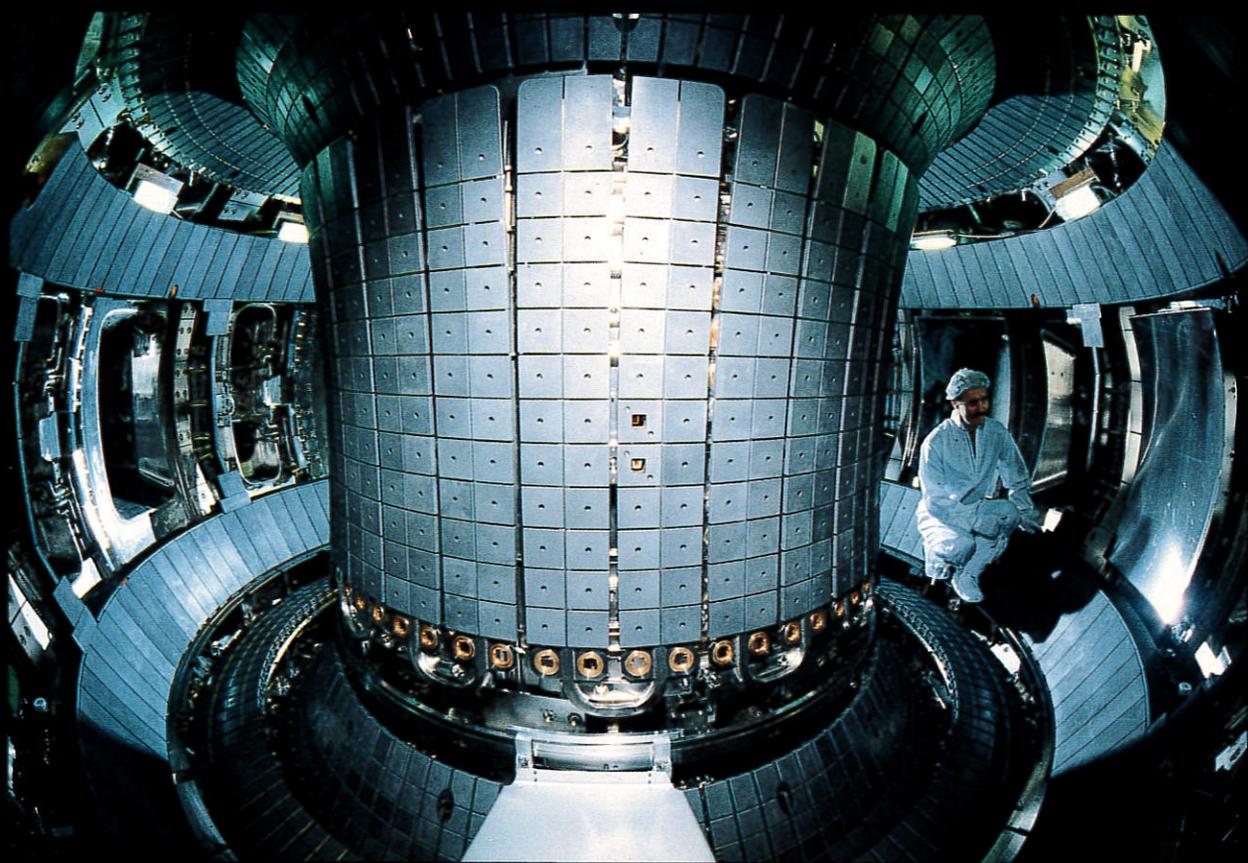


MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK GARCHING BEI MÜNCHEN



J
64
1989/
1990

JAHRESBERICHT 1989/90

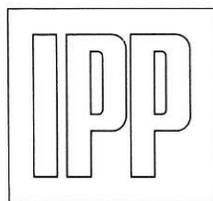
764

Zum Titelbild

Blick in das Plasmagefäß des Fusionsexperimentes ASDEX Upgrade, das 1990 am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik seinen technischen Betrieb aufnahm. Die Wände des Gefäßes sind mit Graphitkacheln bedeckt, an Boden und Decke sind die Divertorplatten zu erkennen.

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
Garching bei München

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik
22. Okt. 2012
Bibliothek



Jahresbericht 1989/90

Inhaltsverzeichnis

Aufgaben des IPP	5	Stellarator-Experimente	42
Auftrag	7	WENDELSTEIN VII-AS	43
Organisation	7	WENDELSTEIN VII-X	47
Kernfusion – eine internationale Gemeinschaftsaufgabe	8	Allgemeine Arbeiten zur Fusion	50
Das Deutsche Fusionsprogramm	10	Plasma-Wand-Wechselwirkung	50
		Theorie 1	51
		Theorie 2	51
		Tokamakphysik	53
		Technologie	54
		Plasmatechnologie	56
		Informatik	56
Einführung in die Fusionsforschung	11	Zusammenarbeit	58
Grundlagen der Kernfusion	13	Zusammenarbeit mit Hochschulen	58
Fusionsreaktionen	13	Internationale Zusammenarbeit	59
Zündbedingungen	14	Nachwuchsförderung	60
Der Magnetische Einschluß	16	Zusammenarbeit mit der Industrie	60
Instabilitäten	17		
Stöße und Verunreinigungen	17	Wissenschaftliche Infrastruktur	61
Plasmadruck	17	Rechenzentrum Garching	61
Plasmaheizung	18	Zentrale Technische Einrichtungen	62
Magnetfeldkonfigurationen – Experimenttypen	19		
Der Tokamak	19	Verwaltung und Allgemeine Dienste	64
Der Stellarator	20	Personalabteilung	64
		Rechts- und Patentabteilung	65
Elemente der Fusionsexperimente	21	Beschaffungsabteilung	65
Vakuumgefäß	21	Sozialabteilung	65
Limiter	22	Finanzabteilung	65
Magnetischer Limiter	23	Baubteilung	65
Divertor	23		
Brennstoffnachfüllung	24	Stabsstellen der Geschäftsführung	66
Plasmadiagnostik	24	Organisation	66
		Revision	66
Sicherheits- und Umweltaspekte der Fusion	26		
		Wissenschaftlich-Technisches Büro	66
Ergebnisbericht des IPP	29	Sicherheit	66
Arbeitsbereiche des Instituts für Plasmaphysik	31	Öffentlichkeitsarbeit	67
Tokamak-Experimente	32	Organisatorischer Aufbau des IPP	69
ASDEX	33		
ASDEX Upgrade	36		
JET-Mitarbeit	38		
NET/ITER-Mitarbeit	40		

Aufgaben des IPP

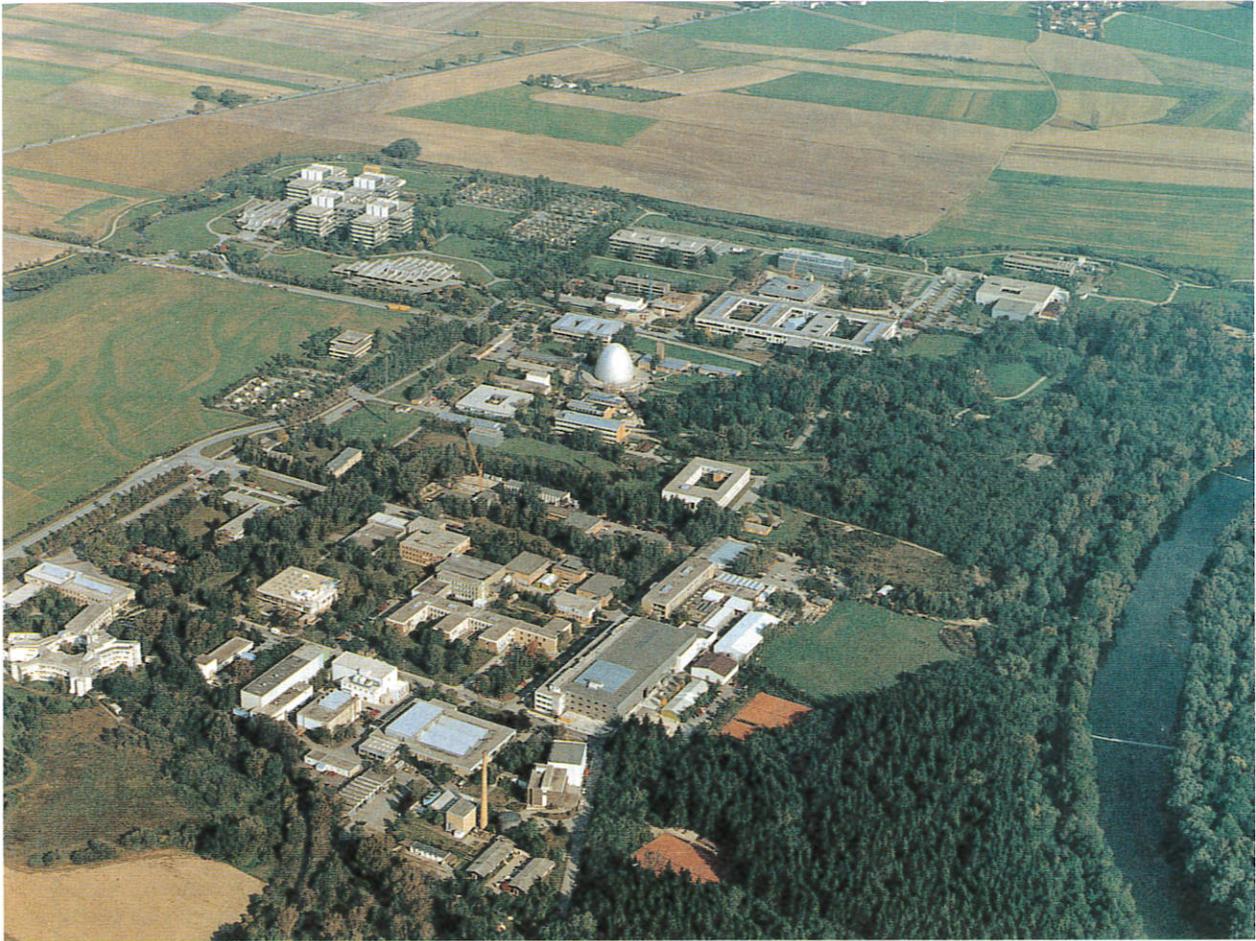


Abbildung 1: Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik auf dem Forschungsgelände Garching

Auftrag

Das Max-Planck-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 Wasserstoffkernen zu Helium 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 der Erde werden.

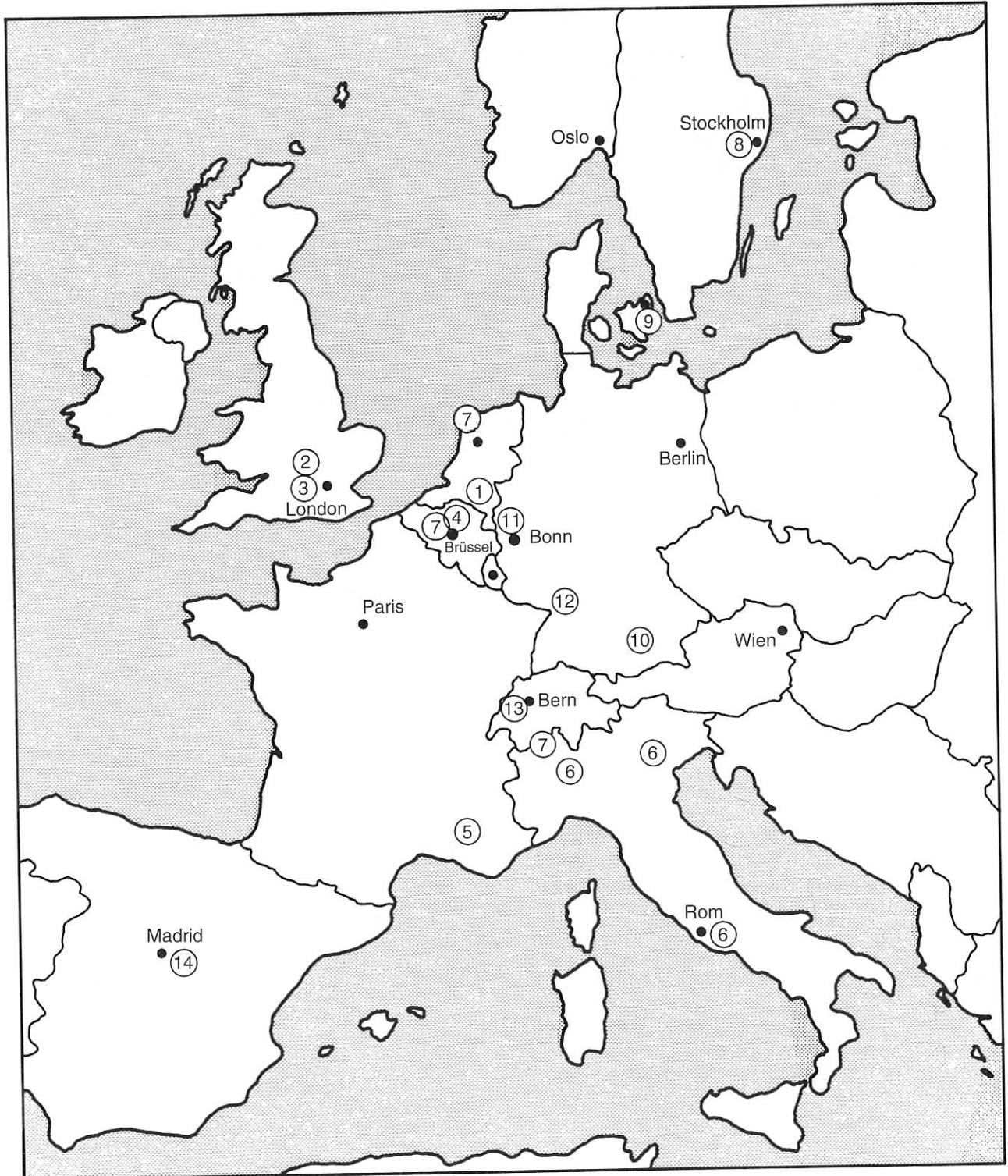
Organisation

Das Institut für Plasmaphysik ist ein Institut der Max-Planck-Gesellschaft. Es beschäftigt etwa 1000 Mitarbeiter, davon ein Viertel Wissenschaftler. Der Haushalt des Instituts wird zu rund einem Drittel durch die Europäische Gemeinschaft (EURATOM) finanziert und zu zwei Dritteln durch den Bund und den Freistaat Bayern im Verhältnis neun zu eins. Das Forschungsprogramm wird durch die Wissenschaftliche Leitung in Abstimmung mit EURATOM im Rahmen des Europäischen Fusionsprogramms festgelegt. Die Arbeiten überwacht und regelt das Direktorium des Instituts. Ein international besetzter Fachbeirat berät das Institut in wissenschaftlichen Fragen. Oberstes Aufsichtsgremium ist das Kuratorium, dem namhafte Persönlichkeiten aus Wissenschaft und Wirtschaft angehören.

