programm wurde der magnetische Einschluß eines Plasmas von relativ kleiner Dichte, aber langer Lebenszeit untersucht.



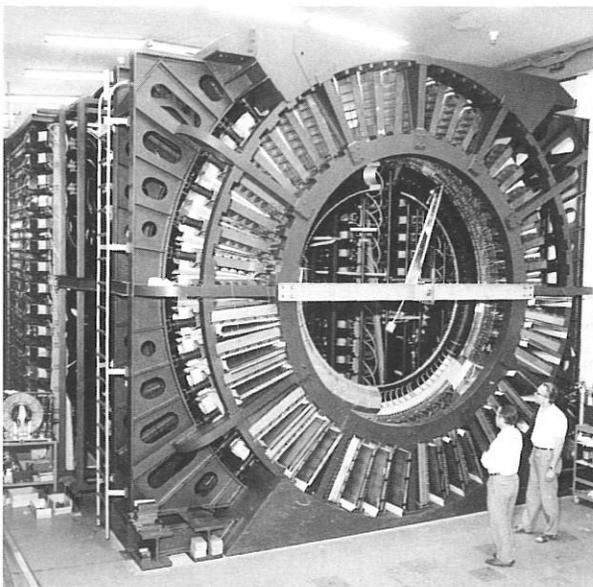


1964 begannen die Experimente an dem Theta-Pinch-Experiment ISAR I, wie die Nachfolger ISAR II bis ISAR IV eine lineare Anordnung, in der das Plasma durch schnelle magnetische Kompression eingeschlossen und aufgeheizt wurde. Nötig hierzu waren starke elektrische Ströme von mehreren Millionen Ampere, die aus einer großen Kondensatorbatterie (im Bildhintergrund) gespeist wurden. Auf diese Weise wurden 1964 erstmalig in der Welt hohe, fusionsrelevante Temperaturen von 60 Millionen Grad erreicht, allerdings nur für einige Mikrosekunden.



Ab 1970 geplant, ging 1973 das Tokamakexperiment PULSATOR in Betrieb, nachdem 1968 sensationelle Erfolge russischer Tokamaks bekannt geworden waren. Im Gegensatz zu Stellaratoren benutzen Tokamaks einen im Plasma fließenden Strom zugleich zur Heizung und zum Einschluß des Plasmas. Der Plasmastrom von etwa 100 Kiloampere wird durch einen Transformator in das Plasma eingekoppelt. Die Abbildung zeigt das Experiment von oben, sichtbar sind insbesondere die gewaltigen Eisenjoche des Transformators.

Der 1970 zum ringförmigen Hoch-Beta-Stellarator ISAR T1 umgebaute lineare Theta-Pinch ISAR 1. Durch die Umkonstruktion sollte das in linearen Pinchen herstellbar heiße und dichte Plasma nun auch für längere Zeit eingeschlossen werden. Dazu wurde durch die 48 Segmente einer einwindigen Magnetspule, die das kreisförmige Vakuumgefäß umgibt, kurzzeitig ein Strom von 20 Millionen Ampere aus einer großen Kondensatorbatterie (im Bildhintergrund) geschickt. Das entstehende Magnetfeld komprimiert den ringförmigen Plasmaschlauch und heizt ihn dabei auf. Da das so eingeschlossene Plasma jedoch nicht für längere Zeit stabil gehalten werden kann, wurde diese Forschungsrichtung Ende der 70er Jahre aufgegeben.



Neu in das Institutsprogramm aufgenommen wurden Untersuchungen am Tokamak, einem Ende der 50er Jahre in der Sowjetunion entwickelten Experimententyp. Im Gegensatz zum Stellarator benutzt der Tokamak einen Ringstrom im Plasma zugleich für Einschluß und Heizung; er galt deshalb als besonders einfach und effektiv.

Die Arbeiten an den Pinch-Experimenten (Hoch-Beta-Stellarator Isar T1, Belt-Pinch), in denen Plasmen sehr hoher Dichte, aber wesentlich kürzerer Lebenszeit als im Tokamak oder Stellarator erzeugt werden, wurden zunächst beibehalten.

Nochmals größer wurden die Anlagen, als die Experimente WENDELSTEIN VII-A (Stellarator, 1976) und ASDEX (Tokamak, 1980) in Betrieb gingen. Bau und Betrieb dieser Experimente erforderten Projektgruppen von 30 bis 40 Wissenschaftlern. Das Volumen der mit diesen Apparaturen erzeugten Plasmen liegt bereits im Bereich von etwa einem Kubikmeter, die ringförmigen Plasmagefäße selbst besitzen Durchmesser von 3,3 bzw. 4 Metern.

Das Institut ist zudem an dem europäischen Fusionsexperiment JET, dem bislang größten Tokamak in Europa, beteiligt und beherbergt seit 1982 die europäische Studiengruppe für die Entwicklung des Next European Torus (NET), den Nachfolger von JET.



Blick in das Vakuumgefäß des Tokamak-Experimentes ASDEX: Das Experiment ist mit einem System zusätzlicher Magnetspulen und Plasmanebenkammern – einem sogenannten Divertor – ausgerüstet. Die engen Schlitze ober- und unterhalb der Hauptkammer führen zu den Divertorkammern, in die Verunreinigungen aus den Randschichten des Plasmas abgelenkt werden. Auf diese Weise werden in ASDEX besonders saubere Plasmen mit hohen Energie-Einschlußzeiten möglich.

Montage der helischen Windungen auf das Vakuumgefäß des Stellarators WENDELSTEIN VII-A, der 1976 den Betrieb aufnahm. Mit dem Experiment gelang es 1980 erstmals, das reine Stellaratorprinzip – Plasmaeinschluß allein durch äußere Magnetfelder – in einem heißen und dichten Wasserstoffplasma zu demonstrieren.



Zwischen 1978 und 1980 wurden die Arbeiten an den Pinch-Experimenten eingestellt und das Zündexperiment »ZEPHYR« geplant, das es erlaubt hätte, die α -Teilchen-Heizung in einem brennenden Plasma zu untersuchen. Wie sich jedoch im Laufe der Planung herausstellte, war die notwendige Größe der Apparatur nicht mit dem verfügbaren Etat verträglich.

In der jetzigen Phase der Institutsentwicklung ist die Fusionsforschung bereits so weit fortgeschritten, daß die Bedeutung jeder konkreten Aufgabe an ihrem jeweiligen Bezug zur Fusionsreaktorentwicklung gemessen werden muß: Seit 1981 konzentriert sich die Arbeit im IPP – neben den Untersuchungen an ASDEX und WENDELSTEIN VII-A – auf die Planung der Nachfolgeexperimente ASDEX Upgrade und WENDELSTEIN VII-AS.

Mit WENDELSTEIN VII-AS – der 1987 in Betrieb gehen wird – sollen die grundlegenden physikalischen Prinzipien der inzwischen entwickelten fortgeschrittenen Stellarator-Konfiguration studiert werden.

Planungen für ASDEX Upgrade wurden notwendig, weil sich herausgestellt hatte, daß der in ASDEX getestete Divertor wohl auch zur Verunreinigungskontrolle in einem zukünftigen Reaktor notwendig ist und das mit ASDEX entdeckte günstige Isolationsverhalten nur in Divertor-Reaktoren erreichbar scheint. ASDEX Upgrade wird daher einen Divertor unter reaktorähnlichen Bedingungen untersuchen und soll 1989 in Betrieb gehen.

Aufgaben des IPP

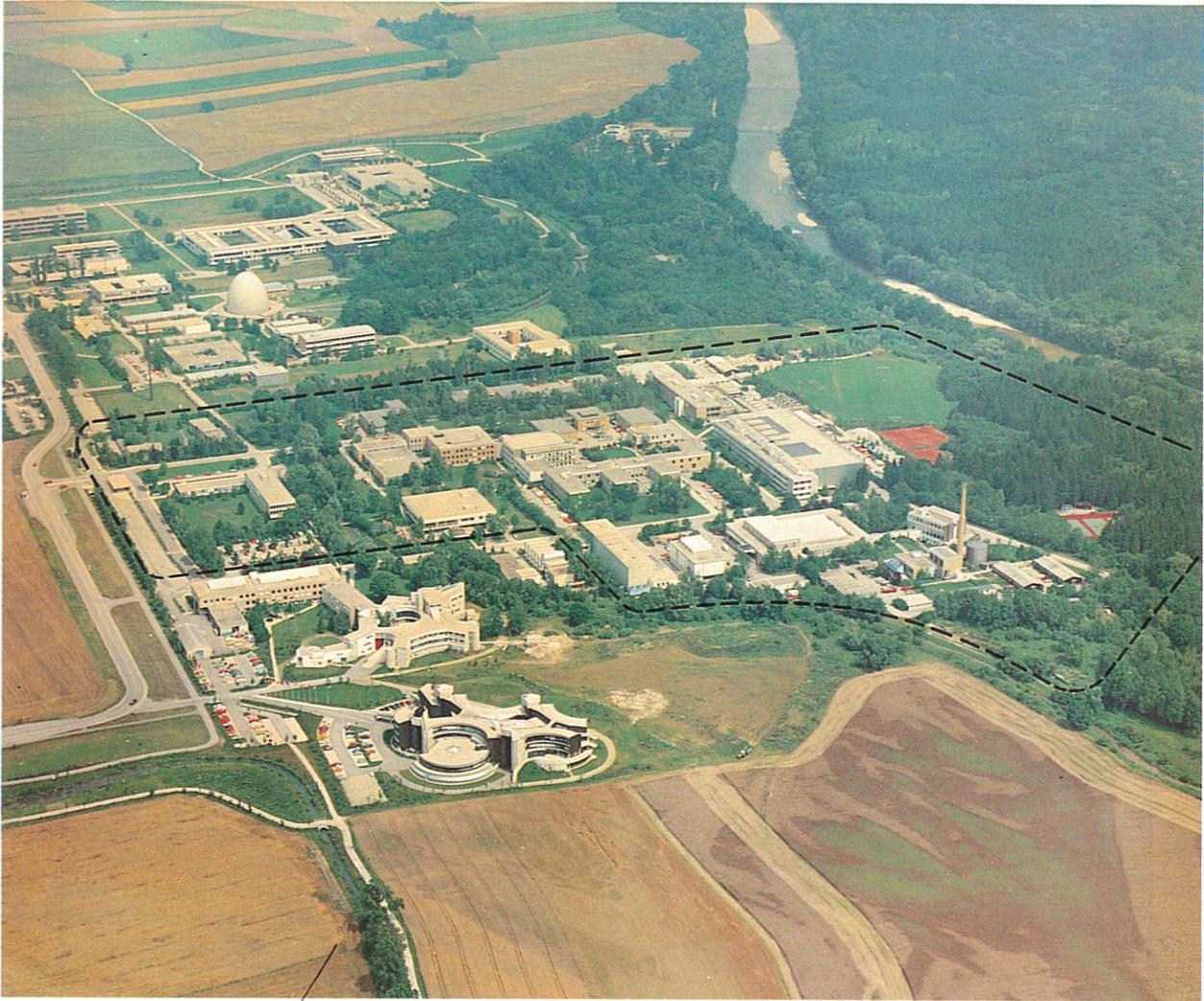


Abbildung 1: Das Institut für Plasmaphysik auf dem Forschungsgelände Garching

Auftrag

Das Institut für Plasmaphysik (IPP) beschäftigt sich mit Forschungen auf dem Gebiet der Plasmaphysik und den angrenzenden Disziplinen. Seit seiner Gründung im Jahr 1960 hat es sich dabei vor allem der Kernfusion zugewandt, die in einem heißen Plasma möglich wird. Ziel dieser Forschung ist die Gewinnung der Energie, die bei der Verschmelzung von zwei Wasserstoffkernen zu einem Heliumkern frei wird. Da die für den Fusionsprozeß nötigen Grundstoffe in nahezu unbegrenzter Menge vorhanden und über die ganze Welt verteilt sind, könnte die Kernfusion zu einem unerschöpflichen Energielieferanten für alle Gebiete dieser Erde werden.

Organisation

Das Institut für Plasmaphysik ist ein Institut der Max-Planck-Gesellschaft. Es beschäftigt etwa 1000 Mitarbeiter, davon etwa ein Viertel Wissenschaftler. Das Institut wird zu rund einem Drittel durch EURATOM finanziert und zu zwei Dritteln im Verhältnis 9:1 durch den Bund und das Land Bayern. Das Forschungsprogramm wird durch die Wissenschaftliche Leitung in Abstimmung mit EURATOM im Rahmen des Europäischen Fusionsprogramms festgelegt. Für die Durchführung der Arbeiten ist das Direktorium des Instituts verantwortlich. Ein international besetzter Fachbeirat berät das Institut in wissenschaftlichen Fragen. Oberstes Aufsichtsgremium ist das Kuratorium, dem namhafte Persönlichkeiten aus Wissenschaft und Wirtschaft angehören.

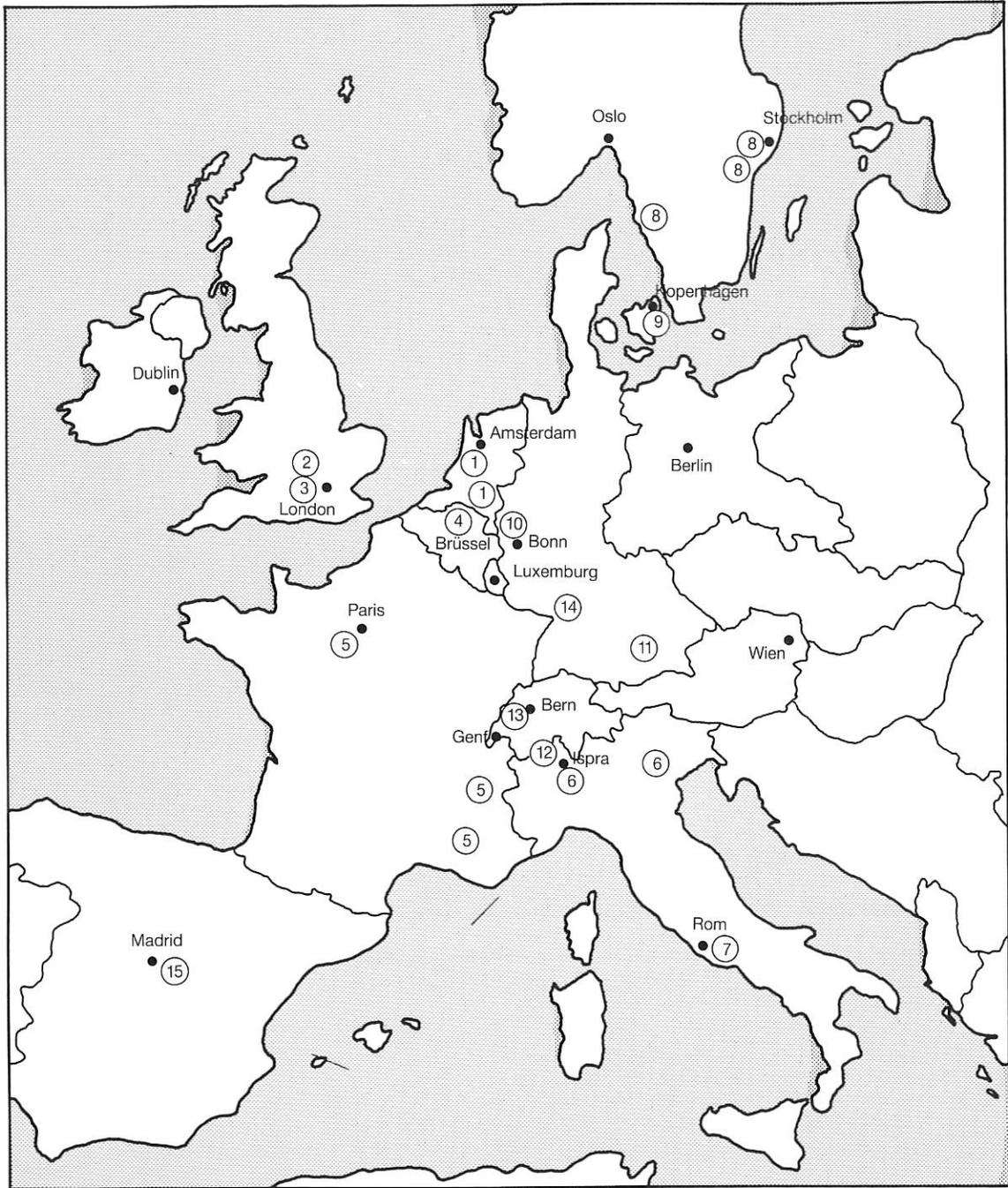


Abbildung 2: Fusionslaboratorien in Europa

- | | | |
|--|---|--|
| 1 FOM Amsterdam Holland
FOM Nieuwegein Holland
80 Wissenschaftler | 6 CNR Mailand, Italien
CNR Padua, Italien
50 Wissenschaftler | 11 IPP Garching, Deutschland
215 Wissenschaftler |
| 2 Culham Laboratory, England
180 Wissenschaftler | 7 ELEA Frascati, Italien
80 Wissenschaftler | 12 ISPRA (Varese), Italien
30 Wissenschaftler |
| 3 JET, Culham, England
200 Wissenschaftler | 8 NSB Stockholm, Schweden
NSB Göteborg, Schweden
NSB Studsvik, Schweden
30 Wissenschaftler | 13 CRPP Lausanne, Schweiz
30 Wissenschaftler |
| 4 Etat Belge, Brüssel, Belgien
45 Wissenschaftler | 9 Risø, Roskilde, Dänemark
15 Wissenschaftler | 14 KfK, Karlsruhe, Deutschland
70 Wissenschaftler |
| 5 CEA Fontenay-aux-Roses, Frankreich
CEA Grenoble, Frankreich
CEA Cadarache, Frankreich
170 Wissenschaftler | 10 KFA Jülich, Deutschland
85 Wissenschaftler | 15 JEN, Madrid, Spanien
20 Wissenschaftler. |

Kernfusion – eine internationale Gemeinschaftsaufgabe

Die Erforschung der Kernfusion läuft weltweit in vier eigenständigen Programmen Europas, der USA, Japans und der Sowjetunion ab. Durch gegenseitige Abstimmung und Zusammenarbeit insbesondere bei der INTOR-Studie, die unter der Schirmherrschaft der Internationalen Atomenergiebehörde in Wien koordiniert wird, sind diese vier Programme miteinander verbunden. In kleinerem Umfang betreiben auch andere Länder – so China, Kanada und Australien – Fusionsforschung.

In Europa wird die Erforschung der Kernfusion gemeinsam von den in EURATOM zusammengeschlossenen Partnern betrieben. Sie stellen das europäische Programm auf, beteiligen sich an seiner Finanzierung und kontrollieren seine Ausführung in den nationalen Laboratorien. Gemeinsam bauen und betreiben sie das gegenwärtig größte Fusionsexperiment der Welt, den »Joint European Torus« (JET), in Culham in England. Gemeinsam auch planen die Europäer in einer europäischen Studiengruppe in Garching den auf JET folgenden nächsten europäischen Torus (NET), der bereits die Vorstufe eines Demonstrationsreaktors sein könnte.

Die europäisch abgestimmte Arbeit in den nationalen Laboratorien schafft die Grundlage für den gemeinsamen Bau von Großexperimenten wie JET und NET, die die finanziellen und personellen Möglichkeiten der einzelnen Partner übersteigen würden. Gleichzeitig übernehmen die nationalen Laboratorien mit ihren Anlagen Aufgaben, die JET nicht leisten kann oder für die Großanlagen wie JET nicht nötig sind. So wird das Programm des intensiv genutzten JET entlastet und die Weiterentwicklung des Programms zu NET abgesichert.

Die Anlagen JET und NET sind vom Typ Tokamak. Auf diesem Gebiet hat das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik mit seinem Divertortokamak ASDEX besonders erfolgreich gearbeitet und wird diese Arbeiten mit dem Experiment ASDEX Upgrade fortsetzen, das einen für NET geeigneten Divertor testen wird. Diese Experimente ergänzen auch das Programm von JET, der noch ohne Divertor geplant wurde und daher dessen vorteilhafte Auswirkungen auf den Plasmaeinschluß nicht nutzen kann.

Der Tokamak ist zwar der weltweit am weitesten fortgeschrittene Experimenttyp; es ist aber nicht sicher, ob er auch die geeignete Basis für einen Fusionsreaktor darstellt. Um Fehlentwicklungen zu vermeiden, müssen daher auch andere Fusionskonzepte weiterverfolgt werden. Von diesen ist der Stellarator, der von Anfang an zum Programm des Instituts gehörte, am aussichtsreichsten und am weitesten entwickelt. Das europäische Programm sieht vor, daß die Untersuchung des Stellarators im Institut für Plasmaphysik vorangetrieben wird.

Das Deutsche Fusionsprogramm

In Deutschland werden Untersuchungen zur Fusion auf der Grundlage magnetischen Einschlusses in vier Großforschungseinrichtungen in Verbindung mit zahlreichen Universitäten betrieben. Schwerpunkt der deutschen Fusionsforschung ist die »Entwicklungsgemeinschaft Kernfusion« zwischen dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und dem Kernforschungszentrum Karlsruhe, in der arbeitsteilig die plasmaphysikalischen (IPP) und technologischen (KfK) Grundlagen für Bau und Betrieb eines Nachfolgeexperiments für JET erarbeitet werden. Beiträge zum deutschen Fusionsprogramm liefert außerdem die Kernforschungsanlage Jülich mit dem Tokamak TEXTOR und seinem Programm zur Plasma-Wand-Wechselwirkung. In kleinerem Maßstab entwickelt das Hahn-Meitner-Institut in Berlin Materialien für einen Fusionsreaktor.

Einführung in die Arbeiten des IPP

Grundlagen der Kernfusion

Fusionsreaktionen

Aus Kernumwandlungen kann Energie entweder durch Spaltung schwerer Kerne wie Uran (Maßzahl für seine Masse: 235) oder durch Verschmelzung (Fusion) leichter Kerne wie Wasserstoff und seine Isotope Deuterium und Tritium (Maßzahlen: 1, 2 und 3) gewonnen werden.

Da Atomkerne positiv geladen sind und sich deshalb gegenseitig abstoßen, können sie nur dann miteinander verschmelzen, wenn sie sich so nahe kommen, daß die anziehenden Kernkräfte, die nur in der unmittelbaren Umgebung der Kerne wirken, die abstoßenden elektrischen Kräfte überwiegen. Erst wenn zwei Kerne mit großer Geschwindigkeit aufeinanderzueinfliegen, können sie ihre gegenseitige Abstoßung überwinden.

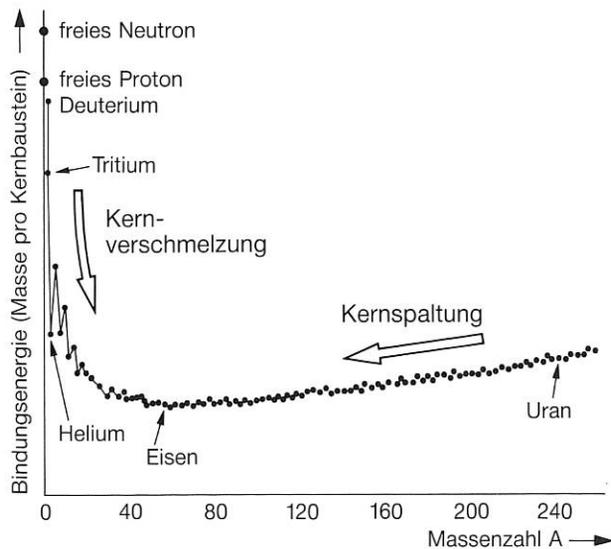
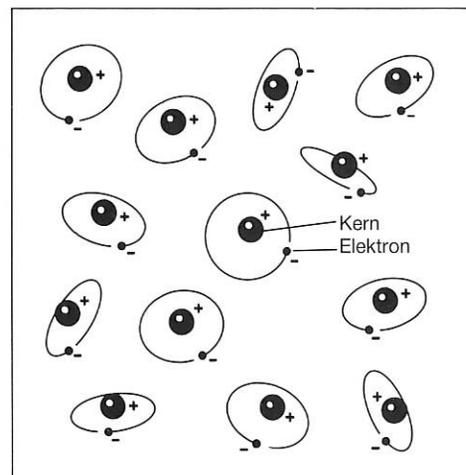
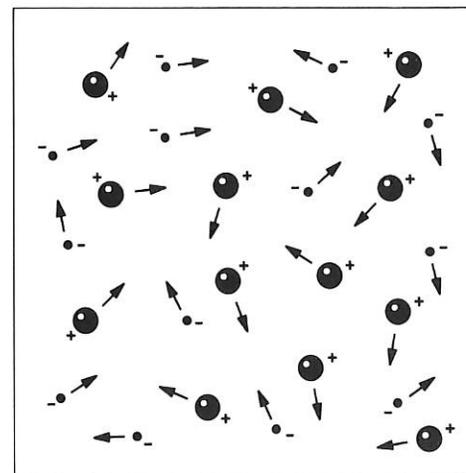


Abbildung 3: Quelle der Fusionsenergie ist die innere Bindungsenergie der Kerne. Je fester die Elemente eines Kerns aneinandergebunden sind, desto mehr Energie muß aufgewandt werden, den Kern zu spalten bzw. desto mehr Energie wird frei, wenn der Kern gebildet wird. Der Kern des Eisenatoms ist von allen Kernen am festesten gebunden. Man kann deshalb Energie gewinnen, wenn man schwerere Kerne wie Uran spaltet oder leichtere Kerne miteinander verschmilzt. In diesem Fall ergeben sich besonders große Energiegewinne bei der Fusion von Deuterium (D) und Tritium (T).

Die erforderlichen hohen Geschwindigkeiten erhalten die Teilchen bei hoher Temperatur. Die Atome eines Gases sind dann in ihre Bestandteile – Elektronen und Kerne – zerlegt: Ein Atom, dem ein oder mehrere Elektronen zu seiner Neutralität fehlen, nennt man »Ion« und ein Gas, dessen Atome in seine Bestandteile aufgetrennt ist, »ionisiert«. Ein solches Gas ist elektrisch leitend und wird wegen seiner von einem normalen Gas stark abweichenden Eigenschaften mit einem eigenen Namen »Plasma« benannt.



Gas



Plasma

Abbildung 4: In einem Gas sind die Elektronen an die Atomkerne gebunden, die einzelnen Atome und damit auch das Gas sind elektrisch neutral. In einem Plasma sind Elektronen und Kerne (Ionen) voneinander getrennt. Ein Plasma ist eine Mischung aus einem Ionen- und einem Elektronengas. Es wird daher stark durch elektrische und magnetische Felder beeinflusst und ist elektrisch leitfähig.

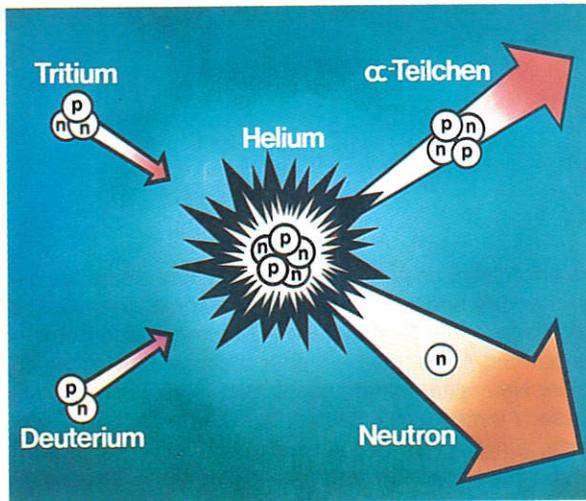
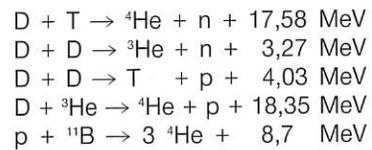


Abbildung 5: Beim Zusammenstoß eines Deuterium- und eines Tritiumkernes bildet sich ein heliumartiger Zwischenkern, der anschließend in ein Alphateilchen (= Kern des Heliums) und ein Neutron zerfällt. Beide Reaktionsprodukte besitzen hohe Energie, die zur Plasmaheizung und zur Energieproduktion eines Reaktors genutzt wird.

Von allen möglichen Paaren leichter Atome, die verschmelzen können, bietet das Paar aus den beiden schweren Isotopen des Wasserstoffs, Deuterium und Tritium, die größte Energieausbeute bei der niedrigsten Temperatur. Deshalb zielen die derzeit durchgeführten Experimente überwiegend auf die Deuterium/Tritiumfusion ab. Immerhin muß auch in einem Deuterium/Tritiumplasma die Fusionstemperatur 100 Millionen Grad betragen. Deuterium ist in genügender Menge in den Weltmeeren vorhanden, Tritium kann aus dem ebenfalls reichlich verfügbaren Element Lithium mit Hilfe der beim Kernfusionsprozeß entstehenden Neutronen erbrütet werden.

Fusionsreaktionen



Brutreaktionen in Lithium

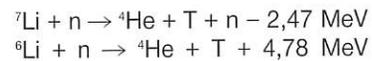


Abbildung 7: Fusionsreaktionen, die zu einem ${}^4\text{He}$ -Kern (Helium-Kern) führen, haben eine hohe Energieausbeute. Von diesen Reaktionen setzt die Deuterium-Tritium-Fusion bei den niedrigsten Temperaturen ein.

Natürliches Lithium besteht zu 92,6 Prozent aus dem Isotop ${}^7\text{Li}$, zu 7,4 Prozent aus ${}^6\text{Li}$. Die Brutreaktion $n + {}^7\text{Li}$ führt wieder zu einem Neutron (n), das eine weitere Reaktion mit ${}^6\text{Li}$ eingehen kann. So kann das benötigte Tritium im Reaktor selbst erzeugt werden.

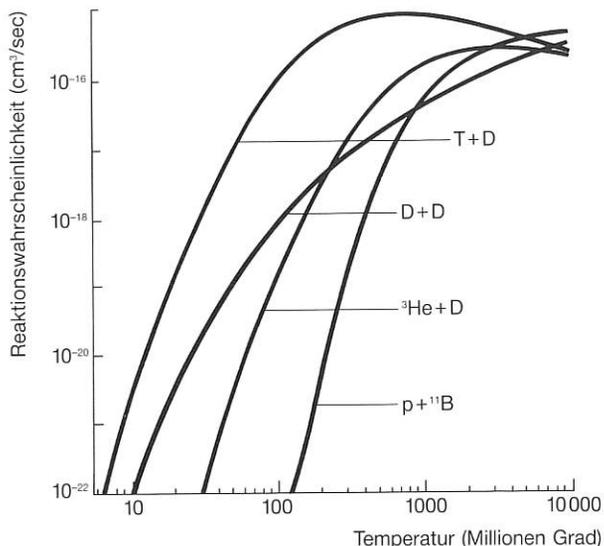


Abbildung 6: Die Reaktionswahrscheinlichkeit $\langle\sigma v\rangle$ hängt nicht nur von der Energie der Reaktionspartner, sondern auch von den Reaktionspartnern selbst ab. Die Deuterium-Tritium-Fusion (D-T) besitzt über einen großen Energiebereich eine weitaus größere Wahrscheinlichkeit als alle anderen bekannten Reaktionen. Prozesse wie die Proton-Bor-Reaktion (p-B), bei denen kein Neutron entsteht – oft als »reine« Fusion bezeichnet –, erfordern eine viel höhere Energie, bis sie mit ähnlicher Wahrscheinlichkeit ablaufen wie die Deuterium-Tritium-Prozesse.

Zündbedingungen

Bei den gegenwärtigen Experimenten verzichtet man noch auf Tritium und arbeitet lediglich mit einfachem Wasserstoff oder Deuterium. Denn da Tritium radioaktiv ist, würde seine frühzeitige Verwendung die Experimente unnötig erschweren. Auch mit einfachem Wasserstoff oder Deuterium läßt sich nämlich überprüfen, ob bei Einsatz von Tritium ein Zustand erreicht werden kann, bei dem das Plasma »zündet«. Nach der Zündung laufen dann gerade so viele Fusionsprozesse ab, daß die Energie der dabei erzeugten Alphateilchen (Heliumkerne) ausreicht, die Temperatur des Plasmas aufrechtzuerhalten. Das Plasma brennt dann ohne äußere Energiezufuhr weiter. Für die Zündung sind vor allem drei Eigenschaften des Plasmas von Bedeutung: Die Temperatur, die Plasmadichte und die Energieeinschlußzeit, die ein Maß für die Güte der Wärmeisolation des Plasmas ist. Die günstigsten Bedingungen für Einschlußzeit und Dichte erhält man bei einer Temperatur von etwa 100 Millionen Grad. Dann fordert das erweiterte »Lawson-Kriterium« (siehe

Abbildung 8) für das Produkt aus Dichte und Einschlußzeit einen Wert von etwa 10^{14} Sekunden pro Kubikzentimeter. (Als typische Werte werden etwa Dichten von 10^{14} Ionen pro Kubikzentimeter und Einschlußzeiten von 1 bis 2 Sekunden angestrebt.) Wegen dieser extrem niedrigen Dichte – 250000fach dünner als die Lufthülle der Erde – besitzt ein gezündetes Plasma trotz der hohen Temperatur eine kaum größere Leitungsdichte als eine normale Glühbirne.

Die zur Zündung notwendige **Anfangstemperatur** des Plasmas muß durch Heizung von außen erzeugt werden. Dazu wurden mehrere Verfahren – Heizung durch Strom, schnelle neutrale Atome oder Hochfrequenzwellen – entwickelt (siehe auch: Plasmaheizung).

Die **Dichte** kann zunächst von außen durch Nachfüllen von Gas, aber auch durch andere Methoden erhöht werden, allerdings nur innerhalb bestimmter Grenzen (siehe auch: Brennstoffnachfüllung).

Die nötige **Energieeinschlußzeit** scheint am schwierigsten erreichbar zu sein. Wird die Energie zu schnell aus dem Zentrum nach außen abgeführt, kann die Temperatur des Plasmas nicht aufrechterhalten werden und der Brennvorgang erlischt. Der brennende Kern eines Plasmas muß also genügend gut wärmeisoliert sein gegenüber der Wand des Gefäßes, in dem sich das Plasma befindet.