Kernfusion – eine internationale Gemeinschaftsaufgabe

Die Welt deckt gegenwärtig neunzig Prozent ihres gesamten Energiebedarfs aus fossilen Energiequellen. Dieses heute noch stabile Energieversorgungssystem kann wegen der begrenzten Vorräte an fossilen Rohstoffen, wegen des dramatischen Wachstums der Erdbevölkerung und angesichts des Klima-Problems nicht von Dauer sein.

Um die Versorgung zukünftiger Generationen zu sichern, müssen bereits heute alle Alternativen untersucht werden, die Kohle, Erdöl und Erdgas ersetzen können. Hierfür sind lediglich drei Möglichkeiten zu erkennen: die Spaltungsenergie der Schnellen Brüter, die Sonnenenergie und die Fusionsenergie.



Der Kernfusion widmen sich weltweit vier eigenständige Forschungsprogramme in Europa, den Vereinigten Staaten von Amerika, Japan und der Sowjetunion. Durch gegenseitige Abstimmung und Zusammenarbeit sind diese vier Programme miteinander verbunden. In kleinerem Umfang beschäftigen sich auch andere Länder – so Australien, China und Kanada – mit der Kernfusion.

Die Anfänge der Fusionsforschung reichen zurück bis in die 50er Jahre. Angesichts der Vielzahl der zu lösenden Probleme auf dem Weg zu einem Reaktor waren in den

Anfangsjahren die theoretischen und experimentellen Arbeiten so breit wie möglich angelegt. Die gewonnenen Erfahrungen führten bald zu einer Konzentration der Arbeitsgebiete. Weltweit setzten sich bei den Bemühungen um den magnetischen Einschluß eines Fusionsplasmas schließlich Experimentanordnungen vom Typ Tokamak durch. Mit deren Hilfe wurden zunächst die zentralen physikalischen Fragen – insbesondere Einschluß und Aufheizung eines Fusionsplasmas – untersucht. Parallel zu den Tokamaks wurde in geringerem Umfang auch mit anderen Experimenttypen gearbeitet, von denen sich in den letzten Jahren der Stellarator als besonders leistungsfähig erwiesen hat. Die Stellaratorexperimente der jetzigen Generation werden betrieben, um prinzipielle Schwächen des ansonsten erfolgreichen Tokamak-Konzeptes zu verbessern.

Nachdem die großen Fortschritte der Plasmaphysik in den letzten Jahren die physikalischen Probleme eines Fusionsreaktors als lösbar erscheinen lassen, konnte die Behandlung der technischen Fragestellungen beginnen. Detaillierte Untersuchungen zu Sicherheits- und Umwelteigenschaften eines Fusionsreaktors, die über prinzipielle Aussagen hinausgehen, werden erst sinnvoll in Verbindung mit einem Experimentalreaktor, der belastbare Vorgaben für solche Analysen liefert. An der Planung von Experimentalreaktoren wird gegenwärtig in allen Fusionsprogrammen der Welt gearbeitet.

In Europa wird die Fusionsforschung gemeinsam von den Ländern der Europäischen Gemeinschaft sowie Schweden und der Schweiz betrieben. Diese in EURATOM zusammengeschlossenen Partner stellen das europäische Programm auf, beteiligen sich an seiner Finanzierung und kontrollieren seine Ausführung in den nationalen Laboratorien. Gemeinsam 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 – basierend auf den großen Fortschritten der letzten Jahre – bereits die Vorstufe eines Demonstrationsreaktors sein soll. Dieses Ziel wird seit 1988 auch in weltweiter Zusammenarbeit verfolgt: Unter der Schirmherrschaft der Internationalen Atomenergiebehörde in Wien arbeiten europäische, amerikanische, sowjetische und japanische Wissenschaftler am IPP gemeinsam an der Planung eines »Internationalen Thermonuklearen Experimentalreaktors« (ITER).

Insgesamt sind in Europa etwa 1700 Wissenschaftler an der Erforschung der Kernfusion beteiligt. 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, für die Großanlagen wie JET nicht nötig oder nicht geeignet sind. So wird das Programm des intensiv genutzten JET entlastet und die Weiterentwicklung des Programms abgesichert.

Die Anlagen JET, NET und ITER sind vom Typ Tokamak. Auf diesem Gebiet hat das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik mit dem Divertor-Tokamak ASDEX besonders

◀ **Abbildung 2:** Fusionslaboratorien in Europa

- 1 Stichting voor Fundamental Onderzoek der Materie (FOM), Nieuwegein, Niederlande
- 2 United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA), Großbritannien
- Culham Laboratory, Abingdon
- Harwell Laboratory, Harwell
- 3 JET Joint Undertaking, Abingdon, Großbritannien
- 4 Etat Belge, Belgien
- Ecole Royale Militaire, Brüssel
- Université Libre de Bruxelles
- 5 Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), Departement de Recherches sur la Fusion Controlée, Cadarache, Frankreich
- 6 Comitato Nazionale per la Ricerca e lo Sviluppo dell'Energia Nucleare e delle Energie Alternative (ENEA), Italien
- Energy Research Centre, Frascati
- Istituto Gas Ionizzati, Padua
- Istituto di Fisica del Plasma, Mailand
- 7 Joint Research Centre
- 8 Naturvetenskapliga Forskningsradet, Stockholm, Schweden
- 9 Riso National Laboratory, Roskilde, Dänemark
- 10 Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Bundesrepublik Deutschland
- 11 Forschungszentrum Jülich GmbH, Jülich, Bundesrepublik Deutschland
- 12 Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, Bundesrepublik Deutschland
- 13 Centre de Recherches en Physique des Plasmas, Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne, Schweiz
- 14 Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), Madrid, Spanien

erfolgreich gearbeitet. Diese Arbeiten werden mit dem Experiment ASDEX Upgrade fortgesetzt, das einen für NET bzw. ITER geeigneten Divertor testen wird. Diese Experimente ergänzen auch das Programm von JET, der noch ohne Divertor geplant wurde. JET plant inzwischen eine Umrüstung, um die vorteilhaften Auswirkungen eines Divertors auf den Plasmaeinschluß ebenfalls nutzen zu können.

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, muß gleichzeitig auch an der Optimierung des Einschlußkonzepts gearbeitet werden. Hier bietet der Stellarator, der von Anfang an zum Programm des Instituts gehört, den aussichtsreichsten Weg und ist auch am weitesten entwickelt. Untersuchungen des Stellarators sind in Europa auf die WENDELSTEIN-Experimente des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik konzentriert. Experimente in kleinerem Umfang gibt es auch in Spanien.

Das Deutsche Fusionsprogramm

In der Bundesrepublik Deutschland werden Untersuchungen zur Fusion auf der Grundlage magnetischen Einschlusses in drei 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 das Forschungszentrum Jülich mit dem Tokamak TEXTOR und seinem Programm zur Plasma-Wand-Wechselwirkung. Daneben widmen sich zahlreiche Universitäten Aufgaben der Fusionsforschung.

Einführung in die Fusionsforschung

Grundlagen der Kernfusion

Fusionsreaktionen

Quelle der Fusionsenergie ist die innere Bindungsenergie der Atomkerne. Die Kernbausteine sind von einer Atomsorte zur anderen verschieden stark aneinander gebunden. Je fester sie verbunden sind, desto mehr Energie muß aufgewandt werden, den Kern zu spalten. Umgekehrt wird desto mehr Energie frei, wenn der Kern gebildet wird. Die stabilsten Kerne besitzen die chemischen Elemente Eisen, Kobalt, Nickel oder Kupfer (Maßzahlen für ihre Massen: etwa 60). Aus Kernumwandlungen kann man deshalb Energie entweder durch Spaltung schwererer Kerne wie Uran – Maßzahl für seine Masse: 235 – oder durch Verschmelzung (Fusion) leichterer Kerne wie Wasserstoff und seine Isotope Deuterium und Tritium – Massenzahlen: 1, 2 und 3 – gewonnen werden (siehe Abbildung 3).

Atomkerne sind positiv geladen und stoßen sich deshalb gegenseitig ab. Daher können sie nur dann miteinander verschmelzen, wenn sie sich so nahekommen, 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 aufeinander zufliegen, können sie ihre gegenseitige Abstoßung überwinden.

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,

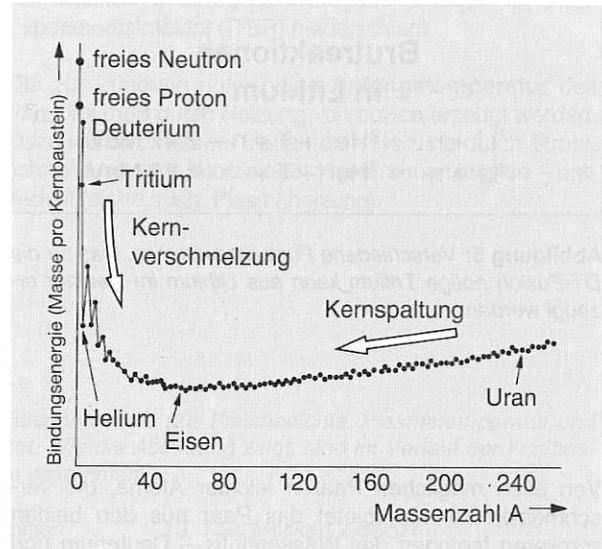
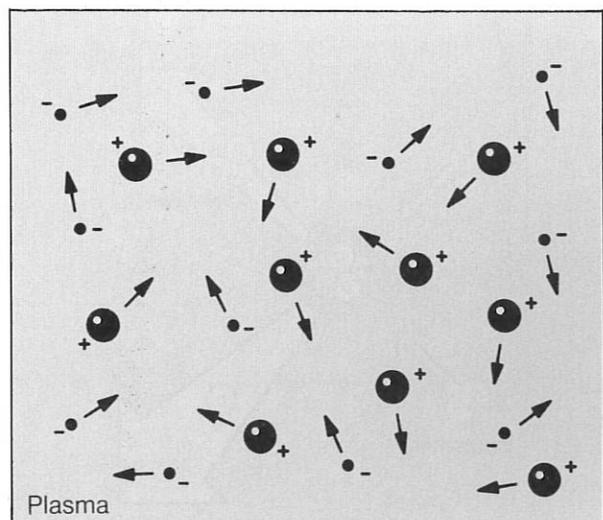
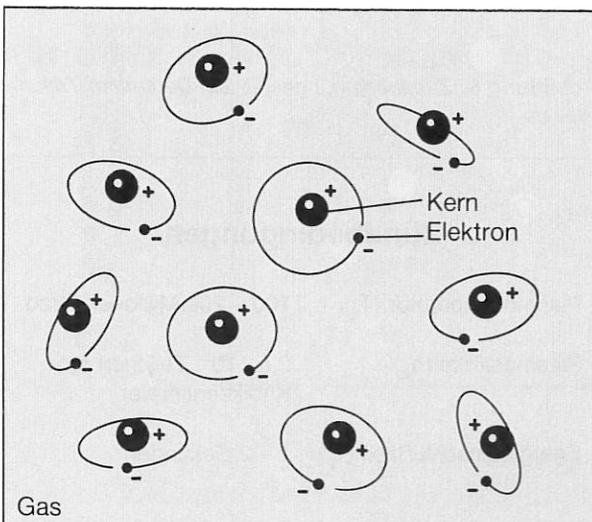


Abbildung 3: Die Kernbausteine sind von einer Atomsorte zur anderen verschieden stark aneinander gebunden. Durch Umordnung der Kernbausteine in fester verbundene Gruppierungen – entweder durch die Spaltung schwerer Kerne oder durch die Verschmelzung leichter Kerne wie Wasserstoff – können große Energiemengen freigesetzt werden.

dessen Atome in seine Bestandteile aufgetrennt sind, »ionisiert«. Ein solches Gas ist elektrisch leitend und wird wegen seiner von einem normalen Gas stark abweichenden Eigenschaften mit einem eigenen Namen »Plasma« benannt.

Abbildung 4: In einem Gas sind die Elektronen an die Atomkerne gebunden, in einem Plasma dagegen sind Elektronen und Kerne (Ionen) voneinander getrennt.



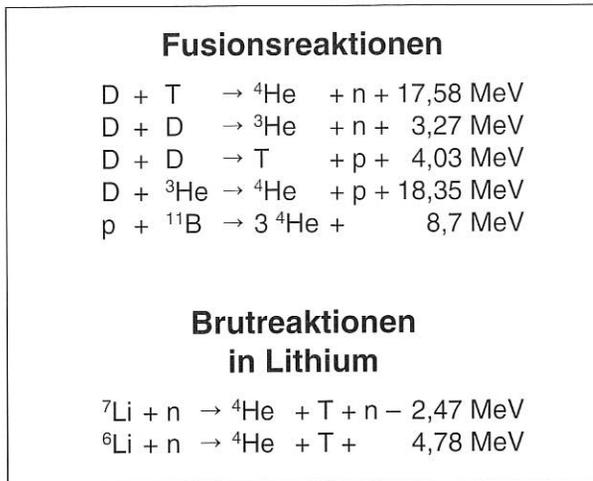


Abbildung 5: Verschiedene Fusionsreaktionen. Das für die DT-Fusion nötige Tritium kann aus Lithium im Reaktor erzeugt werden.

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 derzeitigen Experimente überwiegend auf die Deuterium-Tritium-Fusion ab. Immerhin muß auch in einem Deuterium-Tritium-Plasma 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.

Abbildung 6: Beim Zusammenstoß eines Deuterium- und eines Tritiumkernes bildet sich ein heliumartiger Zwischenkern, der anschließend in einen Heliumkern (ein Alpha-Teilchen) und ein Neutron zerfällt. Beide Reaktionsprodukte besitzen hohe Energie, die zur Plasmaheizung und zur Energieproduktion eines Reaktors genutzt werden soll.

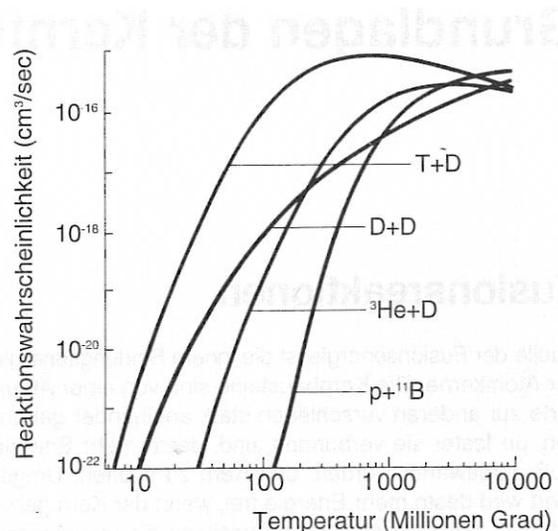
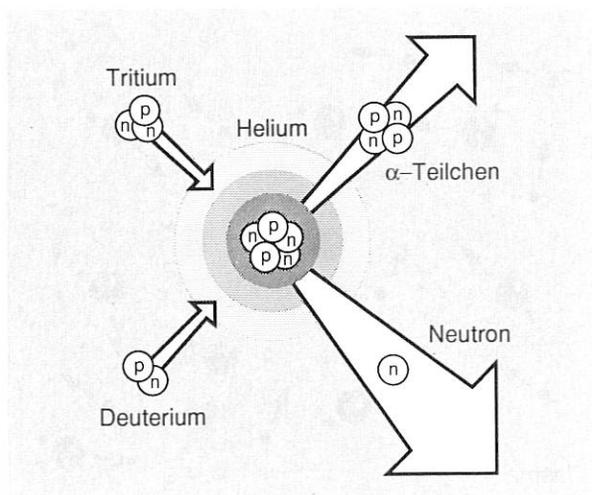


Abbildung 7: Die Wahrscheinlichkeit für eine Verschmelzungsreaktion hängt nicht nur von der Energie der Reaktionspartner ab, sondern auch von den Reaktionspartnern selbst. Die Deuterium-Tritium-Fusion (D-T) besitzt über einen großen Energiebereich eine weitaus größere Wahrscheinlichkeit als alle anderen Reaktionen. Prozesse wie die Proton-Bor-Reaktion (p-B), bei denen kein Neutron entsteht – oft als »reine« Fusion bezeichnet –, erfordern eine viel höhere Temperatur, bis sie mit ähnlicher Häufigkeit ablaufen wie die Deuterium-Tritium-Prozesse.

Zündbedingungen

Bei den gegenwärtigen Experimenten verzichtet man noch auf Tritium und arbeitet lediglich mit einfachem Wasserstoff oder Deuterium. 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

Abbildung 8: Zündbedingungen für ein Deuterium-Tritium-Plasma

Zündbedingungen	
Plasmatemperatur (T_{10})	100 – 200 Millionen Grad
Plasmadichte (n_{10})	$2,5 \cdot 10^{14}$ Teilchen pro Kubikzentimeter
Energieeinschlußzeit (τ_E)	1 – 2 Sekunden

Energie der dabei erzeugten Alphateilchen (Heliumkerne) ausreicht, die Temperatur des Plasmas aufrechtzuerhalten. Das Plasma brennt dann ohne äußere Energiezufuhr weiter, die Heizung von außen kann abgeschaltet werden.

Für die Zündung sind vor allem drei Eigenschaften des Plasmas von Bedeutung: die Temperatur, die Plasmadichte und die Energieeinschlußzeit, die ein Maß ist für die Güte der Wärme-Isolation des Plasmas. In einem Fusionsreaktor muß das Produkt aus diesen Werten eine Mindestgröße besitzen. Die günstigsten Bedingungen für Einschlußzeit und Dichte erhält man bei einer Temperatur von etwa 100 Millionen Grad. Dann fordert die Zündbedingung typische Einschlußzeiten von ein bis zwei Sekunden und Dichten von etwa 10^{14} Ionen pro Kubikzentimeter. Wegen dieser extrem niedrigen Dichte – 250 000fach dünner als die Lufthülle der Erde – besitzt ein gezündetes

Plasma trotz der hohen Temperatur eine kaum größere Leistungsdichte als eine normale Glühbirne.

Mittlerweile hat sich die Fusionsforschung nahe an die Zündung herangearbeitet (siehe Abbildung 9). Die weltweit besten Werte liefert das europäische Gemeinschaftsexperiment JET, das nur noch um einen Faktor acht von den Zündbedingungen entfernt ist. Mit diesen Ergebnissen wird die Extrapolation auf Reaktorverhältnisse möglich, was sich in den gegenwärtigen Planungen für einen Experimentalreaktor (ITER) niederschlägt.

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).

Abbildung 9: Ein Deuterium-Tritium-Plasma zündet, wenn das Fusionsprodukt aus Plasmadichte, Plasmatemperatur und Energie-Einschlußzeit einen bestimmten Minimalwert überschreitet. Wie die Abbildung zeigt, sind im Verlauf der Fusionsforschung die Experimente dem angestrebten Ziel bereits sehr nahe gekommen.

ALCATOR: Boston, USA

ASDEX: Garching, BRD

ASDEX Upgrade: Garching, BRD

ISAR 1: Garching, BRD

JET: Culham, Großbritannien

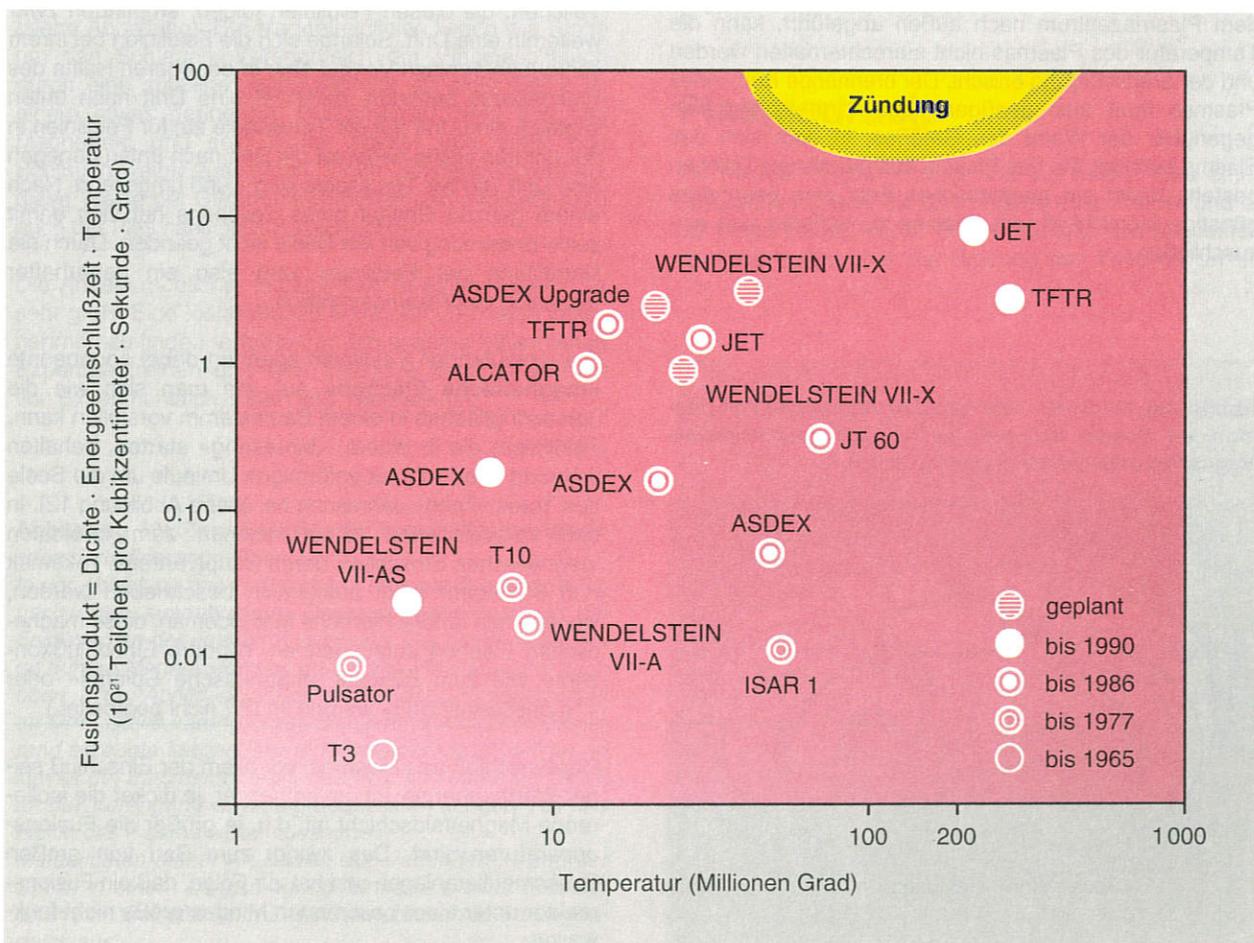
JT-60: Naka, Japan

Pulsator: Garching, BRD

T3, T10: Moskau, UdSSR

TFTR: Princeton, USA

WENDELSTEIN: Garching, BRD



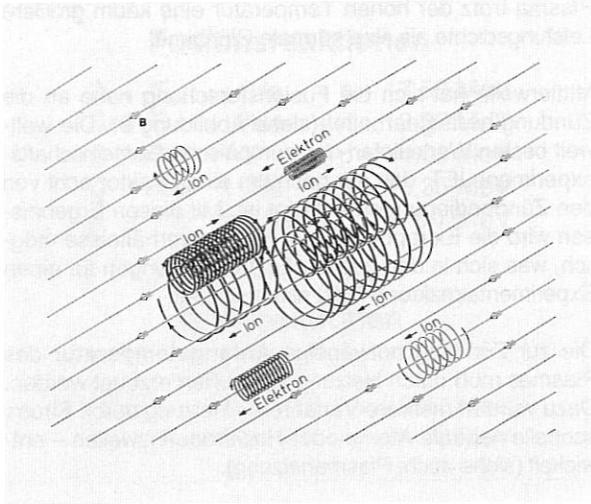
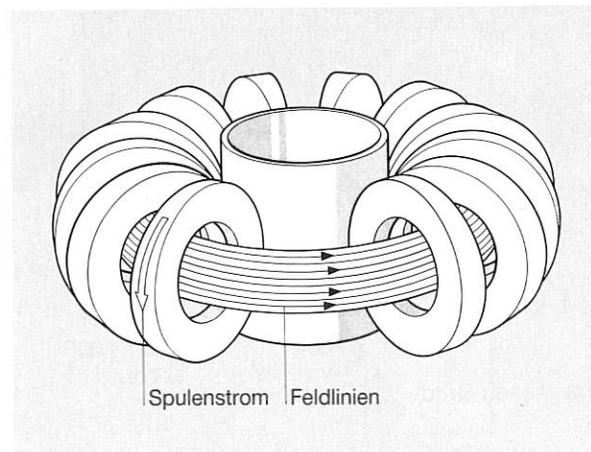


Abbildung 10: Geladene Teilchen bewegen sich spiralförmig um die Magnetfeldlinien. Der Radius der Spirale wird um so größer, je größer Masse und Geschwindigkeit der Teilchen und je kleiner die Stärke des Magnetfeldes ist.

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 Plasmazentrum 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.

Abbildung 11: Durch eine toroidale Anordnung von ringförmigen Spulen läßt sich ein in sich geschlossenes Magnetfeld ohne offene Enden herstellen.



Der Magnetische Einschluß

Geladene Teilchen – Ionen und Elektronen – werden in einem Magnetfeld bei Bewegungen senkrecht zur Magnetfeldrichtung auf Kreis- und Schraubenbahnen um die Feldlinien gezwungen. Die Teilchen sind auf diese Weise an die Feldlinien angebunden. In Längsrichtung der Magnetfeldlinien können sie sich dagegen unbeeinflusst bewegen. Ein Plasma kann also in einem geeignet geformten Magnetfeldkäfig eingeschlossen und von materiellen Wänden ferngehalten werden.

Um zu vermeiden, daß die Teilchen an den Polen des Magnetfeldes auf die Wand stoßen, werden durch Spulen Magnetfelder erzeugt, die ringförmig (toroidal) in sich geschlossen sind. Diese toroidalen Felder allein reichen jedoch nicht aus, um die Teilchen wirklich einzuschließen. Weil in einem Toroidalfeld die Feldstärke aus geometrischen Gründen nach außen hin absinkt, würden die Teilchen sehr schnell an die Wand getrieben. Die Feldänderung verursacht nämlich eine Drift der Teilchen über die Feldlinien hinweg nach oben oder unten entsprechend der positiven oder negativen Ladung der Teilchen. Diese Ladungstrennung wiederum erzeugt ein elektrisches Feld und dieses zusammen mit dem Magnetfeld eine Kraft, die die Teilchen nach außen an die Wand treibt.

Deshalb werden zum Einschluß des Plasmas Felder benutzt, deren Feldlinien nicht nur kreisförmig um die Torusachse laufen, sondern sich schraubenförmig um die Seele des Torus, die zentrale Magnetfeldlinie winden. Teilchen, die diesen Feldlinien folgen, empfinden zwar weiterhin eine Drift. Solange sich die Feldlinien bei ihrem schraubenförmigen Verlauf aber in der oberen Hälfte des Plasmatorus befinden, bedeutet eine Drift nach unten zugleich eine Drift auf die Torusseele zu; für Feldlinien in der unteren Hälfte bedeutet die Drift nach unten dagegen eine Drift von der Torusseele weg – und umgekehrt. Nach einem ganzen Umlauf eines Teilchens hat sich damit seine Entfernung von der Seele nicht geändert. Durch die Verdrillung der Feldlinien wird also ein dauerhafter Einschluß des Plasmas möglich.

Die umlaufenden Feldlinien spannen dabei 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 (siehe Abbildung 12). In den verschiedenen Konfigurationen zum toroidalen magnetischen Einschluß, deren Hauptvertreter Tokamak und Stellarator noch ausführlich beschrieben werden, wendet man unterschiedliche Methoden an, diese magnetischen Flächen aufzuspannen. (Andere Einschlußkonzepte wie zum Beispiel »magnetische Spiegel« oder »Trägheitseinschluß« werden im IPP nicht bearbeitet.)

Der Einschluß des Plasmas, vor allem der Einschluß seiner Wärmeenergie, ist um so besser, je dicker die isolierende Magnetfeldschicht ist, d.h. je größer die Fusionsapparaturen sind. Das zwingt zum Bau von großen Experimentieranlagen und hat zur Folge, daß ein Fusionsreaktor unter einer bestimmten Mindestgröße nicht funktioniert.

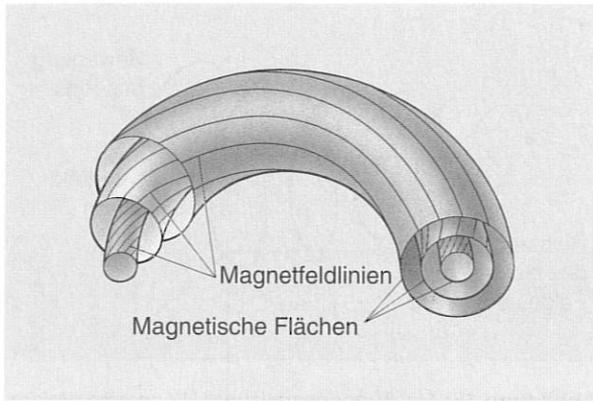


Abbildung 12: Die von den Magnetfeldlinien aufgespannten magnetischen Flächen. Die Abbildung zeigt das Magnetfeld eines Tokamaks. Die Feldlinien auf den inneren Flächen drehen sich öfter um die Seele – die zentrale Ringlinie – als Feldlinien auf den äußeren Flächen: Das Feld hat eine Verscherung.