Da das Plasma aus geladenen Teilchen besteht, bietet ein magnetisches Feld eine besonders günstige Möglichkeit, das Plasma zu isolieren und einzuschließen. Geladene Teilchen – Ionen und Elektronen – können sich zwar unbeeinflusst in Längsrichtung der Magnetfeldlinien bewegen, werden aber bei Bewegungen senkrecht zur Magnetfeldrichtung auf Kreis- und Schraubenbahnen um die Feldlinien gezwungen und so an die Magnetfeldlinien angebunden. Um zu vermeiden, daß die Teilchen an den Polen des Magnetfeldes auf die Wand stoßen, werden durch geeignete Spulen Magnetfelder erzeugt, die ring-

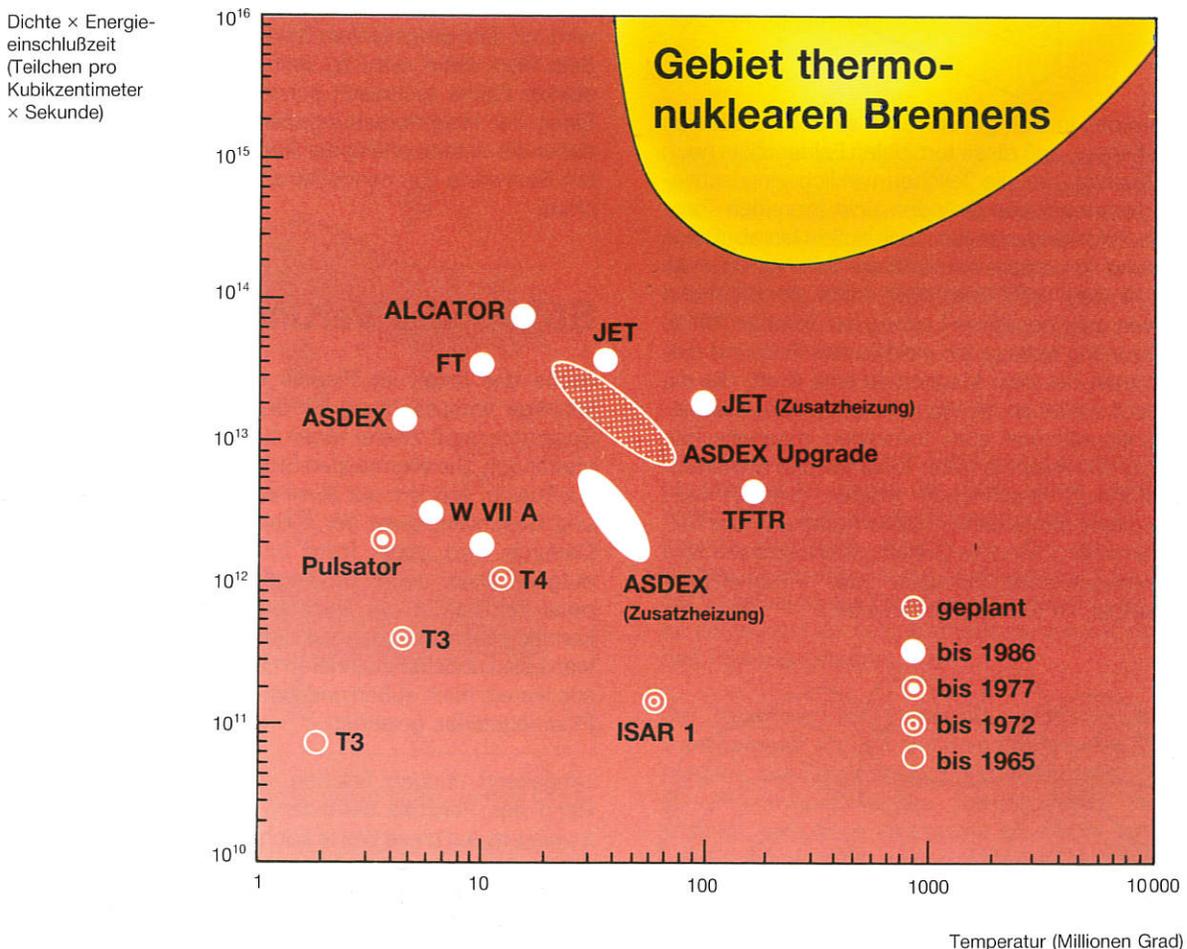


Abbildung 8: Das erweiterte Lawson-Kriterium besagt, daß Zündung möglich ist, wenn das Produkt aus Plasmadichte und Energieeinschlußzeit größer ist als etwa 10^{14} Sekunden pro Kubikzentimeter. Dies gilt für die Deuterium-Tritium-Reaktion und erfordert eine Temperatur von etwa 100 Millionen Kelvin. Wie die Abbildung zeigt, haben sich im Verlaufe der Fusionsforschung die Experimente dem angestrebten Ziel immer mehr genähert.

ALCATOR: Boston, USA
 ASDEX: Garching, BRD
 ASDEX Upgrade: Garching, BRD
 FT: Frascati, Italien
 ISAR 1: Garching, BRD

JET: Culham, Großbritannien
 Pulsator: Garching, BRD
 T3, T4: Moskau, UdSSR
 TFTR: Princeton, USA
 WENDELSTEIN: Garching, BRD

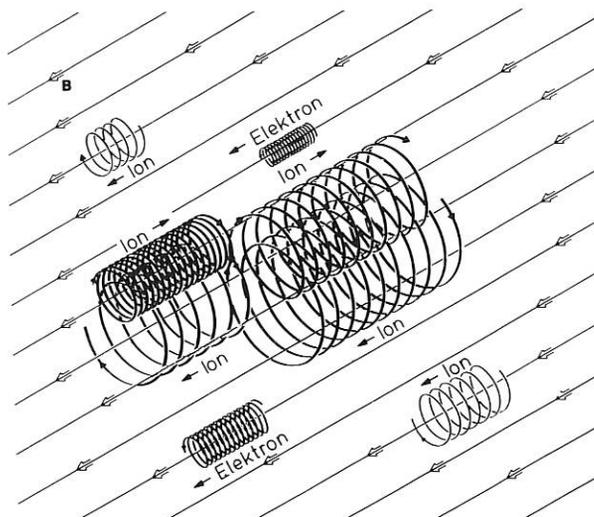


Abbildung 9: Geladene Teilchen bewegen sich spiralförmig um die Magnetfeldlinien. Der Radius der Spirale wird um so größer, je größer Masse und Geschwindigkeit der Teilchen und je kleiner die Stärke des Magnetfeldes ist.

förmig (toroidal) in sich geschlossen sind. Es stellt sich allerdings heraus, daß diese toroidalen Felder allein noch nicht ausreichen, um die Teilchen wirklich einzuschließen: Aus geometrischen Gründen sinkt im reinen Toroidalfeld die Feldstärke nämlich nach außen hin ab. Diese Feldänderung verursacht eine Drift der Teilchen über die Feldlinien hinweg nach oben oder unten entsprechend der positiven oder negativen Ladung der Teilchen. Diese Ladungstrennung erzeugt ein elektrisches Feld und dieses zusammen mit dem Magnetfeld eine Kraft, die die Teilchen nach außen an die Wand treibt. In den verschiedenen Konfigurationen zum toroidalen magnetischen Einschluß, deren Hauptvertreter Tokamak und Stellarator noch ausführlich beschrieben werden, wendet man unterschiedliche Methoden an, diese Außendrift der Teilchen zu verhindern. (Andere Einschlußkonzepte wie zum Beispiel »magnetische Spiegel« oder »Trägheitseinschluß« werden im IPP nicht bearbeitet.)

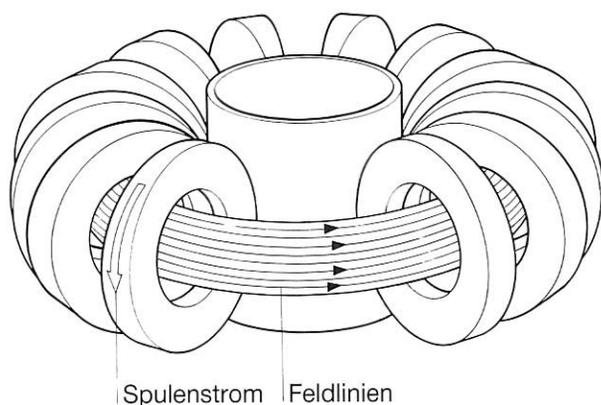


Abbildung 10: Durch diese toroidale Anordnung von ringförmigen Spulen läßt sich ein in sich geschlossenes Magnetfeld ohne »Enden« herstellen.

Der Einschluß des Plasmas, vor allem der Einschluß seiner Wärmeenergie, verbessert sich mit der Größe der Fusionsapparaturen, wie zahlreiche Experimente der letzten Jahre bestätigt haben. Das zwingt zum Bau von großen Experimentieranlagen und hat zur Folge, daß ein Fusionsreaktor unter einer bestimmten Mindestgröße nicht funktioniert.

Beta

Ein heißes Plasma erzeugt wie ein heißes Gas einen erheblichen Druck, der das Plasma auseinander und an die Wand treiben würde. Dies wird durch das Magnetfeld verhindert, das über die Bindung der Teilchen an die Magnetfeldlinien einen Gegendruck ausübt und so das Plasma einschließt und von der Wand isoliert. Der Druck des Magnetfeldes ist durch das Quadrat seiner Feldstärke bestimmt, der Druck des Plasmas durch Dichte und Temperatur. Die genannten Zündbedingungen führen in einem brennenden Plasma zu einem Plasmadruck von etwa 1 bar, das heißt etwa Atmosphärendruck.

Das Verhältnis von Plasmadruck zu Magnetfelddruck wird mit dem griechischen Buchstaben Beta bezeichnet. Sein Wert sollte nicht zu klein sein, da die Erzeugung starker Felder technisch schwierig und kostspielig ist. Eines der Hauptforschungsziele der Fusionsphysik ist daher die Untersuchung der Bedingungen, die nötig sind, um Betawerte von mindestens einigen Prozent zu erreichen.

Stöße und Verunreinigungen

Stöße der Ionen im Plasma untereinander sind eine wichtige Voraussetzung für die Fusion: Nur bei einem Zusammenstoß zweier Ionen kann eine Verschmelzung stattfinden. Die allermeisten Stöße führen allerdings nicht zur Fusion, sondern nur zu einer Änderung von Richtung und Geschwindigkeit der aufeinanderprallenden Ionen. Dadurch wird deren feste Bindung an die Feldlinien aufgebrochen: Jeder Stoß versetzt die Ionen auf eine neue Feldlinie in der Nachbarschaft der früheren. So können Plasmateilchen nach zahlreichen Stößen, auch wenn sie zunächst im Inneren des Plasmas eingeschlossen waren, nach außen und schließlich auf die Wand des Plasmagefäßes gelangen.

Umgekehrt dringen Teilchen, die sich ursprünglich am Rand des Plasmas befanden, durch Stöße bis in das Innere vor. Auf diese Weise können auch Wandatome, die durch Plasmaionen aus der Wand herausgeschlagen wurden, in das Plasma eintreten und dort Energie aufnehmen. Diese Verunreinigungen haben eine viel höhere Massen- und Ladungszahl als das Brennstoffmaterial Wasserstoff und strahlen daher sehr viel Energie in Form von Licht ab. So kühlen sie das Plasma ab und verringern die Fusionsausbeute. Die Kontrolle der Wechselwirkungen zwischen Plasma und Wand zur Erzeugung »sauberer« Plasmen ist eines der großen, noch zu lösenden Probleme der Fusionsforschung und wird im IPP in den Experimenten ASDEX und ASDEX Upgrade studiert.

Instabilitäten

Der Plasmaeinschluß wird außer durch Stöße vor allem durch Instabilitäten behindert. Instabil nennt man einen Vorgang, bei dem eine anfangs geringe Störung eine Kraft hervorruft, die diese Störung verstärkt. Eine solche Instabilität kann in einem Plasma auftreten, in dem ein elektrischer Strom fließt, dessen Magnetfeld das Plasma beispielsweise in einem geraden zylindrischen Schlauch zusammenhält (siehe Abbildung 11). Die Magnetfeldlinien liegen wie Ringe um den Schlauch. Verengt sich der Plasmaschlauch durch eine zufällige kleine Störung an einer Stelle zu einem etwas geringeren Durchmesser, wird dort das Magnetfeld und sein Druck stärker und preßt den Schlauch weiter zusammen. Unter Umständen wird auf diese Weise der Strom unterbrochen und infolgedessen auch der Plasmaeinschluß aufgehoben.

Die Anzahl möglicher Instabilitäten in einem Plasma ist sehr groß. Eine Instabilität zu erkennen und Gegenmaßnahmen zu finden, erfordert in den meisten Fällen lange Experimentreihen und eine intensive Zusammenarbeit von Experimentalphysikern und Theoretikern.

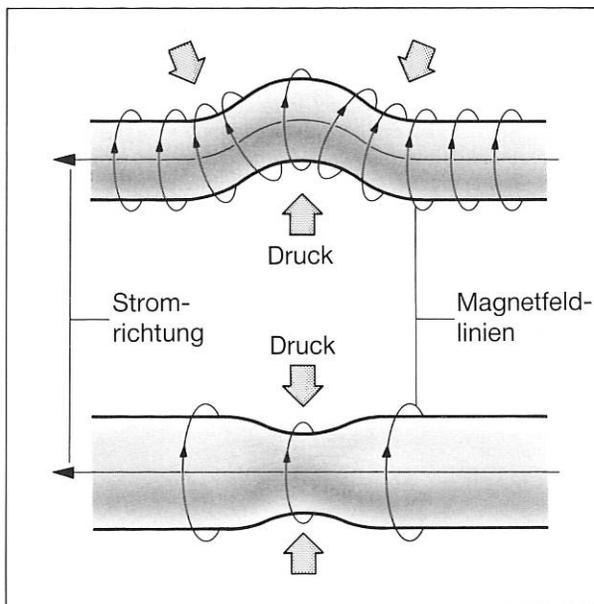


Abbildung 11: Zwei Beispiele für Instabilitäten in einem stromdurchflossenen Plasma:

In der Abbildung oben hat sich der Plasmaschlauch zufällig nach oben ausgebuchtet. Dadurch verdichten sich die Feldlinien an der unteren Einwölbung. Der damit verbundene höhere Magnetfelddruck drückt das Plasma weiter nach oben.

In der unteren Abbildung hat sich der Stromquerschnitt an einer Stelle verengt. Die von einem Strom am Plasmarand erzeugte Magnetfeldstärke ist aber um so größer, je kleiner der Plasmaradius ist. Das Feld und damit der Druck an der Verengung ist also größer als im übrigen Teil und drückt das Plasma weiter zusammen.

Instabilitäten dieser Art lassen sich verhindern, wenn der Strom in einem Längsmagnetfeld fließt. Dieses Feld übt dann zum Beispiel beim Zusammendrücken einen Gegendruck aus.

Plasmaheizung

Bis zur Zündung muß das Plasma von außen geheizt werden. Dafür stehen mehrere Methoden zur Verfügung.

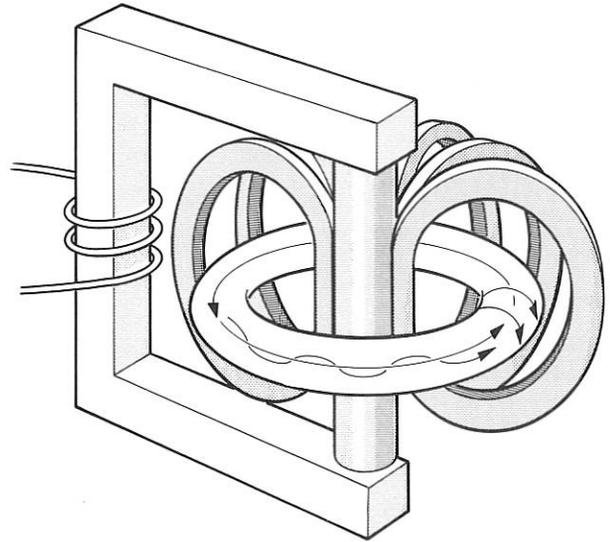


Abbildung 12: Stromheizung: Ein relativ kleiner Strom, der in vielen Windungen um den Eisenkern eines Transformators geführt wird, kann in der »Sekundärwicklung«, dem Plasmaring, einen großen Strom treiben. Da der Plasmastrom seine Richtung nicht umkehren und nicht verschwinden soll, kann immer nur eine Halbwelle der induzierenden Wechselspannung ausgenutzt werden.

Die Ohm'sche Heizung: Das Plasma ist elektrisch leitfähig und besitzt wegen der Stöße seiner Teilchen einen Widerstand. Wird daher ein elektrischer Strom durch das Plasma geschickt, erzeugt er über den Widerstand Wärme im Plasma. Da die Stöße der Teilchen und damit der Widerstand des Plasmas mit zunehmender Temperatur abnehmen, ist diese Methode nur zur Anfangsheizung des Plasmas geeignet.

Der Strom wird im Plasma am einfachsten über einen Transformator erzeugt, bei dem das leitende Plasma die Aufgabe der Sekundärwicklung übernimmt: Solange in der Primärwicklung des Transformators der Strom ansteigt, wird auch im Plasma ein Strom getrieben. In ASDEX können bis zu 0,5 Millionen Ampere erzeugt werden, JET kann für mehrere Sekunden einen Strom von über 5 Millionen Ampere aufrechterhalten.

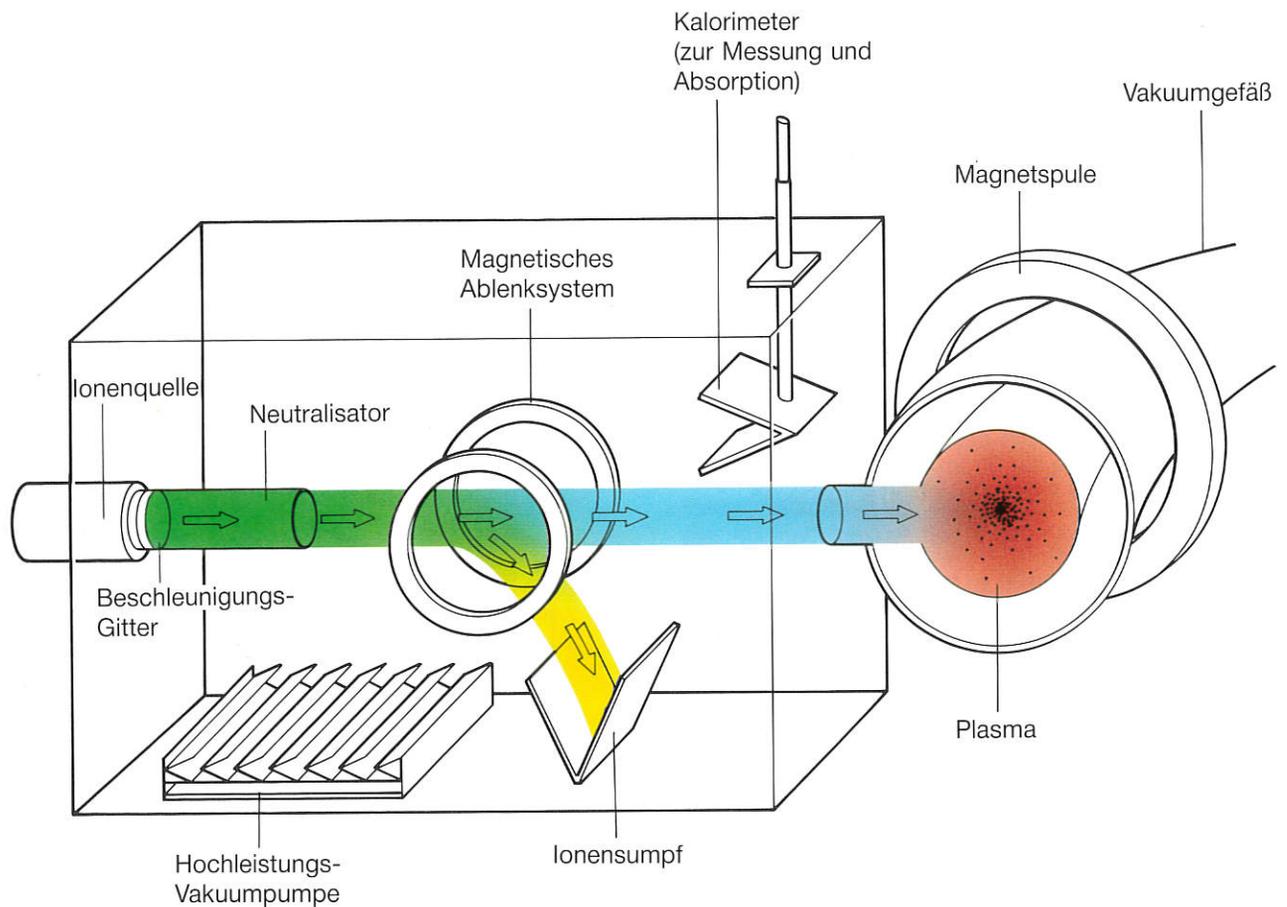


Abbildung 13: Neutralteilchenheizung: Aus der Ionenquelle werden Ionen durch Beschleunigungsgitter abgesaugt und beschleunigt. Damit die schnellen Ionen durch das Magnetfeld in das Plasma eindringen können, müssen sie anschließend wieder neutralisiert werden. Da das nur bei einem Teil der Ionen gelingt, werden die nicht neutralisierten Ionen in einem magnetischen

Ablenssystem aus dem Strahl entfernt und in einen Ionensumpf abgelenkt, wo ihre Energie aufgenommen – später vielleicht einmal zurückgewonnen – wird. Die neutralisierten Ionen dringen in das Plasma ein und werden dort über Stöße ionisiert. Sie sind nun als Ionen im Magnetfeld eingefangen und können über weitere Stöße ihre Energie an die Plasmateilchen abgeben.

Die Neutralinjektionsheizung: Teilchen hoher Bewegungsenergie, die in das Plasma hineingeschossen und dort eingefangen werden, geben über Stöße ihre Energie an die Plasmateilchen ab und heizen sie auf (siehe Abbildung 13). Nach der Zündung wird die hohe Temperatur durch die bei der Fusion entstehenden Alphateilchen aufrechterhalten, die ihre Energie ebenfalls über Stöße an das brennende Plasma abgeben.

Die Hochfrequenzheizung: Die Ionen und Elektronen eines Plasmas im Magnetfeld führen verschiedenartige Eigenschwingungen aus, die von außen durch Einstrahlung einer elektromagnetischen Welle der richtigen Frequenz resonant angeregt werden können. Dabei nehmen die Teilchen Energie aus dem elektromagnetischen Feld der Welle auf und geben sie über Stöße an die anderen Teilchen weiter. Besonders geeignete Resonanzen bieten zum Beispiel die oben beschriebenen Kreisbewegungen der Ionen und Elektronen um die Magnetfeldlinien. Die Kreisfrequenz (Zyklotronfrequenz) der Ionen liegt bei den üblichen Magnetfeldstärken zwischen 10 und 100 Megahertz, die der Elektronen zwischen 60 und 150 Gigahertz.

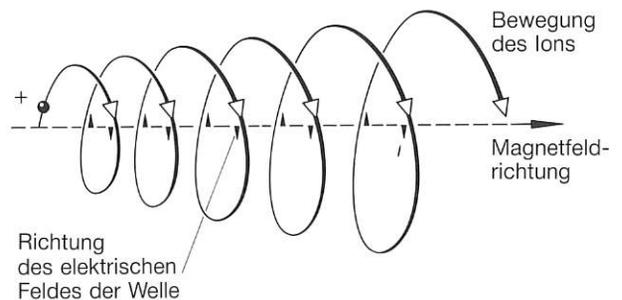


Abbildung 14: Hochfrequenzheizung: Wenn eine elektrische Welle die gleiche Drehfrequenz hat wie ein Ion im Magnetfeld, kann das Ion aus dem elektrischen Feld der Welle Energie aufnehmen.

Magnetfeldkonfiguration – Experimenttypen

Im Institut für Plasmaphysik werden zwei verschiedene Konfigurationen mit magnetischem Einschluß untersucht, der Tokamak und der Stellarator.

Der Tokamak

In einem Tokamak schließen zwei sich überlagernde Magnetfelder das Plasma ein: Erstens ein toroidales Feld, das durch äußere Spulen erzeugt wird und zweitens das Feld eines im Plasma erzeugten Stroms, dessen Feldlinien sich kreisförmig um den Strom schließen. (Der Plasmastrom wird üblicherweise durch eine Transformatorspule auf der Achse des Torus erzeugt; diese Spule wird so angeordnet, daß ihr Magnetfeld das Plasma möglichst nicht beeinflusst.) Wie im vorigen Kapitel gezeigt, wird ein Plasma in einem rein toroidalen Feld nach außen an die Wand getrieben. In dem kombinierten Feld laufen die Feldlinien und die an sie gebundenen Teilchen nicht mehr kreisförmig um die Achse des Torus, sondern winden sich schraubenförmig um die Seele des Torus, die zentrale Magnetfeldlinie. Teilchen, die diesen Feldlinien folgen, empfinden zwar weiterhin eine Drift, zum Beispiel nach unten. Solange sich die Feldlinien bei ihrem schraubenförmigen Verlauf aber in der oberen Hälfte des Plasmatorus befindet, bedeutet eine Drift nach unten zugleich eine Drift auf die Torusseele zu; für Feldlinien in der unteren Hälfte bedeutet die Drift nach unten

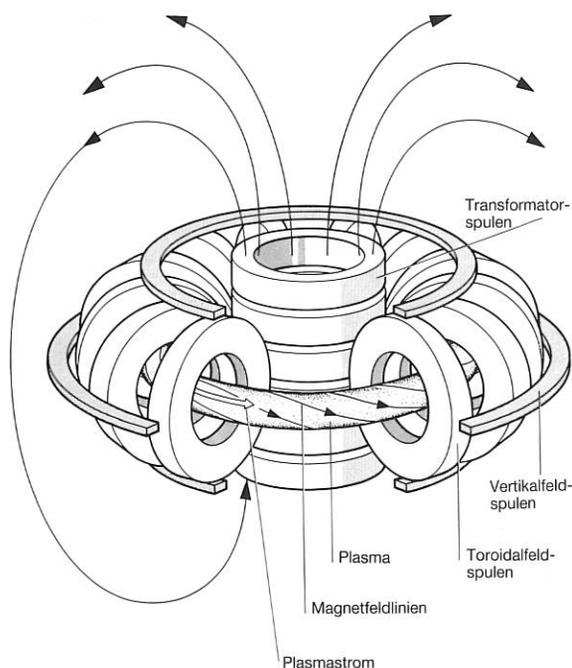


Abbildung 15: Die Schemaskizze eines Tokamaks zeigt die Transformator-, Toroidal- und Vertikalfeldspulen sowie den Plasmastrom, die zusammen das Magnetfeldsystem eines Tokamaks erzeugen.

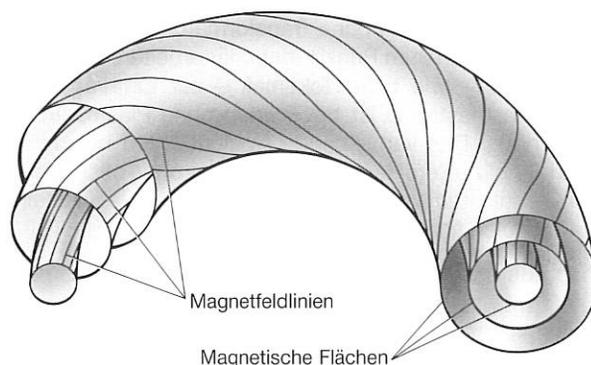


Abbildung 16: Magnetische Flächen eines Tokamakplasmas mit Feldlinien. Die Feldlinien auf den äußeren Flächen drehen sich öfter um die Seele – die zentrale Ringlinie – als Feldlinien auf den inneren Flächen: Das Feld hat eine Verscherung.

dagegen eine Drift von der Torusseele weg. Nach einem ganzen Umlauf eines Teilchens hat sich damit seine Entfernung von der Seele nicht geändert. Außer dem Toroidalfeld und dem Feld des Stromes benötigt der Tokamak noch ein drittes, vertikales Feld, das die Lage des Stromes im Plasmagefäß fixiert.

Die umlaufenden Feldlinien spannen sogenannte »magnetische Flächen« auf, die man sich wie die Jahresringflächen in einem Baumstamm vorstellen kann. Feldlinien, die in einem »Jahresring« starten, behalten während ihres schraubenförmigen Umlaufs um die Seele des Torus »ihren« Jahresring bei. Wenn sich die Feldlinien auf den ineinandergeschachtelten Flächen bei einem Umlauf um den Torus alle gleich oft um die Seele drehen, nennt man das Feld verscherungsfrei. Ein Magnetfeld hat eine Verscherung, wenn sich die Feldlinien auf äußeren Magnetfeldflächen öfter um die Seele drehen als die auf inneren. Dies ist bei einem Tokamak der Fall, was die Stabilität des Plasmas begünstigt.

Der Strom im Tokamak dient also nicht nur zum Heizen, sondern wird vorwiegend benötigt, um ein gut einschließendes Magnetfeld zu erzeugen. Er darf daher auch nach Zündung des Plasmas nicht abgeschaltet werden.

Weil der Plasmastrom normalerweise über einen Transformator induziert wird, arbeitet der Tokamak nicht kontinuierlich, sondern gepulst: In einem Transformator kann nur für eine beschränkte Zeit ein ansteigender Strom in der Primärwicklung erzeugt und damit ein Strom im Plasma getrieben werden. Danach muß der Transformator »entladen« und der Strom von neuem hochgefahren werden. Bei einem Tokamakreaktor kann man sich Pulszeiten von etwa 20 Minuten vorstellen. Da jedoch ein Reaktor aus technischen Gründen kaum gepulst betrieben werden darf, werden Methoden untersucht, einen kontinuierlichen Strom – zum Beispiel durch Hochfrequenzwellen – zu erzeugen. Über erfolgreiche Versuche hierzu wird bei dem Experiment ASDEX berichtet.

Der Stellarator

In einem Stellarator wird die schraubenförmige Drehung (Rotation) der Feldlinien um die Torus-Seele ausschließlich durch Ströme in äußeren Spulen und nicht durch einen Strom im Plasma selbst erzeugt. Abgesehen von der Heizung kommt ein Stellarator also ohne einen Strom im Plasma und damit ohne Transformator aus. Ein Stellarator kann daher im Prinzip stationär arbeiten. Auch ein Vertikalfeld – wie beim Tokamak – zur Lageregelung eines Plasmastroms ist bei Betrieb ohne Plasmastrom nicht nötig. Das verbleibende Spulensystem hat dafür eine kompliziertere, technisch allerdings ohne besondere Schwierigkeiten herstellbare Struktur. Beispiele für Stellaratorospulen finden sich im Bericht über WENDELSTEIN VII-AS und WENDELSTEIN VII-X.

Auch das Magnetfeld des Stellarators besitzt magnetische Flächen und kann mit und ohne Verscherung erzeugt werden. Die sogenannte »**Rotationstransformation**« gibt an, wie oft sich eine Feldlinie beim Umlauf im Ring um die Seele gedreht hat. Ist dies eine rationale Zahl (zum Beispiel $1/3$), bedeutet dies, daß die Feldlinie (im Beispiel nach drei Umläufen) wieder in sich zurückläuft. Ist die Rotationstransformation nicht rational, laufen die Feldlinien beliebig oft auf ihrer magnetischen Fläche

um, ohne jemals wieder an die gleiche Stelle im Torus zu kommen. In einem Magnetfeld ohne Verscherung haben alle Feldlinien die gleiche Rotationstransformation und schließen sich bei einem rationalen Wert nach der gleichen Zahl von Umläufen mit sich selbst. Es zeigt sich, daß das Plasma bei niedrigen rationalen Werten wie $1/2$, $1/3$, $2/3$, $1/4$... empfindlich reagiert und sich vor allem seine Einschlußzeit verringert. Wesentliche Beiträge zur Klärstellung dieses Sachverhaltes lieferten die WENDELSTEIN-Experimente des IPP.

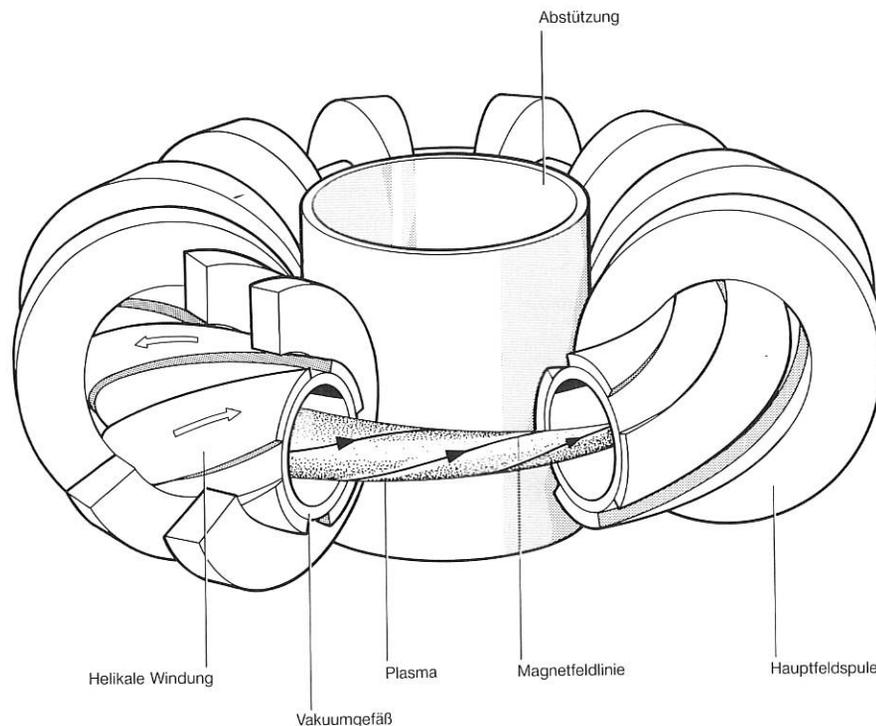


Abbildung 17: Die schematische Skizze eines Stellarators zeigt das toroidale Hauptfeldsystem, dessen zentrale Abstützung, das Vakuumpfäß und die darauf aufgebrachtten helikalen Windungen. Die Ströme in benachbarten Windungen fließen in

entgegengesetzter Richtung. Sie bewirken die Drehung der Feldlinien um die Seele, ohne daß ein Strom im Plasma fließen muß. Ein Transformator ist bei einem reinen Stellarator daher nicht erforderlich.

Elemente der Fusionsexperimente

Von den zahlreichen Elementen eines Fusionsexperiments werden vor allem jene vorgestellt, die für die Experimente des IPP von besonderer Bedeutung waren. Elemente wie Spulensysteme, Pump- und Kühlsystem werden nicht speziell erläutert.