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. Ein Beispiel für eine Instabilität liefert etwa ein Plasma, in dem ein elektrischer Strom fließt, dessen Magnetfeld das Plasma in einem geraden zylindrischen Schlauch zusammenhält (siehe Abbildung): 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 13: 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 Abbildung unten 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 Gegen-
druck aus. ▶

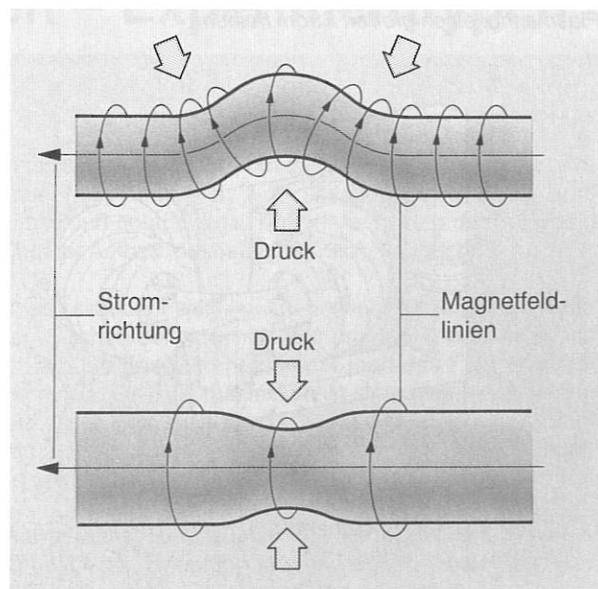
Stöße und Verunreinigungen

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 Brennmaterial Wasserstoff und strahlen daher sehr viel Energie in Form von Licht ab. Auf diese Weise kühlen sie das Plasma ab, verdünnen das Plasma und verringern so die Fusionsausbeute. Die Kontrolle der Wechselwirkungen zwischen Plasma und Wand zur Erzeugung »sauberer« Plasmen ist eine der großen Aufgaben der Fusionsforschung und wird im IPP in den Experimenten ASDEX und ASDEX Upgrade studiert.

Plasmadruck

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 5 bis 10 bar. Dieser Plasmadruck wird von dem Magnetfeldkäfig aufgefangen, die Gefäßwände verspüren davon nichts.

Das Verhältnis von Plasmadruck zu Magnetfeldruck wird mit dem griechischen Buchstaben Beta (β) 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 Betawerte von mindestens einigen Prozenten garantieren.

Plasmaheizung

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

Die Stromheizung: 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 – wie in einer elektrischen Kochplatte – 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

Abbildung 14: 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.

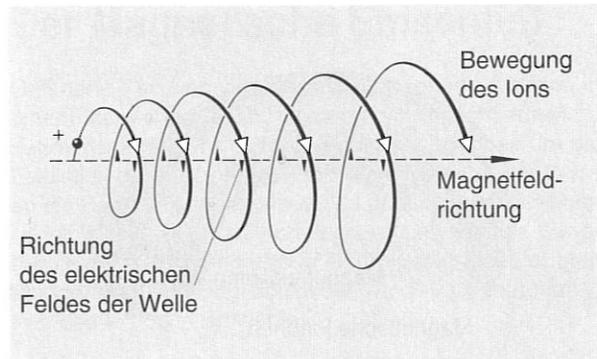
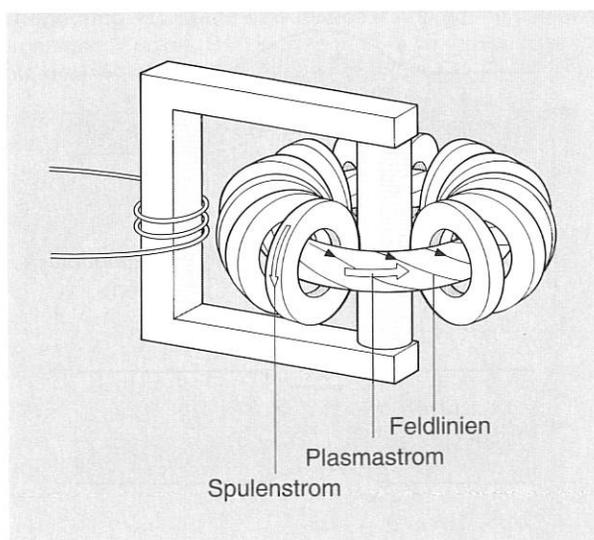


Abbildung 15: Hochfrequenzheizung: Wenn eine elektromagnetische Welle die gleiche Drehfrequenz hat wie ein Ion im Magnetfeld, kann das Ion aus dem elektrischen Feld der Welle Energie aufnehmen.

Aufgabe der Sekundärwicklung übernimmt: Solange in der Primärwicklung des Transformators der Strom ansteigt, wird auch im Plasma ein Strom getrieben. Da der Plasmastrom seine Richtung nicht umkehren und nicht verschwinden soll, kann immer nur eine Halbwelle der induzierten Wechselspannung ausgenutzt werden. Der über einen Transformator getriebene Strom fließt daher nur pulsweise. In ASDEX Upgrade sollen bis zu 2 Millionen Ampere erzeugt werden, JET kann für mehrere Sekunden einen Strom von über 5 Millionen Ampere aufrechterhalten.

Die Hochfrequenzheizung: Die Ionen und Elektronen eines Plasmas im Magnetfeld führen verschiedene 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.

Die Neutralteilchenheizung: 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 16): In dem Neutralteilcheninjektor werden die Ionen zunächst in einer Ionenquelle erzeugt, dann durch Beschleunigungsgitter abgesaugt und beschleunigt. Damit die schnellen Ionen durch das Magnetfeld in das Plasma eindringen können, müssen sie anschließend wieder neutralisiert werden. Da dies nur bei einem Teil der Ionen gelingt, werden die nicht neutralisierten Ionen mit einem magnetischen Ablensystem aus dem Strahl entfernt. Sie werden in einen Ionensumpf abgelenkt, wo ihre Energie aufgenommen – später vielleicht einmal zurückgewonnen – wird. Die neutralisierten Teilchen dringen in das Plasma ein und werden dort über Stöße wiederum ionisiert. Sie sind nun als Ionen im Magnetfeld eingefangen und können über weitere Stöße ihre Energie an die Plasmateilchen abgeben.

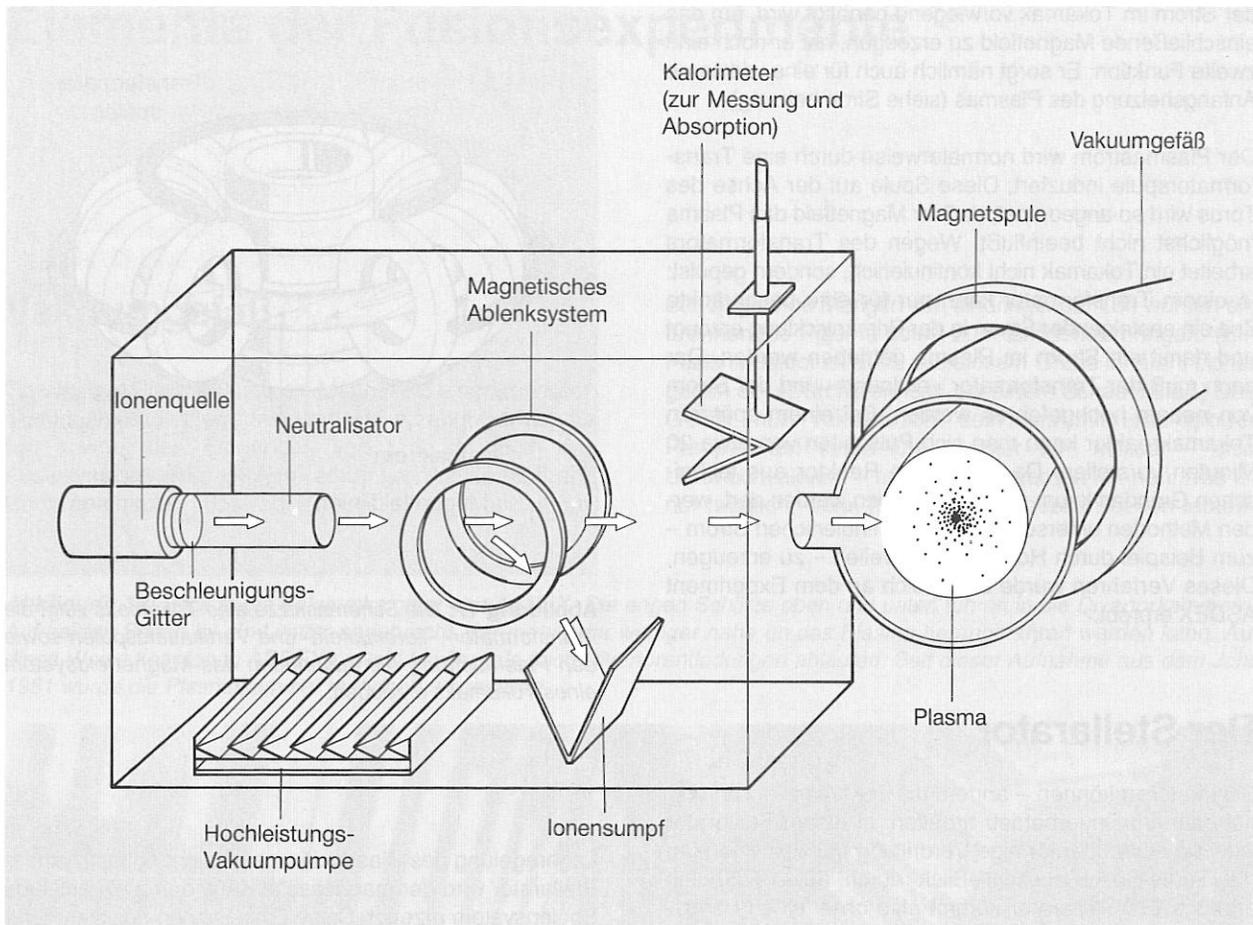


Abbildung 16: Neutralteilchenheizung: In dem Injektor werden in einer Ionenquelle Ionen erzeugt, dann beschleunigt und neutralisiert. Die schnellen Teilchen dringen in das Plasma ein, wo sie ihre Energie über Stöße an die Plasmapartikel weitergeben.

Magnetfeldkonfigurationen – Experimenttypen

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

Der Tokamak

Um die magnetischen Flächen des Magnetkäfigs aufzubauen, schließen in einem Tokamak zwei sich überlagernde Magnetfelder das Plasma ein: erstens ein toroidales Feld, das durch äußere Spulen erzeugt wird, und zweitens das Feld eines im Plasma fließenden Stroms. Dessen Feldlinien schließen sich kreisförmig um den Strom. In dem kombinierten Feld laufen die Feldlinien

dann schraubenförmig um die Seele des Torus, die zentrale Magnetfeldlinie. Auf diese Weise wird die zum Einschluß des Plasmas nötige Verdrillung der Feldlinien und der Aufbau magnetischer Flächen erreicht.

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 verschereungsfrei. Ein Tokamakfeld weist stets eine Verscherung auf. Hier drehen sich die Feldlinien auf den inneren Magnetfeldflächen öfter um die Seele als auf den äußeren (siehe Abbildung 12).

Außer dem Toroidalfeld und dem Feld des Stromes benötigt der Tokamak noch ein drittes, vertikales Feld, das die Lage des Stromes im Plasmagefäß fixiert. Obwohl

der Strom im Tokamak vorwiegend benötigt wird, um das einschließende Magnetfeld zu erzeugen, hat er noch eine zweite Funktion: Er sorgt nämlich auch für eine wirksame Anfangsheizung des Plasmas (siehe Stromheizung).

Der Plasmastrom wird normalerweise durch eine Transformatorspule induziert. Diese Spule auf der Achse des Torus wird so angeordnet, daß ihr Magnetfeld das Plasma möglichst nicht beeinflusst. Wegen des Transformators arbeitet ein 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 späteren 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. Dieses Verfahren wurde erfolgreich an dem Experiment ASDEX erprobt.

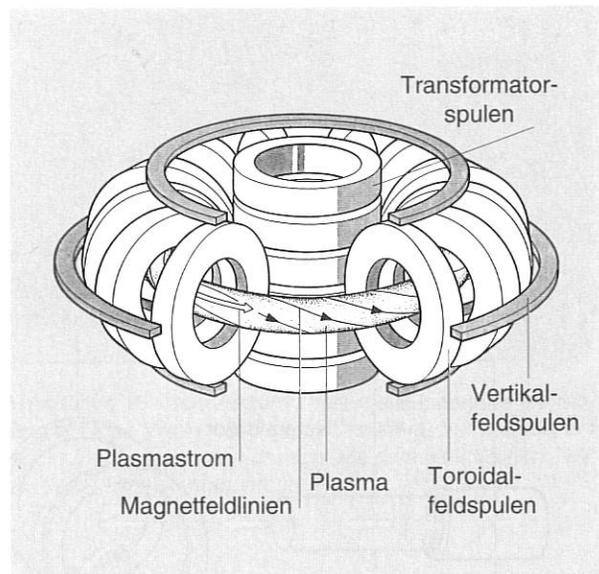
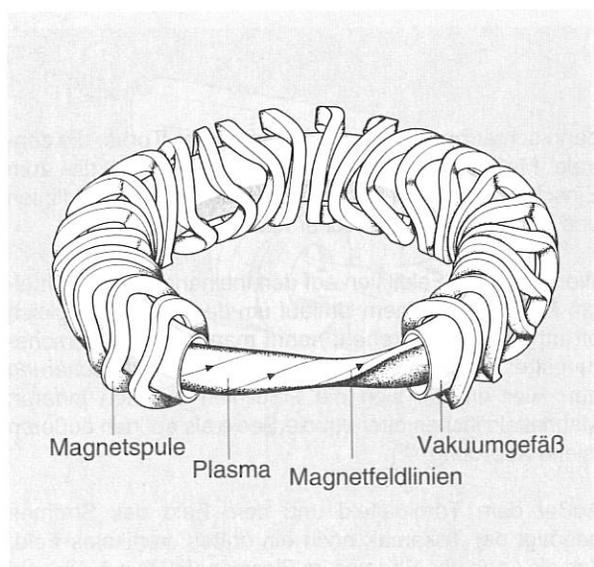


Abbildung 17: Die Schemaskizze eines Tokamaks zeigt die Transformator-, Toroidal-feld- und Vertikal-feldspulen sowie den Plasmastrom, die zusammen das Magnetfeldsystem eines Tokamaks erzeugen.