Limiter

Das Plasma in einem toroidalen Magnetfeld breitet sich wegen der Stöße der Teilchen soweit aus, bis es die Wand berührt, wo es neutralisiert wird. Die Gefäßwand übernimmt dabei – abgesehen von der Strahlung – an den Berührungsstellen die ganze Energie, die aus dem Inneren des Plasmas nach außen transportiert wird. Dafür ist sie normalerweise nicht geeignet. Zu einer kontrollier-

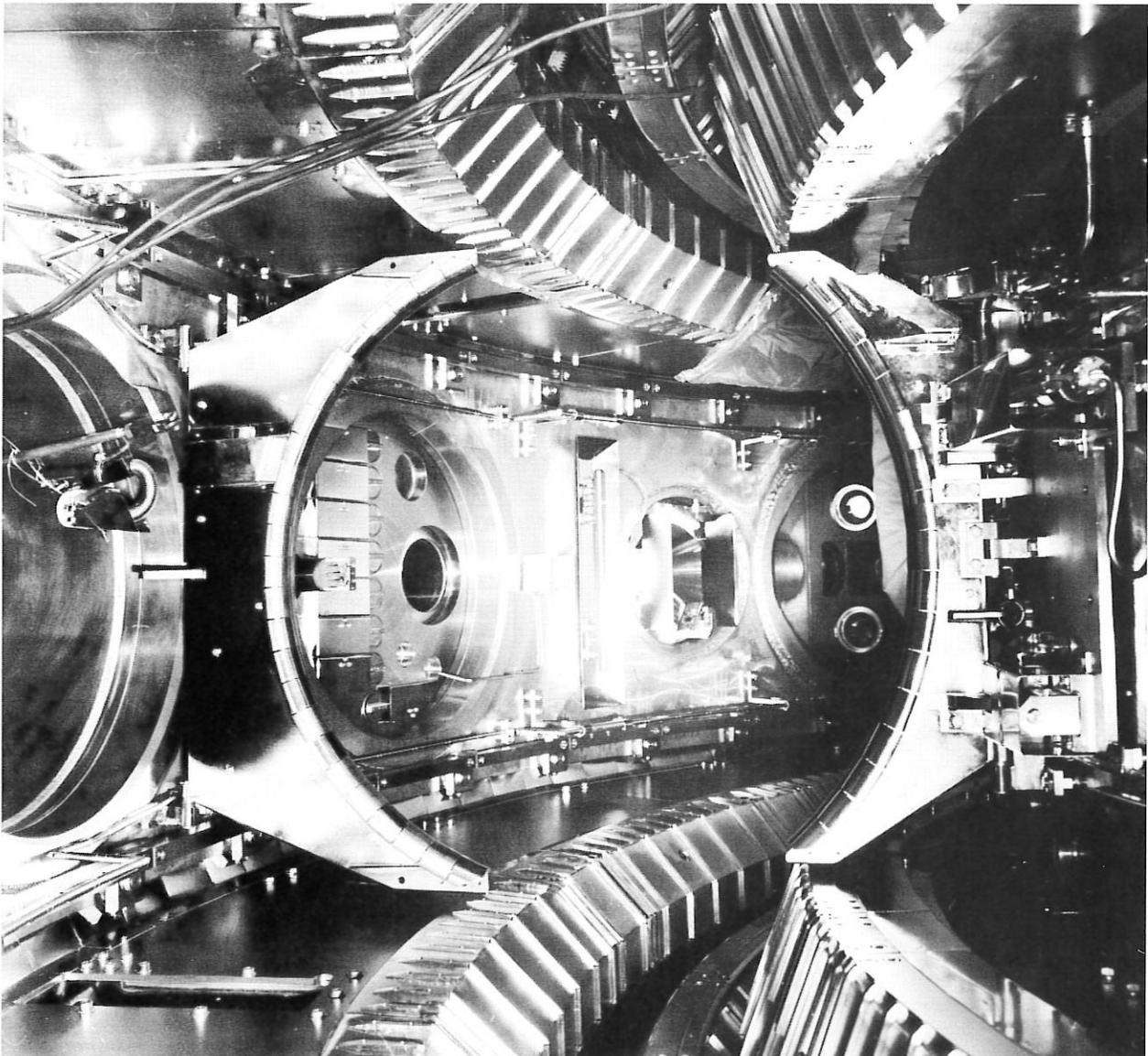


Abbildung 18: Blick in die Vakuumkammer von ASDEX, die Manneshöhe hat. Die engen Schlitzte oben und unten führen in die Divertorkammern. Den Zwischenraum überbrückt auf beiden

Seiten ein Limiter, der mehr oder weniger nahe an das Plasma herangefahren werden kann. Auf diese Weise können in ASDEX sowohl Limiter- als auch Divertorentladungen ablaufen.

ten Begrenzung des Plasmas werden daher in das Plasmagefäß »Begrenzer« (Limiter) eingebaut, die so ausgelegt sind, daß sie die zu erwartenden Energiemengen ungefährdet aufnehmen können. Trotzdem ist es unvermeidlich, daß bei dem Kontakt des Plasmas mit Wand und Limiter Atome – zum Beispiel der Elemente Eisen, Nickel, Chrom oder Sauerstoff – aus der Wand herausgelöst werden und in das Plasma eindringen. Je höher die Ladungszahlen dieser Verunreinigungen sind, desto mehr Licht strahlen sie aus und desto mehr Energie entziehen sie dem Plasma. Limiter werden daher möglichst aus Materialien mit niedrigen Ladungszahlen hergestellt, zum Beispiel aus Kohlenstoff.

Magnetischer Limiter

Der direkte Kontakt des eingeschlossenen Plasmas mit der Wand läßt sich vermeiden, wenn das Magnetfeld so gestaltet wird, daß auf einen geschlossenen äußersten »Jahresring« nur noch offene Magnetflächen folgen, deren Feldlinien auf die Wand treffen. Die letzte geschlossene Magnetfläche wird »Separatrix« genannt; sie separiert das Gebiet des guten Einschlusses innen von einem nicht eingeschlossenen Gebiet außen. Wenn nur die äußeren Zonen der Felder die Wand oder Limiter-ähnliche Strukturen berühren, laufen die meisten Verunreinigungen auf die Wand, bevor sie in das Plasma eindringen können. Weil das gut eingeschlossene Plasma durch die Form des Magnetfeldes limitiert ist, spricht man von

einem »magnetischen Limiter«. Da bei einem magnetischen Limiter das gut eingeschlossene Plasma nicht in direktem Kontakt mit der Wand steht, kann der Plasmarand viel heißer sein als bei materieller Limiterbegrenzung. Wie sich bei gegenwärtigen Messungen herausstellt, könnte dies die Ursache für die beobachtete Verbesserung des Einschlusses in Experimenten mit magnetischem Limiter sein.

Divertor

Den besten Schutz des Plasmas vor Verunreinigungen erhält man, wenn die Feldlinien jenseits der Separatrix nicht direkt auf die Wand treffen, sondern erst durch enge Schlitze in separate Kammern abgelenkt (divertiert) werden, in denen dann Limiter-ähnliche Platten die Plasmateilchen neutralisieren. Das entstehende Neutralgas baut in diesen Kammern einen gegenüber dem Plasmahauptraum höheren Druck auf und kann dadurch leichter abgepumpt werden.

Die vor allem im Institut für Plasmaphysik an ASDEX (axialsymmetrisches Divertorexperiment) mit Divertor durchgeführten Experimente haben nicht nur zu besonders sauberen Plasmen geführt, sondern auch Plasmen mit hohen Einschlußzeiten ermöglicht, die in Limiterentladungen nicht erreichbar sind. Es scheint daher, daß ein Divertor oder zumindest ein magnetischer Limiter für einen späteren Fusionsreaktor notwendig ist.

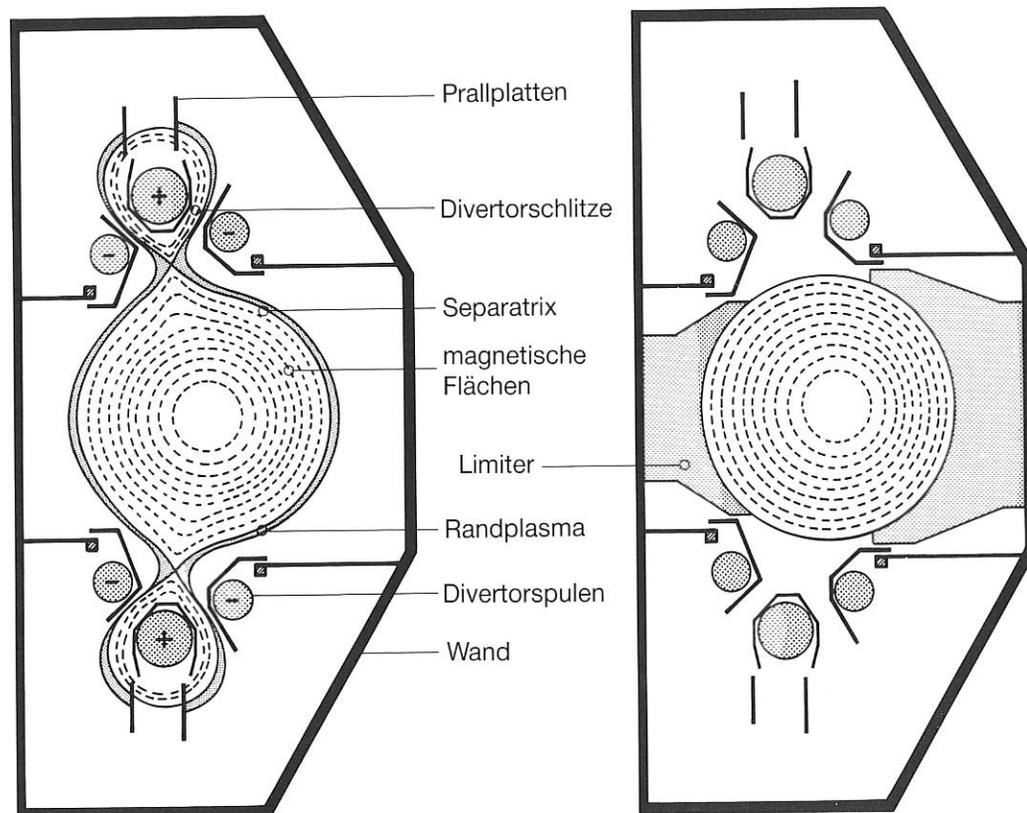


Abbildung 19: Zwei Querschnitte durch das ASDEX-Gefäß und die magnetischen Flächen des Feldes: rechts mit Limiter, links mit Divertor. Der Limiter begrenzt das Plasma und fängt alle Teilchen auf, die über die letzte geschlossene Magnetfläche hinausgehen. Bei Betrieb mit Divertor werden die Teilchen, die

die Separatrix nach außen überqueren, in den Divertor geführt und dort auf den Prallplatten neutralisiert. Die Platten um die Divertorspulen trennen die Plasmakammern durch enge Schlitze von der Divertorkammer.

Vakuumgefäß

Obwohl das Plasma durch ein Magnetfeld eingeschlossen wird, muß es in einem Vakuumgefäß erzeugt werden, das sowohl das Eindringen von Luft als auch das Austreten des Brennstoffs – einfacher Wasserstoff und Deuterium, später das radioaktive Tritium – verhindert. Schon das Eindringen geringer Mengen von Luft würde ein brennendes Plasma sofort zum Erlöschen bringen (Ein Fusionsreaktor ist dadurch inhärent sicher gegen ein »Durchbrennen« bei einem Schadensfall). Das Gefäß muß vakuumdicht sein und mit Hilfe großer Pumpen auf einen Druck unter 10^{-8} Torr – also Ultrahochvakuum – ausgepumpt werden können. Das ist nur möglich, wenn für das Gefäß ausschließlich Materialien mit niedrigem Dampfdruck verwendet werden, die auch bei hohen Temperaturen von 100 bis 300 Grad ausgeheizt werden können.

Da für die Experimente, die im IPP betrieben, gebaut oder geplant werden, kein Tritium benötigt wird, müssen keine Vorkehrungen gegen das Entweichen von Tritium getroffen werden. Anders ist dies bei Experimenten wie NET, die mit einem gezündeten Plasma und daher auch mit Tritium arbeiten werden. Hier werden an das Gefäß besondere Anforderungen gestellt wie zum Beispiel Doppelwandigkeit.

Damit der Transformator den Strom im Plasma und nicht im Gefäß induziert, muß die Leitfähigkeit des Gefäßes sehr gering oder der Torus durch einen Isolatorspalt

getrennt sein. Wegen der hohen Beanspruchung durch Druck und magnetische Kräfte, die durch lokal induzierte Ströme hervorgerufen werden können, kommt als Gefäßmaterial vor allem Edelstahl in Frage. Für Diagnostiken, Heizung und viele Steuerungen benötigt das Gefäß zahlreiche Öffnungen und Stutzen, die angeschweißt oder über Metaldichtungen mit dem Gefäß verbunden werden.

Brennstoffnachfüllung

Bei der Fusion von Deuterium und Tritium entstehen Helium-Kerne (Alphateilchen) als »Asche« des Brennprozesses. Damit sich das Helium nicht im Inneren ansammelt und das Plasma erstickt, müssen die Heliumteilchen ständig von innen nach außen abtransportiert werden. Dementsprechend muß Brennstoff innen nachgefüllt werden, um durch einen hohen Druck im Inneren die Teilchen nach außen zu bringen.

Neben dem Gaseinlaß vom Gefäßrand aus erscheint die Pelletinjektion als besonders geeignete Nachfüllungsmethode. Dabei wird Deuterium – später vielleicht auch Tritium – so stark abgekühlt, bis es in festen Zustand übergeht und Kügelchen (Pellets) von wenigen Millimetern Durchmesser geformt werden können. In Gaskanonen oder Zentrifugen beschleunigt, werden sie in das heiße Plasma eingeschossen, wo sie wieder verdampfen und die einzelnen Atome ionisiert werden.

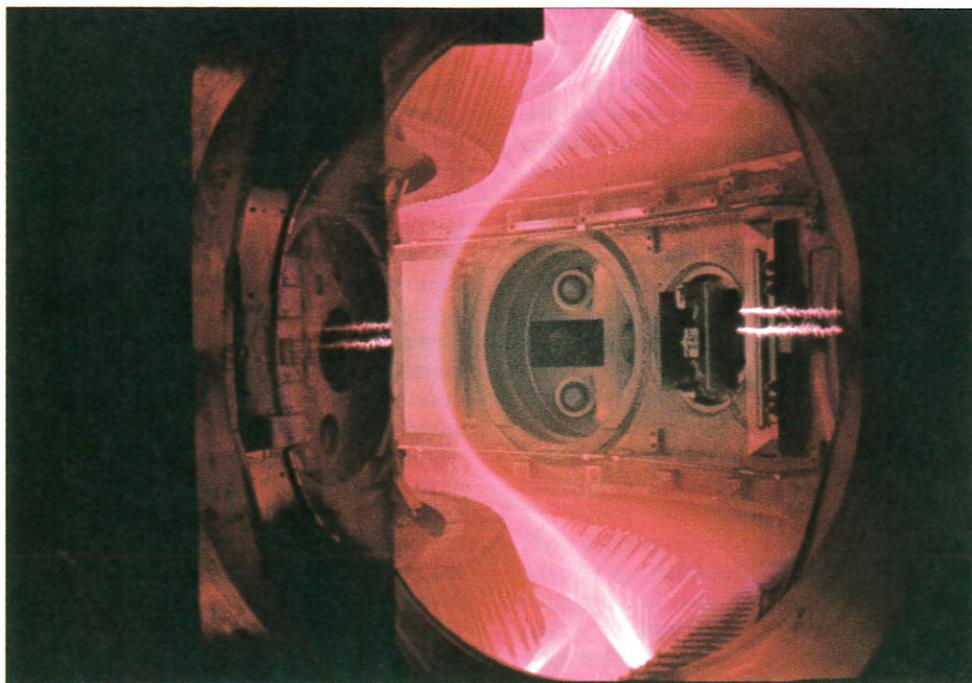


Abbildung 20: Blick in das Plasmagefäß: Da ein heißes Wasserstoffplasma nicht im sichtbaren Bereich leuchtet, ist nur das relativ kalte Plasma am Rand und die Strahlung von Verunreini-

gungen zu sehen. Die beiden hellen Spuren rechts sind Bahnen von Pellets, die im Plasma verdampfen, das Plasma dadurch abkühlen und sichtbar machen.

Plasmadiagnostik

Die extremen Bedingungen in einem Fusionsplasma erfordern besondere Meßmethoden, um seinen Zustand zu diagnostizieren. Generell versucht man, die Eigenschaften des Plasmas zu erkunden, ohne es zu stören, indem man die Wirkungen des Plasmas nach außen untersucht. Diese Wirkungen manifestieren sich in magnetischen oder elektrischen Feldern, durch die Aussendung geladener oder neutraler Teilchen sowie durch Strahlung im gesamten Bereich des Frequenzspektrums. Theoretische Arbeiten stellen den Bezug dieser Wirkungen zu den Plasmaeigenschaften her.

Neben diesen »passiven« Methoden werden auch aktive eingesetzt, sofern man sicher sein kann, daß sie das zu untersuchende Plasma nicht verändern. Besonders ergiebig ist die Einstrahlung von Laserlicht oder Mikrowellen, die durch das Plasma verändert werden und über seine Eigenschaften Auskunft geben können. Auch Teilchenstrahlen werden zur Diagnose verwendet.

Messung der Elektronentemperatur

Die Temperatur der Elektronen äußert sich eindeutig in ihrer Geschwindigkeit. Die Temperaturmessung ist daher eigentlich eine Geschwindigkeitsmessung, die ähnlich funktioniert wie die Radar-Geschwindigkeitsmessung an Automobilen: Ein intensives Lichtstrahlbündel einer festen Frequenz wird von einem Laser in das Plasma eingestrahlt. Das Licht wird an den bewegten Elektronen gestreut (Thomsonstreuung) und erleidet dabei eine Frequenzänderung, die der Geschwindigkeit der Elektronen entspricht. Aus einer genauen Frequenzmessung des gestreuten Lichtes kann man so die Temperatur der Elektronen berechnen.

Eine andere Methode benutzt die vom Plasma ausgesandte Elektronen-Zyklotronstrahlung. Die Plasmaelektronen, die sich mit der Zyklotronfrequenz auf Kreisbahnen um die Magnetfeldlinien bewegen, strahlen dabei Wellen dieser Frequenz und deren Oberschwingungen ab. In normalen Fusionsplasmen hängt die Intensität der zweiten Oberschwingung dieser Strahlung nur von der Temperatur ab, die auf diese Weise meßbar wird. Darüber hinaus kann man bei geeigneter Beobachtung aus der Frequenz der Strahlung auf die Magnetfeldstärke und daraus auf den Entstehungsort der Strahlung schließen. Aus der Messung von Intensität und Frequenz kann also die Verteilung der Temperatur im gesamten Plasma bestimmt werden.

Messung der Elektronendichte

Mit Hilfe der Thomsonstreuung läßt sich nicht nur – aus der Frequenzänderung des Lichtes – die Temperatur der Elektronen, sondern – aus der Intensität des gestreuten Lichtes – auch die Dichte der Elektronen bestimmen. Mit geeigneten Detektoren, die das Streulicht des Laserstrahls von verschiedenen Orten des Plasmas auf sammeln,

erhält man so ein Profil der Plasmadichte über den Plasmaquerschnitt. Da das benötigte Laserlicht gepulst erzeugt wird, ist die Beobachtung des Plasmas mit dieser Methode nur während der kurzen Pulszeiten möglich. Eine hohe Repetitionsfrequenz des Lasers ist daher wünschenswert. Der an ASDEX eingesetzte Laser kann 50 Impulse pro Sekunde feuern und erlaubt damit eine quasistationäre Messung von Elektronentemperatur und Plasmadichte.

Eine Methode der Dichtemessung, die völlig stationär arbeitet, beruht auf der Veränderung der Lichtgeschwindigkeit im Plasma. Ein Plasma verhält sich wie ein Dielektrikum mit einem stark von der Frequenz abhängigen Brechungsindex für elektromagnetische Wellen. Zur Messung der Plasmadichte wird eine Welle mit einer Frequenz aus dem Mikrowellenbereich gesplittet und zum Teil durch das Plasma, zum Teil durch Luft geschickt. Bringt man die beiden Teilwellen wieder zusammen, kann man aus dem entstehenden Interferenzmuster auf die Änderung der Wellen-Geschwindigkeit im Plasma und daraus auf die Plasmadichte schließen. Auf diese Weise erhält man ein stationäres Signal über die gemittelte Dichte. Da das Plasma insgesamt neutral ist, ist die Dichte der Ionen praktisch identisch mit der Dichte der Elektronen, weshalb eine eigene Messung der Ionendichte nicht nötig ist.

Messung der Ionentemperatur

Bei genügend hoher Plasmadichte kann man meistens davon ausgehen, daß alle Komponenten eines Plasmas die gleiche Temperatur besitzen. Da aber die verschiedenen Heizmethoden entweder die Ionen oder die Elektronen heizen, können sich bei Fusionsplasmen deutliche Temperaturunterschiede ergeben. Da die Ionen durch die leichteren und beweglicheren Elektronen elektrisch gut abgeschirmt sind, erschließen sie sich nicht so leicht durch elektromagnetische Strahlung. Die Ionen des Plasmas entreißen allerdings, wenn sie bei einem Stoß einem neutralen Atom nahekommen, diesem gelegentlich ein Elektron und werden dadurch selber neutral (Umladungsneutrale). Dadurch sind sie nicht mehr im Magnetfeld gebunden und können das Plasma verlassen. Mißt man die Energien dieser neutralen Teilchen, kann man auf die Temperatur der Ionen im Plasma zurückrechnen.

Eine andere Methode zur Messung der Ionentemperatur benutzt das Licht, das Verunreinigungsatome im Plasma ausstrahlen. Die Wasserstoffatome sind im Plasma vollständig ionisiert und leuchten daher nicht mehr. Verunreinigungsatome mit vielen Elektronen sind jedoch noch nicht völlig ionisiert und leuchten daher mit charakteristischen Frequenzen. Diese Frequenzen ändern sich in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, mit der sich die Ionen relativ zum Beobachter bewegen. Aus einer genauen Frequenzmessung kann man also auf die Geschwindigkeit und damit die Temperatur der Teilchen schließen.

Sicherheits- und Umweltaspekte der Fusion

Obwohl derzeit noch vorwiegend die Grundlagen der Fusion erforscht werden, sind bereits heute Aussagen über Sicherheit und zu erwartende Einflüsse eines späteren Fusionsreaktors auf die Umwelt erwünscht – auch als Wegweiser für die sicherheitstechnischen Anforderungen an das Reaktordesign. Solche Angaben werden durch Reaktorentwürfe ermöglicht, die in den letzten Jahren zunehmend näher an die Praxis herangerückt sind. Die Fusionsexperimente der nächsten Generation, an denen bereits im Detail gearbeitet wird, werden nämlich fast schon Reaktoren sein.

Auf dieser Grundlage kann man dem Fusionsreaktor bereits heute die folgenden günstigen Eigenschaften zusprechen:

- Ein »Durchgehen«, das heißt ein unkontrollierter Leistungsanstieg über die Nennleistung hinaus, ist in einem Fusionsreaktor nicht möglich.
- Die auch in einem Fusionsreaktor auftretenden radioaktiven Substanzen – Tritium sowie die aktivierten Strukturmaterialien – haben ein relativ niedriges biologisches Gefährdungspotential.
- Langfristig sieht man die Möglichkeit, Menge und Langzeitaktivität der entstehenden radioaktiven Stoffe durch geeignete Materialentwicklung für die erste Wand und das Blanket ganz erheblich zu vermindern.

Radioaktive Belastung im Normalbetrieb

Sicherheitsvorkehrungen werden nötig, weil der Reaktor neben Deuterium das radioaktive Tritium als Brennstoff benutzt und weil die freigesetzten energiereichen Neutronen zu Radioaktivität in der Brennkammerwand und im Brutmantel führen. Die Reaktorhalle wird man deshalb während des Betriebs und auch noch einen Tag nach dessen Ende nicht betreten können. Alle Arbeiten während dieser Zeit werden daher durch Fernbedienung verrichtet.

Tritium, die schwerste und einzige radioaktive Variante des Wasserstoffs, besitzt eine Halbwertszeit von 12,3 Jahren. Seine radioaktive Strahlung – Beta-Strahlung, das heißt Elektronen – kann menschliche und tierische Haut nicht durchdringen. Für Lebewesen wird sie erst gefährlich, wenn das Tritium durch Einatmen, Essen oder Trinken vom Körper aufgenommen wird. Einmal in den Körper gelangt, besitzt Tritium dort eine durchschnittliche Aufenthaltsdauer von 10 Tagen. Im Ökosystem verteilt und verdünnt sich Tritium – auch in der Form tritiierten Wassers – wesentlich schneller als etwa Spaltprodukte und kann Land und Gebäude nicht für längere Zeit kontaminieren. Ebenso wenig gibt es Anzeichen für eine Tritiumanreicherung in der Nahrungskette.

Da das Tritium erst an Ort und Stelle im Brutmantel aus dem Metall Lithium erzeugt wird, läuft der Brennstoff für die Fusion nur im Innern des Reaktors um. Sicherheitstechnisch ist dies sehr von Vorteil. Insgesamt wird ein

Fusionskraftwerk voraussichtlich etwa drei Kilogramm Tritium enthalten, von dem ein großer Teil fest in Speichern und Metallen gebunden ist. Sicherheit und Umwelteinflüsse hängen entscheidend von der Rückhaltung des Tritiums im Reaktor ab. Hierzu dient ein System von mehrfach überwachten, ineinander geschachtelten Umhüllungen. Nach bisherigen technischen Erfahrungen muß man annehmen, daß im Normalbetrieb nicht mehr als 2 Gramm Tritium pro Jahr aus dem Reaktor entweichen werden. Zum Vergleich: Die im Jahre 1985 weltweit vorhandene Menge an Tritium, die hauptsächlich aus Kernwaffenversuchen, aber auch aus natürlichen Quellen und Kernkraftwerken stammt, wird auf etwa 100 Kilogramm geschätzt.

Die von den Fusionsneutronen aktivierten Strukturmaterialien besitzen – bei den heute verfügbaren Stahlsorten – Halbwertszeiten im wesentlichen zwischen 1 und 100 Jahren. Sie sind alle in Form fester Metalle in die innere Reaktorkonstruktion eingebunden. Von der aktivierten Struktur wird daher im Normalbetrieb so gut wie keine Radioaktivität außer einigen Curie pro Jahr über Korrosionsprodukte an die Umwelt abgegeben.

Alle Freisetzungen zusammengenommen bedeuten – berechnet unter ungünstigsten Bedingungen für die am meisten belastete Person, die sich ständig in einem Kilometer Entfernung vom Reaktor aufhält – eine maximale Dosis von 1,5 Millirem pro Jahr. Die mittlere Belastung für die in einem Umkreis von 50 Kilometern um den Reaktor lebende Bevölkerung beträgt dann 0,01 Millirem pro Jahr. Diese Werte entsprechen etwa 1 bzw. 0,005 Prozent der natürlichen radioaktiven Belastung von etwa 200 Millirem in der Bundesrepublik und liegen damit beide deutlich unterhalb der Dosischwankung der natürlichen Radioaktivität von Ort zu Ort.

Für die Gesamtbelastung in einer Weltwirtschaft, die mit beispielsweise 2000 über die Erde verteilten Fusionskraftwerken arbeitet, bedeuten alle Freisetzungen zusammen eine zusätzliche durchschnittliche Jahresdosis von weniger als 0,1 Millirem pro Mensch. Dies entspricht 0,05 Prozent der natürlichen Strahlenbelastung.

Störfälle

Fusionsreaktoren lassen eine sehr große Sicherheit vor Unfällen erwarten, die die Umgebung gravierend belasten könnten:

Ein unkontrollierter starker Leistungsanstieg ist nicht möglich, denn die Brennstoffmenge in der Plasmakammer ist – mit knapp einem Gramm – sehr klein und reicht deshalb nur für 10 Sekunden Brenndauer aus.

Die Leistungsdichten im Plasma und Blanket sind mit etwa 3 bzw. 20 Watt pro Kubikzentimeter gering. Darüber hinaus bringt jede Änderung der Betriebsbedingungen über Plasmainstabilitäten den Brennvorgang sofort zum Erlöschen.

Auch die Nachwärme nach Abschaltung des Reaktors reicht nicht aus, um ganze Bauteile zu schmelzen, das gleiche gilt für die restlichen in der Anlage gespeicherten

Energien. (Vorausgesetzt wird hierbei, als Brutmaterial kein reines Lithium in flüssiger Form zu verwenden.)

Diese grundsätzlichen Eigenschaften werden im Rahmen von Studien zu möglichen Störfällen und ihren Folgen zunehmend genauer untersucht. Viele technische Details des zukünftigen Reaktors sind heute jedoch noch nicht festgelegt. Die Ergebnisse der Analysen, die fortwährend die Planung des Reaktors beeinflussen werden, sollen zunächst vor allem dazu dienen, mögliche Störfallursachen zu identifizieren und durch die Konstruktion auszuschalten. Die heutigen Angaben über Störfälle sind daher bezüglich der genauen Zahlenangaben noch vorläufig, nach aller Voraussicht aber grundsätzlich richtig.

Eine Gefahrensituation wäre gegeben, wenn durch einen Unfall Tritium in die Reaktorhalle freigesetzt werden könnte. Da der Reaktor keine Energiequellen enthält, die einen Durchbruch der Reaktor-Sicherheitshülle von innen bewirken könnten, hätte ein solcher Unfall geringe Auswirkungen nach außen. Unterstellt man trotzdem ein Versagen der Sicherheitshülle, so kann keine Ereigniskette gefunden werden, die zu einer Freisetzung von mehr als 200 Gramm Tritium führt. Dies ist in etwa das nicht fest gebundene Tritiuminventar, das also schlimmstenfalls bei einem Unfall entweichen könnte. Beim Ausströmen in 20 Meter Höhe – etwa durch ein Leck im Gebäudedach – hätte dies unter ungünstigsten Wetterbedingungen in 1 Kilometer Entfernung, das heißt am Zaun der Anlage, eine maximale Belastung von 6 bis 8 rem zur Folge. Zum Vergleich: Die deutsche Regelung für kerntechnische Anlagen sieht für beruflich strahlenexponierte Personen einen Grenzwert von 5 rem pro Jahr vor. Über einen 100 Meter hohen Schornstein abgegeben, ergibt die gleiche Menge Tritium, an der gleichen Stelle gemessen, eine maximale Belastung von etwa 0,24 rem. Kein Mechanismus konnte gefunden werden, der mehr als einige Gramm radioaktiven Metallstaubes freisetzen kann.

Es ist noch unbekannt, ob es langfristig gelingen kann, anstelle der Deuterium-Tritium-Fusion andere Fusionsreaktionen technisch nutzbar zu machen, bei denen die Tritiumherstellung im Reaktor entfallen würde.

Abfälle

Während der 30jährigen Lebenszeit der Anlage wird die erste Wand und das Blanket aufgrund der hohen Belastung und des Abbrandes etwa viermal ausgetauscht werden. Ein Fusionsreaktor, der die heute gebräuchlichen Stahlsorten benutzt, produziert damit während seines gesamten Betriebes schätzungsweise 4000 Kubikmeter an mittelaktivem und 2000 Kubikmeter an hochaktivem metallischem Abfall. Dies entspricht der Menge nach etwa dem doppelten Abfall aus einem Spaltungsreaktor, bei der Sicherheit bestehen jedoch große Unterschiede:

So ist die biologische Gefährdung durch die Fusion etwa 100fach, nach 100 Jahren bereits 2000fach geringer. Die Halbwertszeiten der wesentlichen Fusionsrückstände sind bedeutend kleiner – 1 bis 100 Jahre gegenüber 100 bis 10000 Jahren im Falle der Kernspaltung. Diese Vor-

züge lassen sich noch erheblich steigern, wenn anstelle der jetzt in Betracht gezogenen konventionellen Stahlsorten für die erste Wand und das Blanket modifizierte Stähle entwickelt werden können. Stähle ohne störende Beimengungen, wie zum Beispiel Nickel und Molybdän, deren wirtschaftliche Herstellung nach einiger Entwicklungsarbeit als möglich betrachtet wird, würden eine langzeitige Isolation des Abfalls überflüssig machen. Bei sehr günstiger Entwicklung würde Abfall dann nur in der Verbraucher-Generation anfallen, die ihn erzeugt hat. In größeren Zeiträumen käme es deshalb wegen der kurzen Halbwertszeiten zu keiner Anhäufung hochradioaktiver Materialien, zum Teil könnten die Metalle sogar wieder verwendet werden.

Ergebnisbericht des IPP

Die Arbeitsbereiche des Instituts für Plasmaphysik

Die wissenschaftlichen Arbeiten des Instituts werden in neun Bereichen, fünf vorwiegend experimentellen, drei theoretischen sowie im Bereich Informatik, durchgeführt. Der Wissenschaftliche Direktor des IPP ist **Prof. Klaus Pinkau**.

Der experimentelle Bereich E1 unter **Dr. Michael Kaufmann** ist zuständig für Planung und Bau des Experimentes ASDEX Upgrade und entwirft und baut Diagnostiken für JET. Der experimentelle Bereich E2 unter der Leitung von **Dr. Günter Grieger** faßt die Aktivitäten des Instituts auf dem Gebiet des Stellarators zusammen. Hauptaufgabe des experimentellen Bereiches E3 unter Leitung von **Dr. Gerhart von Gierke** ist der Betrieb des Tokamak ASDEX. Der Bereich Oberflächenphysik, seit Oktober 1985 unter Leitung von **Prof. Volker Dose**, betreibt an

verschiedenen Experimenten vorwiegend experimentelle Arbeiten zur Plasma-Wand-Wechselwirkung. Der Bereich Technologie unter **Dipl.-Ing. Karl-Heinz Schmitter** (seit 1. Januar 1986 im Ruhestand) vereinigt die Gruppen, die für die Zusatzheizung an den Experimenten verantwortlich sind. Der Bereich Theorie 1 unter **Prof. Dieter Pfirsch** widmet sich vorwiegend grundlegenden Problemen der Plasmaphysik. Der Bereich Theorie 2 unter Leitung von **Prof. Arnulf Schlüter** ergänzt die experimentellen Untersuchungen des Bereichs 2 mit theoretischen Arbeiten zum Stellarator. Der Bereich Theorie 3 wird von **Dr. Karl Lackner** geleitet und befaßt sich mit theoretischen Arbeiten zur Tokamakphysik. **Prof. Friedrich Hertweck** leitet den Bereich Informatik, der vor allem die Datenverarbeitung von ASDEX Upgrade vorbereitet.

Projekt/ Projektbeauftragter	Arbeitsgruppe/ Gruppenleiter	Bereich/ Bereichsleiter	E 3 v. Gierke	Oberflächen- physik Dose	E 1 Kaufmann	Theorie 3 Lackner	E 2 Grieger			Theorie 2 Schlüter	Technologie Lackner (komm.)			Theorie 1 Pfirsch	Informatik Hertweck
		ASDEX Wagner	PWW Dose	ASDEX Upgrade Köppendörfer	JET-Diagn. + Pellet Andelfinger	Tokamakphysik Lackner	Wendelstein VII-AS Renner (Physik)	Wendelstein VII-AS Sapper (Technik)	Wendelstein VII-X Wobig	Stellaratorphysik Nührenberg	Neutrainjektion Speth	LHRH Leuterer	ICRH Wesner	Theorie 1 Biskamp	Informatik Hertweck
Projekte	ASDEX Wagner	(X)	(X)		/	(X)					(X)	(X)	(X)	/	/
	ASDEX-Upgrade Köppendörfer	/	/	(X)	(X)	(X)					(X)	/	(X)		(X)
	JET-Mitarbeit Kaufmann	/	X		(X)	X	/							/	
	NET-Mitarbeit Grieger		/			X									
	Wendelstein VII-A Renner		/		/		X		/		X		X		/
	Wendelstein VII-AS Sapper				/		X	(X)	/	X	(X)		(X)		/
	Wendelstein VII-X Wobig							/	(X)	(X)					
Allgemeine Physik		(X)											(X)		

(X) = Schwerpunkt der Aktivitäten

X = wesentliche Aktivitäten

/ = Nebenaktivitäten

Abbildung 21: Beiträge der Gruppen und Bereiche zu den einzelnen Forschungsprojekten.

Tokamaks

Tokamaks wurden Anfang der 50er Jahre in der Sowjetunion entwickelt und wegen ihrer Erfolge und ihrer prinzipiellen Einfachheit bald weltweit zum führenden Experimenttyp der Fusionsforschung. Das Institut für Plasmaphysik arbeitet gegenwärtig an vier verschiedenen Tokamakexperimenten: an ASDEX, an dem Nachfolgeexperiment ASDEX Upgrade, das derzeit gebaut wird, an dem im englischen Culham betriebenen europäischen Gemeinschaftsexperiment JET und an dessen Nachfolger NET, der in einer europäischen Studiengruppe im Institut für Plasmaphysik vorbereitet wird.