Der Stellarator

Stellaratoren können – anders als Tokamaks – von vornherein im Dauerbetrieb arbeiten: In einem Stellarator wird die schraubenförmige Verdrillung der Feldlinien um die Torus-Seele ausschließlich durch äußere Spulen erzeugt. Ein Stellarator kommt also ohne einen Längsstrom im Plasma und damit ohne Transformator aus. Er kann daher im Prinzip stationär arbeiten. Stromgetriebene Instabilitäten (Plasmaabbrüche) können nicht auftreten und auch ein Vertikalfeld – wie beim Tokamak – zur

Abbildung 18: Die schematische Skizze eines Stellarators zeigt ein System aus nicht ebenen Einzelspulen. Ihre spezielle Form bewirkt die Drehung der Feldlinien um die Seele, ohne daß ein Strom im Plasma fließen muß.



Lageregelung des Plasmastroms ist nicht nötig. In einem Stellarator wird der magnetische Käfig durch ein einziges Spulensystem erzeugt. Seine Einzelspulen besitzen dafür eine kompliziertere, technisch allerdings ohne besondere Schwierigkeiten herstellbare Form. (Beispiele für Stellaratorspulen finden sich in den Kapiteln über WENDELSTEIN VII-AS und WENDELSTEIN VII-X.)

Unter dem immer mehr an Bedeutung gewinnenden Gesichtspunkt der Reaktortechnologie betrachtet, könnten Stellaratoren eine technisch einfachere Lösung sein als Tokamaks. Auf theoretischem Wege ist diese Frage nicht zu beantworten, sie experimentell zu entscheiden, ist das Ziel der WENDELSTEIN-Experimente des IPP.

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 bei einem Umlauf im Ring um die Seele gedreht hat. Ist dies eine rationale Zahl, bedeutet dies, daß die Feldlinie wieder in sich zurückläuft. Beispielsweise bedeutet eine Rotationstransformation von $1/3$, daß die Feldlinie nach drei Umläufen um den Torus in sich zurückläuft. Ist die Rotationstransformation nicht rational, laufen die Feldlinien beliebig oft auf ihrer magnetischen Fläche um, ohne jemals wieder an dieselbe Stelle im Torus zu kommen. In einem Magnetfeld ohne Verscherung hätten 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 der Plasmaeinschluß stark von der Rotationstransformation des Feldes abhängt. Gutes Einschlußverhalten stellt sich ein, wenn man niedrige rationale Werte der Rotationstransformation wie $1/2$, $1/3$, $2/3$, $1/4$, ... vermeidet. Wesentliche Beiträge zur Klarstellung dieses Sachverhaltes lieferten die WENDELSTEIN-Experimente des IPP.

Elemente der Fusionsexperimente

Vakuumgefäß

Obwohl das Plasma durch ein Magnetfeld eingeschlossen wird, muß es in einem Vakuumgefäß erzeugt werden. Es soll sowohl das Eindringen von Luft als auch das Austreten des Brennstoffs – einfacher Wasserstoff und Deuterium, später das radioaktive Tritium – verhindern.

Schon geringe Mengen von eindringender Luft würden ein brennendes Plasma sofort zum Erlöschen bringen. (Ein Fusionsreaktor ist auch aus diesem Grund inhärent sicher gegen ein »Durchbrennen« bei einem Schadensfall.) Das Gefäß muß vakuumdicht sein und mit Hilfe großer Pumpen auf einen Druck unter 10^{-8} Millibar – also Ultrahochvakuum – ausgepumpt werden können. Das ist nur möglich, wenn für das Gefäß ausschließlich Materi-

Abbildung 19: Blick in die Vakuumkammer von ASDEX: Die engen Schlitzte oben und unten führen in die Divertorkammern. Auf beiden Seiten ist ein Limiter angebracht, der mehr oder weniger nahe an das Plasma herangefahren werden kann. Auf diese Weise konnten in ASDEX sowohl Limiter- als auch Divertorentladungen ablaufen. Seit dieser Aufnahme aus dem Jahr 1981 wurde die Plasmakammer mehrfach umgestaltet.



alien mit niedrigem Dampfdruck verwendet werden, die auch bei hohen Temperaturen von 100 bis 300 Grad ausgeheizt werden können.

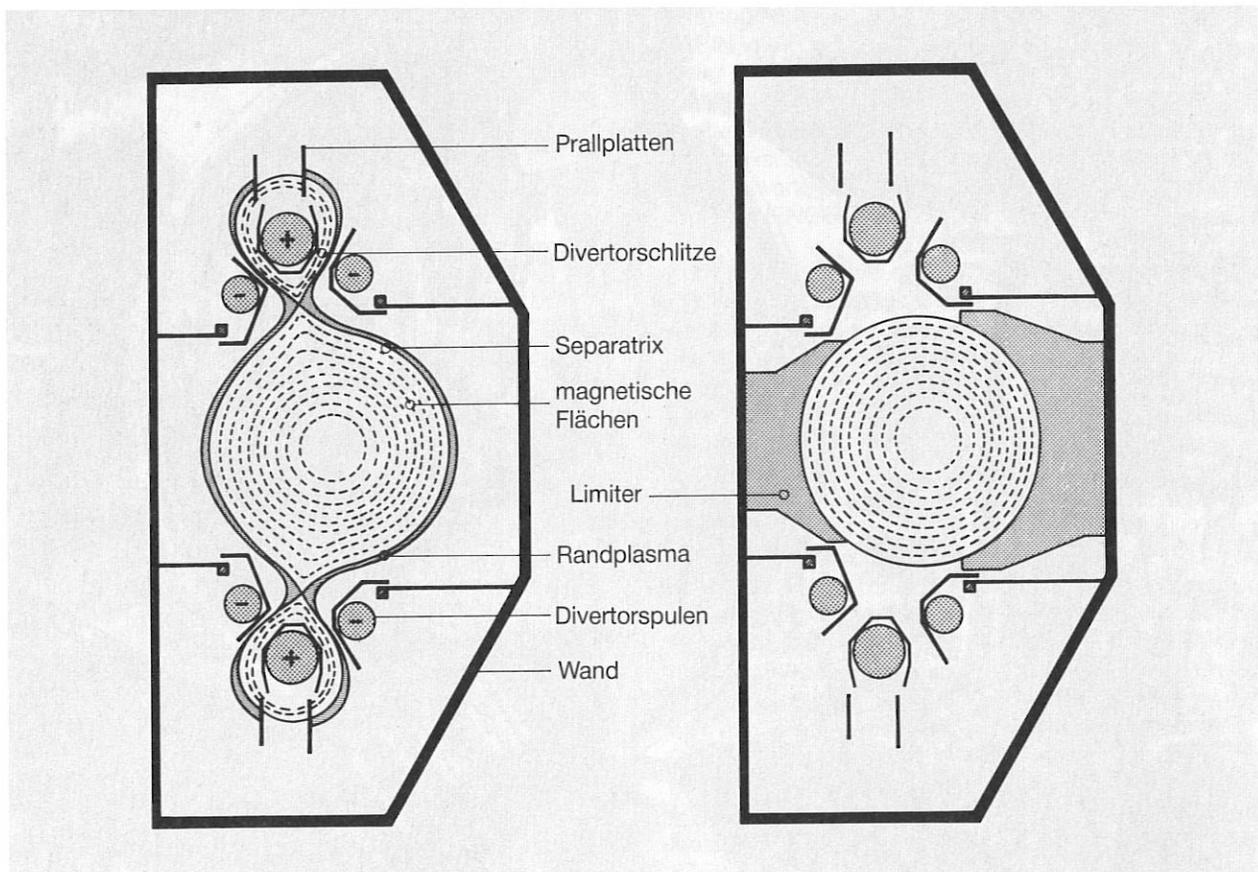
Da für die Experimente, die im IPP betrieben, gebaut oder geplant werden, kein Tritium benötigt wird, müssen keine Vorkehrungen gegen das Entweichen von Tritium getroffen werden. Anders ist dies bei Experimenten wie NET oder ITER, die mit einem gezündeten Plasma und daher auch mit Tritium arbeiten werden. 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 Stützen, die angeschweißt oder über Metalledichtungen mit dem Gefäß verbunden werden.

Limitier

Das Plasma in einem toroidalen Magnetfeld breitet sich wegen der Stöße der Teilchen so weit aus, bis es die Wand berührt. 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 kontrollierten Begrenzung des Plasmas werden daher in das Plasmagefäß »Begrenzer« (Limitier) eingebaut. Sie ragen aus der Gefäßwand in das Plasma hinein und sind so ausgelegt, daß sie die zu erwartenden Energiemengen ungefährdet aufnehmen können. Trotzdem ist es unvermeidlich, daß bei dem Kontakt des Plasmas mit Wand und Limitier Atome – zum Beispiel der Elemente Eisen, Nickel, Chrom oder Sauerstoff – herausgelöst werden und in das Plasma eindringen. Je höher die Ladungszahlen dieser Verunreinigungen sind, desto mehr Licht strahlen sie ab und desto mehr Energie entziehen sie dem Plasma. Limitier werden daher möglichst aus Materialien mit niedrigen Ladungszahlen hergestellt, zum Beispiel aus Kohlenstoff.

Abbildung 20: Zwei Querschnitte durch das ASDEX-Gefäß und die magnetischen Flächen des Feldes: rechts mit Limitier, links mit Divertor. Der Limitier 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.



Magnetischer Limiter

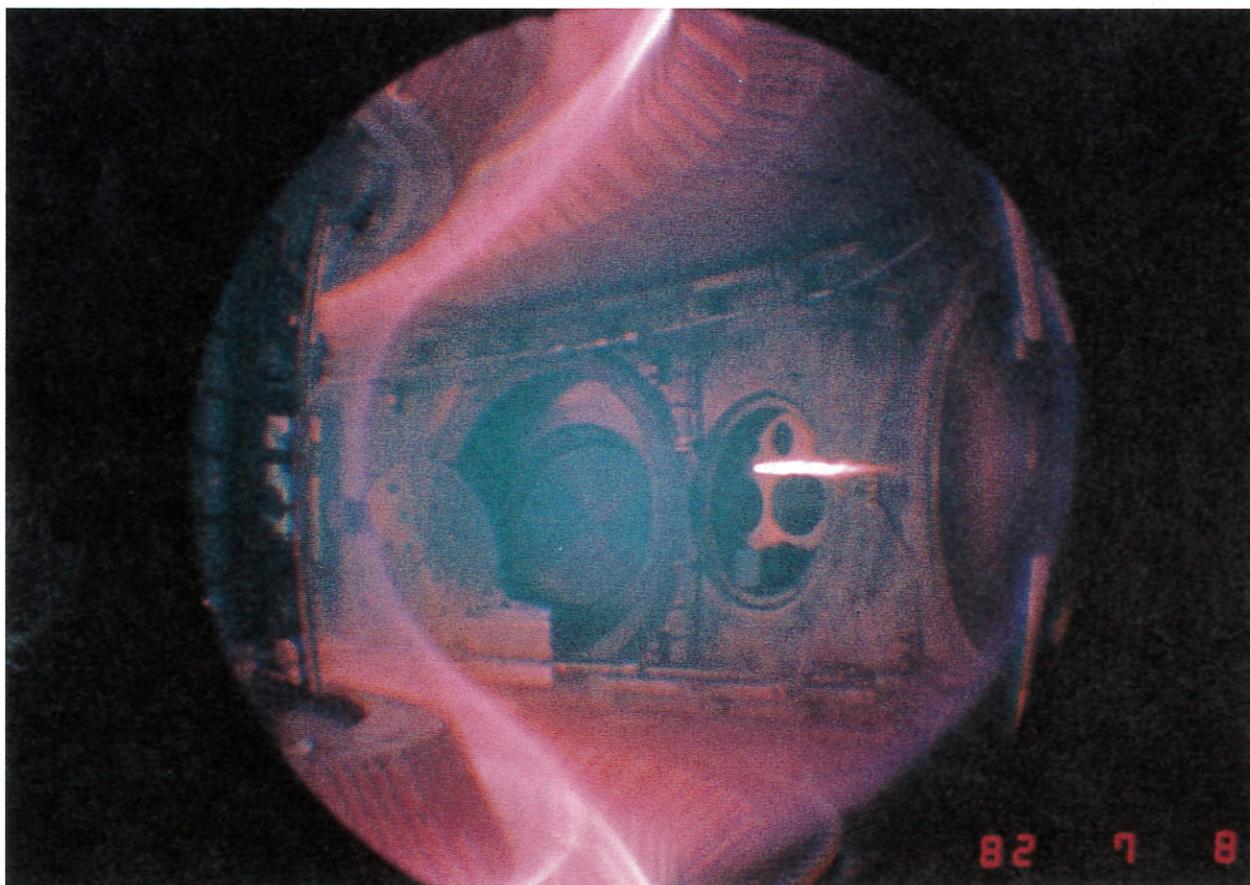
Leistungsfähiger als Limiter-Experimente sind Anordnungen, die den direkten Kontakt des eingeschlossenen Plasmas mit der Wand vermeiden. Dies wird möglich, wenn das Magnetfeld so gestaltet wird, daß auf einen geschlossenen äußersten »Jahresring« nur noch offene Magnetflächen folgen, deren Feldlinien 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. Dies erklärt auch die beobachtete Verbesserung des Einschlusses in Experimenten mit magnetischem Limiter.

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 Schlitzte 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 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. Man geht deshalb heute davon aus, daß ein Divertor für einen späteren Fusionsreaktor notwendig ist.

Abbildung 21: Blick in das Plasmagefäß von ASDEX während einer Entladung: Da ein heißes Wasserstoffplasma nicht im sichtbaren Bereich des Spektrums leuchtet, ist nur das relativ kalte Plasma am Rand zu sehen, das oben und unten in die Divertorschlitze läuft. Die helle Spur rechts ist die Bahn eines Pellets, das im Plasma verdampft, das Plasma dadurch abkühlt und sichtbar macht.



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 Druck im Inneren die Teilchen nach außen zu bringen.