An ASDEX hatte sich das IPP das Ziel gesetzt, mit Hilfe von Divertoren saubere Plasmen zu erzeugen und so die Bedeutung des Divertors für einen zukünftigen Fusions-

reaktor herauszuarbeiten. Inzwischen haben Experimente an ASDEX gezeigt, daß ein Divertor nicht nur das Plasma sauberhalten kann, sondern auch bei Zusatzheizung zu einer bedeutenden Verbesserung der Einschlußzeiten führt. Nach den Erfolgen mit ASDEX soll in dem Nachfolgeexperiment ASDEX Upgrade der Divertor in einer Form untersucht werden, die auch in einem Reaktor einsetzbar wäre. Ergebnisse dieses Experimentes werden daher auch für NET von großer Bedeutung sein.

Mit den Untersuchungen an JET ist das IPP über Aufgabenvereinbarungen verbunden, die dem Institut vor allem die Gebiete Verunreinigungsphysik und Plasma-Wand-Wechselwirkung zur Mitarbeit zuweisen.

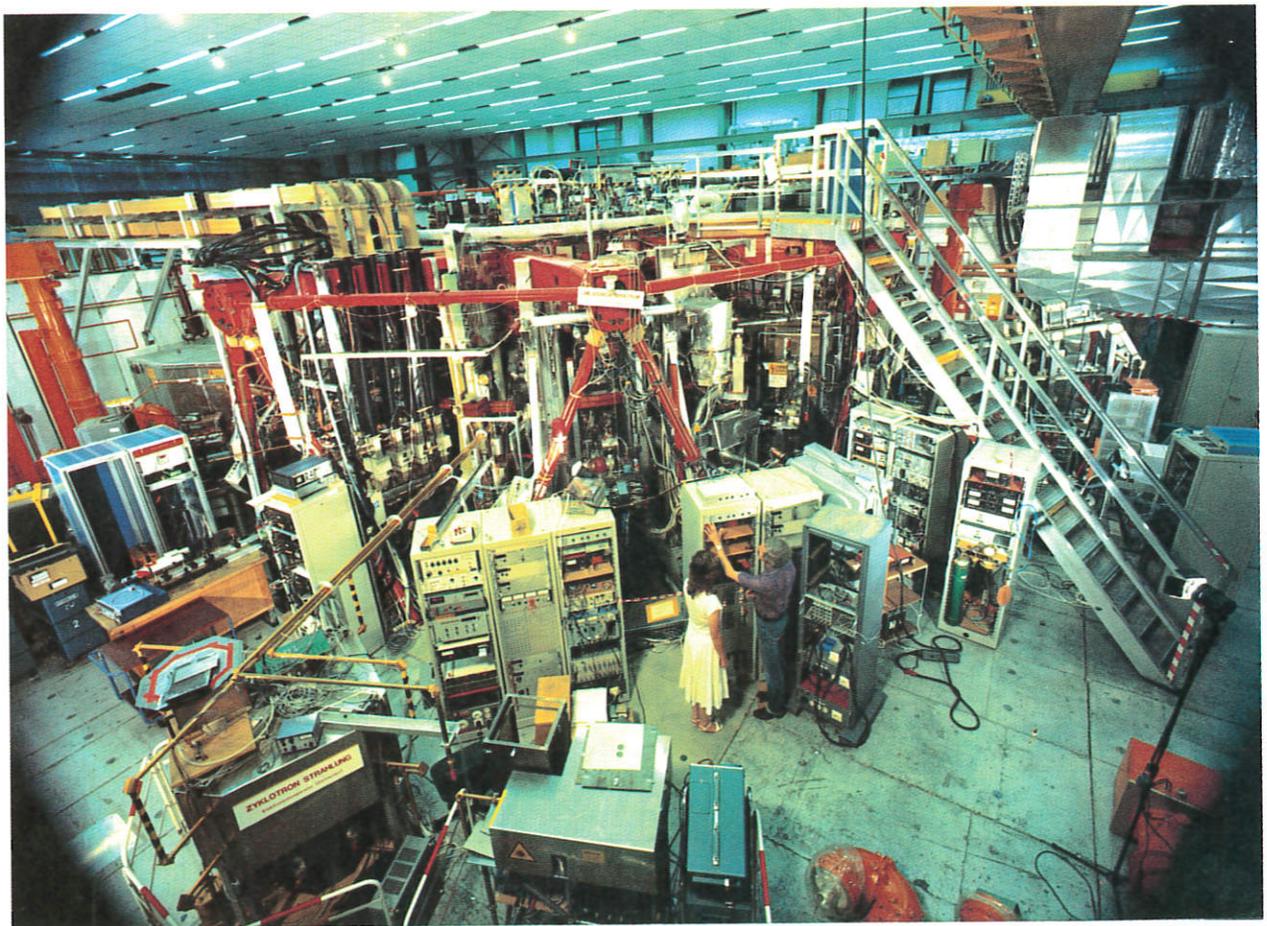


Abbildung 22: Das Experiment ASDEX, umstellt von zahlreichen Diagnostiken und Heizeinrichtungen.

ASDEX

Projektleiter: Dr. Martin Keilhacker (bis 31. Dezember 1985)
 Dr. Friedrich Wagner (ab 1. Januar 1986)

ASDEX ist ein axialsymmetrisches Divertorexperiment vom Typ Tokamak, bei dem die Randschichten des Plasmas durch enge Schlitze ober- und unterhalb der Plasmahauptkammer in separate Nebenkammern abgelenkt (divertiert) werden. Hier wird die Energie des Plasmas dann von speziellen Prallplatten aufgenommen. Dabei entwickelt sich in den Divertorkammern ein Druck, der um ein bis zwei Größenordnungen über dem Druck der Hauptkammer liegen kann. Dieser hohe Druck führt zu einer hohen Plasmadichte und diese wiederum zu einer niedrigen Temperatur des Plasmas vor den Prallplatten. Obwohl das in der Hauptkammer eingeschlossene Plasma bis zum Rand hin hohe Temperaturen besitzt (bis zu mehreren 100 Elektronenvolt bzw. einigen Millionen Grad Kelvin) und auch heiß in die Randschicht eindiffundiert, ist das Plasma an den Stellen, an denen es schließlich mit der Wand – den Prallplatten – in Berührung kommt, bereits verhältnismäßig »kalt« (unter 10 Elektronenvolt bzw. 100 000 Kelvin). Dieses »kalte« Plasma richtet wesentlich weniger Schaden an den Wänden an als ein heißes. In dem Divertorexperiment ASDEX werden deshalb viel weniger Verunreinigungen erzeugt als in Limiterexperimenten. Wegen der zu den Prallplatten hin gerichteten Plasmaströmung haben die Verunreinigungen darüber hinaus auch nur eine geringe Chance, in das Plasma einzudriften. ASDEX konnte auf diese Weise problemlos sehr saubere Plasmen erzeugen – ein großer Erfolg des Experiments.

Es zeigte sich aber, daß ein divertiertes Plasma noch weitere unerwartet positive Eigenschaften besitzt. So

Gesamtradius:	3,50 Meter
Höhe:	5 Meter
Gewicht:	250 Tonnen
Großer Plasmaradius:	1,65 Meter
Kleiner Plasmaradius:	0,40 Meter
Magnetfeld (auf der Plasmaachse):	2,8 Tesla
Anzahl der Spulen:	16
Spulenstrom:	≤ 45 Kiloampere
Plasmastrom:	≤ 500 Kiloampere
Entladungsdauer:	≤ 3 Sekunden (≤ 10 Sekunden im suprathemischen Regime)
Heizleistung:	
– Neutralinjektion:	≤ 4 Megawatt
– Ionen-Zyklotronheizung:	≤ 3 Megawatt
– Hochfrequenzheizung bei der unteren Hybridfrequenz:	≤ 2,4 Megawatt

Abbildung 23: Charakteristische Daten des Experimentes ASDEX

hatte man weltweit in Limiterexperimenten eine Verschlechterung des Energieeinschlusses beobachtet, wenn das Plasma – zusätzlich zur Ohmschen Heizung durch den Plasmastrom – von außen geheizt wurde. Unter diesen Umständen mußte man es für nahezu unmöglich halten, die Zündbedingungen in einem zusätzlich geheizten Tokamak zu erreichen. Daher war es um so bemerkenswerter, daß sich im Divertorbetrieb von ASDEX ein Entladungstyp einstellen ließ, in dem die Zusatzheizung keine Verschlechterung des Einschlusses zur Folge hatte, sondern hohe Dichte und Einschlußzeit beobachtet wurden. Diese Betriebsweise wurde vom ASDEX-Team »H-Regime« genannt. Wegen seiner ausschlaggebenden Bedeutung für einen zukünftigen Fusionsreaktor wurde daraufhin weltweit in allen Tokamak-Labors nach dem H-Regime gesucht. Dabei wird es immer sicherer, daß nur Tokamaks mit Divertor oder wenigstens mit magnetischem Limiter das H-Regime erreichen können. Offenbar ist zur Einstellung des H-Regimes eine hohe Temperatur am Plasmarand erforderlich, die beim direkten Kontakt des Plasmas mit der Wand in einer Limiterentladung nicht möglich ist.

An ASDEX stehen außer der Heizung durch den Plasmastrom drei Zusatzheizverfahren zur Verfügung: die Heizung mit Neutralteilcheninjektion sowie die Heizung mit Hochfrequenzwellen der unteren Hybridfrequenz und der Ionen-Zyklotronfrequenz. Hierdurch hat das Experiment die einzigartige Möglichkeit, die verschiedenen Heizverfahren hinsichtlich Leistung und synergistischem Zusammenwirken miteinander zu vergleichen.

Die Ionen-Zyklotronheizung wurde Ende 1984 in Betrieb genommen und kann mittlerweile routinemäßig Leistungen bis zu 2,5 Megawatt für eine Sekunde dem ASDEX-Plasma anbieten. Erstmals wurde versucht, Ionen-Zyklotronheizung gemeinsam mit Neutralteilchenheizung anzuwenden und so insgesamt 5 Megawatt Leistung in das Plasma einzustrahlen. Dieses Verfahren erwies sich als sehr erfolgreich: Das Plasma wird zunächst mit Neutralteilchen vorgeheizt und anschließend die Hochfrequenzheizung zugeschaltet. Wenn die Anfangstemperatur des Plasmas genügend hoch ist, steigt die vom Plasma absorbierte Hochfrequenzleistung auf 70 Prozent der eingestrahelten Leistung – verglichen mit 50 Prozent bei nur ohmsch geheiztem Plasma. Erfreulicherweise konnte auch mit dieser Heizmethode das H-Regime erreicht werden. Die Plasmazustände mit verschlechtertem und gutem Einschluß können also als allgemeine Eigenschaften eines zusätzlich geheizten Tokamaks angesehen werden, die unabhängig von der spezifischen Methode der Zusatzheizung sind. Dabei scheint alleine die Höhe der Randtemperatur des Plasmas ausschlaggebend dafür zu sein, welcher Plasmazustand sich während der Entladung einstellt.

Mit der Neutralteilchenheizung wurde untersucht, wie die Eindringtiefe der Neutralteilchen die Heizwirkung beeinflusst. Bislang war man der Ansicht, daß für effektive Heizung mit guten Einschlußzeiten die Teilchen bis ins Zentrum des Plasmas vordringen müssen. Dies wird jedoch in großen Fusionsanlagen problematisch, da für steigende Maschinengrößen immer höhere Teilchengeschwindigkeiten nötig werden, um bis ins Plasmazentrum vorzustoßen. Der erforderliche Teilchenstrahl kann dann mit gegenwärtigen technischen Mitteln nicht mehr

wirtschaftlich hergestellt werden. Die Experimente an ASDEX zeigten nun aber, daß auch langsame, weniger tief in das Plasma eindringende Neutralteilchen die gewünschte Temperaturerhöhung hervorbringen. Anders als befürchtet, verschlechtern sich die Heizeffizienz und die Wärmeisolation des Plasmas hierbei nicht. Dieses unerwartete Ergebnis kann von einigem Einfluß auf kommende Heizstrategien sein: An dem europäischen Gemeinschaftsexperiment JET (Joint European Torus) in Culham/Großbritannien werden bereits Versuche geplant, um zu prüfen, ob das an ASDEX gefundene Ergebnis auch bei größeren Apparaturen seine Gültigkeit behält. In diesem Fall würden zur Heizung des nochmals größeren JET-Nachfolgers NET (Next European Torus) sogar Neutralteilchenstrahlen geringerer Energie ausreichen, als sie die gegenwärtig bei JET eingebauten Teilcheninjektoren liefern.

Das Heizexperiment bei der unteren Hybridfrequenz arbeitet mit einer Frequenz von 1,3 Gigahertz und ist für eine Leistung von maximal 2,4 Megawatt und eine Pulsdauer von 1,5 Sekunden ausgelegt. Während anfangs die Ionenheizung mit Wellen der unteren Hybridfrequenz in ASDEX und anderen großen Tokamaks ohne Erfolg war, wurde nun in drei verschiedenen Bereichen von Plasma-Parametern eine Heizwirkung der Wellen gefunden. Die höchste Heizeffizienz ergab sich bei einer Plasmadichte von 2 bis 4×10^{13} Teilchen pro Kubikzentimeter.

Neben den Heizexperimenten werden ausführliche Untersuchungen dazu angestellt, wie mit Wellen der unteren Hybridfrequenz ein Strom im Plasma getrieben werden kann. Dazu werden die elektromagnetischen Wellen von einer Antenne gerichtet in das Plasma abgestrahlt, die die Elektronen beschleunigen und damit einen elektrischen Strom erzeugen. Bei genügend hoher Hochfrequenz-Leistung kann der gesamte Plasmastrom allein durch die Hochfrequenz-Wellen aufrechterhalten werden. Der externe Transformator kann dabei ganz abgeschaltet werden. Bei weiterer Erhöhung der Leistung kann nicht nur der Plasmastrom konstant gehalten, sondern auch Energie in den Primärkreis des Transformators zurückgespeist werden. Da die Hochfrequenz-Leistung im Dauerbetrieb erzeugt wird und deshalb auch der Strom stationär getrieben werden kann, eröffnet sich damit die Möglichkeit, auch den Tokamak stationär oder zumindest quasistationär zu betreiben, indem der Strom abwechselnd mit Transformator und Hochfrequenz-Wellen aufrechterhalten wird.

Daneben zeigte sich, daß diese Art der Stromerzeugung im Plasma es möglich macht, bestimmte Plasmainstabilitäten, die sogenannten »Sägezähne«, zu vermeiden.

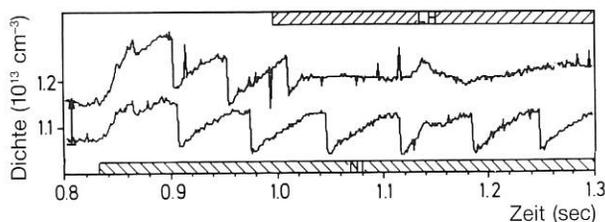


Abbildung 24: »Sägezahn«-Stabilisierung mit Hochfrequenzwellen der unteren Hybridfrequenz. Die während des Heizens mit Neutralteilchen auftretenden Schwankungen der zentralen Elektronendichte – sogenannte »Sägezähne« (siehe untere Kurve) – werden durch das Stromtreiben mit Hilfe von Wellen der unteren Hybridfrequenz unterdrückt (obere Kurve).

Sägezähne sind periodische Schwankungen der Dichte und Temperatur im Plasmazentrum, die mit Energieverlust nach außen verbunden sind. Anders als bei ohmschem Betrieb, bei dem wegen des temperaturabhängigen Plasmawiderstandes die Stromdichte von der Plasma-Temperatur abhängt, sind beim Stromtrieb mit Wellen der unteren Hybridfrequenz Stromdichte- und Temperaturverteilung unabhängig voneinander. Mit Hilfe der Wellen der unteren Hybridfrequenz lassen sich deshalb die Stromdichteprofile so beeinflussen, daß Sägezahninstabilitäten nicht mehr auftreten.

Ein neuer Hochdichte-Zustand des Plasmas konnte mit Hilfe von Pellet-Injektion gefunden werden. Durch das Einschleusen gefrorener Wasserstoffkügelchen in das Plasma konnte man – ähnlich wie im H-Regime – deutlich erhöhte Dichte und bemerkenswerterweise auch verbesserte Einschlußzeit feststellen. Technische Voraussetzung hierfür war eine neue Pellet-Zentrifuge, die bis zu 50 Pellets pro Sekunde in das Plasma einschleusen kann und

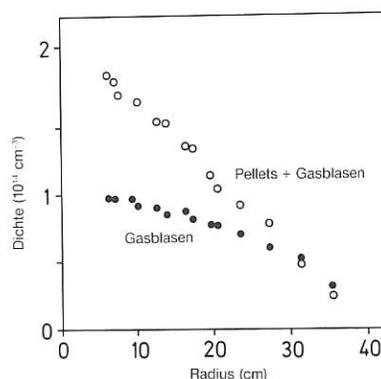


Abbildung 25: Die Abbildung zeigt die Dichteverteilung in zwei identischen Plasmaentladungen, die sich nur durch die Art der Brennstoffnachfüllung unterscheiden. Während die untere Kurve ein durch Gaseinblasen nachgefülltes Plasma wiedergibt, dessen Dichte bis zu der bislang erreichbaren Grenze angestiegen ist, zeigt die obere Kurve die Wirkung zusätzlicher Pelletinjektion: Die mit einer Geschwindigkeit von 650 Metern pro Sekunde in das Plasma eingeschossenen Wasserstoffkügelchen heben die Plasmadichte im Zentrum über die bisherige Grenze auf etwa den doppelten Wert.

so kontinuierliche Brennstoffnachfüllung ermöglicht. Anders als bei der üblichen Nachfüllung durch seitliches Einblasen von Wasserstoffgas, dringen die Pellets bis ins Zentrum des Plasmas vor. Das Studium dieses neuen Einschluß-Regimes wird einer der Hauptpunkte der weiteren Untersuchungen sein.

Die gegenwärtig oder in naher Zukunft an ASDEX installierten Heizungen erlauben es, dem Plasma Leistungen von 6 Megawatt für 10 Sekunden anzubieten. Das ist mehr, als Prallplatten und Gefäßwände derzeit aushalten. Nach umfangreichen Entwurfs- und Konstruktionsarbeiten wird ASDEX daher 1986 umgebaut und für die Langpulsheizung mit hohen Leistungen »gehärtet«. Mit den längeren Pulszeiten können 20- bis 30fach höhere Energiebeträge als bisher von der Heizung in das Plasma eingestrahlt werden. ASDEX wird dann – neben den beiden Großexperimenten JET in Großbritannien und JT-60 in Japan – das einzige Fusionsexperiment mit derart langen Heizzeiten sein.

ASDEX Upgrade

Projektleiter: Dr. Walter Köppendörfer

Der große und zum Teil überraschende Erfolg des Divertorexperiments ASDEX hat die Frage aufgeworfen, unter welchen Bedingungen auch ein Fusionsreaktor mit einem Divertor ausgestattet werden kann. In einem Reaktor dürfen die Divertorspulen, die die Randschichten des Plasmas in die Divertorkammern ablenken, nicht so nahe am Plasma liegen, wie dies bei ASDEX noch möglich war, sondern müssen außerhalb des Gefäßes verlaufen. Das hat zur Folge, daß die Divertorkammern nicht mehr – wie bei ASDEX – durch enge Schlitze von der Plasmakammer getrennt, sondern weit geöffnet sein werden. Das nächste große europäische Gemeinschaftsexperiment, NET, wird deshalb mit einem offenen Divertor geplant. Die Aufgabe von ASDEX Upgrade wird sein, einen solchen

offenen Divertor zu testen. Dabei soll durch genügend hohe Heizleistung dafür gesorgt werden, daß die Energieflüsse durch die Randschicht des Plasmas denen im Fusionsreaktor entsprechen. Aufgrund dieser Maßnahmen ist zu erwarten, daß ASDEX Upgrade trotz seiner kleinen Abmessungen die Randschichteigenschaften, die in NET sowie in einem Reaktorplasma auftreten werden, ausreichend simuliert.

Um das Plasma bis an die physikalisch und technisch gegebenen Grenzen zu heizen und den gewünschten Energiefluß durch die Randschicht zu erreichen, ist eine Heizleistung von 12 bis 15 Megawatt erforderlich. Diese Leistung muß für etwa 7 Sekunden zur Verfügung stehen. Dabei sollen die ersten 6 bis 9 Megawatt durch Neutralteilchenheizung erbracht werden, die restlichen 6 Megawatt durch Hochfrequenz-Heizung der Ionen-Zyklotronfrequenz.

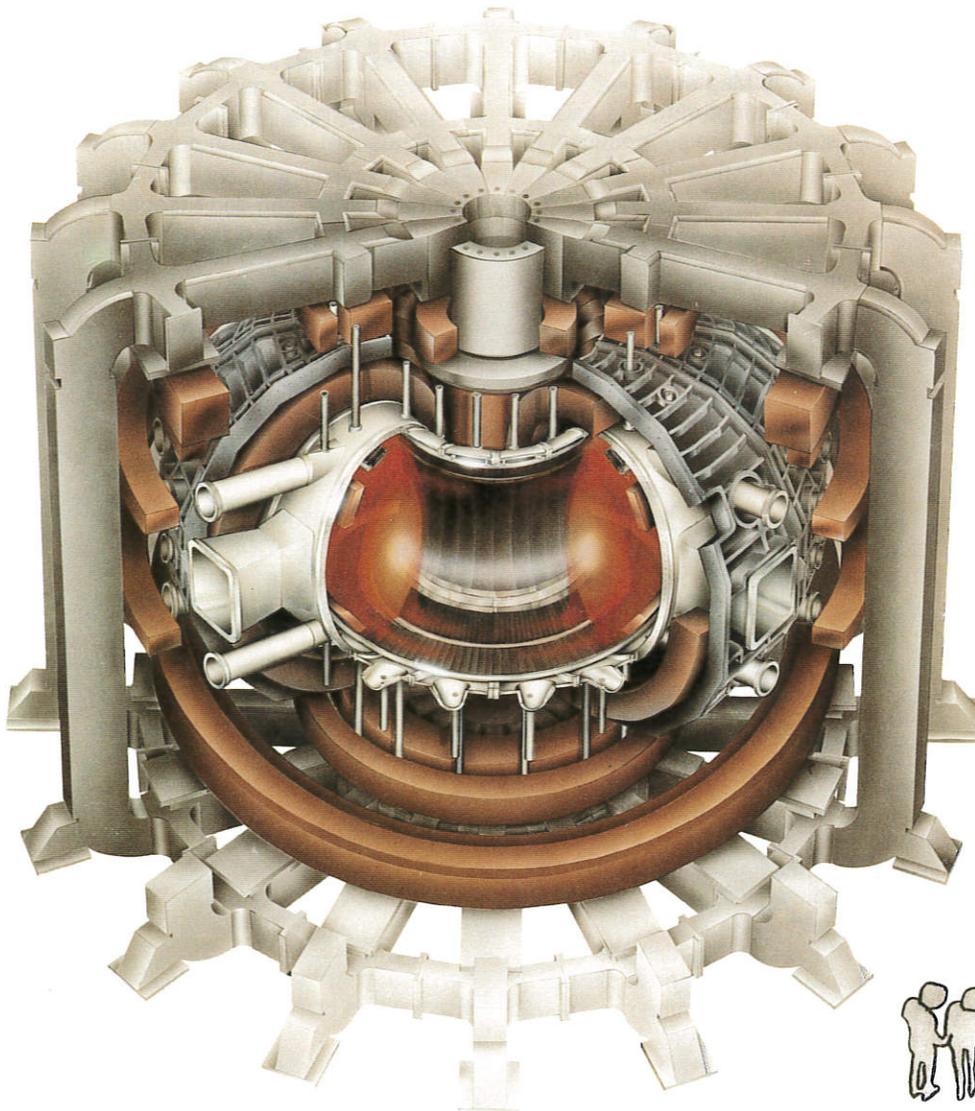


Abbildung 26: Ansicht des Tokamaksystems (aufgeschnitten) von ASDEX Upgrade mit Vakuumgefäß, Toroidalfeldmagneten, Poloidal-feldspulen und äußerem Stützgerüst.

Aufbauend auf Entwicklungsarbeiten im Rahmen von Studienaufträgen, wurden für Ende 1985 vier Sender mit je 2 Megawatt Heizleistung in Auftrag gegeben, die Wellen mit Frequenzen von 30 bis 120 Megahertz in das Plasma strahlen. Zugleich wurden Antennen entwickelt, die mit geringfügigen Umbauten verschiedenen Plasmakonfigurationen angepaßt werden können. Für die Neutralinjektion wurden wichtige Teile für die Stahlquellen und die Anpassung der Stromversorgung in Auftrag gegeben.

Gesamtradius:	5 Meter
Höhe:	10 Meter
Gewicht:	800 Tonnen
Großer Plasmaradius:	1,65 Meter
Plasmahöhe:	1,60 Meter
Plasmbreite:	1 Meter
Toroidalfeld:	3,9 Tesla
Anzahl der Toroidalfeldspulen:	16
Toroidalfeldspulenstrom:	84 Kiloampere
Maximaler Plasmastrom:	2 Megaampere
Entladungsdauer:	10 Sekunden
Heizleistung (total):	12 Megawatt
– Neutralinjektion:	6 Megawatt
– Ionen-Zyklotronheizung:	6 Megawatt

Abbildung 27: Charakteristische Daten des Experimentes ASDEX Upgrade

Inzwischen sind alle Hauptkomponenten des Experiments berechnet, konstruiert und bestellt. Die Spulen der Toroidal- und Poloidalfeldsysteme sind größtenteils in Fertigung. Die ersten Schalenelemente der Stützstruktur der toroidalen Spulen sind gegossen, das Stahlträgerwerk der poloidalen Spulen ist fertiggestellt und die Herstellung des Vakuumgefäßes in vollem Gange.

Sämtliche elektrischen Schaltanlagen für den Betrieb der Spulensysteme wurden bis Ende 1985 in Auftrag gegeben. Die Ausschreibung für die Kühlwasserversorgung ist erfolgt. Für die durch Wärmefluß und energiereiche Teilchen hochbelasteten Gefäßeinbauten wurden wassergekühlte Graphitstrukturen entwickelt und geprüft, die stationär bis zu 12 Megawatt pro Quadratmeter aufnehmen können.

Die Tokamakmaschine, der Entladungsablauf und die Sicherheitsverriegelungen sollen durch ein System programmierbarer Steuerungen geregelt und überwacht werden, dessen Aufbau begonnen hat.

Das Abschirmhaus mit 2 Meter dicken Wänden und einer 1,8 Meter starken Decke wurde – mit insgesamt 8000 Kubikmeter vergossenem Beton – zusammen mit den nötigen Nebenräumen errichtet. Die nötigen Türen und Öffnungen in den Wänden für Zugänge und Diagnostiken wurden so gestaltet, daß ein jährlicher Neutronenfluß aus dem Plasma von 10^{19} Neutronen sicher aufgefangen werden kann. Dieser Fluß entspricht etwa 500 Entladungssekunden in Deuterium bei maximalen Plasmapa-

rametern. Die Aktivierung der Apparaturen bleibt dann noch so gering, daß das Experiment jederzeit zugänglich bleiben wird.

Auch mit der Entwicklung der Plasmadiagnostik – schnell verschiebbare Langmuirsonde, Vielkanalbolometer, quasistationäre Pelletnachfüllung, Neutronenspektrometer (Zusammenarbeit mit dem Kernforschungszentrum Karlsruhe), Spektroskopie, insbesondere der Elektronen-Zyklotronstrahlung, HCN-Laser, Mikrowelleninterferometrie und Thomsonstreuung – wurde begonnen.

Der Betriebsbeginn des Experiments ist für Anfang 1989 vorgesehen. Da im amerikanischen Fusionsprogramm das »Poloidal Divertor Experiment« beendet werden mußte, sind die Amerikaner an einer Mitarbeit an ASDEX Upgrade interessiert. Diese Zusammenarbeit wurde 1985 im Rahmen der »Internationalen Energieagentur«, einem Organ der »Organisation for Economic Cooperation and Development« (OECD), vertraglich geregelt.

JET-Mitarbeit

Projektleiter: Dr. Michael Kaufmann

Das Tokamakexperiment JET (Joint European Torus), das gemeinsam von den Europäern in Culham/Großbritannien betrieben wird, ist das weltweit größte Unternehmen auf dem Gebiet der Kernfusion: Der Plasmaring des Experiments hat einen Umfang von 20 Metern, eine Höhe von über 4 Metern und einen Durchmesser von 2,5 Metern. Das Experiment ist Mitte 1983 planmäßig in Betrieb gegangen und hat seither in zahlreichen Entladungen mit Ohmscher Heizung durch den Plasmastrom hervorragende Ergebnisse erzielt. Das Zusatzheizprogramm hat mit der Inbetriebnahme von drei Antennen begonnen, die 6 Megawatt Radiofrequenzheizung liefern und bis 1985 zu Ionentemperaturen von 40 Millionen Grad geführt haben. Der erste von zwei Neutralteilcheninjektoren mit je 5 Megawatt Leistung wurde installiert und zum Jahreswechsel 1985/86 in Betrieb genommen. Auch die Betriebsparameter des JET-Tokamaks selbst konnten weiter erhöht werden. Es wurde das volle Magnetfeld von 3,45 Tesla erreicht und ein Plasmastrom von 5 Megaampere, der über dem Designwert von 4,8 Megaampere liegt.

JET hat zum Ziel, nach stufenweisem Aufbau der Zusatzheizung mit Neutralinjektion und Ionen-Zyklotronwellen Plasmazustände zu erreichen, die für ein Brenngemisch aus Deuterium und Tritium zumindest einige Megawatt an Heizleistung aus den Fusionsalphateilchen erwarten lassen. Wegen dieser Zielsetzung wurde JET von Anfang an technologisch auf den Betrieb mit Tritium und die dann notwendige Fernbedienung der Anlage ausgerichtet.

Das Institut für Plasmaphysik beteiligt sich an dem Experiment in verschiedenen Formen. Von der Planungsphase an hat das Institut wissenschaftliche und technische Mitarbeiter zu JET beurlaubt, die fest in das JET-Team integriert sind.

Die Hauptarbeit des IPP für JET besteht im Entwurf, der Konstruktion und dem Bau von Diagnostiken. 1983 wurden an JET Bolometerkameras zur Messung der von den Verunreinigungen abgegebenen Strahlung und ein vorläufiges System zur Messung weicher Röntgenstrahlen geliefert. Im Laufe des Jahres 1985 wurde das endgültige 100-Kanal-System geliefert und erfolgreich in Betrieb genommen. Im ersten Halbjahr 1986 werden drei weitere Geräte folgen: Dies sind zwei Kristallspektrometer, mit denen – zum Teil räumlich und zeitlich aufgelöst – einzelne Verunreinigungslinien vermessen werden können, um so auf Temperatur und Zusammensetzung des Plasmas schließen zu können. Zweitens eine Gaskanone, die gefrorene Deuteriumkügelchen mit einer Geschwindigkeit von etwa 1,5 Kilometern pro Sekunde in das Plasma einschleusen soll. Diese Pellets können wichtige Eigenschaften des Plasmas wie Dichteprofil und Teilchentransport beeinflussen und so diagnostizieren helfen. Drittens entwickelt das IPP eine Oberflächenanalysestation, mit deren Hilfe Proben, die an verschiedenen Stellen der Gefäßwand oder in der Nähe des Limiters angebracht werden, ausgewertet werden können, um so die Wechselwirkung des Plasmas mit der Wand studieren zu können.

Mit den bereits ausgelieferten Bolometerkameras kann unter bestimmten Zusatzannahmen der Ursprungsort der im Plasma auftretenden Strahlung bestimmt werden: JET hat 1985 Experimente durchgeführt, bei denen das

Plasma durch einen magnetischen Limiter begrenzt wurde. Mit der vertikalen und den zwei horizontalen Kameras der Bolometerdiagnostik wurde im Bereich der x-Punkte stark erhöhte Strahlung gemessen, solange der magnetische Limiter wirksam war. Die durch Wärmeleitung und Konvektion zur Gefäßwand transportierte Leistung war dagegen vergleichsweise gering. Da diese Energieverluste hauptsächlich für die Produktion von Verunreinigungen verantwortlich sind, kann ein magnetischer Limiter die Konzentration von Metallen im Plasma wesentlich reduzieren.

Die beiden neu in Betrieb genommenen Röntgenkameras messen die Emissionen des Plasmas mit hoher Raum- (ca. 50 Millimeter) und Zeitauflösung (5 Mikrosekunden). Sie eignen sich deshalb besonders zur Untersuchung von schnell ablaufenden Instabilitäten, wie Sägezahnrelaxationen und MHD-Oszillationen.

Bereits die ersten von den Kameras während mehrerer JET-Entladungen aufgezeichneten Daten waren störungsfrei und von hoher Qualität. Das Prinzip der Datenaufnahme, das eigens für diese Diagnostik entwickelt wurde, erwies sich als sehr leistungsfähig. Die gleichzeitige Forderung nach hoher Raum- und Zeitauflösung führt zu hohen Datenraten und – bei einer Pulsdauer von 20 Sekunden – zu extrem unhandlichen Datenmengen. Das neue System zur Datenaufnahme erlaubt, sowohl hochfrequente Phänomene, deren Auftreten zeitlich nicht

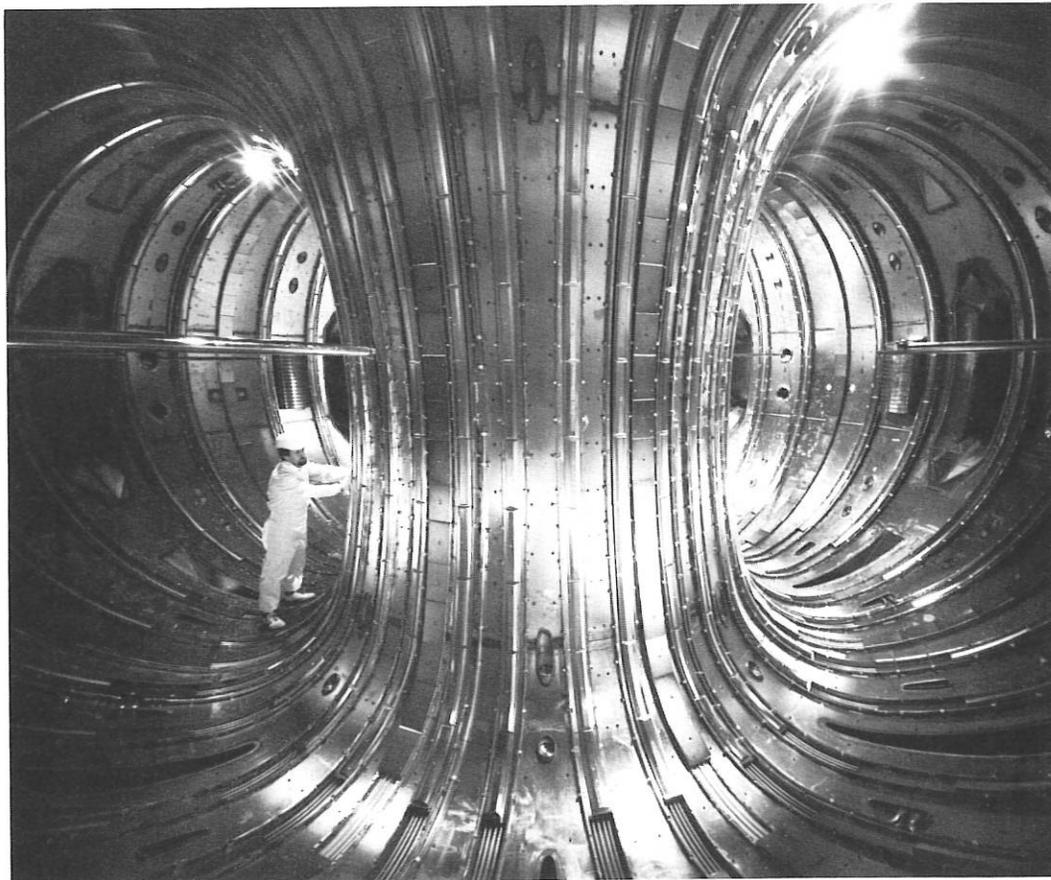


Abbildung 28: Blick in das Innere von JET. Die Plasmakammer besitzt ein Volumen von etwa 300 Kubikmetern, das Plasma füllt

davon etwa 100 Kubikmeter. Die innere Wand ist durch Graphitblöcke gegen die Berührung mit dem Plasma geschützt.

determiniert ist, zuverlässig mit hoher Datenrate aufzuzeichnen, als auch länger dauernde Vorgänge oder den Gesamtverlauf des Pulses mit angepaßt niedrigerer Datenrate zu dokumentieren.