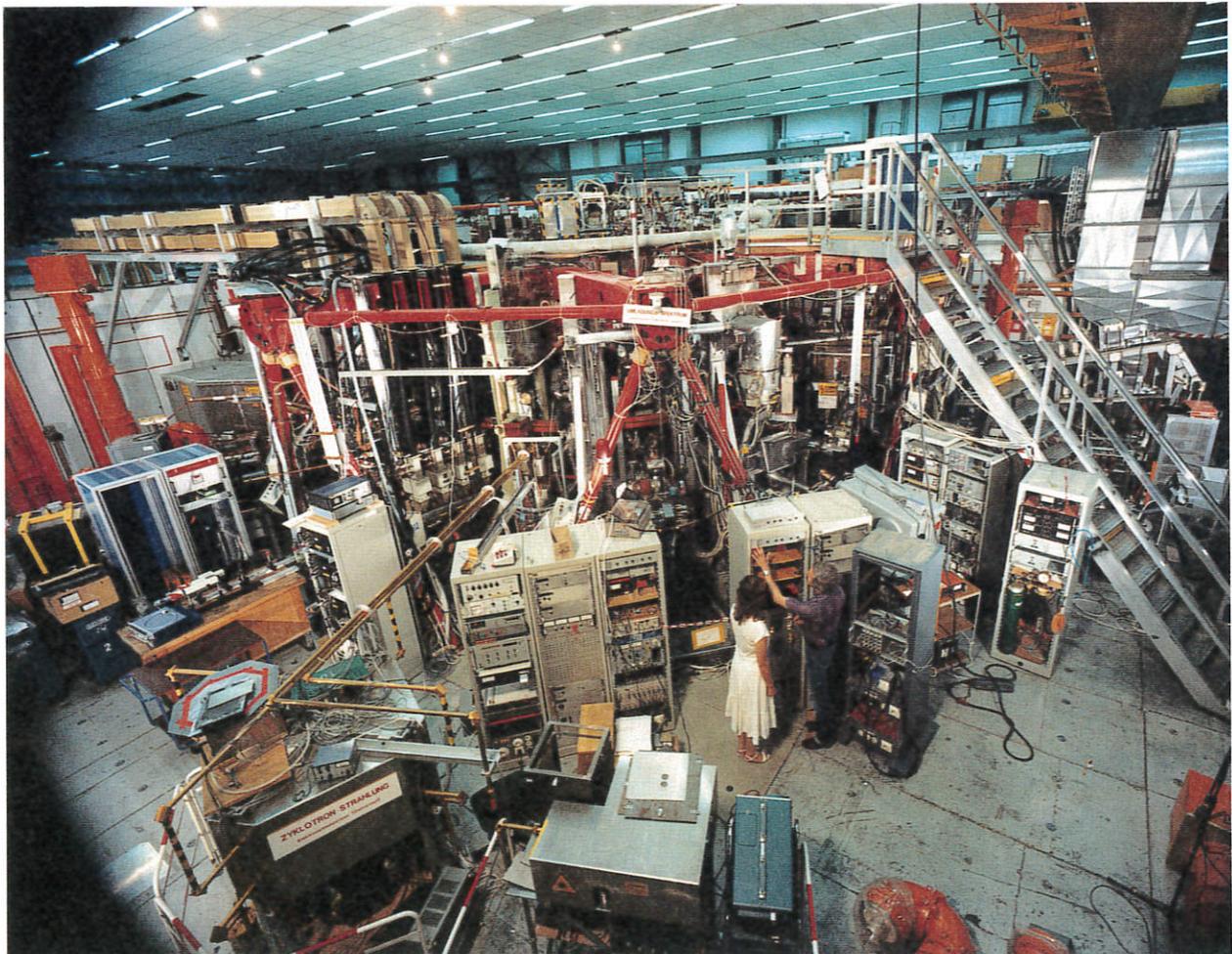
Neben dem Gaseinlaß vom Gefäßbrand aus erscheint die Pelletinjektion als besonders geeignete Nachfüllungsmethode. Dabei wird Deuterium – später vielleicht auch Tritium – so stark abgekühlt, bis es in festen Zustand übergeht und Kügelchen (Pellets) von wenigen Millimetern Durchmesser geformt werden können.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

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 äußern 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 Verfahren 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 beeinflusst werden und so über seine Eigenschaften Auskunft geben können. Auch Teilchenstrahlen werden zur Diagnose verwendet.

Abbildung 22: Zahlreiche Diagnostiken und Heizeinrichtungen umgeben das Fusionsexperiment ASDEX.



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 Spiralbahnen um die Magnetfeldlinien bewegen, strahlen dabei Wellen dieser Frequenz und deren Oberwellen ab. In normalen Fusionsplasmen hängt die Intensität der zweiten Oberwelle dieser Strahlung nur von der Temperatur ab, die auf diese Weise meßbar wird. Darüberhinaus kann man bei geeigneter Beobachtung aus der Frequenz der Strahlung auf die Magnetfeldstärke und hieraus 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 deren Dichte bestimmen. Mit geeichten Detektoren, die das Streulicht des Laserstrahls von verschiedenen Orten des Plasmas aufsammeln, erhält man so ein Profil der Elektronendichte über den Plasmaquerschnitt. Da das benötigte Laserlicht gepulst erzeugt werden muß, 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 Upgrade eingesetzte Laser kann bis zu 120 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 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 Luft geschickt. Bringt man die beiden Teilwellen wieder zusammen, kann man aus dem entstehenden Interferenzmuster auf die Änderung der Wellengeschwindigkeit 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 Wasserstoffionen 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 die Ionen die gleiche Temperatur besitzen wie die Elektronen. Da aber die verschiedenen Heizmethoden entweder die Ionen oder die Elektronen heizen, können sich bei Fusionsplasmen deutliche Temperaturunterschiede ergeben. Da die Ionen eine sehr viel größere Masse besitzen als die Elektronen, kann man ihre Temperatur nicht mit der Thomsonstreuung messen. Die Ionen des Plasmas entreißen allerdings, wenn sie bei einem Stoß einem neutralen Atom nahekommen, diesem gelegentlich ein Elektron und werden dadurch selbst 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.

Weder die von außen zugeführten Rohbrennstoffe für Fusionsreaktoren – Deuterium und Lithium – noch ihr Reaktionsprodukt Helium sind radioaktiv. Sicherheitsüberlegungen werden jedoch nötig im Zusammenhang mit dem im Reaktor aus Lithium erzeugten radioaktiven Tritium und der Aktivierung von Brennkammerwand und Brutmantel durch die freigesetzten energiereichen Neutronen. Wie intensiv diese Aktivierung ausfällt, hängt sehr stark von den Materialien ab, auf die die Neutronen auftreffen.

Tritium, die schwerste und einzige radioaktive Variante des Wasserstoffs, besitzt eine Halbwertszeit von 12,3 Jahren. Seine radioaktive Strahlung – Beta-Strahlung, das heißt Elektronen – ist zu energieschwach, um menschliche und tierische Haut durchdringen zu können. Für Lebewesen wird sie dann schädlich, wenn das Tritium durch Einatmen, Essen, Trinken oder Diffusion durch die Haut vom Körper aufgenommen wird. Einmal in den Körper gelangt, besitzt Tritium dort eine effektive biologische Halbwertszeit von elf Tagen. Gelangt das Tritium in bereits organisch gebundener Form in den Körper, so erhöht sich die Halbwertszeit auf 30 Tage. 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.

Im Gegensatz zur Kernspaltung, bei der die anfallende Radioaktivität durch die Spaltprodukte – zum Beispiel Cäsium oder Jod – naturgesetzlich mit der produzierten Energie verknüpft ist und zwangsläufig entsteht, kann man bei der Fusion durch Verringerung der im Reaktor vorhandenen Tritiummenge und durch die Verwendung von geeigneten Baumaterialien für den Reaktor die Gefahr durch radioaktive Stoffe beeinflussen und ganz wesentlich reduzieren.

Einem Fusionsreaktor kann man bereits heute die folgenden günstigen Eigenschaften zusprechen:

– In einem Fusionsreaktor gibt es keine Kettenreaktion

oder ähnliche Leistungsanstiege, die zum »Durchgehen« des Reaktors führen können.

– Die in einem Fusionsreaktor auftretenden radioaktiven Substanzen – Tritium sowie aktivierte Bauteile – haben ein relativ niedriges biologisches Gefährdungspotential.

– Langfristig sieht man die Möglichkeit, Menge und Aktivität der entstehenden radioaktiven Stoffe durch geeignete Materialentwicklung ganz erheblich zu vermindern.

Radioaktive Belastung im Normalbetrieb

Da das sehr flüchtige Tritium erst an Ort und Stelle im Brutmantel aus Lithium erzeugt wird, läuft der Brennstoff für die Fusion nur im Inneren des Reaktors um. Sicherheitstechnisch ist dies sehr von Vorteil. Insgesamt wird ein Fusionskraftwerk eine Tritiummenge in der Größenordnung mehrerer Kilogramm enthalten, wovon 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 nimmt man an, daß im Normalbetrieb nicht mehr als zwei Gramm Tritium pro Jahr aus dem Reaktor entweichen werden. Zum Vergleich: Die im Jahre 1985 weltweit in der Erdatmosphäre 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 Bauteile besitzen – bei den heute verfügbaren Stahlsorten – Halbwertszeiten im wesentlichen zwischen 1 und 100 Jahren. Sie sind alle als feste Metalle in die innere Reaktorkonstruktion eingebunden. Auch Korrosionsprodukte spielen hier keine große Rolle, so daß die aktivierten Bauteile im Normalbetrieb kaum zur Freisetzung von Radioaktivität an die Umwelt beitragen.

Alle Freisetzungen zusammengenommen bedeuten – berechnet für eine Person, die sich ständig in einem Kilometer Entfernung vom Reaktor aufhält und alle Nahrungsmittel aus unmittelbarer Reaktorumgebung bezieht – eine maximale Dosis von zwei Millirem pro Jahr. Dies entspricht etwa einem Prozent der natürlichen radioaktiven Belastung von etwa 200 Millirem in Deutschland und liegt damit deutlich unterhalb der Dosischwankung der natürlichen Radioaktivität von Ort zu Ort.

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 etwa einem Gramm – sehr klein und reicht deshalb nur für hundert Sekunden Brenndauer aus.

Die Leistungsdichten im Plasma und Blanket sind mit etwa 3 bzw. 20 Watt pro Kubikzentimeter gering. Sie entsprechen in etwa der Leistungsdichte einer normalen Glühbirne. Darüberhinaus bringt jede Änderung der Betriebsbedingungen über Plasmainstabilitäten den Brennvorgang sehr schnell 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. Wichtig ist hierbei die Entscheidung, als Brutmaterial kein reines Lithium in flüssiger Form zu verwenden.

Die wesentlichste Folgerung aus diesen naturgesetzlich gegebenen Eigenschaften eines Fusionsreaktors ist: Der Reaktor kann so konstruiert werden, daß er keine Energiequellen enthält, die seine Sicherheitshülle von innen zerstören könnten. Im Rahmen von Studien zu möglichen Störfällen und ihren Folgen werden diese grundsätzlichen Eigenschaften zunehmend genauer untersucht. Viele technische Details des zukünftigen Reaktors sind heute noch nicht festgelegt. Die Ergebnisse der Analysen, die fortwährend die Planung des Reaktors beeinflussen werden, sollen zunächst vor allem dazu dienen, mögliche Störfallursachen zu entdecken und durch passive Mechanismen auszuschalten. Die heutigen Angaben über Störfälle sind daher bezüglich der Zahlenangaben noch vorläufig, aller Voraussicht nach aber grundsätzlich richtig.

Eine Gefahrensituation wäre gegeben, wenn durch einen Unfall Tritium oder aktivierte Baumaterialien in die Reaktorhalle freigesetzt würden. Da der Reaktor seine Sicherheitshülle von innen nicht durchbrechen kann, hätte ein solcher Unfall geringe Auswirkungen nach außen. Unterstellt man trotzdem ein Versagen der Sicherheitshülle – etwa durch äußere Einwirkungen – so erwartet man, daß auch im ungünstigsten Fall nicht mehr als 200 Gramm Tritium freigesetzt werden können. Beim Ausströmen hätte diese kurzfristig freigesetzte Tritiummenge unter ungünstigsten Wetterbedingungen in einem Kilometer Entfernung, das heißt am Zaun der Anlage, eine Belastung von etwa zehn Rem zur Folge. Ein Vergleichswert: Die deutsche Regelung für kerntechnische Anlagen sieht für beruflich strahlenexponierte Personen einen Grenzwert von fünf Rem pro Jahr vor.

Aktivierte Baumaterialien könnten bei einem Unfall entweder nach einer starken örtlichen Überhitzung als Metallstaub oder nach längerem Ausfall der Kühlung als flüchtige Oxide freigesetzt werden. Darüber hinaus müßte die Rückhaltefunktion aller Barrieren gestört sein. Es ist heute noch nicht bekannt, wieviel festes Material auf diese Weise mobilisiert werden und in das Reaktor-Sicher-

heitsbehältnis gelangen könnte. Weil sich diese Freisetzen zunächst innerhalb der Sicherheitshülle ablagern, kann man annehmen, daß auch im Falle eines unterstellten Lecks in der Sicherheitshülle nur begrenzte Aktivitätsmengen in die Umgebung gelangen. Genauere Untersuchungen dieser Zusammenhänge sind im Gange. Insbesondere sollen sie Richtlinien für eine Konstruktion des Reaktors liefern, die eine möglichst hohe passive Sicherheit garantiert.

Abfälle

Während der etwa 30jährigen Lebenszeit der Anlage wird die erste Wand und das Blanket aufgrund der hohen Belastung und des Abbrandes etwa viermal ausgetauscht werden. Zusammen mit den aktivierten Reaktorteilen, die nach Betriebsende zurückbleiben, produziert ein Fusionsreaktor, der die heute gebräuchlichen Stahlsorten benutzt, insgesamt also schätzungsweise 15000 Kubikmeter an radioaktivem Abfall. Es liegt nahe, diesen Abfall nach Menge und Qualität mit dem radioaktiven Abfall eines Spaltreaktors zu vergleichen: Die zu erwartende Abfallmenge ist etwa fünfmal so hoch wie in einem Spaltungsreaktor; in seinen Eigenschaften wird Fusionsabfall jedoch ungleich günstiger sein als Spaltabfall. So sind die Halbwertszeiten der wesentlichen Fusionsrückstände bedeutend kleiner – 1 bis 100 Jahre gegenüber 100 bis 10000 Jahren im Falle der Kernspaltung. Das biologische Gefährdungspotential der Fusionsabfälle ist im Vergleich zu Spaltabfall nach 100 Jahren bereits 5000fach geringer, d.h. es ist dann nur noch etwa zehnmal größer als das Gefährdungspotential der Asche eines Kohlekraftwerkes.

Diese Vorzüge lassen sich noch erheblich steigern, wenn anstelle der jetzt in Betracht gezogenen üblichen Stahlsorten für die erste Wand und das Blanket spezielle Materialien entwickelt werden können. Man denkt dabei an Stähle ohne störende Beimengungen, wie zum Beispiel Nickel und Molybdän, oder an nichtmetallische Baumaterialien wie Silizium-Carbid. Bei günstiger Entwicklung könnte ein Teil der Materialien sogar wieder verwendet werden.

Es ist noch unbekannt, ob es langfristig gelingen kann, anstelle der Deuterium-Tritium-Fusion andere Fusionsreaktionen technisch nutzbar zu machen, bei denen Tritiumherstellung im Reaktor und Neutronenaktivierung noch einmal stark vermindert werden oder nahezu ganz verschwinden.

Ergebnisbericht des IPP

Arbeitsbereiche des Instituts für Plasmaphysik

Das Institut ist in acht wissenschaftliche Bereiche aufgliedert, fünf vorwiegend experimentelle, zwei theoretische sowie den Bereich Informatik. Der Wissenschaftliche Direktor des Instituts ist Prof. Dr. Klaus Pinkau.