Dieses Prinzip ermöglichte nach kurzer Parameteroptimierung die sichere Aufzeichnung eines Sägezahnkollapses – einer Plasmainstabilität, bei der sich die Verteilung von Temperatur, Druck und Dichte des Plasmas sehr schnell verändern, ohne jedoch das Plasma zu zerstören (siehe Abbildung). Die Kollapszeit beträgt bei JET nicht, wie ursprünglich erwartet, einige Millisekunden, sondern nur etwa 50 bis 200 Mikrosekunden wie bei Tokamaks mit wesentlich kleinerem Querschnitt. Die beiden senkrecht zueinander stehenden Röntgenkameras haben dieses Phänomen nun erstmalig über den ganzen Plasmaquerschnitt so detailliert gemessen, daß mit tomographischen Methoden die lokalen Veränderungen rekonstruiert und neue Modellvorstellungen geprüft werden konnten.

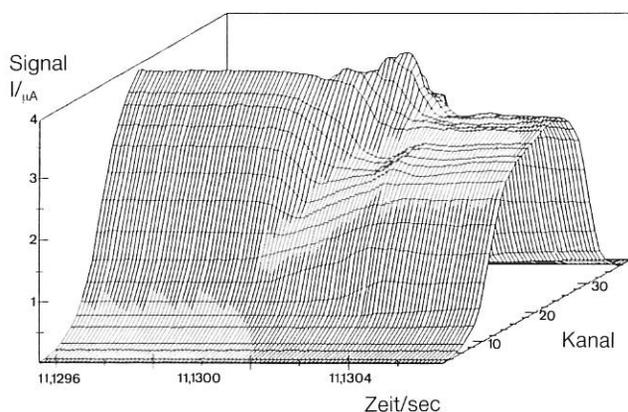


Abbildung 29: Sägezahnkollaps: Die Röntgenkameras zeichnen alle 5 millionstel Sekunden über den gesamten Plasmaquerschnitt ein Profil der abgegebenen Röntgenstrahlung auf. Der »Sägezahn« – erkennbar am Rückgang der Röntgenstrahlung – tritt unvorhersagbar auf und löst die Datenspeicherung mit der hohen Zeitauflösung, die zu seiner Beobachtung nötig ist, selbsttätig aus.

Das Institut für Plasmaphysik ist daran interessiert, die gebauten Diagnostiken soweit wie möglich auch bei JET zu betreiben. Zu diesem Zweck ordnet es Mitarbeiter für Zeiten von ein bis zwei Jahren zu JET ab und sorgt so für eine effektive Wechselwirkung zwischen JET und dem IPP.

Im Auftrag von JET führt das Institut auch Messungen und Rechnungen durch. So wurden die Zerstäubungsraten von Beryllium gemessen und Rechnungen zum Transport von Verunreinigungen, zum Plasmaaufbau und zur Plasmalagebestimmung angestellt.

Im Rahmen der JET-Aktivitäten betreibt das IPP auch ein Tritiumlabor, in dem Methoden zur Reinigung von Oberflächen und Atmosphären von Tritium und die Trennung und Abscheidung von Tritium untersucht werden.

NET-Mitarbeit

Projektleiter: Dr. Günter Grieger

Das Experiment JET kann wichtige physikalische Erkenntnisse für einen Fusionsreaktor prüfen. Vor dem Bau eines Testreaktors müssen allerdings auch eine große Zahl technischer Komponenten erprobt und der Nachweis erbracht werden, daß ein für längere Zeit kontrolliert brennendes Plasma physikalisch und technisch realisierbar ist. Diese Aufgaben sind dem auf JET folgenden nächsten europäischen Torus NET zugewiesen, dessen Dimensionen die von JET noch einmal deutlich übersteigen werden, vor allem wegen der zusätzlich nötigen technischen Komponenten wie Blanket und radiologischer Abschirmung.

In der ersten Planungsphase für NET wurde festgelegt, welche konkreten Fragestellungen das Experiment beantworten soll. Dazu wurde eine Europäische Studien­gruppe gebildet mit Sitz im IPP Garching, die Ende 1985 den Abschlußbericht der Definitionsphase vorlegte und nun mit dem Entwurf des Großexperiments begonnen hat. Das Institut hat seine eigene NET-Gruppe dieser Europäischen Studiengruppe angegliedert. Zusätzlich werden auf der Basis gesonderter Verträge spezielle Detailfragen für NET bearbeitet, wobei das Institut insbesondere seine Kenntnisse auf dem Gebiet der Plasmandphysik, der Divertorphysik, der Pellet- und Neutralinjektion zur Verfügung stellt.

So wird im Rahmen einer Vertragsstudie die Nachfüllung des NET-Plasmas durch Pelletinjektion untersucht. Die Rechenmodelle ergaben, daß bei geeigneter Wahl von Neutralteilchenheizung- und Pelletparametern die technischen Anforderungen an die Neutralteilchenheizung zur Zündung des Plasmas erheblich reduziert werden können. Verglichen mit der Brennstoffnachfüllung durch Einblasen von Wasserstoffgas läßt die Nachfüllung mittels Pelleteinschuß eine bedeutend erhöhte Produktionsrate an Alpha­teilchen erwarten.

Eine weitere Computerstudie beschäftigt sich modellhaft mit Designfragen supraleitender Magnetspulen eines Tokamaks. Insbesondere wurden verschiedene Materialien und Konstruktionsprinzipien der Spulen auf Kühlungsprobleme und Ermüdungserscheinungen hin getestet.

Ähnliche Ziele wie mit NET werden auf internationaler Ebene mit dem Experiment INTOR (**I**nternationaler **T**orus) verfolgt, an dem auch die USA, Japan und die UdSSR beteiligt sind. Arbeiten für NET fließen so auch in INTOR ein und umgekehrt. Das IPP stellt den Leiter sowie ein weiteres Mitglied der Europäischen Delegation zu INTOR.

Eine INTOR-Studie des IPP beschäftigt sich mit der Frage, wie sich internationale Zusammenarbeit auf die Kosten eines Experiments auswirkt. Wegen der aufwendigeren Koordination wird ein Gemeinschaftsexperiment den Zeitplan um ein- bis zweieinhalb Jahre ausdehnen. Dafür entstehen für jeden der vier Partner je nach Art der Zusammenarbeit nur 33 bis 40 Prozent der Kosten, die er alleine für das Experiment hätte aufbringen müssen.

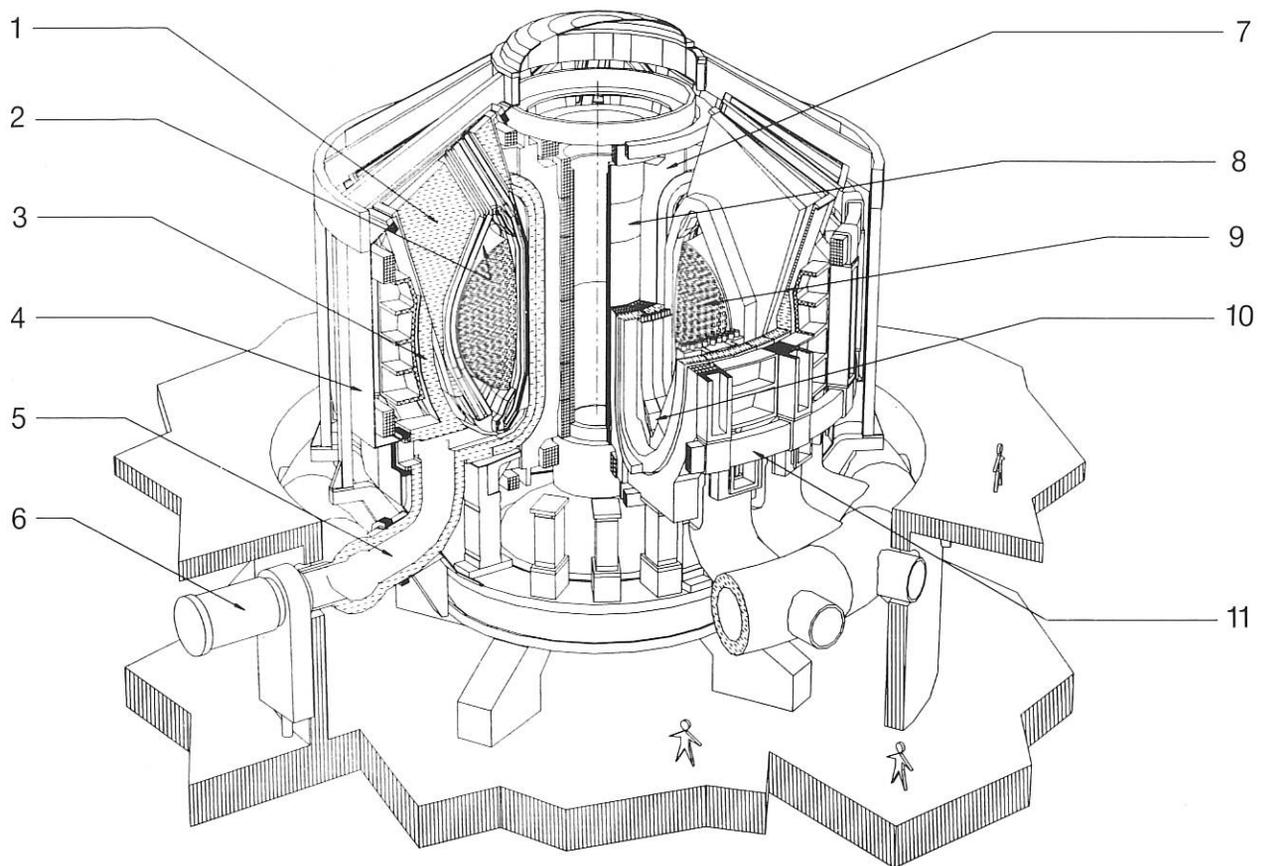


Abbildung 30: Entwurf des Experiments NET von der europäischen Studiengruppe in Garching:

1 Blanket für Energieumsatz und Brüten von Tritium
 2 Erste Wand
 3 Abschirmung
 4 Kryostat zur Wärmeisolation der Spulen
 5 Abpumpstutzen
 6 Vakuumpumpe

7 Toroidal­feldspulen
 8 Innere Poloidal­feldspulen
 9 Plasma
 10 Divertorplatten
 11 Äußere Poloidal­feldspulen

Stellaratoren

Im Rahmen des Europäischen Fusionsprogrammes betreibt das Institut für Plasmaphysik die Entwicklung der Stellaratoren als die wichtigste Alternative zum Tokamak. Wesentliche Vorteile eines Stellarators sind seine Fähigkeit zu stationärem Betrieb sowie die Aussicht, durch nichtaxialsymmetrische Magnetfelder die Einschlußeigenschaften toroidaler Systeme noch einmal wesentlich zu verbessern (Advanced Stellarator).

Das IPP beschäftigt sich zur Zeit mit drei Stellaratoren: WENDELSTEIN VII-A, WENDELSTEIN VII-AS und WENDELSTEIN VII-X.

An WENDELSTEIN VII-A konnte vor einigen Jahren zum erstenmal der Einschluß eines heißen Plasmas ohne

Plasmastrom, das heißt nur durch äußere Magnetfelder, demonstriert werden. Zwar wurde das Plasma noch mit Hilfe eines Stroms erzeugt, der danach aber abgeschaltet wurde. Das Plasma wurde dann ausschließlich durch Neutralinjektion weitergeheizt. Ohne Strom fielen die stromgetriebenen Instabilitäten weg, und die Einschlußeigenschaften verbesserten sich deutlich. Damit hat sich das Stellaratorprinzip in seiner klassischen Form auch bei höheren Plasmaenergiedichten bewährt.

Die Spulenkonfiguration des WENDELSTEIN VII-A war jedoch – zugunsten maximaler experimenteller Flexibilität – weder reaktortauglich noch auf hohe Beta-Werte ausgerichtet. Das Experiment WENDELSTEIN VII-AS soll daher unter Verwendung möglichst vieler Komponenten

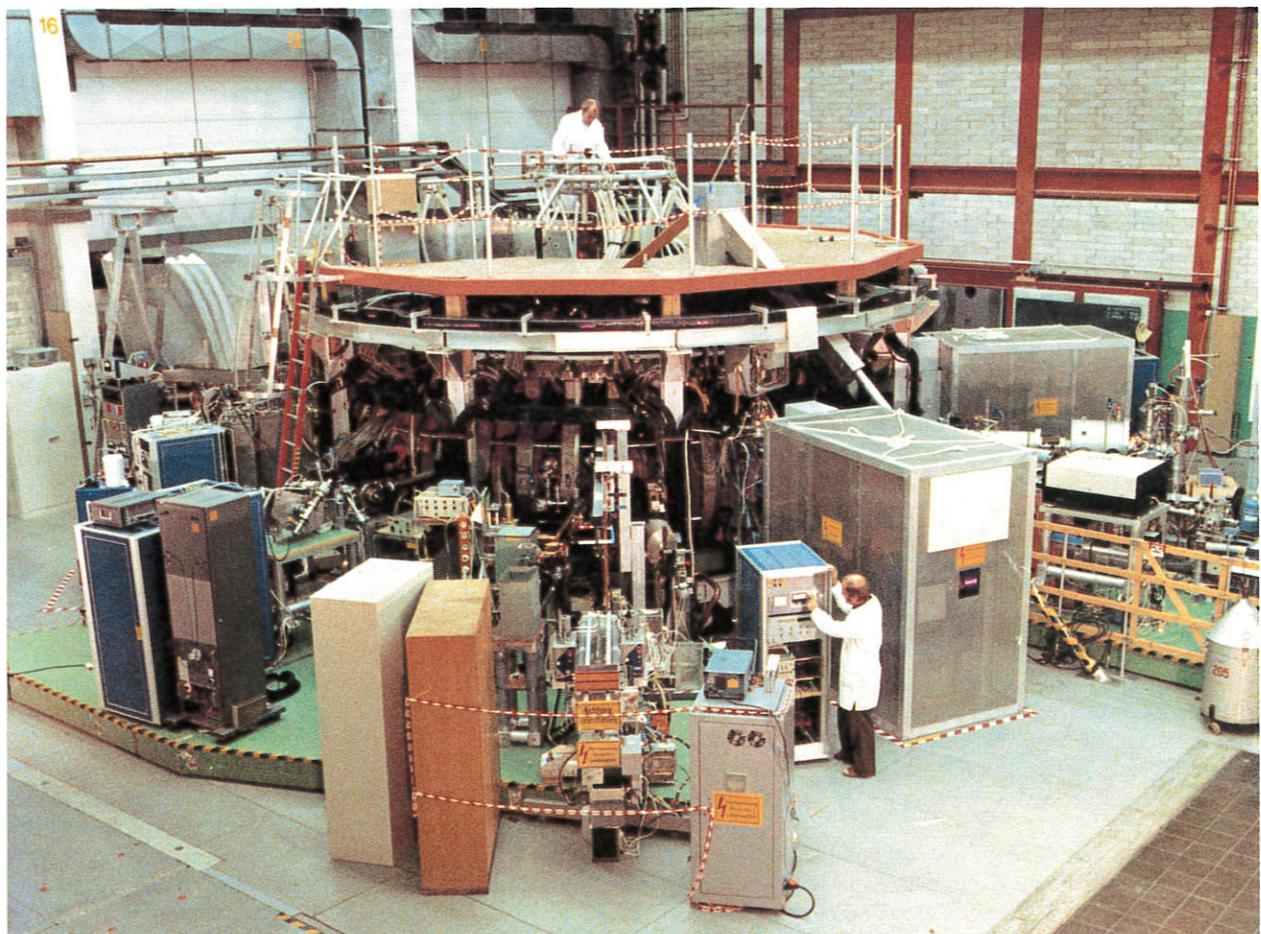


Abbildung 31: Das Experiment Wendelstein VII-A wurde 1976 in Betrieb genommen. Es hat einen großen Durchmesser von 4 Meter und einen kleinen Durchmesser von 20 Zentimeter. Mit diesem Experiment konnte erstmals reiner Stellaratorbetrieb bei

heißem Plasma erreicht werden. Wie bei Fusionsmaschinen üblich, ist das Experiment selbst verborgen hinter einer Reihe von Diagnostiken und Heizungsapparaturen.

seines Vorgängers einen Schritt in Richtung optimierter Magnetfelder tun und damit das physikalische Prinzip des **Advanced Stellarators (AS)** absichern. Gleichzeitig wird ein modulares Spulenkonzept verwirklicht, das reaktorrelevant ist. WENDELSTEIN VII-AS wird WENDELSTEIN VII-A 1987 ablösen.

Das Experiment WENDELSTEIN VII-X, das derzeit in Planung ist, soll schließlich Magnetfelder aufweisen, die auch reaktorrelevante Beta-Werte zulassen.

WENDELSTEIN VII-A

Projektleiter: Dr. Herrmann Renner

Am 15. November 1985 wurde nach 10jähriger Betriebszeit mit insgesamt 65541 »Entladungen« das Experiment WENDELSTEIN VII-A beendet. In der letzten Arbeitsphase sollten vor allem die Grundlagen für die Inbetriebnahme des verbesserten Nachfolgers WENDELSTEIN VII-AS erarbeitet werden. Dabei standen die Erzeugung und Aufheizung des Plasmas mit Hilfe der Elektronen-Zyklotronheizung sowie der stromlose Einschluß des Plasmas im Vordergrund der Untersuchungen.

Bisher war zur Plasmaerzeugung auch im Stellarator immer noch ein Plasmastrom erforderlich. Durch die Entwicklung von Hochfrequenzgeneratoren wurde es jedoch möglich, ein Reaktorplasma durch Wellen mit der Elektronen-Zyklotronresonanzfrequenz zu erzeugen. Da die benötigte Frequenz dem Magnetfeld proportional sein muß, werden für einen Reaktor Senderöhren mit einer Frequenz von nahezu 150 Gigahertz nötig werden. Für die Experimente der jetzigen Generation (mit einer Feldstärke von etwa 2,5 Tesla) genügt dagegen eine Frequenz von 70 Gigahertz. Solche Röhren mit hoher Leistung (Gyrotrons) werden jetzt sogar für Dauerbetrieb verfügbar.

Gesamtradius:	3 Meter
Höhe oberhalb Hallenboden:	2,85 Meter
Gewicht:	300 Tonnen
Mittlerer Plasmaradius:	0,12 Meter
Magnetfeldstärke:	3,5 Tesla
Rotationstransformation:	0,5
Anzahl der Spulen:	40
Spulenstrom pro Windung:	40 Kiloampere
Netto-Plasmastrom:	0
Entladungspulsdauer:	0,15 Sekunden
Heizleistung (total):	2,9 Megawatt
– Neutralinjektion:	1,2 Megawatt
– Ionen-Zyklotronheizung:	1,5 Megawatt
– Elektronen-Zyklotronheizung:	200 Kilowatt

Abbildung 32: Charakteristische Daten des Experimentes WENDELSTEIN VII-A

Nach ersten Heizversuchen mit einem 70-Gigahertz-Gyrotron Ende vergangenen Jahres wurde die Elektronen-Zyklotronheizung, die hauptsächlich die Plasmaelektronen aufheizt, im Berichtsjahr routinemäßig benutzt. In Zusammenarbeit mit dem **Institut für Plasmaforschung der Universität Stuttgart** wurden geeignete Transmissionselemente entworfen und gebaut, die die ausgesandten Hochfrequenzwellen in eine einzige, sauber linear polarisierte Mode umwandeln. Dies ist Voraussetzung für eine hohe Absorption der Leistung im Plasma.

In 100 Millisekunden langen Pulsen wurden so 200 Kilowatt Heizleistung in das Plasma eingestrahlt. Das Plasma absorbiert diese Leistung bei einem Magnetfeld von 2,5 Tesla als ordentliche Welle in Resonanz mit der Elektronen-Zyklotronfrequenz oder – nach Drehung der Polarisationssebene der Welle und Halbierung der Magnetfeldstärke – als außerordentliche Welle mit der doppelten Elektronen-Zyklotronfrequenz. In beiden Fällen werden – physikalisch sehr unterschiedlich – die Elektronen mit einem Wirkungsgrad bis zu 90 Prozent geheizt. Auf diese Weise kann man das Plasma sowohl aus Neutralgas

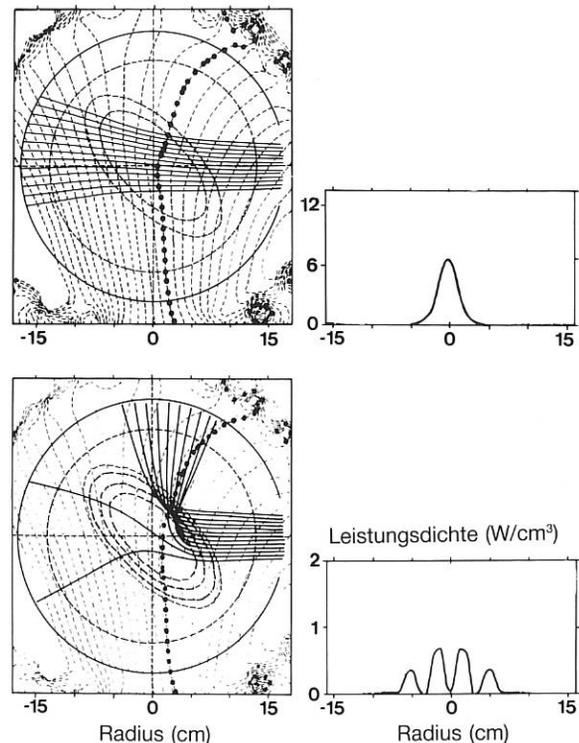


Abbildung 33: Rechnungen zu Strahlverlauf und Absorption der Elektronen-Zyklotronwellen im Plasma (Torusquerschnitt): Da die Zyklotronfrequenz der Elektronen von der Stärke des Magnetfeldes abhängt, ist optimale Absorption der 70-Gigahertz-Wellen nur längs einer Linie konstanter Feldstärke (gepunktete Linie) möglich. Die erste Abbildung gibt den Strahlverlauf der Hochfrequenzwellen, die von rechts in das Plasma eingestrahlt werden, in einem relativ dünnen Plasma von $1,8 \cdot 10^{13}$ Teilchen pro Kubikzentimeter wieder, die zweite zeigt das Verhalten eines etwa dreimal so dichten Plasmas. Im ersten Fall wird ein großer Teil der eingestrahlichten Heizleistung absorbiert, so daß eine Temperatur von 18 Millionen Grad erreicht wird. Im zweiten Fall können die Hochfrequenzwellen kaum in das Plasma eindringen, die Absorption und daher auch die Temperatur von 6 Millionen Grad sind wesentlich niedriger.

erzeugen, als auch – mit der ordentlichen Welle – Elektronentemperaturen von 10 Millionen Grad und Ionen-temperaturen von 2,5 Millionen Grad bei einer Elektrodendichte von 4×10^{13} Teilchen pro Kubikzentimeter erreichen. Diese Dichte reicht aus, um das Plasma anschließend mit Neutralteilchen oder Ionen-Zyklotronheizung weiter aufzuheizen. In Zukunft kann der Stellarator also ohne ohmsche Anfangsphase und die mit ihr verbundenen Instabilitäten betrieben werden.

Da die Ionen beim Heizen mit Hochfrequenzwellen der Elektronen-Zyklotronfrequenz relativ kalt bleiben, hat man Gelegenheit, den Energietransport der Elektronen detailliert zu untersuchen. Wegen der besseren Heizung konnten die Ergebnisse des vergangenen Jahres dabei für einen weit größeren Bereich von Plasmaparametern, das heißt für höhere Dichte und Temperatur, bestätigt werden. Danach entspricht der entscheidende Energieverlust über die Elektronenstöße innerhalb $\frac{1}{3}$ des Plasmaradius sehr gut den neoklassischen Voraussagen. Damit konnte gezeigt werden, daß das Stellaratorplasma die theoretisch maximal mögliche thermische Isolationsfähigkeit besitzt. Im äußeren Plasmabereich ist der Energieverlust der Elektronen dagegen deutlich größer als klassisch. Die Ursache dieses erhöhten Wärmeverlustes sind wohl Verformungen der Magnetfeldflächen, die zum Beispiel durch Störungen von außen, etwa Ungleichmäßigkeit in den Magnetspulen, hervorgerufen werden. Die Magnetfeldflächen verlieren dadurch etwas von ihrer isolierenden Wirkung für den Wärmestrom. Diese erhöhten Verluste am Plasmarand gehen aber mit wachsender Temperatur und Dichte zurück und dürften deshalb bei größeren Anlagen nur noch eine geringe Rolle spielen.

Bei den Experimenten mit Neutralteilchenheizung wurde entdeckt, daß durch die nahezu senkrechte Neutralinjektion elektrische Felder im Plasma erzeugt werden, die den Wirkungsgrad der Heizung erheblich verbessern. Auch die Ionenwärmeverluste durch Wärmeleitung nehmen erheblich ab. Es stellte sich heraus, daß auch bei der Heizung mit Wellen der Elektronen-Zyklotronfrequenz – aufgrund der verschiedenen starken Driftraten von leichten Elektronen und schweren Ionen aus dem heißen Plasma nach außen – während des Heizens elektrische Felder entstehen. Sie beeinflussen die Ionenbahnen auf günstige Weise und tragen so zu dem verbesserten Energieeinschluß und der hohen Temperatur der Ionen bei. Damit läßt sich auch die Energiebilanz der Ionen bei Elektronen-Zyklotronheizung verstehen: Sie werden durch Stöße mit den Elektronen aufgeheizt und verlieren ihre Energie – verzögert durch die Wirkung des radialen elektrischen Feldes – nach den Gesetzen der klassischen Wärmeleitung.

In den letzten Betriebswochen an WENDELSTEIN VII-A wurde vor allem das Einschlußverhalten des Plasmas in Abhängigkeit von der Rotationstransformation und Verscherung der Magnetfelder untersucht. Während man bereits Erfahrungen über die Wirkung eines kleinen, im Plasma fließenden Stromes gesammelt hatte, der eine Verscherung des an sich scherungsfreien Stellaratorfeldes erzeugt, wurde nun die Wirkung einer rein externen hervorgerufenen Verscherung erprobt: Ungleich große elektrische Ströme in den beiden Paaren der Stellaratorwicklungen sorgten jetzt für die Verscherung des

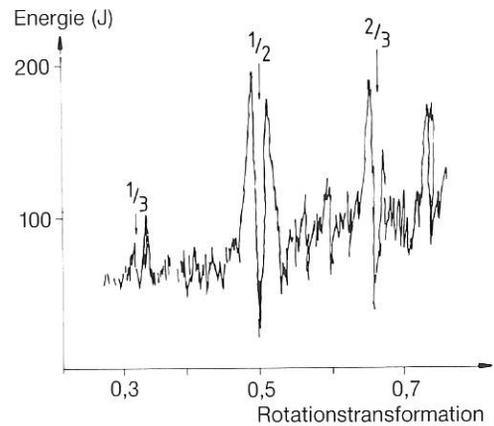


Abbildung 34: Die im Plasma gespeicherte Energie hängt von der Rotationstransformation des Magnetfeldes ab. Bei rationalen Werten der Rotationstransformation wie $1/3$, $1/2$, $2/3$... wird die Plasmaenergie deutlich kleiner, das heißt das Einschlußverhalten deutlich schlechter.

Magnetfeldes. Die bereits bekannten positiven Auswirkungen der Verscherung auf den Plasmaeinschluß wurden auch in diesem sogenannten »Torsatron-Betrieb« bestätigt: Die im Plasma gespeicherte Energie hängt deutlich von der Rotationstransformation der Magnetfelder ab und geht bei kleinen rationalen Werten stark zurück. Eine Verscherung der Felder kann diese Verschlechterung des Einschlusses jedoch teilweise korrigieren.

WENDELSTEIN VII-AS

Projektleiter: Dipl.-Ing. Jörg Sapper

WENDELSTEIN VII-AS ist das Nachfolgeexperiment von WENDELSTEIN VII-A und soll die physikalischen Grundlagen des »Advanced Stellarator« bestätigen. Es benutzt Teile des Vorgängerexperimentes, geht aber – vor allem durch seine modularen Magnetspulen – technisch einen bedeutenden Schritt über WENDELSTEIN VII-A hinaus. Physikalisch überbietet WENDELSTEIN VII-AS seinen Vorgänger durch einen vierfach größeren Plasmaquerschnitt und eine neu berechnete, verbesserte Magnetfeldstruktur. Sie läßt ein Plasmagleichgewicht mit höherem Druck und eine höhere Dichtigkeit des Magnetfeldkäfts erwarten.

Da die modularen Spulen ein ähnliches Feld erzeugen müssen, wie es in WENDELSTEIN VII-A von kreisrunden Toroidfeldspulen zusammen mit den auf das Gefäß gewickelten helikalen Spulen produziert wurde, weicht die neue Windungsform stark von einer ebenen Spule ab. Der Spulensatz ist fünffach periodisch, jede Periode besteht aus neun Spulen, von denen je vier zu einer gedachten Zwischenebene symmetrisch sind. Die mittlere Spule hat einen größeren Durchmesser, um den Zugang zum Plasma für Heizung und Diagnostik an diesen Stellen zu verbessern.

Das Vakuumgefäß folgt der von der Spule vorgegebenen Form der magnetischen Flächen im Plasma und ist deshalb ebenfalls von geometrisch anspruchsvoller Gestalt. Auch die Strukturschale außerhalb des Spulenkranzes und die unmittelbar die Spulen abstützenden Elemente folgen der Geometrie des Spulensatzes.

WENDELSTEIN VII-AS ist seit 1983 im Bau und wird Mitte 1987 in Betrieb gehen. Alle wesentlichen Großbauteile der Elektrotechnik und des Maschinenbaus wurden von Industriefirmen inzwischen hergestellt und sind ausgeliefert oder befinden sich im Abnahmeverfahren. Lediglich die Serienfertigung der Modulfeldspulen wird noch den Zeitraum bis Ende 1986 beanspruchen. In der Experimentierhalle wurden alle nicht mehr benötigten Teile des Experimentes WENDELSTEIN VII-A und dessen Zusatzaggregate – wie Kühlung und Plasmaheizung – abgebaut. Das Fundament und die zentralen Stützteile werden zur Aufnahme der vormontierten Module des neuen Experimentes vorbereitet.

WENDELSTEIN VII-AS wird drei verschiedene externe Heizverfahren erhalten: Zur Plasmaerzeugung wurden vier Gyrotrons mit 70 Gigahertz und 200 Kilowatt 3-Sekunden-Leistung bestellt. Die Stromversorgung und Hilfseinrichtungen für die Senderöhren wurden vom IPP erstellt.

Radius:	3,6 Meter
(größte Poloidal­feldspule)	
Höhe oberhalb Hallenboden:	ca. 4 Meter
Gewicht:	250 Tonnen
Mittlerer Plasmaradius:	0,2 Meter
Magnetfeldstärke:	2,5 – 3,5 Tesla
Rotationstransformation:	0,2 – 0,5
Anzahl der nichtebenen Spulen:	40 + 5
Spulenstrom pro Windung:	37 Kiloampere
Netto-Plas­mastrom:	0
Pulsdauer:	5 Sekunden
Heizleistung (total):	4,1 Megawatt
– Neutralinjektion:	1,6 Megawatt
– Ionen-Zyklotron­heizung:	1,5 Megawatt
– Elektronen-Zyklotron­heizung:	1 Megawatt

Abbildung 35: Charakteristische Daten des Experimentes WENDELSTEIN VII-AS.

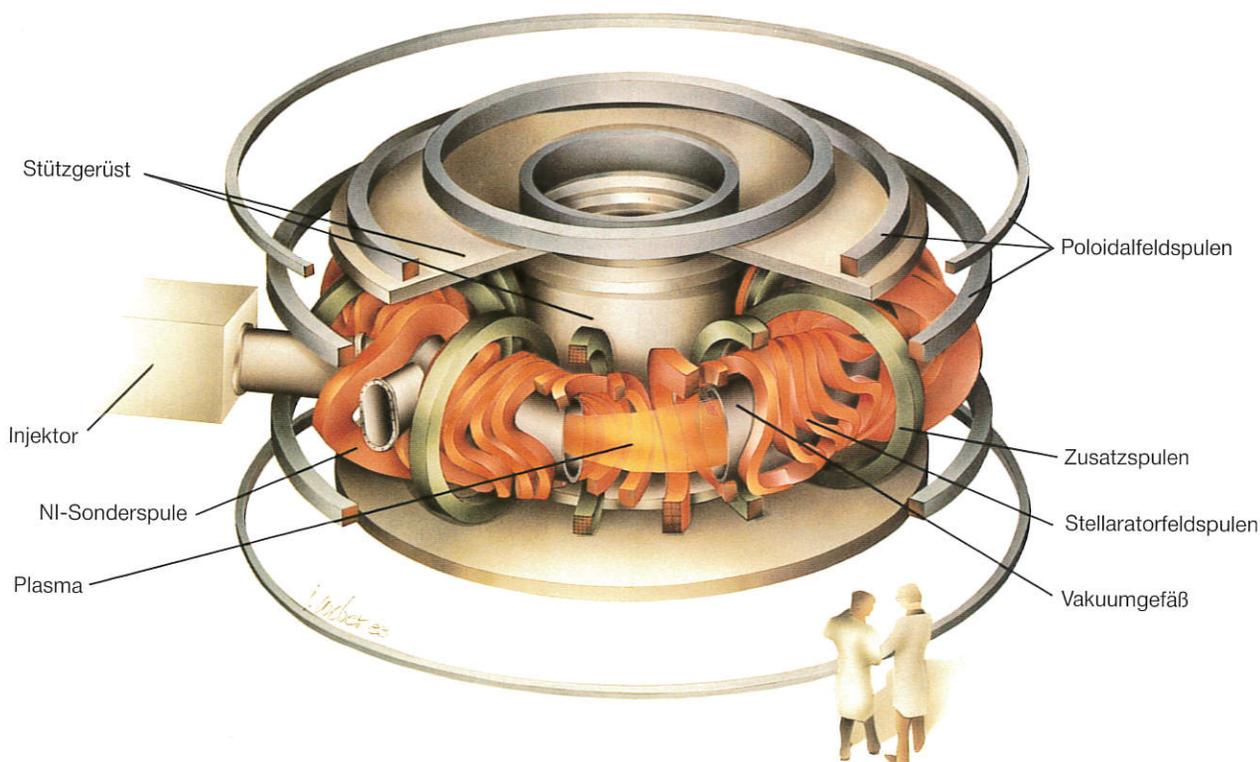


Abbildung 36: WENDELSTEIN VII-AS wird den gleichen Durchmesser besitzen wie WENDELSTEIN VII-A, der Plasmaquerschnitt wird allerdings viermal so groß sein. Es wird im wesentlichen nur noch ein Spulensystem haben, das aus kompliziert gebauten Einzelspulen bestehen wird. Dieses modulare Spulen-

system besteht im Fall von WENDELSTEIN VII-AS aus fünf identischen Sets von je neun Spulen. Die jeweils mittlere der neun Spulen hat einen größeren Radius, um den Zugang für Heizung und Diagnostik zu dem Plasma zu verbessern.

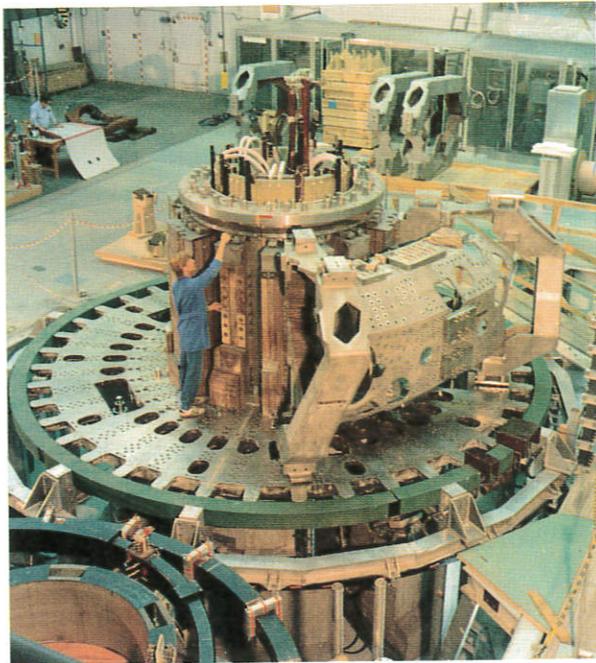


Abbildung 37: Aufbau von WENDELSTEIN VII-AS in der Experimentierhalle. Zu sehen ist das Fundament mit unterem Tragring, zentraler Stützsäule und Teilen der äußeren Stützstruktur für die Magnetspulen.

Die benötigten Übertragungselemente für die Hochfrequenzwellen werden im **Institut für Plasmaforschung der Universität Stuttgart** entwickelt und teilweise bereits erprobt.

Zur weiteren Heizung des Plasmas werden zwei Neutralinjektoren benutzt, die in einer ersten Ausbaustufe eine Leistung von 1,6 Megawatt in 3-Sekunden-Pulsen in das Plasma strahlen. Die Injektoren sind weitgehend baugleich mit denjenigen für die ASDEX-Langpulsinjektion und können in einer weiteren Ausbaustufe auf die doppelte Leistung gebracht werden.

Ferner steht ein Hochfrequenz-Sender von 3 Megawatt Heizleistung bei der Frequenz der Ionen-Zyklotronresonanz von 35 bis 115 Megahertz zur Verfügung.

Für das neue Experiment werden eine Vielzahl von Plasmediagnostiken vorbereitet, die über ein ebenfalls in Entwicklung befindliches Datenerfassungs-System ausgewertet werden sollen. Letzteres ist modular aufgebaut und in mehrere Erfassungs- und Auswerteebenen untergliedert, so daß eine Unterbrechung oder Überlastung der Datenleitung zum zentralen Rechenzentrum des Instituts nicht zur unmittelbaren Beeinträchtigung des Experimentierbetriebes führt.

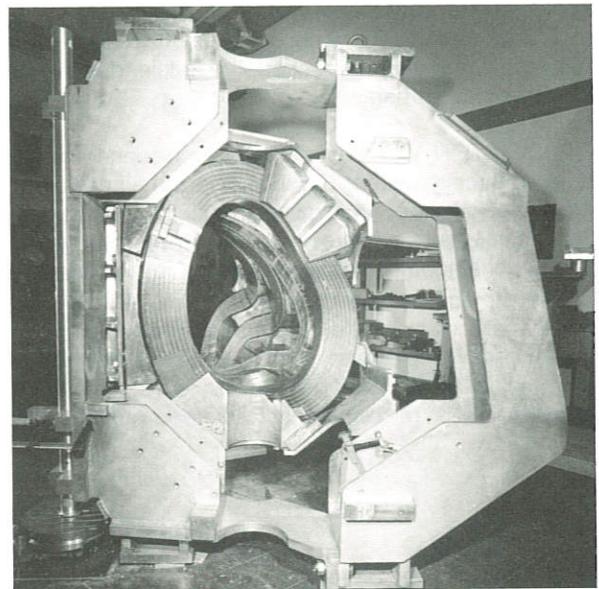


Abbildung 38: Montage des ersten Teilstückes: Die Magnetfeldspulen werden zusammen mit Abstützelementen in die Strukturschale eingepaßt. Die Strukturschale dient dazu, die bei eingeschaltetem Magnetfeld auftretenden enormen Wechselwirkungskräfte zwischen den Spulen aufzufangen.

WENDELSTEIN VII-X

Projektleiter: Dr. Horst Wobig

Dem Experiment WENDELSTEIN VII-X kommt die Aufgabe zu, Beta-Werte und Temperaturen zu erreichen, die reaktorrelevant sind, um so – zusammen mit den Ergebnissen anderer Experimente – die Reaktortauglichkeit des »Advanced Stellarators« und seine erwarteten Vorzüge zu demonstrieren.

Um WENDELSTEIN VII-X optimal zu dimensionieren, wurden in Zusammenarbeit mit dem Kernforschungszentrum Karlsruhe die Studien zum Stellaratorreaktor auf der Basis der bekannten Spulen- und Magnetfeldkonfiguration von WENDELSTEIN VII-AS fortgeführt. Aufgrund der an der Universität Madison gemachten Blanketuntersuchungen konnte man die Größe des Reaktors auf einen Durchmesser von 40 Metern reduzieren. Diese Konfiguration (ASRA 6C) bildete den Ausgangspunkt für die Bearbeitung technischer Probleme wie Aufbau des Spulensystems oder Auswechseln des Blankets. Die Reduktion der Spulenzahl auf 6 pro Feldperiode und der überall gleiche Querschnitt des Spulensystems erleichtern das Auswechseln erheblich.

Ein Grundproblem des WENDELSTEIN VII-X ist es, eine Magnetfeldkonfiguration zu finden, die bei den zu erwartenden Einschlußbedingungen besonders hohe Beta-Werte verspricht. Da sich herausstellte, daß die zur Erzeugung der verschiedenen möglichen Magnetfelder jeweils erforderlichen modularen Spulen sich kaum von-

einander unterscheiden – lediglich ihre relative Anordnung ist verschieden –, läßt sich die technische Entwicklung modularer Spulensysteme parallel zur Optimierung der Magnetfeldkonfiguration vorantreiben.

Auf der Suche nach einem für WENDELSTEIN VII-X geeigneten Magnetfeld wurde mit dem Helias-Konzept – Anordnungen mit einer helikalen, das heißt gewundenen magnetischen Achse – ein wesentlicher Fortschritt erzielt (siehe Bericht Theorie 2). Mit einem stabilen Verhalten bis zu Beta-Werten von etwa 5 Prozent erreicht diese Konfiguration sowohl die für WENDELSTEIN VII-X als auch die für den Reaktor gesteckten Ziele. Näherungsrechnungen zeigen darüber hinaus eine wesentliche Verminderung der Diffusionsverluste gegenüber bisherigen Stellarator-konfigurationen.

Umfangreiche theoretische Arbeiten befassen sich mit der weiteren Untersuchung des Gleichgewichts und des Stabilitätsverhaltens sowie mit der Suche nach geometrisch einfachen Versionen des Helias-Konzeptes.

Technisch ist es möglich, auch die Helias-Konfiguration durch ein modulares Spulensystem zu realisieren, wobei die Einzelspule nicht wesentlich komplizierter als die des WENDELSTEIN VII-AS ist. Die technischen Probleme solcher nichtebenen supraleitenden Spulen werden zur Zeit in Zusammenarbeit mit dem Kernforschungszentrum Karlsruhe untersucht. Weitere Untersuchungen zielen darauf ab, das Helias-Konzept vom technischen Aufbau her zu vereinfachen und der AS-Konfiguration anzunähern.

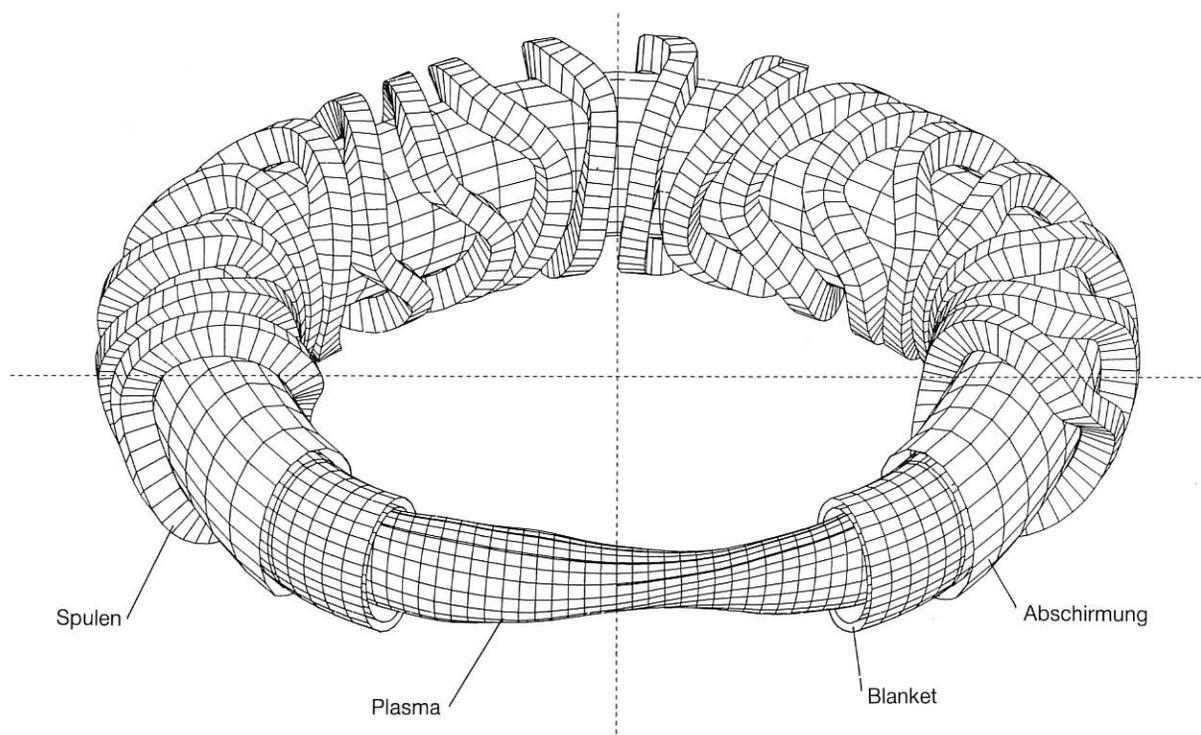


Abbildung 39: Die Abbildung zeigt ein modulares Spulensystem für einen Stellaratorreaktor auf der Basis des WENDELSTEIN VII-AS. Das System ist fünffach periodisch mit sechs

Spulen pro Periode. Es gibt nur drei verschiedene Spulen. Der Radius des Torus beträgt 20 Meter.

Allgemeine Arbeiten zur Fusion

Die Arbeiten des IPP sind im wesentlichen projektartig auf die Planung oder Ausführung einzelner Experimente konzentriert. Einige Untersuchungsbereiche lassen sich jedoch keinem speziellen Experiment zuordnen, weil sie für ein größeres Gebiet der Fusion von Bedeutung sind.

Plasma-Wand-Wechselwirkung

Bereichsleiter: Prof. Dr. Dieter Pfirsch (kommissarisch bis September 1985)
Prof. Dr. Volker Dose (ab Oktober 1985)

Die Wechselwirkung des Plasmas mit der Wand ist ein Problem, das für alle Fusionsanlagen bedeutsam ist. Als Wand ist hierbei nicht allein die Gefäßwand zu verstehen, sondern alle Strukturteile, die mit dem Plasma in Berührung kommen, also insbesondere auch Limiter und Divertor. Am IPP werden Probleme wie die Erzeugung von Plasmaverunreinigungen, die Diffusion von Wasserstoff durch die Wand und der Wasserstoffhaushalt bearbeitet.

Wenn Ionen aus dem Plasma auf die Wand treffen, können sie das Wandmaterial zerstäuben, das heißt, sie können Atome aus der Oberfläche der Wand heraus-

schlagen. Dies hat einen doppelt negativen Effekt zur Folge: Zum einen können die abgestäubten Atome als Verunreinigungen in das Plasma eindringen, zum anderen wird die Wand beschädigt. Die Zerstäubungsrate hängt von der Energie der auftreffenden Ionen, dem Auftreffwinkel, von dem Material und dem Zustand der Wand ab. Messungen zeigen, daß die Energie der auftreffenden Ionen niedrig sein muß, um die Zerstäubungsrate klein zu halten. Um die Verunreinigung des Plasmas gering zu halten, sollte daher das Plasma bei Limiterentladungen eine möglichst kalte Randschicht besitzen, bei Entladungen mit Divertor sollte die Randschicht sich auf dem Weg in die Divertorkammern abkühlen. Dies konnte in ASDEX auch beobachtet werden. Als Wand- und Limitermaterial kommt vor allem Kohlenstoff und Stahl in Frage.

Die Wand ist jedoch nicht nur Quelle für Verunreinigungen, sondern beeinflusst auch den Nachschub von Plasmateilchen (Wasserstoff), die, aus dem Plasma kommend, auf die Wand treffen und über verschiedene Prozesse wieder ins Plasma zurückgeführt werden (Recycling). Zur Dichtekontrolle des Plasmas ist es deshalb wichtig zu wissen, wie stark die Plasmateilchen von der Gefäßwand reflektiert bzw. aufgenommen und wieder abgegeben werden.

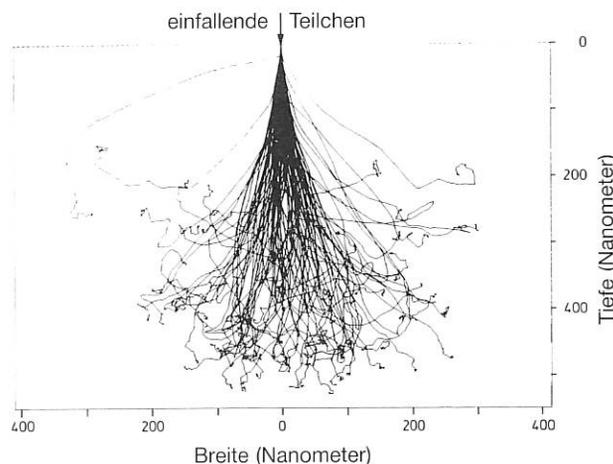


Abbildung 40: Der Prozeß der Teilchenreflektion an Festkörperoberflächen wird sowohl experimentell als auch – wie hier – durch Computersimulation untersucht. Die Abbildung zeigt die berechneten Bahnen von Wasserstoffteilchen, die auf eine Nickeloberfläche geschossen werden, projiziert auf eine Ebene senkrecht zur Oberfläche. Von 100 eingeschossenen Atomen kommen 38 im Nickel zur Ruhe. Die Bahnen der 62 durch Stöße mit den Nickelteilchen reflektierten und so das Plasma zurückgeworfenen Atome sind nicht gezeigt.

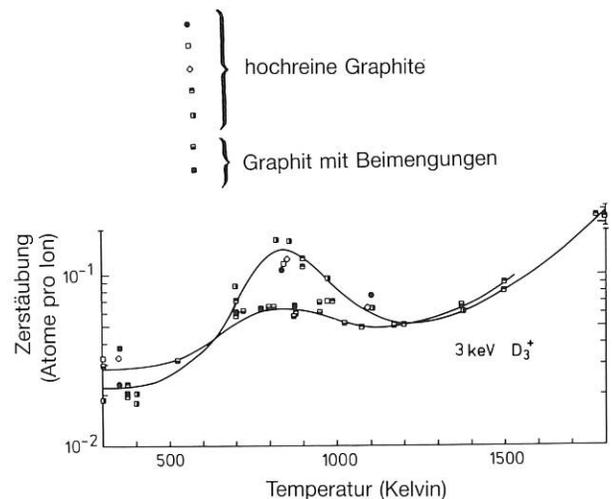


Abbildung 41: Die Zerstäubung von Kohlenstoff hängt unter anderem von dessen Temperatur ab. Je heißer die Wand, desto mehr Atome können die aufprallenden Wasserstoffionen los schlagen. Daneben spielt auch die Kohlenstoff-Sorte eine Rolle: Bei Beschuß mit Wasserstoffionen ist bis 800° Kelvin die Zerstäubung besonders stark. Dieser Effekt kann jedoch durch geringe Beimengungen von Bor oder Silizium in das Kohlenstoffmaterial unterdrückt werden. Reiner Kohlenstoff ist also zur Auskleidung des Plasmagefäßes weniger geeignet.

Theorie 1

Bereichsleiter: Prof. Dr. Dieter Pfirsch

Zu den im Bereich Theorie 1 behandelten Fragen gehören die derzeit wichtigsten Probleme fusionsorientierter Plasmaphysik: die »Beta-Grenze«, der Energie- und Teilcheneinschluß, die Plasmaheizung und – speziell bei Tokamaks – das nichtinduktive Stromtreiben, das heißt die Erzeugung eines Stroms im Plasma ohne Transformator.

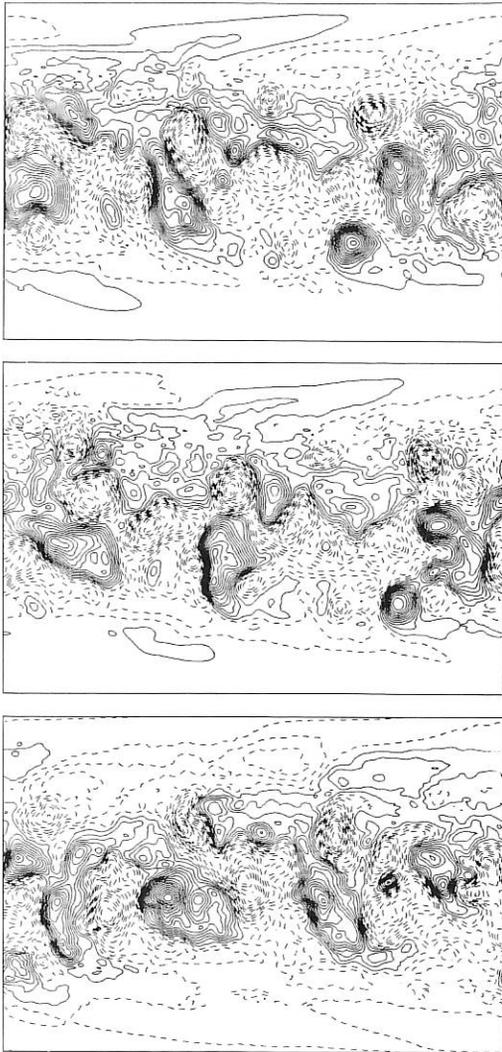


Abbildung 42: Mit Hilfe des Computers simulierte turbulente Dichteschwankungen im Plasma. Die Linien geben Orte gleicher Dichte an. Die für schnell aufeinanderfolgende Zeitpunkte berechneten »Momentaufnahmen« zeigen, wie rasch sich die Dichteverteilung in turbulenten Plasmen ändert.

Im Zusammenhang mit dem anomalen Transport, das heißt einem anomal schlechten Teilcheneinschluß, der es erschwert, die notwendige Zündtemperatur eines Fusionsplasmas von 100 Millionen Grad zu erreichen, spielen turbulente Vorgänge im Plasma eine wesentliche Rolle. Experimentelle Resultate deuten darauf hin, daß es sich dabei um sogenannte »starke Turbulenz« handeln dürfte. Für deren Beschreibung sind Renormierungsverfahren vorgeschlagen worden, deren Anwendung auf

konkrete Situationen sich jedoch sehr schwierig gestaltet. Daneben kennt man mehr physikalisch begründete Theorien der starken Turbulenz – beruhend auf dem Konzept des Mischungswegs, einer Größe analog der freien Weglänge in der Gaskinetik –, die wesentlich einfacher zu handhaben sind. Das Problem ist aber, einen hinreichend guten Wert für den Mischungsweg zu finden. In Zusammenarbeit mit der **Cornell-Universität** in Ithaka (USA) wurde deshalb der Versuch unternommen, aus den Renormierungstheorien Ausdrücke für den Mischungsweg abzuleiten, mit denen dann weiter im Sinne der Mischungswegtheorien verfahren werden kann. Die so gewonnenen Beziehungen erlauben es, auf relativ einfache Weise das Turbulenzspektrum in einer großen Klasse von Plasma- und Flüssigkeitssystemen bei Vorliegen starker Turbulenz zu bestimmen.

In Zusammenarbeit mit der **Universität von Texas** in Austin wurde der Einfluß von Hochfrequenzheizung auf das Transportverhalten des Plasmas untersucht. Der Effekt sollte vor allem für die schnellen Fusionsalphateilchen von Bedeutung sein. Hier sagen die Untersuchungen eine Minderung der Alphateilchenheizung voraus, falls die Hochfrequenzheizung der Ionen-Zyklotronfrequenz in Resonanz mit den Alphateilchen arbeitet.

Zusammenarbeit besteht außerdem mit der **Königlich Technischen Universität** in Stockholm auf dem Gebiet des dortigen »Extrap-Experiments«, für das Stabilitätsuntersuchungen angestellt werden. Mit der **Courant-Universität** in New York laufen gemeinsame Arbeiten über die Absorption von Alfvén-Wellen zur Heizung im Plasma.

Theorie 2

Bereichsleiter: Prof. Dr. Arnulf Schlüter

Die Untersuchungen des Bereiches Theorie 2 sind ausschließlich dem Stellarator gewidmet. Sie haben zum Ziel, ein reaktortaugliches Stellaratorkonzept zu finden, das Gleichgewicht und Stabilität bei hohen Beta-Werten zuläßt sowie guten Teilcheneinschluß garantiert. Ein Ergebnis dieser Arbeiten, die vor allem dem Projekt WENDELSTEIN VII-X zugute kommen und daher zum Teil dort wiedergegeben sind, war das Helias-Konzept. Helias (Helical axis advanced stellarator) bezeichnet eine Klasse spezieller Magnetfeldkonfigurationen, von denen man günstige Stabilitäts- und Teilcheneinschluß Eigenschaften erwartet.

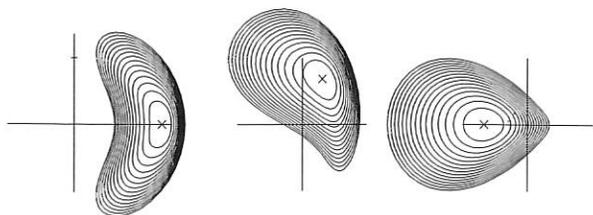


Abbildung 43: Querschnitte magnetischer Flächen einer Helias-Konfiguration.

Theorie 3

Leiter: Dr. Karl Lackner

Aufgabe dieses 1985 neu gegründeten Bereiches ist die theoretische Unterstützung des Tokamakprogrammes. Hier liegt der Schwerpunkt der experimentellen Bemühungen bei den sogenannten Divertorkonfigurationen, die mit Hilfe einer etwas komplexeren Magnetfeldstruktur eine Verbesserung im Verunreinigungs- und Energieeinschlußverhalten erzielen. Die theoretischen Arbeiten des Bereiches Theorie 3 konzentrieren sich auf die Berechnung derartiger Gleichgewichtskonfigurationen und ihre Kontrollierbarkeit, auf die Aufbereitung der an den Experimenten gewonnenen Ergebnisse in einer physikalisch interpretierbaren Form und die Modellierung der Plasmadynamik in den wandnahen Zonen, die für die Verunreinigungsproduktion bestimmend sind.

In der Dateninterpretation bemüht man sich dabei verstärkt um Rechenverfahren, die so schnell sind, daß ihre Ergebnisse noch während einer Entladung verfügbar sind und zur weiteren Steuerung des Ablaufes benützt werden können. Ungeregelt neigen Tokamakentladungen nämlich zu einem zeitlich unruhigen und häufig irreproduzierbaren Verlauf der meisten Parameter, was in einem Reaktor nicht vorstellbar wäre. Große Fortschritte – vor allem auch an ASDEX – wurden durch den Einsatz von Regelkreisen erzielt, wobei als Steuergrößen bisher jedoch nur direkt meßbare Parameter benutzt werden konnten. Eine weitere signifikante Verbesserung ist zu erwarten, wenn als Eingangsgrößen die für das Plasmaverhalten tatsächlich charakteristischen Parameter zur Verfügung stehen werden. Diese Kenngrößen können jedoch nur rechnerisch und häufig erst unter gleichzeitiger Verwendung der Ergebnisse mehrerer Diagnostiken gewonnen werden.

Die zunächst zur Heizung im Plasma abgeladene Energie muß unter stationären Bedingungen schließlich über die Wände des Plasmagefäßes abgeführt werden, was zu Wandbeschädigung und untragbarer Verunreinigungsproduktion führen kann. Dieser Vorgang ist jedoch durch die Physik der wandnahen Plasmaschichten entschei-

dend und teilweise kontrollierbar zu beeinflussen. Die dabei wesentliche Bewegung der geladenen Teilchen entlang der Feldlinien wird wahrscheinlich durch klassische Stoßprozesse bestimmt. Dennoch ist ihre Analyse komplex, da wichtige freie Weglängen der Plasmateilchen vergleichbar mit Maschinenabmessungen werden können, einfache Flüssigkeitsmodelle zur Beschreibung des Plasmas also nur noch bedingt tauglich sind. Neben der Anwendung solcher Modelle bemüht man sich daher auch um die genauere Analyse dieses Übergangsbereiches. Von ihr erwartet man unter anderem verbesserte Abschätzungen für den Zusammenhang zwischen Plasmamparametern und dem Potentialabfall an der Kontaktfläche zwischen Wand und Plasma.

Technologie

Bereichsleiter: Dipl.-Ing. Karl-Heinz Schmitter (bis 31. Dezember 1985)
Dr. Karl Lackner (kommissarisch ab 1. Januar 1986)

Die wesentliche Aufgabe des Bereichs Technologie liegt bei der Untersuchung der physikalischen und technischen Grundlagen der Plasmaheizung mit Neutralteilchen oder Hochfrequenzwellen (über einzelne Ergebnisse wird auch in den Kapiteln über das ASDEX-Experiment und die Stellaratoren berichtet): Die Arbeiten zur Neutralteilchenheizung konzentrierten sich 1985 darauf, die geplante Langpulsheizung mit 10 Sekunden Heizdauer für ASDEX und WENDELSTEIN VII-AS vorzubereiten. Daneben wurden Untersuchungen zur erforderlichen Eindringtiefe der Neutralteilchen im Plasma angestellt, die von weitreichender Bedeutung für den zukünftigen Einsatz der Neutralteilchenheizung an großen Maschinen sein könnten. Bisher galt, daß für steigende Maschinengröße immer höhere Teilchengeschwindigkeiten notwendig werden, um bis ins Zentrum des Plasmas vorzustoßen. Der benötigte Teilchenstrahl kann dann mit den gegenwärtigen technischen Mitteln nicht mehr wirtschaftlich hergestellt werden. Experimente an ASDEX zeigten nun, daß Temperaturerhöhung und Einschlußzeit

		WENDELSTEIN VII-A	ASDEX
Untere Hybrid-Frequenz	Frequenz	—	1,3 Gigahertz
	Abgestrahlte Leistung	—	1,1 Megawatt
	Pulslänge	—	1,5 Sekunden
Ionen-Zyklotron-Resonanz	Frequenz	76 Megahertz/38 Megahertz	67 Megahertz/38,5 Megahertz
	Abgestrahlte Leistung	bis 500 Kilowatt	2,7 Megawatt
	Pulslänge	bis 50 Millisekunden	2,0 Sekunden
Neutral-Injektion	Energie der Teilchen	27 Kiloelektronenvolt	40 (45 Kiloelektronenvolt) H ⁰ (D ⁰)
	Eingeschossene Neutraleistung	1,0 Megawatt	4,0 (4,3) Megawatt
	Pulslänge	0,2 Sekunden	0,5 Sekunden

Abbildung 44: Grundparameter der bis Ende 1985 an WENDELSTEIN VII-A und ASDEX eingesetzten Heizverfahren.

über einen größeren Bereich unabhängig von der Eindringtiefe der Neutralteilchen sind als bisher angenommen. Danach würden zur Heizung von NET Neutralstrahlen mit geringerer Energie ausreichen, als sie gegenwärtig bei dem wesentlich kleineren JET eingesetzt werden.

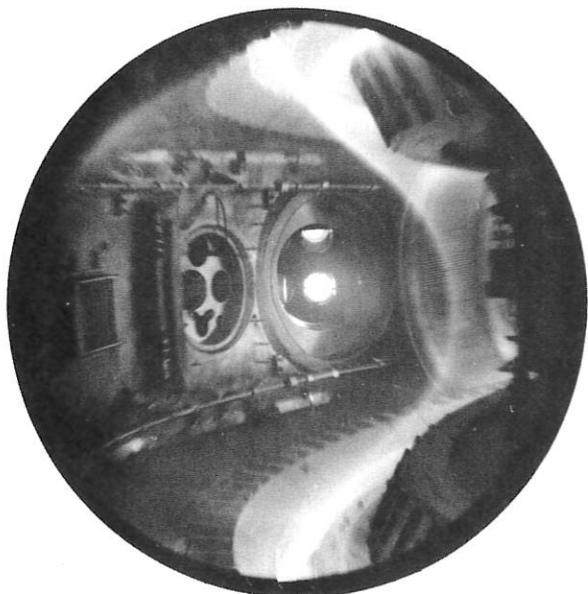


Abbildung 45: Blick in das Plasmagefäß des ASDEX-Experiments während einer Plasmaentladung mit Zusatzheizung: Zu erkennen ist die leuchtende Randschicht des Plasmas, die sich oben und unten in die Divertorschlitzte verliert. Ebenfalls hell leuchten die Neutralteilchenstrahlen in den Einschuböffnungen der Neutralinjektion (Bildmitte: Nur einer der vier Strahlen ist vollständig sichtbar). Rechts davon liegt die halbrunde Antenne der Ionen-Zyklotronresonanzheizung, ganz links am Bildrand die rechteckige »Grill«-Antenne, über die die Wellen der unteren Hybridfrequenz in das Plasma eingekoppelt werden.

Die Hochfrequenzleistung bei der Ionen-Zyklotronresonanzheizung wird mit Hilfe von Schleifenantennen übertragen. Schwerpunkte der Arbeiten liegen hier bei der Berechnung und Entwicklung solcher Antennen, der Entwicklung von Rechenverfahren zur Simulation von Ausbreitung und Absorption der Wellen im Plasma und der Vorbereitung und Ausführung der Heizungsexperimente. In ersten Untersuchungen mit der doppelten Ionen-Zyklotronfrequenz von 67 Megahertz erwies sich die Ionen-Zyklotronheizung als sehr effizient. Besonders erfolgreich ist die Kombination mit Neutralteilcheninjektion: Das Plasma wird zunächst mit Neutralteilchen vorgeheizt und anschließend die Hochfrequenzheizung zugeschaltet. Divertor und Karbonisierung der Gefäßwände gestattet hierbei weitgehend verunreinigungs-freie Plasmaentladungen, deren Einschlußverhalten systematisch leicht verbessert war gegenüber Heizung mit Neutralinjektion alleine. Inzwischen wurde auch an anderen Fusionsexperimenten diese Kombination der Heizverfahren übernommen.

Neues ergaben auch Experimente mit Radiowellen der unteren Hybrid-Frequenz von 1,3 Gigahertz, die es – im Gegensatz zu dem nur pulsweise arbeitenden Transformator – gestatten, einen stationären Plasmastrom in

einem Tokamak zu treiben. Dazu werden die Wellen über eine Antenne gerichtet in das Plasma eingestrahlt, auf denen resonante Elektronen wie »Wellenreiter« nach vorne beschleunigt werden. Mit einer Hochfrequenzleistung, die der ohmschen Heizleistung bei niedrigen Dichten entspricht, kann auf diese Weise der gesamte Plasmastrom aufrechterhalten und bei stärkerer Wellenheizung sogar zusätzlich Energie in den Primärkreis des Transformators zurückgespeist werden. Man kann den Transformator also für den nächsten ohmschen Heizpuls aufladen, ohne unterdessen das Plasma zu verlieren. Auf diese Weise könnte quasi-kontinuierliches Arbeiten auch für einen Tokamak möglich werden – eine günstige Randbedingung für einen späteren Reaktorbetrieb. Ein zusätzlicher Vorteil des hochfrequenzgetriebenen Stromes wurde erst kürzlich entdeckt: Die für die Stabilität des Tokamaks wichtige Stromverteilung im Plasma ist nun – anders als beim Transformatorbetrieb – nicht mehr unmittelbar an die Temperaturverteilung im Plasma gekoppelt, sondern kann unabhängig von der Heizung beeinflußt werden. Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten, das Stabilitätsverhalten eines Tokamaks zu verbessern.

Informatik

Bereichsleiter: Prof. Dr. Friedrich Hertweck

Die Aktivitäten dieses Bereichs waren im Berichtszeitraum völlig auf den Entwurf und die Entwicklung eines Datenverarbeitungssystems für ASDEX Upgrade abgestellt. Vorgesehen ist ein verteiltes System mit einem leistungsfähigen Zentralrechner in der Rechenanlage des Instituts und autonomen Unterrechnern, die je einer Diagnostik zugeteilt sind. Das neue System soll in der Lage sein, die Daten (8 Megabyte) der bis zu 30 verschiedenen Diagnostiken von ASDEX Upgrade innerhalb von 20 Sekunden aufzunehmen und zwischen zwei Entladungen (»Schüssen«) – das heißt innerhalb etwa 10 Minuten – zu analysieren.

Da diese Diagnostiken unabhängig voneinander von verschiedenen Experimentatoren aufgebaut und benutzt werden, war es notwendig, eine flexible Struktur zu entwerfen, die es ermöglicht, verschiedene Diagnostiken nach dem gleichen allgemeinen Schema zu beschreiben. Damit kann ein Auswerteprogramm (DIAG) auf Meßdaten mehrerer Diagnostiken zugleich zugreifen. Dies ist insbesondere dann nötig, wenn die richtige Interpretation der Ergebnisse einer Diagnostik die Meßwerte einer anderen Diagnostik voraussetzt.