Der Bereich **Experimentelle Plasmaphysik 1** unter Leitung von Prof. Dr. Michael Kaufmann betreibt das Experiment ASDEX Upgrade und entwirft und baut Diagnostiken für das europäische Gemeinschaftsexperiment JET. Der Bereich **Experimentelle Plasmaphysik 2** unter der Leitung von Dr. Günter Grieger ist zuständig für die Planung des Stellaratorexperimentes WENDELSTEIN VII-X. Aufgabe des Bereichs **Experimentelle Plasmaphysik 3** unter Leitung von Dr. Friedrich Wagner war bis Herbst 1990 der Betrieb des Tokamaks ASDEX. Nach Betriebsende des Experimentes ging ein Teil des ASDEX-Teams in das bestehende Team des Stellarators WENDELSTEIN VII-AS über, an dem nun im Bereich Experimentelle Plasmaphysik 3 experimentiert wird. Der andere Teil des ASDEX-Teams wechselte in die Betriebsmannschaft des Nachfolge-Experimentes ASDEX Upgrade. Der Be-

reich **Oberflächenphysik** unter Leitung von Prof. Dr. Volker Dose betreibt vorwiegend experimentelle Arbeiten zur Plasma-Wand-Wechselwirkung. Der Bereich **Technologie** unter der Leitung von Prof. Dr. Rolf Wilhelm vereinigt die Gruppen, die für die Heizungsapparaturen an den Experimenten verantwortlich sind. Der Bereich **Theorie** (vormals Theorie 1) unter Leitung von Prof. Dr. Dieter Pfirsch widmet sich vorwiegend grundlegenden Problemen der theoretischen Plasmaphysik. Der ehemalige Bereich **Theorie 2**, der sich mit Arbeiten zur Stellarator-Theorie und mit theoretischen Vorarbeiten für das Stellaratorexperiment WENDELSTEIN VII-X beschäftigt, wurde mit der Emeritierung des Bereichsleiters, Prof. Dr. Arnulf Schlüter, im Januar 1991 als Gruppe »Stellaratorphysik« in den Bereich Experimentelle Plasmaphysik 2 aufgenommen. Der Bereich **Tokamakphysik** (vormals Theorie 3) unter Leitung von Prof. Dr. Karl Lackner befaßt sich mit theoretischen Arbeiten zur Tokamakphysik. Prof. Dr. Friedrich Hertweck leitet den Bereich **Informatik**, der vor allem die Datenverarbeitung von ASDEX Upgrade bearbeitet.

Abbildung 1: Beiträge der Gruppen und Bereiche zu den einzelnen Forschungsprojekten (Stand: 1.8.1991)

● = Schwerpunkt der Aktivitäten ⊙ = wesentliche Aktivitäten ○ = Nebenaktivitäten

Bereich / Bereichsleiter	Experimentelle Plasmaphysik 1 Kaufmann		Tokamakphysik Lackner		Experimentelle Plasmaphysik 3 Wagner			Experimentelle Plasmaphysik 2 Grieger			Oberflächenphysik Dose, Küppers		Technologie Wilhelm		Theorie Pfirsch		Informatik Hertweck	
	ASDEX Upgrade Köppendörfer	ASDEX Upgrade Diagnostik Röhr	Tokamakphysik Lackner	Randschichtphysik Neuhauser	WENDELSTEIN VII-AS Wagner	W VII-AS ECRH Erckmann	W VII-AS Divertor / Pump/limiter Niedermeier	WENDELSTEIN VII-X Physik Wobig	WENDELSTEIN VII-X Technik Sapper	Stellaratorphysik Nührenberg	Plasma-Wand- Wechselwirkung Roth	Oberflächenphysik Bertel	Plasmatechnologie Möller	Neutralinjektion Speth	E C R H Leutner	I C R H Wesner	Theorie Biskamp	Informatik Hertweck
ASDEX Upgrade Köppendörfer	●	●	●	●							●	⊙	●	●	●		●	
WENDELSTEIN VII-AS Wagner		○			●	●	●	⊙	○	○	●	⊙	●	⊙	●			
WENDELSTEIN VII-X Grieger					⊙	○	⊙	●	●	●				⊙	○	○		
JET - Mitarbeit Kaufmann	○	⊙	⊙	○							⊙	○						
NET / ITER - Mitarbeit Grieger	○		⊙	○							○							
Allgemeine Physik											⊙	●	⊙				●	●

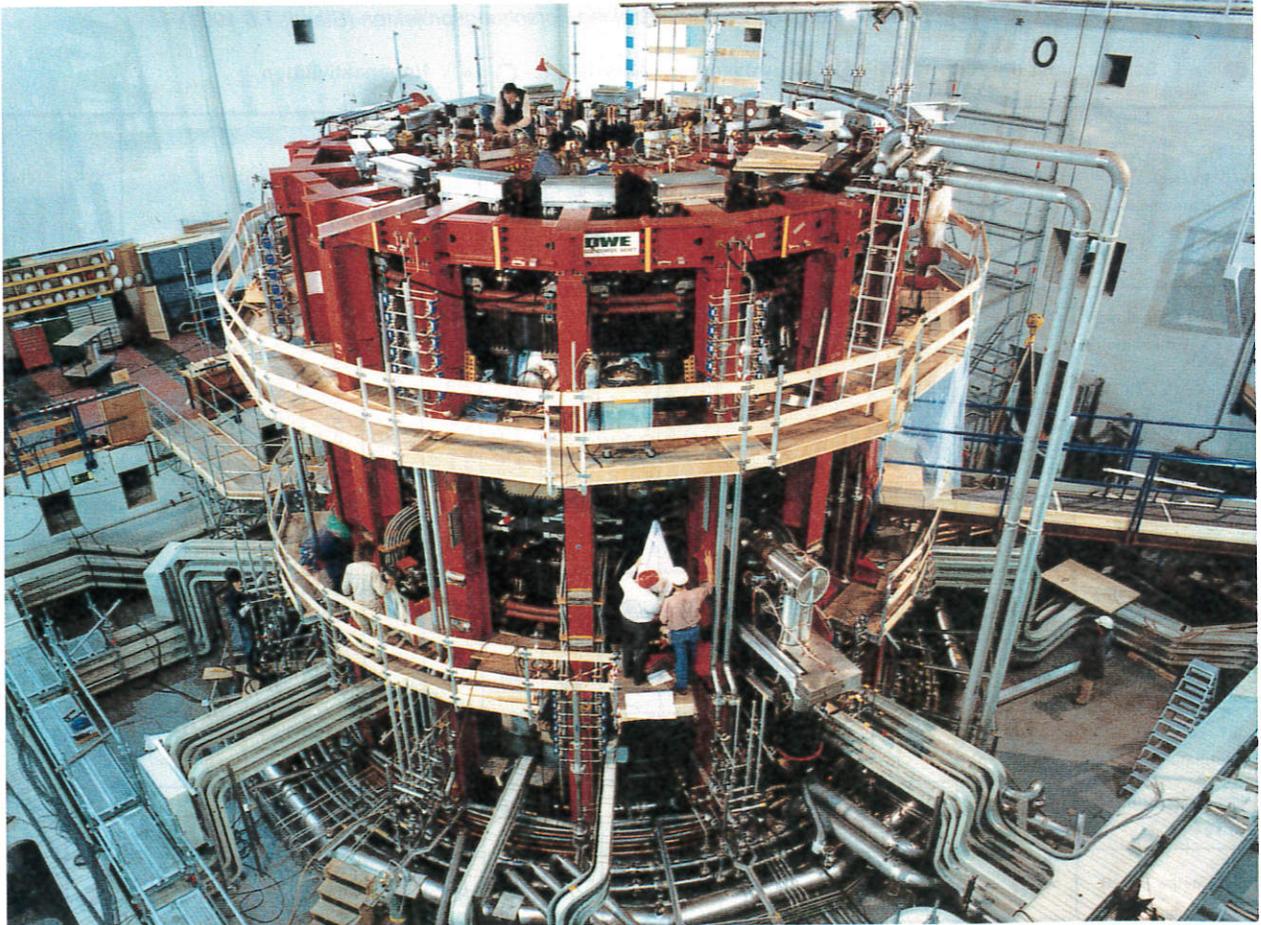
Tokamak-Experimente

Tokamaks wurden Anfang der 50er Jahre in der Sowjetunion entwickelt und wegen ihrer prinzipiellen Einfachheit bald weltweit zum führenden Experimenttyp der Fusionsforschung. Das Institut für Plasmaphysik arbeitet gegenwärtig an vier verschiedenen Tokamak-Experimenten: Schwerpunkt der Tokamak-Aktivitäten ist das Experiment ASDEX Upgrade, das 1990 in Betrieb genommen wurde, nachdem der Vorgänger ASDEX nach zehnjähriger überaus erfolgreicher Experimentierzeit im gleichen Jahr stillgelegt wurde. Außerdem beteiligt sich das Institut an dem im englischen Culham betriebenen europäischen Gemeinschaftsexperiment JET (Joint European Torus). Das IPP beherbergt darüber hinaus eine europäische Studiengruppe, die den JET-Nachfolger NET (Next European Torus) plant und beteiligt sich an den Planungen für den europäisch-amerikanisch-sowjetisch-japanischen ITER (Internationaler Thermonuklearer Experimentalreaktor).

An ASDEX hatte sich das IPP zum Ziel gesetzt, mit Hilfe von Divertoren saubere Plasmen zu erzeugen und so die Bedeutung des Divertors für einen zukünftigen Fusionsreaktor herauszuarbeiten. Inzwischen haben die Experimente an ASDEX gezeigt, daß ein Divertor das Plasma nicht nur sauberhalten kann, sondern auch zu einer bedeutenden Verbesserung der Einschlußzeiten führt. Nach den guten Ergebnissen von ASDEX wird nun in dem Nachfolger ASDEX Upgrade der Divertor in einer Form untersucht, wie er auch in einem Reaktor einsetzbar wäre. Ergebnisse dieses Experimentes werden daher auch für NET bzw. ITER von großer Bedeutung sein.

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

Abbildung 1: Das Fusionsexperiment ASDEX Upgrade nach Abschluß der Montage im Mai 1990.



ASDEX

Projektleiter: Dr. Friedrich Wagner

Das Tokamak-Experiment ASDEX (Axialsymmetrisches Divertorexperiment), das 1980 als damals weltweit größte Fusionsanlage in Betrieb ging, wurde Mitte 1990 mit Betriebsbeginn des Nachfolgers ASDEX Upgrade stillgelegt. Aus diesem Grunde sollen die wesentlichen Ergebnisse von ASDEX in diesem Jahresbericht zusammengefaßt werden. An ASDEX arbeiteten verschiedene Gruppen des IPP – die experimentelle ASDEX-Gruppe, die Tokamak-Theorie, die Plasma-Wand-Wechselwirkung sowie die verschiedenen Heizgruppen und daneben eine Vielzahl von Gästen und Vertragspartnern.

ASDEX begründete erfolgreich die Divertorlinie des IPP, die nun mit ASDEX Upgrade fortgesetzt wird. Der Divertor ist eine besondere Magnetfeldstruktur, die einerseits für sehr saubere Plasmen sorgt und andererseits den Energie- und Teilchenfluß aus dem Plasma steuert. Sechs zusätzliche, toroidal umlaufende Spulen, die je als Triplett über- und unterhalb des Plasmaringes angeordnet sind, formen dieses spezielle Magnetfeld: Ein geschlossener Feldbereich mit gutem Einschluß im Zentrum, in dem sich das heiße Plasma befindet, ist von einer Magnetfeldschale umgeben, die sich nach oben und unten öffnet; das Magnetfeld wird »divertiert« (abgelenkt). Eine geschlossene Magnetfeldfläche, die Separatrix, trennt damit den inneren Einschlußbereich vom äußeren offenen Plasma und verhindert so den Kontakt des inneren Plasmas mit der Gefäßwand (siehe Abb. 20). Die Funktion des offenen Bereichs ist es, die Energie- und Teilchenflüsse aus dem Plasmainternen in die Divertorkammern zu führen, wo die Teilchen an Prallplatten neutralisiert und zusammen mit störenden Verunreinigungen – später in einem Reaktor auch die Helium-»Asche« – entfernt werden. Das Divertorkonzept gestattet es damit, die verschiedenen Anforderungen an ein Plasma in räumlich getrennten Bereichen zu erfüllen und dort die Plasmaeigenschaften auf den jeweiligen Zweck hin auszurichten. Das Hauptplasma läßt sich für hohe Temperatur und guten Einschluß optimieren; das Divertorplasma dagegen, das zur Energie- und Teilchenabfuhr mit Materie in Berührung steht, soll möglichst kalt sein und durch wandschonende atomare Prozesse einen Teil der Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung abgeben.

Das Divertorkonzept, das mit ASDEX zum ersten Male in einem Großexperiment geprüft wurde, hat sich außerordentlich bewährt. Das ausströmende Plasma wird präzise in die Divertorkammer geführt. Das Divertorplasma ist von hoher Dichte und niedriger Temperatur, das zentrale Plasma von großer Reinheit. Dies gilt prinzipiell bis zu den höchsten Leistungsflüssen. Es hat sich auch gezeigt, daß das Divertorplasma für gasförmige Verunreinigungen wie eine Diffusionspumpe wirkt, so daß Verunreinigungen aus dem Hauptplasma entfernt und in der Divertorkammer konzentriert werden.

Radius der Anlage (über alles):	3,5 Meter
Höhe (über alles):	5 Meter
Gewicht:	250 Tonnen
Großer Plasmaradius:	1,65 Meter
Kleiner Plasmaradius:	0,40 Meter
Anzahl der Toroidalfeldspulen:	16
Spulenstrom:	45 Kiloampere
Magnetfeld:	2,8 Tesla
Plasmastrom (max.):	500 Kiloampere
Entladungsdauer:	4 – 10 Sekunden
Heizleistung:	
– Neutral-Injektion:	3 Megawatt
– Ionen-Zyklotronheizung:	4 Megawatt
– Hochfrequenzheizung bei der unteren Hybridfrequenz:	2 Megawatt

Abbildung 1: Charakteristische Daten des Experimentes ASDEX

Während der zehn Betriebsjahre wurde die Divertorkonzeption von ASDEX mehrfach verändert. In der ersten Operationsphase bis 1986 wurden Prallplatten aus Titan verwendet, die dann bei der sogenannten »Härtung« des Divertors durch wassergekühlte Kupferplatten ersetzt wurden, um Divertorplasmen auch bei langen Heizpulsen untersuchen zu können. Daneben wurden verschiedene Verfahren untersucht, um die Wände des Entladungsgeläßes zu beschichten und damit den Verunreinigungshaushalt zu beeinflussen. Ein optimaler Betrieb ergab sich bei borierter Wand und möglichst geschlossener Divertorkammer.