Die autonomen Diagnostikrechner (AD) sollen durch ein leistungsfähiges Kommunikationsuntersystem mit dem Zentralrechner verbunden werden. Es besteht aus Knotenrechnern und Glasfaser-Kommunikationseinheiten: das bereits fertiggestellte **MSCC** (Medium speed communications controller) für Übertragungsraten von 100 Kilobyte pro Sekunde und das **HSCC** (High speed communications controller) für 1 Megabyte pro Sekunde. Der HSCC-Entwurf wurde in einer Prototyp-Version fertiggestellt, die zufriedenstellend arbeitet; die endgültige Version wird voraussichtlich 1986 in Betrieb genommen.

Gegen Ende 1985 wurde die Grundversion des Kommunikations-Subsystems mit MSCCs fertiggestellt. Der Knotenrechner kann bis zu 16 MSCCs und wenigstens ein HSCC enthalten und bis zu 1500 Nachrichten pro Sekunde verarbeiten. Bei einer maximalen Nachrichten-größe des MSCC von ungefähr 1000 Bytes bedeutet dies einen Durchsatz von gut 1 Megabyte pro Sekunde. Dieser für ein kleines System hohe Durchsatz ist möglich, weil die Software ohne Betriebssystem arbeitet. Es wird lediglich ein Satz von Unterbrechungsprozeduren benutzt, die je nach Anforderung aktiviert werden.

Ende 1985 wurde mit dem nächsten Planungsabschnitt begonnen: Ein Knotenrechner wurde mit einer Vorversion

eines IBM-Kanal-Interfaces, das vom Rechenzentrum entwickelt wurde, an den neu installierten Großrechner (IBM 4381) sowie zwei Diagnostik-Systeme an einen zweiten Knoten angeschlossen. Die Knoten selbst wurden ebenfalls mit MSCCs verbunden, die 1986 durch HSCCs ersetzt werden sollen. Die Möglichkeit, Dateien zwischen den ADs und dem Großrechner zu übertragen, wurde demonstriert. Die Datenrate zwischen Knotenrechner und Großrechner betrug 40 Kilobytes pro Sekunde. Der Prototyp des IBM-Kanalinterfaces, der eine Transferrate von 1,5 Megabytes pro Sekunde erlaubt, wird für Anfang 1986 erwartet.

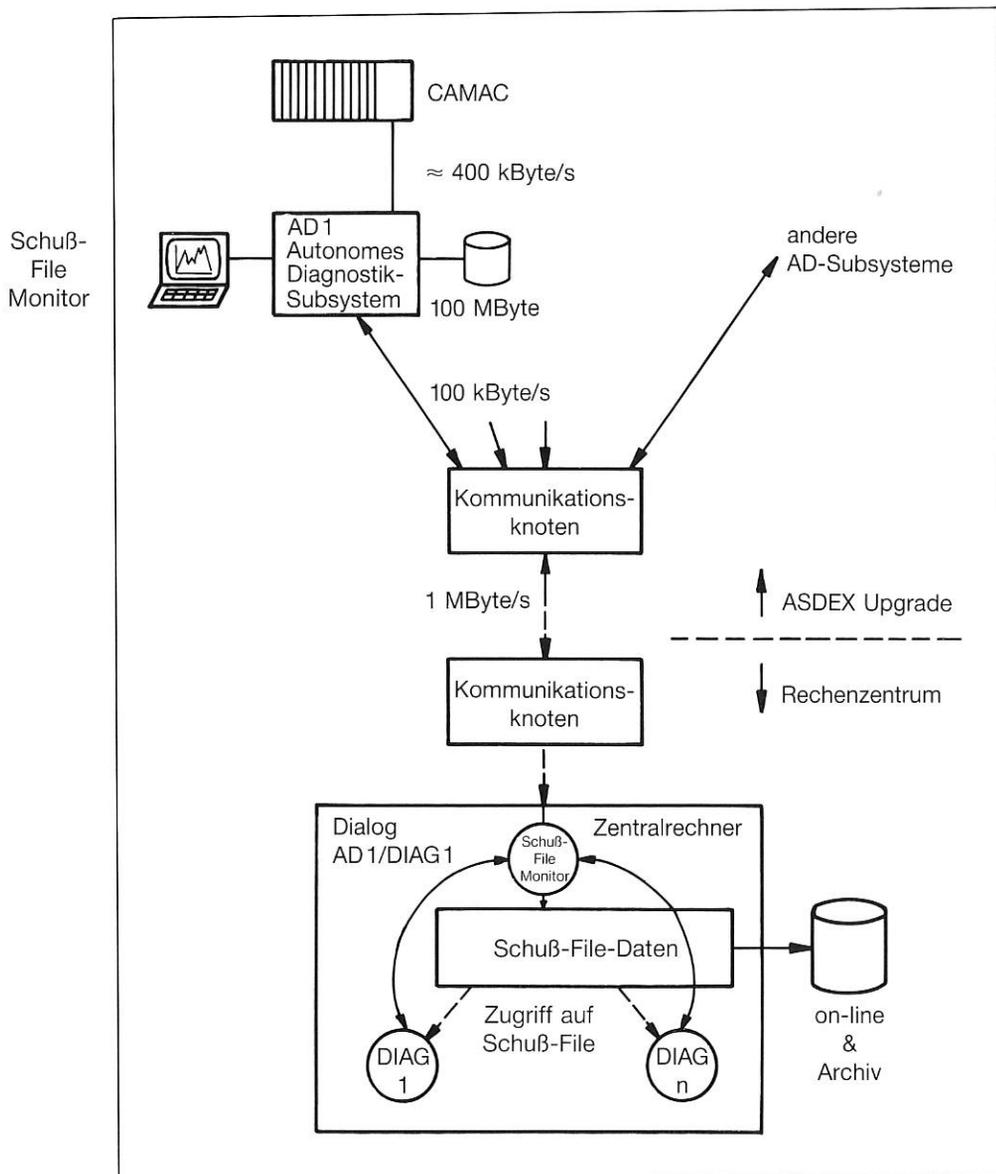


Abbildung 46: Das Analysensystem für die Daten von ASDEX Upgrade sieht für jede Diagnostik autonome Subsysteme (AD) vor, die »ihre« Diagnostikdaten über CAMAC-Module erhalten. Die Subsysteme nehmen eine erste Verarbeitung der Daten vor und reduzieren dadurch die Datenmenge, die an den Hauptrechner im Zentralen Rechenzentrum weitergegeben werden muß. Ein Knotenrechner sammelt die Daten von verschiedenen Dia-

gnostiken. Damit die ausgewerteten Meßdaten den Experimentatoren schnell zur Verfügung stehen, wird nicht nur ein schneller Rechner, sondern auch eine schnelle Datenleitung benötigt. Die in der Zeichnung angegebenen Geschwindigkeiten für den Datentransfer sollen in Glasfaserkabeln realisiert werden und wurden zum Teil in Prototypversuchen schon erreicht.

Zusammenarbeit

Zusammenarbeit mit Hochschulen

Mit mehreren Hochschulinstituten arbeitet das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik eng zusammen, um gemeinsam einige grundlegende physikalische Probleme im Bereich der Plasmaheizung, der Entwicklung und Anwendung spezieller Diagnostikmethoden und der Plasma-Wand-Wechselwirkung zu lösen. Mit der finanziellen Förderung der im allgemeinen zeitlich begrenzten Arbeiten wird sowohl das IPP um die Erfahrung und das Fachwissen der Universitäten bereichert, als auch den Hochschulinstituten Gelegenheit gegeben, ihre Spezialkenntnisse im Anwendungsgebiet am IPP zu erweitern.

Mit Beiträgen zur Plasmaheizung im Bereich der Elektronen-Zyklotronresonanzheizung (ECRH) am Stellarator WENDELSTEIN VII-A und zur Plasmadiagnostik mit der Ferninfrarot-Lichtstreu-Diagnostik am Tokamak ASDEX trägt das **Institut für Plasmaforschung (IPF) der Universität Stuttgart** den Hauptteil der Hochschul-Zusammenarbeit.

Bei der Elektronen-Zyklotronresonanzheizung ergab die Erhöhung der Frequenz von bisher 28 Gigahertz auf ein neues System mit 70 Gigahertz den Zugang zu Arbeiten mit relativ hohem Magnetfeld (2,5 Tesla) im WENDELSTEIN VII-A-Torus. Die Entwicklung, der Bau und die erfolgreiche Erprobung und Optimierung von Wellenleitern und speziellen Hochfrequenz-Komponenten (Modenwandler und -filter, Krümmer und Taper) für 70 Gigahertz ermöglichen bei der Einstrahlung einer Wellenleistung von 200 Kilowatt unter speziellen Polarisationsbedingungen eine Elektronentemperatur von 25 Millionen Grad im WENDELSTEIN-Plasma. Darüber hinaus bilden diese Untersuchungen eine tragfähige Grundlage für die zukünftige Anwendung dieser Heizung am Stellarator WENDELSTEIN VII-AS mit fünf Gyrotrons von etwa einem Megawatt Gesamtleistung.

Die Entwicklung spezieller Komponenten für die Lichtstreu-Diagnostik und die dazu benötigten Ferninfrarot-Laser am IPF Stuttgart hat es nach langer Experimentierzeit möglich gemacht, die Dichteschwankungen bei der Hochfrequenzheizung im Bereich der unteren hybriden Frequenz in ASDEX zu untersuchen. Bei niederfrequenten Schwankungen konnten Spektren mit guten Signal-Rausch-Verhältnissen gemessen werden. In der Entwicklung einer speziellen Laserstreudiagnostik (LIDAR) für räumlich aufzulösende Elektronentemperatur-Messungen an JET konnten die Voraussetzungen für den Nachweis der Streusignale experimentell geprüft werden.

Im Isotopentrenn-Labor des **Physik-Departments der Technischen Universität München** werden Zerstäubungsausbeuten bei Beschuß fester Oberflächen mit

schnellen Ionen ausgemessen, die für das Verständnis der Wechselwirkung zwischen Plasma und Wand von Bedeutung sind. Es wurde festgestellt, daß die Zerstäubungsausbeute von Kupfer bei Beschuß mit Argon von der Temperatur bis nahe an den Schmelzpunkt nahezu unabhängig ist.

Am **Lehrstuhl für Technische Elektrophysik der Technischen Universität München** werden zum Verständnis der Vorgänge in induzierten Plasmabögen, wie sie in Plasmamaschinen zwischen dem Plasma und der ersten Wand auftreten können, Zündbedingungen, Plasmaeigenschaften und Kathodenphänomene solcher Bogenentladungen experimentell untersucht.

Mit dem **Institut für Angewandte Physik II der Universität Heidelberg** besteht eine enge Zusammenarbeit im Bereich der Diagnostikentwicklung und -anwendung für die Messung von Neutronenflüssen und -spektren. Damit werden Aussagen über die Energieverteilung und Temperatur der Ionen sowie die Quellverteilung der Fusionsneutronen am Tokamak ASDEX gewonnen.

Am **Institut für Angewandte Physik der Universität Frankfurt** wurde im Rahmen der Zusammenarbeit im Bereich der Plasma-Wand-Wechselwirkung eine Anordnung mit speziell geformtem intensiven Elektronenstrahl entwickelt und gebaut, mit der die von der Wand zerstäubten Teilchen ionisiert und dann analysiert werden können.

Am **Institut für Kernphysik und Strahlencentrum der Justus-Liebig-Universität Gießen** wurde zur Bestimmung der für die spektroskopischen Messungen des IPP benötigten Ionisierungsquerschnitte vielfach geladener Ionen eine Elektronen-Zyklotron-Resonanz-Ionenquelle aufgebaut. Die damit erzeugten Strahlen vielfach geladener Ionen ermöglichen die erhebliche Erweiterung der bisherigen Untersuchungen zur Elektronenstoß-Ionisation und -wechselwirkung.

In der **Forschungsgruppe Oberflächenphysik des Fachbereichs Physik der Universität Osnabrück** werden Diagnostikverfahren zur Plasma-Wand-Wechselwirkung entwickelt, die die Lichtaussendung bei der Wechselwirkung von Ionen und Molekülonen mit Oberflächen ausnutzen. Schwerpunkt ist dabei die Untersuchung des Ladungsaustauschs zwischen Ionen und Oberflächen.

Mit der **Universität Bayreuth** wurde eine enge Zusammenarbeit im Forschungsschwerpunkt Oberflächenphysik sowie die gemeinsame Berufung der leitenden Forscher vereinbart.

Über diese vertraglich geregelten Zusammenarbeiten hinaus pflegt das IPP zahlreiche wissenschaftliche Kontakte mit fast allen deutschen Universitäten.

Internationale Zusammenarbeit

Das IPP arbeitet nicht nur mit vielen deutschen Hochschulen, sondern auch mit zahlreichen europäischen und außereuropäischen Instituten zusammen.

Auf den Gebieten der Stellarator-Entwicklung und der Erforschung des Divertors in den Experimenten ASDEX und ASDEX Upgrade wurden größere Vereinbarungen zur Zusammenarbeit mit den USA im Rahmen der Internationalen Energieagentur (IEA) in Paris, einem Organ der »Organisation for Economic Cooperation and Development« (OECD) abgeschlossen, denen sich später möglicherweise auch Japan anschließen wird. Diese Verträge haben bereits im ersten Jahr zu intensivem wissenschaftlichen Austausch geführt.

Theoretische Untersuchungen stehen im Vordergrund der Zusammenarbeit mit dem **Centre de Recherches en Physique des Plasmas** in Lausanne/Schweiz. Das **FOM-Institut voor Plasmaphysika** in Rijnhuizen (Holland) liefert Beiträge zu einem Energieanalysator für ASDEX. Eine Kooperation mit **Risø National Laboratory** in Dänemark bezieht sich auf die Entwicklung von Pellets. Die **Europäische Forschungsanstalt Ispra** führt auf dem Gebiet der Oberflächenphysik Untersuchungen von Schutzschichten vorzugsweise auf Graphit aus. Die **Universität Cork** in Irland beteiligt sich an der Plasmadiagnostik für ASDEX Upgrade. Dies ist auch der Gegenstand eines Zusammenarbeitsvertrages mit dem **Kernforschungszentrum Demokritos** in Griechenland. Ein Vertrag mit der **Königlich-Technischen-Hochschule Stockholm** in Schweden sieht gegenseitige Unterstützung der Experimente »Extrap« (Stockholm) sowie ASDEX und ASDEX Upgrade vor. Mit **JEN** Madrid besteht Gedankenaustausch und Zusammenarbeit auf dem Gebiet des Stellarators. Mit dem **Centre d'Etudes Nucléaires** Grenoble kooperiert das Institut auf dem Gebiet der Heizung mit Wellen der unteren Hybridfrequenz.

Nach Rußland bestehen Kontakte über Personalaustausch mit dem **Lebedev-Institut** in Moskau und dem **Physikalisch-Technischen Institut** in Charkow auf dem Gebiet der Stellaratoren, auch mit dem **Ioffe-Institut** in Leningrad auf dem Gebiet von Neutralteilchenanalysatoren für ASDEX.

Über Personalabordnung ist das IPP mit dem europäischen Gemeinschaftsprojekt NET verbunden, dessen Arbeitsgruppe ihren Sitz auf dem Garching Institutsgelände hat.

Zu der internationalen Zusammenarbeit zwischen Europa, Japan, USA und der Sowjetunion im Rahmen der INTOR-Studie, die unter der Schirmherrschaft der Internationalen Atomenergieagentur (IAEA) in Wien entsteht und einen internationalen Tokamak-Reaktor vorbereiten soll, entsendet das IPP den Leiter sowie ein weiteres Mitglied der europäischen Delegation.

Zusammenarbeit mit der Industrie

Das Institut für Plasmaphysik geht bei seinen Arbeiten von dem Grundsatz aus, daß der Bau des als Fernziel anvisierten Fusionsreaktors nur von der Industrie realisiert werden kann; wichtigste Voraussetzung hierzu ist ein möglichst vollständiger Transfer des erarbeiteten Know-hows.

Man bemüht sich daher bereits jetzt, Industriebetriebe möglichst intensiv in die Entwicklung solcher Bauteile einzubeziehen, die nach den derzeitigen Erkenntnissen in mehr oder weniger abgeänderter Form auch in einem Fusionsreaktor notwendig sein werden.

Diese Zusammenarbeit erfolgt auf verschiedenen Wegen: So vergibt das IPP in größerem Umfang Studien- und Fertigungsaufträge über den Bau von reaktorrelevanten Komponenten. Auf Teilgebieten wird hierzu eine sehr intensive Wechselwirkung und ein guter Informationstransfer erreicht. Dabei geht der wechselseitige Informationsaustausch – wegen der Problemverknüpfungen mit anderen, im IPP aufgebauten Geräten – weit über den eigentlichen Vertragsgegenstand hinaus. In Anbetracht eines Auftragsvolumens von etwa 40 Millionen DM im Jahr für Planinvestitionen spielt diese Form des Technologie-Transfers für das IPP die zentrale Rolle.

Auch der Personalaustausch mit Industriebetrieben hat sich als eine sehr effiziente Form des Kenntnis-Austausches erwiesen. Angestellte von Industrieunternehmen arbeiten an Entwicklungsprojekten im IPP mit, und umgekehrt sind Mitarbeiter des IPP in Industriebetrieben tätig.

Außerdem vergibt das IPP Lizenzverträge über die zu diesem Zwecke 1972 gegründete Gesellschaft »Garching Instrumente«. Mit diesen Lizenzverträgen sind sehr häufig direkte Beraterverträge mit Mitarbeitern des IPP verbunden, die über die notwendigen Detailkenntnisse zu den Lizenzgegenständen verfügen.

Vertragspartner des IPP sind Firmen jeder Größe. Aufträge für hochbelastete und große Stahlstrukturen sowie im Großelektromaschinenbau gehen zumeist an größere Firmen, weil kleinere in der Regel nicht über die erforderliche maschinelle Ausstattung verfügen. Dagegen findet das IPP bei diffizilen Aufträgen auf dem Gebiet der Elektronik und Datenerfassung seine Vertragspartner häufig in kleinen, innovationsfreudigen Unternehmen.

Wissenschaftliche Infrastruktur

Rechenzentrum Garching

Leiter: Dr. Johann Gaßmann

Das »Rechenzentrum Garching« wird als gemeinsame Einrichtung des Max-Planck-Institutes für Plasmaphysik und der Max-Planck-Institute für Physik, Astrophysik und extraterrestrische Physik betrieben. Mittels Datenübertragung sind weitere Max-Planck-Institute angeschlossen. Als leistungsfähigstes Rechenzentrum in der Max-Planck-Gesellschaft kann das Rechenzentrum Garching große Rechenkapazitäten bereitstellen. Diese Rechenleistung wird ergänzt durch umfangreiche Peripheriegeräte zur Speicherung, Ein- und Ausgabe von Daten, sowie durch ein vielfältiges Angebot an Systemprogrammen

und Programmpaketen. Eine besondere Aufgabe ist die Erfassung und Archivierung von Experimentdaten der Plasmaexperimente sowie die sofortige Auswertung dieser Daten.

Die Rechanlage besteht aus einem Rechnerverbund, nämlich einem Vektorrechner CRAY XMP-14 für rechenintensive zu vektorisierende Programme, einem System SIEMENS 7.880 und zwei Rechnern IBM 4381 für Experimentdatenverarbeitung, interaktive Programmierung und Batchverarbeitung. Der CRAY-Rechner besitzt außer Plattenspeichern keine weiteren Peripheriegeräte. Alle übrigen Peripheriegeräte stehen sowohl dem SIEMENS-Rechner als auch den IBM-Rechnern zur Verfügung. Es können etwa 400 Terminalanschlüsse mit alphanumerischen und graphischen Terminals genutzt werden. Weiter entfernte Datenstationen versorgen die Benutzer mit gedruckten oder gezeichneten Ergebnissen ihrer Rechnungen. Mit Hilfe der Postnetze DATEX-P und DATEX-L können auswärtige Benutzer Anschluß an das Rechenzentrum erhalten. Lokale Benutzer können über diese Vermittlungsnetze externe Rechenzentren erreichen. Eine Reihe wissenschaftlicher Rechenzentren ist über Direktanschlüsse (EARN) zu erreichen.

Der CRAY-Rechner läuft unter dem Betriebssystem COS und wird ausschließlich in FORTRAN programmiert. SIEMENS- und CRAY-Rechner sind über ein vom Bereich INFORMATIK entwickeltes Kopplungsprogramm aneinander angeschlossen. Das Basisbetriebssystem des SIEMENS-Rechners und der IBM-Rechner ist VM/SP der Firma IBM. Für Dialogverarbeitung wird die interaktive Komponente CMS verwendet. Die Datenbestände der Dialogsysteme AMOS-1 und HADES sind von CMS aus erreichbar, dabei wird die bessere Dateiverwaltung und Archivierung von AMOS-1 und HADES gegenüber CMS ausgenutzt.

Die Nutzung des CRAY-Rechners liegt unverändert hoch an der Leistungsgrenze der Anlage. Die Rechenleistung des SIEMENS- und der IBM-Rechner wird vollständig ausgenutzt durch die interaktive Nutzung während der Tageszeit und die Stapelverarbeitung hauptsächlich in der Nacht.

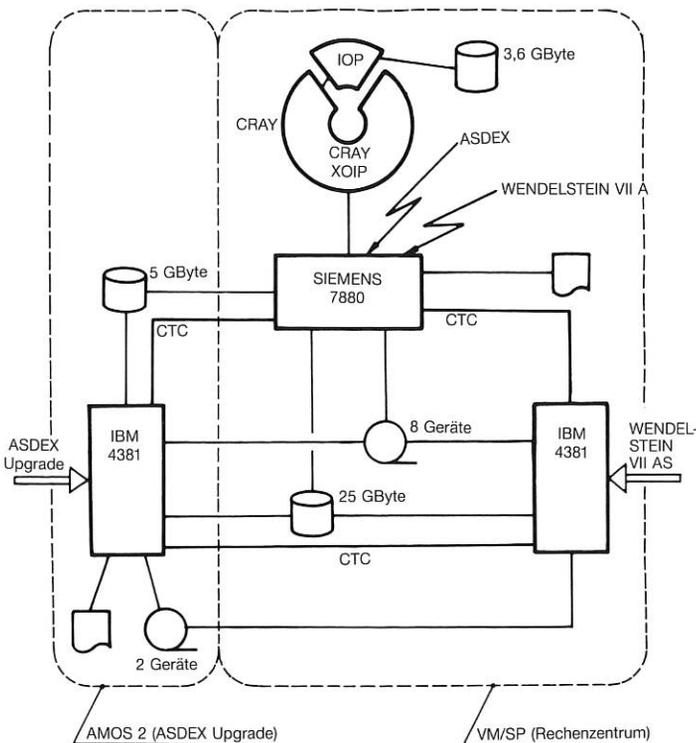


Abbildung 47: Das Rechenzentrum Garching (RZG) verfügt über einen Rechnerverbund, bestehend aus einer CRAY XMP-14, deren Vorrechner, einer SIEMENS 7.880 sowie zwei IBM 4381. Durch Hardwarekopplung (CTC=Channel to Channel Communication) und Softwarekopplung erscheinen die Rechner dem Benutzer wie ein einziges System mit dem IBM-Betriebssystem VM/SP. Während des Experimentbetriebs von ASDEX wird eine IBM 4381 ausschließlich der Experimentdatenverarbeitung reserviert.

Zentrale Technische Einrichtungen (ZTE)

Leiter: Dr. Helmut Muntenbruch

Die Vorbereitungen, der Auf- und Ausbau sowie der Betrieb der Großexperimente im IPP erfordern in erheblichem Umfang Ingenieurleistungen und technische Dienstleistungen. Projektübergreifende Arbeiten, solche, die Spezialkenntnisse erfordern, und zeitlich begrenzte, den durchschnittlichen Bedarf der Projekte überschreitende Arbeiten sind in den Zentralen Technischen Einrichtungen zusammengefaßt. Dies ermöglicht eine bessere Anpassung an den schwankenden Auftragseingang aus den verschiedenen Projekten und erlaubt es, spezielle Fertigkeiten bereitzustellen, die bei dezentraler Organisation nicht ausgelastet wären. Neben den ZTE gibt es noch örtliche, den Experimenten zugeordnete Werkstätten, die bei der Steuerung der Auftragslage von den ZTE mit erfaßt werden, sowie den Experimenten zugeordnete Betriebsmannschaften. Da die Bereitschaft der Industrie zur Übernahme auch risikoreicher Entwicklungsarbeiten und Fertigungen in den vergangenen Jahren gewachsen ist, konnte das Institut die Kapazitäten der ZTE zugunsten eines direkten Personaleinsatzes in den Projekten reduzieren.

In der Fachabteilung Elektro- und Hochspannungstechnik wurde 1985 mit Vorarbeiten für die Steuerung des ASDEX Upgrade begonnen. Zur Hochstromversorgung dieses Experimentes wurden umfangreiche Ausschreibungen erarbeitet und Aufträge für Umbau und Erweiterung der Gleichrichteranlagen erteilt. Die zentrale Elektrowerkstatt war neben ihren vielen Standardarbeiten an umfangreichen Montagearbeiten für die Experimente beteiligt. Die Betreuung von Arbeiten externer Firmen erforderte einen deutlich zunehmenden Anteil der Arbeitskraft.

Eine größere Anzahl sehr unterschiedlicher Geräte wurde in der Fachabteilung Elektronik konzipiert und in deren zentraler Elektronikwerkstatt gebaut. Die Entwicklung einer hochisolierten 120-V-Gleichspannungsquelle mit einem Isolationswiderstand größer als 1 Teraohm als Ersatz für Anodenbatterien sei als Beispiel angeführt. Die Einzel- und Kleinserienfertigung der Elektronikwerkstatt umfaßt sowohl Geräte in analoger als auch in digitaler Technik. Die Fertigung größerer Stückzahlen – etwa die eines Breitbandverstärkers – wurde bei Fremdfirmen in Auftrag gegeben, ebenso die Herstellung größerer Serien von Platinen. Vom Elektronikservice wurden schließlich etwa 560 Reparaturen an Oszillografen, Terminals etc. ausgeführt.

Von der Fachabteilung Material-, Vakuum- und Chemische Technologien wurde – wie in den Vorjahren – eine große Zahl unterschiedlicher Aufträge bearbeitet, von der Entwicklung austenitischer Stahlgußkörper und der von Löttechniken für die Verbindung großer Querschnitte über die Fertigung vielpoliger Glas-Graphit-Stromdurchführungen für die Röntgendiagnostik und die Herstellung von Keramik-Metall-Verbindungen für rechteckige hochbelastete Mikrowellenfenster bis hin zur chemischen und elektrochemischen Oberflächenbehandlung und zur ana-

lytischen Überwachung von Betriebswässern und galvanischen Bädern.

Arbeiten der zentralen Konstruktion betrafen alle Projekte und die Heizungssysteme. So wurden für ASDEX Diagnostikeinrichtungen konstruiert, für die ASDEX-Härtung Vorrichtungen entworfen, die Fertigung betreut und für WENDELSTEIN VII-AS Studien zur Montage fortgesetzt. Für ASDEX Upgrade wurden Konstruktionsarbeiten an vielen Komponenten fortgesetzt, für die Toroidalfeldspulen fertigungsbegleitende Analysen durchgeführt. ICRH-Antennen wurden für beide Tokamak-Projekte entworfen.



Abbildung 48: Die räumlich gekrümmten Magnetspulen von WENDELSTEIN VII-AS verlangen ein besonderes Spulendesign, das die bei der Herstellung auftretenden Spannungen berücksichtigt. Man verwendet flexible verdrehte Litzenleiter, die gegeneinander mit imprägniertem Glasfasergewebe isoliert sind. Die Abbildung zeigt einen Probekörper aus diesem Material, der zum Test der Schubspannungsfestigkeit bei dynamischer Belastung benutzt wird.

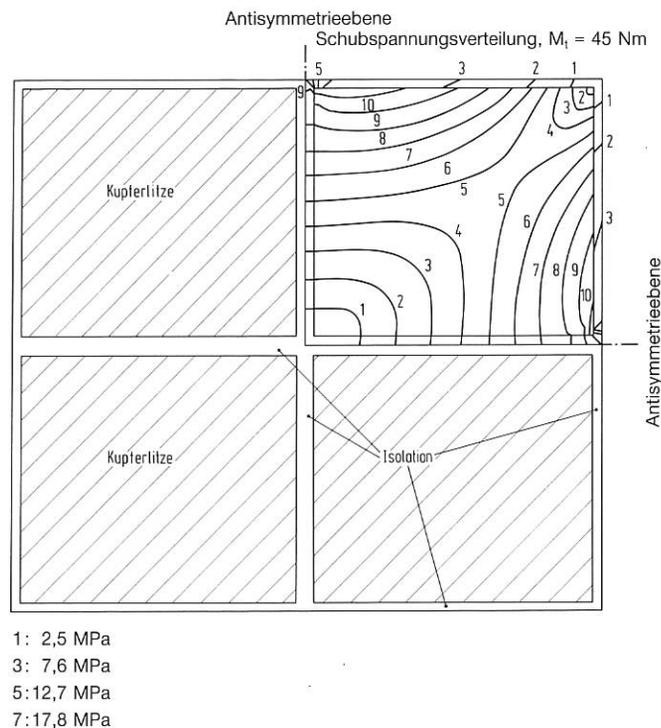


Abbildung 49: gibt die errechnete Spannungsverteilung im Probekörper wieder. Bei diesen Untersuchungen arbeitete das IPP mit BBC Mannheim und der Materialprüfungsanstalt in Darmstadt zusammen.

Die Arbeiten der zentralen Arbeitsvorbereitung unterliegen einem stetigen Wandel, da der Umfang externer Arbeiten erheblich zugenommen hat und damit die Betreuung dieser Arbeiten ein höheres Gewicht erhielt. 1985 mußten etwa 50 Prozent der Tätigkeit allein für die ASDEX-Härtung aufgewandt werden, die die Herstellung von etwa 50000 Einzelteilen umfaßt, deren größter Teil schon vormontiert ist und zum Einbau bereitgestellt wurde. Für externe Firmen wurden Werkverträge für etwa 25000 Stunden vorbereitet und vergeben sowie Arbeiten im Umfang von etwa 90000 Stunden vorkalkuliert.

In Mechanik, Feinmechanik, Schlosserei und Schreinerei der zentralen mechanischen Werkstätten wurden etwa 67400 Produktionsstunden geleistet, von denen hohe Anteile der ASDEX-Härtung und der Neutralinjektion zuzuordnen sind.

Die ZTE umfassen auch die technischen Läger und den Gerätepool. Dabei versorgten die Läger die Projekte mit Bauteilen und Materialien im Wert von 2,7 Millionen DM aus einem Sortiment von 5100 Artikeln. Annahme, Ausgabe und Verkauf von Geräten hielten sich im Pool etwa die Waage und betrafen jeweils etwa 1,1 Millionen DM.

Die Zentrale Bildstelle mit Fotolabor, Kopierstelle und Druckerei führt einen Großteil der anfallenden Arbeiten selbst durch und vermittelt und betreut externe Aufträge.

Die Betriebstechnik führte neben den üblichen Routinearbeiten vor allem solche zur Reduzierung der Systemtemperatur in unserer Fernheizanlage aus. Damit konnte

der Verbrauch an Heizenergie merklich reduziert werden. Für das Rechenzentrum wurde eine Klimaanlage geplant und am Jahresende in Betrieb genommen. Dadurch konnte die Betriebssicherheit des Rechenzentrums erhöht werden.

Zur Befriedigung des Bedarfs an Ausbildungsplätzen haben die ZTE wie in den Vorjahren einen erheblichen Beitrag geleistet: Durch Anstellung von 14 Auszubildenden in 5 Berufen erhöhte sich die Gesamtzahl der Auszubildenden auf 47.

Bibliothek

Leiter: Dipl.-Bib. Angelika Hohaus

Der Bestand der Zentralbibliothek und der zehn Handbibliotheken umfaßte am 31. Dezember 1985 40653 Monographien, Konferenzberichte und Loseblattsammlungen; 48060 Reports, Dissertationen und Patentschriften; 3349 Microfiches; 286 Mikrofilme sowie 20278 Zeitschriftenbände und 569 Zeitschriftenabonnements.

Es wurden 1262 Monographien, 1550 Reports, Dissertationen und Patentschriften; 177 Microfiches; 11 Mikrofilme sowie 919 Zeitschriftenbände beschafft und bibliothekarisch bearbeitet. Monatlich wird eine »Bibliotheksinformation« herausgegeben, in der Neuerwerbungen der Bibliothek veröffentlicht werden. Außerdem werden Vortragsankündigungen und Konferenzankündigungen versandt. Im Leihverkehr mit anderen Bibliotheken konnten 400 Literaturanfragen positiv beantwortet werden.

Die Umstellung der Bibliothek auf Datenverarbeitung wurde fortgeführt. Im Bereich der Katalogisierung wurden bisher insgesamt 20000 Titel erfaßt. Auch das Berichtswesen des IPP gehört zu den Aufgaben der Bibliothek. So wurden 1985 60 Veröffentlichungen bei Fachzeitschriften und Konferenzveranstaltern eingereicht. Außerdem wurden insgesamt 15844 Sonderdrucke dieser institutseigenen Veröffentlichungen und 13210 IPP-Laborberichte versandt.

Die Bibliothek des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik wird ebenfalls vom IPP betreut und im Berichtsjahr 300 Bücher gekauft und bearbeitet sowie 4360 Sonderdrucke versandt.



Abbildung 50: Eine Kupferblende zum Justieren des Teilchenstrahls der Neutralteilchenheizung wird auf einem Schwenk- und Kipptisch bearbeitet.

Verwaltung und Allgemeine Dienste

Leiter: Adolf Ilse

Der Bereich »Verwaltung« umfaßt die Personalabteilung, die Beschaffungsabteilung, die Finanzabteilung sowie die Rechts- und Patentabteilung. Zu den »Allgemeinen Diensten« gehören die Bau- und die Sozialabteilung.

Personalabteilung

Leiter: Dr. Bernhard Raiser (bis 31. Dezember 1985)
Dr. jur. Carl-Heinz Duisberg (ab 1. Januar 1986)

- Vom 1.1.1985 bis 31.12.1985 ist die Gesamtzahl der Beschäftigten von 1062 um 10 auf 1052 zurückgegangen.

Der Personalstand zu den Jahresenden 1984 und 1985 stellt sich wie folgt dar:

	Stand: 31.12.1984	Stand: 31.12.1985
Wissenschaftler (einschließlich Gastforscher)	243	249
Technisches Personal	500	484
Direktorium und Betriebsrat	20	20
Allgemeine Dienste	135	135
Verwaltung	66	67
	964	955
Mitarbeiter von CEA zum IPP abgeordnet	4	—
Auszubildende und Praktikanten	58	58
Doktoranden und Diplomanden	19	16
Zeithilfen	17	23
	1062	1052

Das Institut hat aufgrund der Forderung des BMFT und gesetzlicher Sparmaßnahmen bis zum 31.12.1985 von seinem bisherigen gesamten Planstellen-Soll von 981 Stellen 59 Stellen abgebaut, so daß derzeit das Planstellen-Soll 922 beträgt. Der Abbau erfolgte aus der Fluktuation.

- Die Austrittsfluktuation der Mitarbeiter auf Planstellen in der Zeit vom 1.1.1985 bis 31.12.1985 ist in der nachstehenden Übersicht dargestellt:

	Zahlenstand 1984	Zahlenstand 1985
Gruppe 1 Angestellte C4-BAT IIa	2,4% (5)	2,4% (5)
Gruppe 2 Angestellte BAT IIaT-BAT X	3,3% (15)	3,5% (15)
Gruppe 3 Lohnempfänger	5,4% (13)	4,0% (11)
Gesamtfluktuation	3,7% (33)	3,4% (31)

- Die Zahl der schwerbehinderten Beschäftigten betrug zum Jahresende 1985 71 (Vorjahr 77). Die durch das Schwerbehindertengesetz vorgeschriebene Quote von 6% wurde somit um 11 Mitarbeiter überschritten.
- Zu JET waren zum Jahresende 1985 11 Mitarbeiter für einen mehrjährigen Aufenthalt nach England beurlaubt. 14 Mitarbeiter waren zeitweise zu JET abgeordnet.
- Zum NET-Team waren zum Jahresende 1985 5 Wissenschaftler abgeordnet, 8 weitere Mitarbeiter wurden zur zusätzlichen Unterstützung des Teams beschäftigt, davon 6 außerhalb des Stellenplans.

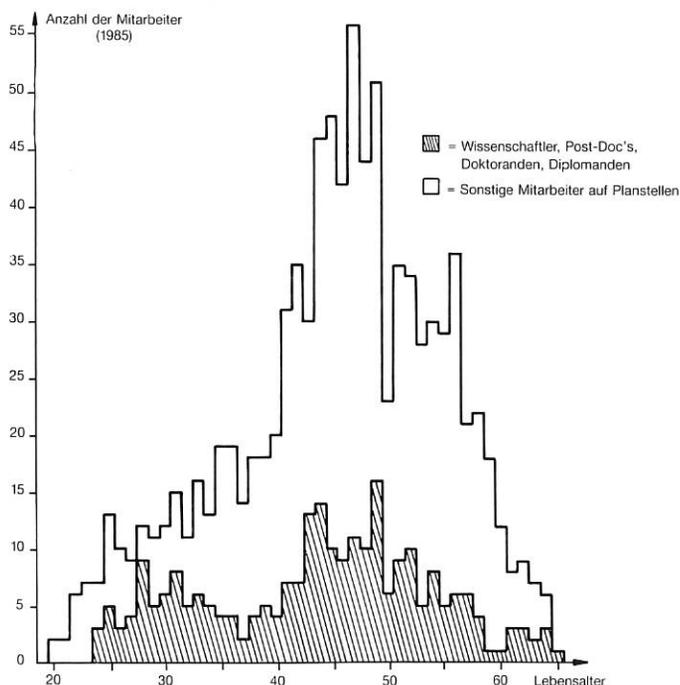


Abbildung 51: Altersstruktur der wissenschaftlichen Mitarbeiter des Instituts.

6. Zum Jahresende 1985 waren im IPP insgesamt 52 Mitarbeiter mit Ausbildungsverträgen beschäftigt (Vorjahr 49), davon 24 Feinmechaniker, 11 Elektrogerätemechaniker, 6 Energiegeräteelektroniker, 2 Schreiner, 1 Galvaniseur, 3 Technische Zeichner, 2 Köche und 3 Bürokaufleute.
7. Das Durchschnittsalter der wissenschaftlichen Mitarbeiter auf Planstellen betrug 1985 47,6 Jahre (Vorjahr 46,8 Jahre). Bezieht man die außerhalb des Stellenplans mit 3-Jahres-Verträgen angestellten Nachwuchswissenschaftler mit ein, so ergibt sich ein Durchschnittsalter von 46,5 Jahren (1984: 46,0 Jahre).
8. Durch Tarifverträge wurden die Löhne und Gehälter zum 1.1.1985 um 3,2 Prozent angehoben.

Beschaffungsabteilung

Leiter: Dr. Ing. Karl Tichmann

Die Beschaffungsabteilung hat im Berichtsjahr 7993 Aufträge erteilt (1984: 7932). Der einzelne Auftragswert lag bei 84 Aufträgen mit einem Gesamtwert von 59 Millionen DM über 50000 DM (1984: 68/51,1 Millionen DM) und bei 623 Aufträgen im Gesamtwert von 10 Millionen DM zwischen 5000 DM und 50000 DM (1984: 585/8,4 Millionen DM). Die Verteilung der Aufträge nach Art und Umfang entsprach weitgehend dem Vorjahr. Die Zahl der Großaufträge für WENDELSTEIN VII-AS ist jedoch zurückgegangen, nachdem sich das Experiment in der Schlußphase des Aufbaus befindet. Eine entsprechende Entwicklung bei ASDEX Upgrade zeichnet sich ab.

Finanzabteilung

Leiter: Dipl.-Volkswirt Karl Salow

Im Jahre 1985 stand ein Haushaltsvolumen von 151,9 MDM zur Verfügung. Die Ausgaben setzten sich verglichen mit den Vorjahren wie folgt zusammen:

	Ist 1983 MDM	Ist 1984 MDM	Ist 1985 MDM
Personalausgaben	56,5	58,7	59,8
Sachausgaben	27,9	33,2	31,1
Beteiligung am JET-Projekt	6,7	3,0	3,4
Durchlaufende Mittel für fremde Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	2,1	0,9	1,3
Betriebsausgaben	93,2	95,8	95,6
Laufende Investitionen	13,8	12,5	9,8
Investitionen nach Ausbauprogramm	21,1	35,2	46,5
Investitionsausgaben	34,9	47,7	56,3
Gesamtausgaben	128,1	143,5	151,9

Die Finanzierung wurde wie folgt vorgenommen:

Eigene Erträge	15,2	22,2	23,2
EURATOM-Zuschüsse für IPP	28,2	34,2	39,5
Fremde Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	2,1	0,9	1,3
Zuschuß Bund	74,3	77,6	79,1
Zuschuß Bayern	8,3	8,6	8,8
	128,1	143,5	151,9

Rechts- und Patentabteilung

Leiter: Dr. jur. Carl-Heinz Duisberg
(bis 31. Dezember 1985)
Dr. jur. Heinz-Georg Sundermann
(ab 1. Januar 1986)

Die Arbeitsschwerpunkte der Rechts- und Patentabteilung lagen in der Betreuung der Gremien und Organe des Instituts sowie in der Gestaltung von Verträgen. Hervorzuheben sind hierbei Kooperationsverträge mit deutschen und europäischen Universitäten und Forschungseinrichtungen sowie der Abschluß der im Rahmen der Internationalen Energie Agentur (IEA) zwischen EURATOM und dem Department of Energy/USA geschlossenen Implementing Agreements für ASDEX Upgrade und die Stellaratoren.

Ferner wurden die gewerblichen Schutzrechte des IPP verwaltet und auf ihre Verwertbarkeit untersucht. Bis zum Jahresende 1985 wurden insgesamt 175 Schutzrechte und Schutzrechtsanmeldungen betreut. In dieser Zahl sind 12 europäische Patentanmeldungen bzw. Patente enthalten, die in 78 Ländern angemeldet wurden.

Die Verwertung der Schutzrechte und des Know-hows geschah in Zusammenarbeit mit der zur Max-Planck-Gesellschaft gehörenden Firma »Garching Instrumente, Gesellschaft zur industriellen Nutzung von Forschungsergebnissen mbH«.

Zum Jahresende 1985 bestanden 10 Lizenzverträge über Schutzrechte und technisches Know-how des IPP.

Bauabteilung

Leiter: Bauingenieur Martin Mahl

Die Bauarbeiten zum Umbau der Halle L 6 sind abgeschlossen, die Torushalle steht für den Aufbau des Experimentes ASDEX-Upgrade zur Verfügung. Der Meßraum III für WENDELSTEIN VII-AS ist fertiggestellt.

Für einen weiteren Stoßstromgenerator muß ein neues Gebäude errichtet werden (Energiezentrale 4). Im Berichtszeitraum wurde die Planung ausgearbeitet und die erforderlichen Genehmigungen eingeholt, mit den Bauarbeiten wurde im September begonnen, das Stahl-

skelett des Maschinenhauses war zum Jahresende fertig. Die Gesamtfertigstellung ist für August 1986 vorgesehen.

Das Wohnheim für Gastforscher im Riemerfeld wurde im Juli 1985 bezogen.

In Planung befinden sich unter anderem die erweiterte Abschirmung für ASDEX, eine Erweiterung der Fundamente der Hochspannungsanlage sowie eine Alarmanlage für den Cray-Rechner im Rechenzentrum.

Sozialabteilung

Leiter: Berthold Appel

Für die Unterbringung von Gastforschern wurde vom Institut ein Gästehaus mit 18 möblierten Wohnungen in

Garching »Riemerfeld« errichtet. Die Gesamtwohnfläche beträgt 906 Quadratmeter.

1985 wurden vom Institut zwei Eigenheime durch Familienheimdarlehen gefördert.

Im Rahmen einer gemeinsamen Fahrbereitschaft wird vom Institut für die auf dem Forschungsgelände ansässigen Einrichtungen ein Buszubringerdienst organisiert. Für die Benutzung der Busse wird ein Fahrpreis erhoben, der an dem vergleichbaren öffentlichen Entgelt des Münchener Verkehrsverbundes ausgerichtet ist.

Die Fahrbereitschaft des Instituts verfügt über 12 Fahrzeuge (Pkws und Lkws). Es wurden 242067 Kilometer gefahren.

Von der Kantine wurden im Jahr 1985 171276 Essensportionen ausgegeben (Vorjahr 180317).

Geschäftsführung und Wissenschaftlich-Technisches Büro

Organisation und Revision

Leitung: Hans-Joachim Paschke (bis 31. Dezember 1985)
Wolfgang Weidinger

Die Organisation befaßte sich im Berichtsjahr mit Untersuchungen für die Neugestaltung des Ablaufs im Bestellwesen und in der Reisekostenabrechnung. Es wurden insgesamt 4 Projektvorschläge erarbeitet. Die der Detailplanung vorgelagerte Diskussion war zum Jahreswechsel noch nicht abgeschlossen.

Im Verwaltungsrechnersystem wurden die Geräte für die Lochkartenverarbeitung abgeschafft und durch Terminalanschlüsse ersetzt.

Neben den routinemäßigen Prüfungen der Kassen und Verwendungsnachweise der vom IPP geförderten Hochschulprojekte lag der Schwerpunkt der Revision 1985 vor allem in Prüfungen des Beschaffungswesens, der Fahrbereitschaft, der Personaleinstufungen sowie der Kapazität der Zentralen Technischen Einrichtungen. Die Prüfungen der Lagerverwaltung und der Reisekosten wurden begonnen.

Betriebsärztlicher Dienst

Leiter: Dr. med. Nils Kaiser (bis 31. März 1986)

Im Betriebsärztlichen Dienst wurde in 6160 Fällen ärztliche Hilfe geleistet; darin sind 42 Einstellungsuntersuchungen, 616 physikalische Behandlungen, 877 Sonderuntersuchungen, 350 Vorsorgemaßnahmen und 711 arbeitsschutzrechtlich vorgeschriebene Untersuchungen enthalten. Weiter wurden 28107 Laborleistungen einschließlich Kontrollen erbracht.

Wissenschaftlich-Technisches Büro

Leiter: Dr. Gerhard Zankl

Die Aufgabenbereiche Forschungsplanung und Projektüberwachung sowie Sicherheit und Öffentlichkeitsarbeit sind organisatorisch im Wissenschaftlich-Technischen Büro zusammengefaßt, das direkt dem Direktorium unterstellt ist.

In jährlichen Programmbesprechungen erläutern die Projekte und Arbeitsgruppen den Stand und die Ergebnisse

ihrer Arbeiten und stellen die weitere Planung vor. Auf dieser Grundlage werden der in den »Forschungsvorhaben« dargestellte jährliche Personaleinsatz und Mittelaufwand sowie die mittelfristige Institutsplanung erarbeitet, die ihren Niederschlag im jährlich erscheinenden »Programmbudget« findet.

Besonders hervorzuheben sind 1985 Überlegungen zur Organisation der technischen Infrastruktur, insbesondere bei den mechanischen Werkstätten, um die für den künftigen Betrieb der Großexperimente erforderliche Flexibilität und Querdurchlässigkeit der verschiedenen Werkstätten im IPP sicherzustellen. Außerdem wurden die technischen und personellen Möglichkeiten für einen Weiterbetrieb von ASDEX nach Inbetriebnahme von ASDEX Upgrade untersucht und gezeigt, daß ein begrenzter Weiterbetrieb von ASDEX neben ASDEX Upgrade und WENDELSTEIN VII-AS möglich ist.

Sicherheit

Leiter: Dr. Manfred Hüls

1985 verringerte sich die Gesamtunfallzahl von 116 im Jahr 1984 auf 97. Darin enthalten ist die mit 15 gegenüber dem Vorjahr mit 17 niedrigere Zahl meldepflichtiger Unfälle. Diese Zahl enthält 11 meldepflichtige Arbeitsunfälle. Für das Jahr 1985 ergab sich gegenüber dem Vorjahr eine um 1,7 Prozent niedrigere Gesamtunfallquote von 9,2 Prozent und eine Quote meldepflichtiger Wege- und Betriebsunfälle von zusammen 1,45 Prozent. Der durch die meldepflichtigen Unfälle bedingte Arbeitszeitausfall erhöhte sich gegenüber dem Vorjahr insbesondere wegen zweier Unfälle mit zusammen 217 Ausfalltagen im Jahr 1985 auf insgesamt 435 Fehltag. Damit ergibt sich über alle meldepflichtigen Unfälle gemittelt ein spezifischer Arbeitszeitverlust von 29 Arbeitsausfalltagen je Unfall.

Aufgrund gesetzlicher Vorschriften sind verschiedene Experimente, Plasmaanlagen und Beschleuniger im IPP auf Produktion und Feststellung der Dosis radioaktiver und Röntgenbremsstrahlung zu überwachen. Im Berichtszeitraum konnten u.a. bei Einsatz von 3224 Filmdosimetern, die für die Personenüberwachung und für die Ortsdosimetrie benutzt wurden, keine personenschädigenden Dosisüberschreitungen festgestellt werden.

Dem Bayerischen Landesamt für Umweltschutz wurde für das Jahr 1985 eine am Abluftkamin unseres Tritiumlabors gemessene, infolge einer korrodierten Berstscheibe

erhöhte mittlere Emissionskonzentration angezeigt. Der normale Experimentierbetrieb einschließlich aller im Jahr 1985 durchgeführten Reparatur-, Umbau- und Wartungsmaßnahmen verursachte Tritiumfreisetzungen, die unterhalb des gesetzlichen Grenzwertes lagen. Der Jahresmittelwert der mit dem Abwasser abgegebenen Tritiumkonzentration ergab sich als weit unterhalb der erlaubten Abgabe.

Angelegenheiten des Arbeitsschutzes, der Strahlensicherheit, des Laserschutzes und der Objektsicherung werden im Arbeitsschutzausschuß des Instituts behandelt, der zur Zeit 57 Mitglieder hat. Darunter sind 19 der für die verschiedenen Bereiche eingesetzten Sicherheitsbeauftragten, 22 Strahlenschutzbeauftragte und 9 Laserschutzbeauftragte. Nachdem die Freiwillige Betriebsfeuerwehr des IPP nach 20 Jahren zum Jahresende 1985 aufgelöst wurde, liegen die Aufgaben des vorbeugenden und praktischen Brandschutzes nunmehr bei der für das gesamte Forschungsgelände zuständigen, bei der Technischen Universität München angesiedelten hauptberuflichen Feuerwehr.

Öffentlichkeitsarbeit

Leiter: Isabella Milch (ab 1. April 1985)

Die Öffentlichkeitsarbeit des Instituts für Plasmaphysik informiert kontinuierlich über Aufgaben und Zielsetzungen der Fusionsforschung und insbesondere über die Planung, den Verlauf und die Ergebnisse der Forschungsarbeiten im Institut für Plasmaphysik.

Dies geschieht durch Betreuung von Presse-, Rundfunk- und Fernsehjournalisten, Pressemitteilungen und Besucherbetreuung. Im Berichtsjahr haben etwa 2300 Personen – sowohl Einzelbesucher als auch Gruppen – das IPP besucht. Über die Institutsarbeit informierten sich unter anderem Dr. Beaulieu, Direktor des Büros für internationale Beziehungen des National Research Council in Kanada, eine Delegation der Polnischen Akademie der Wissenschaften, Abgeordnete des US-Kongresses, Prof. Greenspan von der Israelischen Atomenergiebehörde sowie eine Delegation des Shanghaier Instituts für Maße und Gewichte.

Anlässlich des 25jährigen Bestehens des IPP wurde am 4. Juli 1985 eine Pressekonferenz veranstaltet. Ein vorangehendes Festkolloquium informierte über Entwicklung und Stand der Stellarator- und Tokamakexperimente im IPP sowie über das JET-Projekt in Culham.

Auf der Hannover-Messe 1985 war das IPP am Gemeinschaftsstand der Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen vertreten. Am IPP-Stand wurde ein Modell der geplanten Tokamak-Anlage ASDEX Upgrade ausgestellt und die Wirkungsweise eines gekühlten Graphitlimiters demonstriert. Zum Thema »Beschleuniger in der Großforschung« veranstaltete die Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen eine Sonderschau, an der sich das IPP mit Elementen der Neutralteilchen-Heizung beteiligte.

Zum Informationsaustausch der Institutsmitglieder untereinander erschienen vier Ausgaben der internen wissenschaftlichen »Monatlichen Mitteilungen«, die Hauszeitschrift »Impulse« wurde dreimal (eine Doppelnummer) herausgegeben. Eine interne Presseinformation wurde wöchentlich zur Verfügung gestellt.



Abbildung 52: Das Institut für Plasmaphysik auf der Hannover-Industriemesse 1985.

Der organisatorische Aufbau des IPP

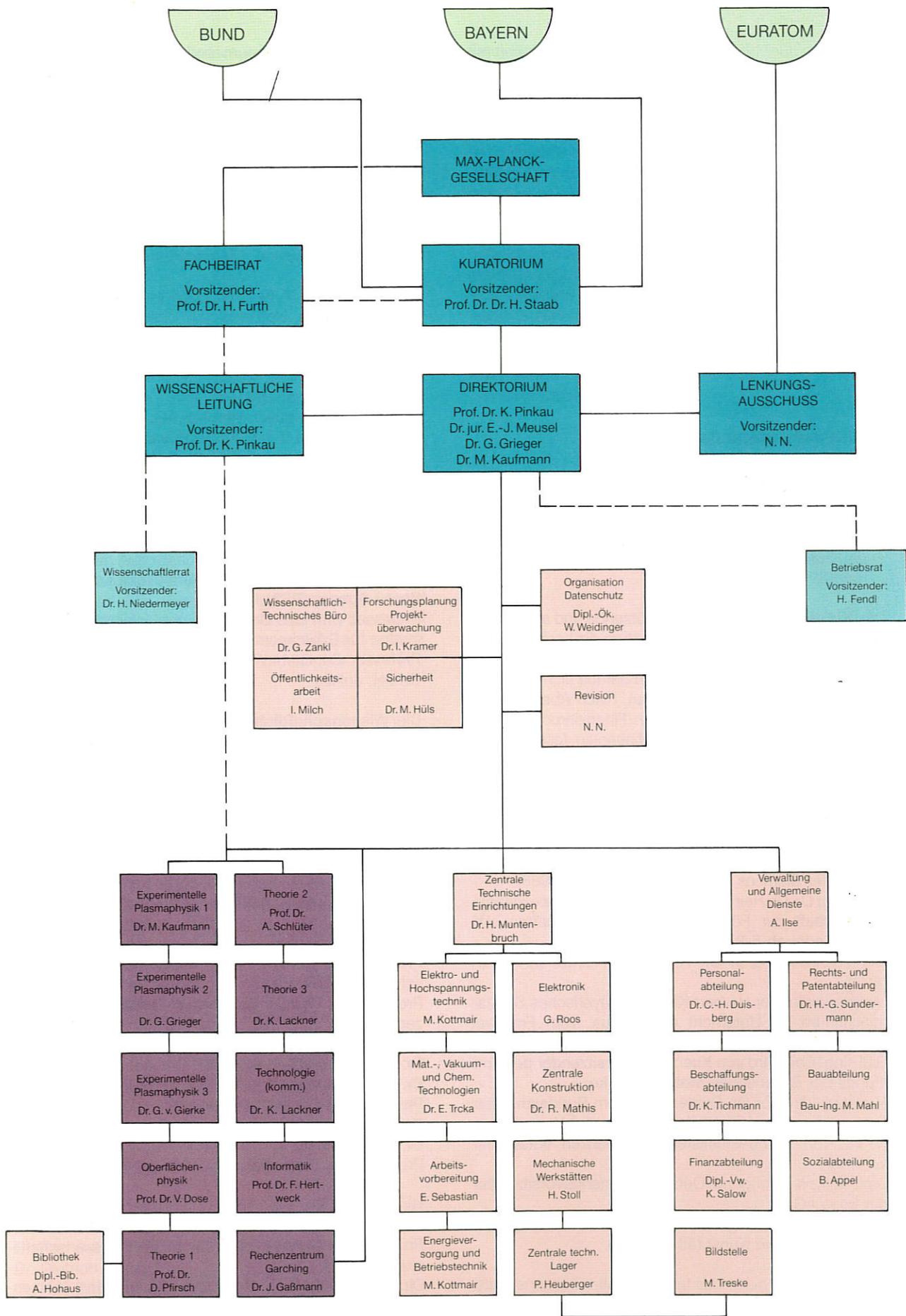


Abbildung 53: Organigramm des Instituts für Plasmaphysik (Stand November 1986).

Das am 28. Juni 1960 als gemeinnützige Gesellschaft mit beschränkter Haftung gegründete Institut für Plasmaphysik wurde gemäß den Beschlüssen des Senats der Max-Planck-Gesellschaft und der Gesellschafterversammlung des IPP ab 1. Januar 1971 als Max-Planck-Institut fortgeführt. Die vom Senat der Max-Planck-Gesellschaft für das Institut beschlossene Satzung trägt der bewährten Struktur und Handlungsfreiheit des Instituts in vollem Umfange Rechnung.

Die **Max-Planck-Gesellschaft** als Trägerorganisation erläßt die Institutssatzung, beruft die Wissenschaftlichen Mitglieder, die Mitglieder des Kuratoriums und des Fachbeirats, bestellt die Mitglieder des Direktoriums, überprüft die satzungsgemäß zu erstattenden Berichte und wirkt im Kuratorium mit.

Finanzierungsträger des Instituts sind:

- die Bundesrepublik, die 1985 rund 61 Prozent der Ausgaben finanzierte,
- der Freistaat Bayern, der sich mit etwa 7 Prozent beteiligte,
- die Europäischen Gemeinschaften (EURATOM) mit rund 32 Prozent.

Das **Kuratorium** hat eine unterstützende und allgemeine Aufsichts- und Entscheidungsfunktion. Es berät mit dem Direktorium und der Wissenschaftlichen Leitung das wissenschaftliche Programm und die daraus sich ergebenden Folgen für den Haushaltsplan. Nach Abschluß der Haushaltsverhandlungen mit den Finanzierungsträgern stellt das Kuratorium den Haushaltsplan fest und tritt insoweit an die Stelle des Senats der Max-Planck-Gesellschaft.

Mitglieder des Kuratoriums waren im Jahre 1986:

Professor Dr. Karl-Heinz Beckurts, Mitglied des Vorstands der Siemens AG (Vorsitzender) † 9.7.1986);
Professor Dr. Dr. Heinz Staab, Präsident der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. (Vorsitzender ab 6.8.1986);
Generaldirektor a.D. Dr. Alexander Hocker (Ehrenkurator);
Ministerialdirektor Herbert Kießling, Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus, vom Freistaat Bayern entsandter Vertreter;
Dipl.-Ing. Eberhard von Kuenheim, Vorsitzender des Vorstands der Bayerischen Motoren-Werke;
Ministerialdirektor Dr. Günter Lehr, vom Bundesminister für Forschung und Technologie entsandter Vertreter;
N. N., vom Bundesminister der Finanzen entsandter Vertreter;
Dipl.-Volksw. Wolfgang Oehme, Vorstandsvorsitzender der Esso AG;
Prof. Dr. Wolfgang Wild, Bayerischer Staatsminister für Wissenschaft und Kunst (ab 6.11.86);

Der **Fachbeirat** berät das Institut in allen wissenschaftlichen Fragen. Er erstattet dem Präsidenten der Max-Planck-Gesellschaft jährlich einen Bericht über die wissenschaftliche Arbeit des Instituts und leitet diesen

zugleich dem Kuratorium und der Wissenschaftlichen Leitung des Instituts zu. Mitglieder des Fachbeirats waren im Jahr 1986:

Professor Dr. Harold P. Furth (Vorsitzender), Plasma Physics Laboratory, Princeton University, Princeton, USA;
Professor Dr. Bo Lehnert (stellvertretender Vorsitzender), The Royal Institute of Technology, Division of Plasma Physics and Fusion Research, Stockholm, Schweden;
Dr. Roy J. Bickerton, Culham Laboratory, Abingdon, Großbritannien;
Professor Dr. C. M. Braams, FOM-Instituut voor Plasmafysica, Jutphaas, Holland;
Professor Dr. Klaus Dransfeld, Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart;
Professor Dr. Roy W. Gould, California Institute of Technology, Pasadena; USA;
Dr. Rolf Gremmelmaier, Siemens AG, Zentrale Forschung und Entwicklung, Forschungslaboratorien, Erlangen;
Dr. Jules Horowitz, CEN de Saclay, Gif-sur-Yvette; Frankreich;
Dr. Dieter Kind, Präsident der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig, Institut für Hochspannungstechnik der Technischen Universität Braunschweig;
Professor Dr. Reimar Lüst, Generaldirektor der European Space Agency (ESA), Paris;
Professor Dr. Hans Schlüter, Ruhr-Universität Bochum, Institut für Experimentalphysik, Bochum;
Professor Dr. Gerd Wolf, Kernforschungsanlage Jülich GmbH, Jülich.

Die **Wissenschaftliche Leitung** des IPP, die aus den ständig im Institut tätigen Wissenschaftlichen Mitgliedern mit Leitungsfunktion besteht, stellt das Forschungsprogramm auf und beschließt den Zeit-, Personal- und Finanzrahmen der durchzuführenden Forschungsaufgaben, die Organisationsstruktur des wissenschaftlichen Bereiches, die Beauftragung von Wissenschaftlern mit Leitungsaufgaben und im Zusammenwirken mit dem Direktorium die Anstellung, Eingruppierung und Entlassung des wissenschaftlichen Personals. Ihr gehörten 1986 an:

Professor Dr. Klaus Pinkau, Vorsitzender und Wissenschaftlicher Direktor;
Professor Dr. Arnulf Schlüter, stellvertretender Vorsitzender;
Professor Dr. Volker Dose;
Dr. Gerhart von Gierke;
Dr. Günter Grieger;
Professor Dr. Friedrich Hertweck;
Dr. Michael Kaufmann;
Dr. Karl Lackner;
Professor Dr. Dieter Pfirsch.

Hinzu kommen:

Professor Dr. Ewald Fünfer, emeritiertes Wissenschaftliches Mitglied;
Dipl.-Ing. Karl-Heinz Schmitter, emeritiertes Wissenschaftliches Mitglied;
Professor Dr. James McCune, auswärtiges Wissenschaftliches Mitglied;

Professor Dr. Rudolf Wienecke, auswärtiges Wissenschaftliches Mitglied;
Professor Dr. Hartmut Zwicker, auswärtiges Wissenschaftliches Mitglied (†10.11.1986).

Das **Direktorium** besorgt die laufenden Geschäfte, entscheidet über die Verwendung der Haushaltsmittel, überwacht und regelt den Ablauf der Forschungsarbeiten, beschließt über die Anstellung, Eingruppierung und Entlassung des Personals und vertritt das Institut auch im übrigen nach innen und außen.

Ihm gehörten folgende Mitglieder an:

für den wissenschaftlich-technischen Geschäftsbereich:

Professor Dr. Klaus Pinkau (Vorsitzender);
Dr. Günter Grieger;
Dr. Michael Kaufmann;

für den kaufmännisch-administrativen Geschäftsbereich:

Dr. jur. Ernst-Joachim Meusel.

Der nach dem Assoziationsvertrag mit EURATOM gebildete **Lenkungsausschuß**, dem Vertreter der Kommission und des IPP angehören, legt das gemeinsame Programm fest, leitet dessen Durchführung, überwacht die Arbeiten, beschließt über Aufbau und Zusammensetzung der Forschungsgruppe und entscheidet über Einzelausgaben ab 100.000,- ECU.

Der **Lenkungsausschuß** setzte sich 1986 wie folgt zusammen:

seitens der Kommission der Europäischen Gemeinschaften in Brüssel:

Professor Dr. Donato Palumbo (Vorsitz bis zum 15.10.1986),
Dr. Charles Maisonnier,
Karl Melchinger;

seitens des Instituts:

Dr. Günter Grieger,
Dr. Michael Kaufmann,
Dr. Ernst-Joachim Meusel,
Professor Dr. Klaus Pinkau.

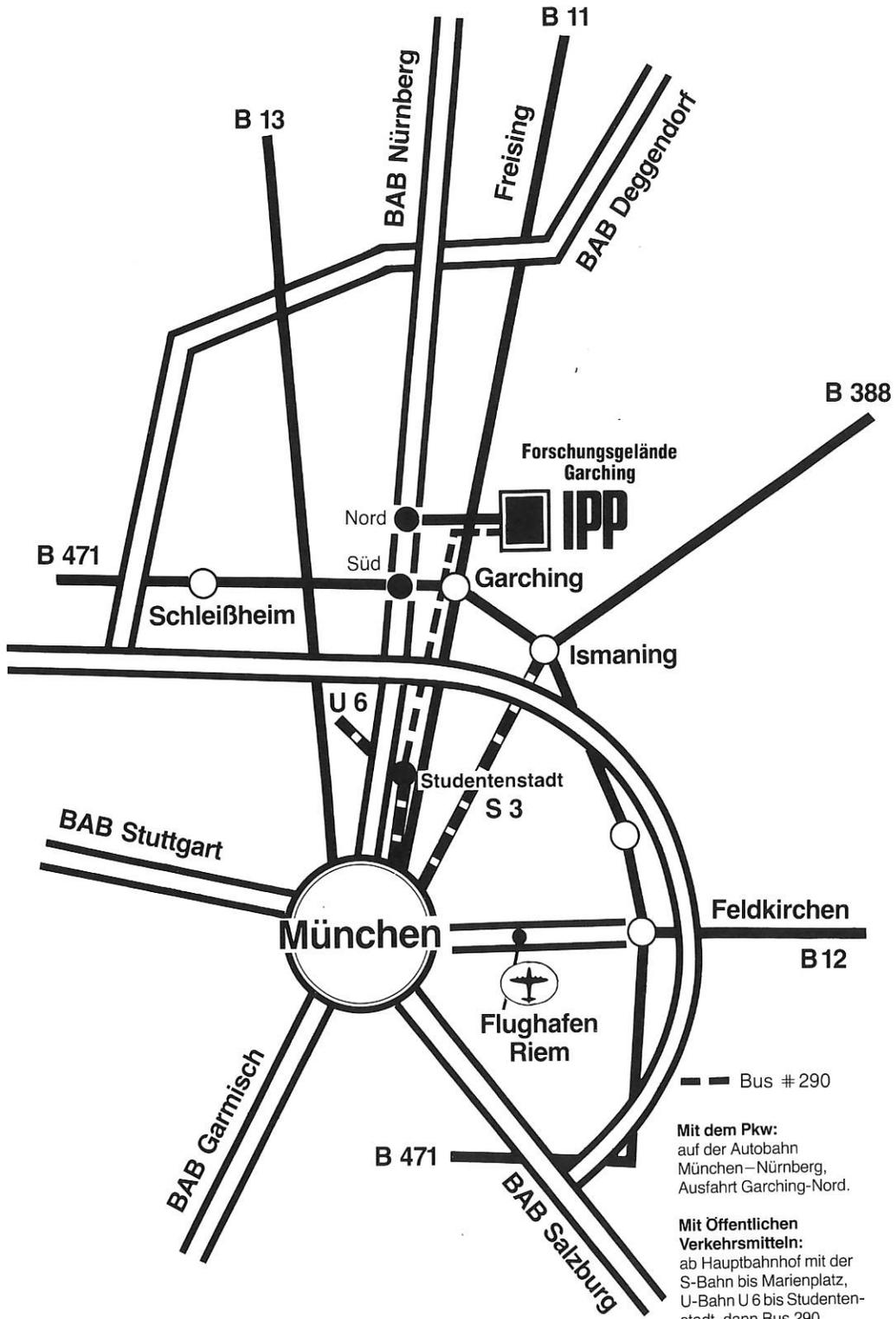
Der aus gewählten Vertretern der wissenschaftlichen Mitarbeiter bestehende **Wissenschaftlerrat** berät die Wissenschaftliche Leitung in allen Angelegenheiten ihres Entscheidungsbereiches, insbesondere in Fragen des wissenschaftlichen Programms, bei Struktur- und Personalfragen. Der Wissenschaftlerrat setzte sich nach der Wahl am 22.7.1986 wie folgt zusammen:

Dr. Helmut Niedermeyer (Vorsitzender),
Dr. Karl Steinmetz (stellvertretender Vorsitzender),
Dr. Karl Behler,
Dr. Dietrich Dorst,
Dr. Karl Ertl,
Prof. Dr. Dietrich Lortz,
Günther Roos,
Dr. Dieter Zäsche.

Dem **Betriebsrat** gehörten 1986 folgende Mitglieder an:

Heinz Fendl (Vorsitzender; freigestellt),
Fritz Lehnert (stellvertretender Vorsitzender; freigestellt),
Dr. Heinrich Wulff (freigestellt) (bis 31.7.1986),
Anton Albrecht,
Peter Angene,
Helmut Gillhuber,
Ernst Grassy,
Richard Hüttinger,
Manfred Hunger,
Michael Karpfinger,
Paul Pfundmayr (ab 1.8.1986),
Engelbert Prex,
Ursula Rang,
Dr. Gerhard Venus,
Uwe Weber,
Barbara Wörle.

Wie erreichen Sie das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)?



--- Bus # 290

Mit dem Pkw:
auf der Autobahn
München–Nürnberg,
Ausfahrt Garching-Nord.

**Mit Öffentlichen
Verkehrsmitteln:**
ab Hauptbahnhof mit der
S-Bahn bis Marienplatz,
U-Bahn U 6 bis Studenten-
stadt, dann Bus 290.

JAHRESBERICHT 1985/86

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) · 8046 Garching bei München
Telefon (089) 3299-1, Telex 05215808

Redaktion und Gestaltung:
Isabella Milch, Dr. Winfried Herrmann
Gesamtherstellung: Kastner & Callwey, München
1986 Copyright by IPP Garching
Printed in Germany
ISSN 0172-8482

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Vertrages zwischen dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und der Europäischen Atomgemeinschaft über die Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik.

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit schriftlicher Genehmigung des IPP unter Nennung des IPP und des Autors gestattet.