Die besondere Sauberkeit von Divertorplasmen folgte aus dem simplen Umstand, daß der Wandkontakt – anders als bei Limitertokamaks – entfernt von der Plasmaoberfläche erst in der Divertorkammer stattfindet. Die grundlegenden Transportbedingungen für die Teilchen entlang der Randschicht lassen sich modellmäßig beschreiben: Die Randschicht wirkt als Flußverstärker; auf dem Weg zur Prallplatte steigt die Plasmadichte an und infolgedessen sinkt die Temperatur. An der Prallplatte wird das kalte Plasma dann neutralisiert. Die Prallplatte stellt also eine tiefe Senke dar, auf die das Plasma am Ende mit Schallgeschwindigkeit zuströmt und schließlich darin verschwindet. Verunreinigungen, die das Plasma dabei aus der Prallplatte herausschlägt, schwimmen gegen das anströmende Plasma und werden zurück zur Platte geführt. Von der hohen Plasmasauberkeit profitierten die übrigen Forschungsgebiete an ASDEX, die im folgenden dargestellt werden.

Die alles überragende Herausforderung an die Fusionsforschung ist die Güte des Energieeinschlusses, also die Qualität der Wärmeisolation des Magnetfeldkäfigs. Die Maßzahl für diese Qualität ist die Energieeinschlußzeit τ_E , die möglichst groß sein muß. Ein grundlegendes Problem für das Tokamak-Konzept zeigte sich Mitte der 70er Jahre durch die an allen Experimenten beobachtete Abnahme der Energieeinschlußzeit mit zunehmender Heizleistung. Es zeichnete sich ein Teufelskreis ab: Die Annäherung der Temperatur an die Zündbedingungen hatte unvermeidbar das Weglaufen der Wärmeisolation zur Folge. Unter diesen Umständen mußte man es für unmöglich halten, die Zündbedingungen zu erreichen. Hier brachte ASDEX die Lösung: 1982 wurde ein Plasmazustand mit einem günstigeren Verhalten von τ_E entdeckt. Er wurde H-Regime getauft (high confinement) im Gegensatz zu dem bisherigen ungünstigen L-Regime (low confinement). In Abbildung 2 ist der Verlauf von τ_E mit der Heizleistung dargestellt. Im L-Regime nimmt τ_E stetig ab, während es im H-Regime nahezu unabhängig von der Heizleistung ist.

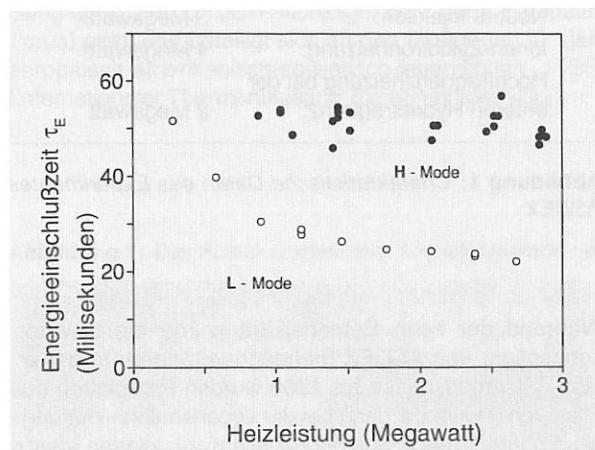


Abbildung 2: Verlauf der Energieeinschlußzeit τ_E mit der Heizleistung für Plasmen im L- und H-Regime. Im H-Regime ist die Energieeinschlußzeit etwa doppelt so hoch.

Im Unterschied zu den gut erklärbaren Vorgängen im Randplasma fehlt bis heute ein tiefes Verständnis der Transportvorgänge des Hauptplasmas, die die Energieeinschlußzeit bestimmen. Grund ist die hohe Komplexität des dort herrschenden turbulenten Transports, der radiale Flüsse verursacht. Deshalb gibt es keine Theorie für den Plasmaeinschluß, die unter veränderten Randbedingungen Voraussagen zuließe. Trotzdem war es möglich, die wesentlichen Voraussetzungen für das H-Regime rezeptartig zu beschreiben, so daß auch andere Experimente im H-Regime operieren können. Diesen Rezepten folgend, hat PDX – ein Experiment in Princeton – seinen Divertor abgedichtet, um im H-Regime zu arbeiten, hat Doublet III in San Diego sein Magnetfeld umgekehrt, hat der japanische JT-60 seinen Staupunkt von außen nach unten verlegt, was nur mit einem teuren Umbau der Maschine möglich war. Nicht zuletzt wurde das europäische Gemeinschaftsexperiment JET für einen einfachen Divertorbetrieb umgestaltet. Die größten Erfolge hatte die

Fusionsforschung mit JET, seit es in dieser – wenn auch noch nicht optimalen – Divertorkonfiguration und in der H-Mode arbeitet. Dabei hat JET bereits etwa 80 Prozent der ersten Wegetappe zurückgelegt, die sich die Fusionsforschung gesetzt hat – nämlich soviel Energie durch Fusion zu gewinnen, wie für die Aufrechterhaltung des Plasmas notwendig ist.

Eine zentrale Frage für den Betrieb zukünftiger Fusionsreaktoren ist die Brennstoffnachfüllung mit Deuterium und Tritium. Um hier den Tritiumeinsatz gering zu halten, sollte die Teilchendeponation möglichst im Zentrum des brennenden Plasmas erfolgen. Eine Nachfüllung durch das Einschleusen beschleunigter Pellets aus gefrorenem Wasserstoff in das Plasmazentrum ist deshalb zum Ausgleich des kontinuierlichen Teilchenverlusts einer Entladung besonders geeignet. Es erweitert außerdem die Vielfalt der erreichbaren Plasmaprofile. Ganz überraschend hat sich dabei gezeigt, daß auf diesem Wege auch der Einschluß des Plasmas im Magnetfeld verbessert werden kann.

Um die innere Nachfüllung von Plasmen untersuchen zu können, mußten zunächst Beschleuniger für Pellets in der Größe von mehreren Kubikmillimetern und mit Geschwindigkeiten bis 1000 Metern pro Sekunde entwickelt werden. Passend zu den Zeitkonstanten des Plasmas sollten etwa 60 Pellets mit einem Zeitabstand von 1/30 Sekunde nacheinander eingeschossen werden. Diese Bedingungen führten im IPP zur Entwicklung einer flexiblen Beschleunigungszentrifuge, die 1985 ihren Betrieb an ASDEX aufnahm.

Die eingeschossenen Pellets dringen einige 10 Zentimeter in das Plasma ein. Dabei spitzt sich das Profil der Plasmadichte im Zentrum charakteristisch zu, und zwar weit über das Maß hinaus, das man mit gasförmiger Nachfüllung erreichen kann. Auch nach der Injektion nimmt die zentrale Dichte zu, obwohl die Pellets nicht bis ins Zentrum vorgedrungen sind. Grund ist eine starke Verbesserung des Teilcheneinschlusses, der von einer Verdopplung der Energieeinschlußgüte, d.h. der thermischen Isolation zwischen heißer Plasmamitte und Rand, begleitet ist. Als Folge der geänderten Transporteigenschaften stieg außerdem die maximal erreichbare Plasmadichte mit Pellets bis auf reaktorrelevante Werte von $2 \cdot 10^{20}$ Teilchen pro Kubikmeter.

Die Plasmadichte einer Tokamakentladung kann durch Einschleusen von Wasserstoff-Pellets oder durch Zuführen von Wasserstoffgas nur in gewissen Grenzen erhöht werden. Bei Überschreiten eines Grenzwertes, der von zahlreichen Einflußgrößen abhängt, widersetzt sich die Entladung einer weiteren Steigerung durch ein unerwünschtes Abbrechen des Plasmastroms. Dieses Dichtelimit ist als Betriebsgrenze für den Reaktor ebenso wichtig wie für experimentelle Anlagen. Alle experimentellen Befunde deuten darauf hin, daß das Dichtelimit durch Effekte im Divertor bestimmt wird. Es wird erreicht, wenn die Temperatur des Divertorplasmas zu niedrig wird, um das Neutralgas in der Divertorkammer zu ionisieren. Bereits ein einfaches Modell, das neben den Grundgleichungen für das Divertorplasma lediglich Annahmen über den Plasmatransport senkrecht zum Magnetfeld enthält, kann das Dichtelimit quantitativ mit guter Näherung beschreiben. Unverstanden ist bisher allerdings noch, wie der Zusam-

menbruch des Divertorgleichgewichts zu einer Instabilität der ganzen Entladung führt. Das ASDEX-Modell des Dichtelimits sollte für alle Tokamaks anwendbar sein, die ein relativ sauberes Plasma produzieren, also auch für einen Reaktor.

An ASDEX wurden neben der Stromheizung drei weitere Heizverfahren angewandt: Die Neutralinjektion sowie Wellenheizungen bei Lower Hybrid- und Ionen-Zyklotronfrequenzen. Heizung und Stromtrieb durch Wellen der Lower-Hybrid-Frequenz wurden an ASDEX ursprünglich mit einem System bei 1.3 Gigahertz untersucht und ab 1988 in Zusammenarbeit mit den Fusionslaboratorien in Frascati (Italien) und Princeton (USA) mit einem neuen System bei 2.45 Gigahertz mit Leistungen bis zu zwei Megawatt fortgesetzt. Mit einer neuartigen Antennenstruktur, die auf umfangreichen Kopplungscode-Rechnungen basierte, wurde eine gute Ankopplung der Lower Hybrid-Wellen an das Plasma erreicht. Damit konnte bis zu 85 Prozent der eingestrahlenen Leistung im Plasma absorbiert werden und der Operationsbereich für Lower Hybrid-Stromtrieb erheblich erweitert werden bis zu mittleren Plasmadichten von $5 \cdot 10^{13}$ Teilchen pro Kubikzentimeter, die sich in Verbindung mit Pelletinjektion nochmals verdoppeln ließ.

Normalerweise wird der Plasmastrom in einem Tokamak durch einen Transformator erzeugt, was einen nur pulsweisen Betrieb dieser Anlagen zur Folge hat. An ASDEX konnte jedoch durch Lower Hybrid-Wellen der volle Plasmastrom von maximal 460 Kiloampere bis zu Dichten von $3 \cdot 10^{13}$ Teilchen pro Kubikzentimeter getrieben werden ohne unterstützenden Transformator. Die Abhängigkeit des Stromtrieb-Wirkungsgrads von Plasma- und Wellenparametern lag dabei in guter Übereinstimmung mit der Theorie. Damit wird eine sicherere Extrapolation auf künftige größere Experimente möglich.

Lower Hybrid-Stromtrieb hat neben der Möglichkeit des stationären Betriebs den weiteren Vorteil, daß die lokale Leistungsabgabe an das Plasma über eine Veränderung der Wellenparameter an der Antenne von außen gesteuert werden kann. Damit wird eine gezielte Kontrolle der Stromdichteverteilung im Plasma möglich, was eine Verbesserung des Energieeinschlusses durch Unterdrückung von Instabilitäten ermöglicht. An ASDEX konnten durch Verbreiterung des Stromprofils im Plasmazentrum mit Lower Hybrid-Stromtrieb sogenannte Sägezahn- und $m=1$ -Instabilitäten unterdrückt werden. Damit wurden im Plasmazentrum Rekordwerte für die Elektronentemperatur von 80 Millionen Grad (8 Kiloelektronenvolt) erreicht, wie in Abbildung 3 gezeigt ist. Der Gesamtenergie-Inhalt steigt dabei bis um 50 Prozent im Vergleich zur Einstrahlung von Wellen mit einem symmetrischem Spektrum, d.h. ohne Netto-Stromtrieb. Die effektivste Beeinflussung des Stromprofils wurde durch Überlagerung unterschiedlicher Wellenspektren erzielt, die von zwei unabhängigen Antennen eingestrahlt wurden. Das Spektrum mit der niedrigsten Phasengeschwindigkeit bestimmt dabei die Absorptionszone für Wellen mit hoher Phasengeschwindigkeit, die einen hohen Stromtrieb-Wirkungsgrad besitzen. Diese an ASDEX gefundene Methode fand bereits Eingang in die Auslegung eines Lower Hybrid-Stromtriebssystems für den Internationalen Theronuklearen Testreaktor ITER.

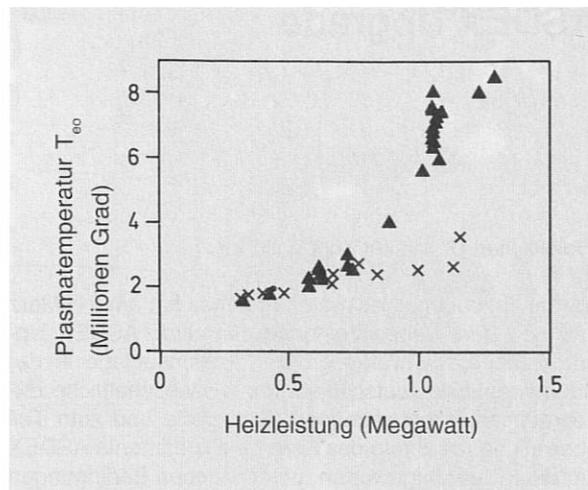


Abbildung 3: Die Temperatur im Plasmazentrum T_{eo} in Abhängigkeit von der aufgenommenen Heizleistung bei Einstrahlung von Lower Hybrid-Wellen in Stromtrieb-Einstellung (▲) und – mit symmetrischem Spektrum – ohne Stromtrieb (x).

Von Ende 1984 bis Mitte 1989 wurde an ASDEX die Hochfrequenzheizung mit der Ionen-Zyklotron-Frequenz eingesetzt. Hierfür standen zwei Generatoren mit einer Gesamtleistung von vier Megawatt bei Frequenzen zwischen 30 und 115 Megahertz zur Verfügung. Zum ersten Mal wurde dabei nachgewiesen, daß das 1982 bei ASDEX mit Neutralinjektion gefundene H-Regime auch mit einer anderen Heizmethode erreicht werden kann. Für die »Härtung« von ASDEX wurden erstmals wassergekühlte Antennen entwickelt, die größere Pulsweiten ermöglichten. Diese technologisch komplizierten Antennen arbeiteten problemlos und erzielten Heizleistungen bis drei Megawatt bei Pulsweiten bis zwei Sekunden. Die Kombination von Ionen-Zyklotron-Resonanzheizung mit Pelletinjektion ergab durch eine Zuspitzung der Plasmadichteprofile sehr hohe Einschlußzeiten, deren Abhängigkeit von der Pelletfrequenz und der Heizleistung eingehend untersucht wurde. Ein ähnlicher Effekt konnte durch Kombination der Ionen-Zyklotron-Resonanzheizung mit »Counter-Injektion« der Neutralteilchen-Heizung erzielt werden.

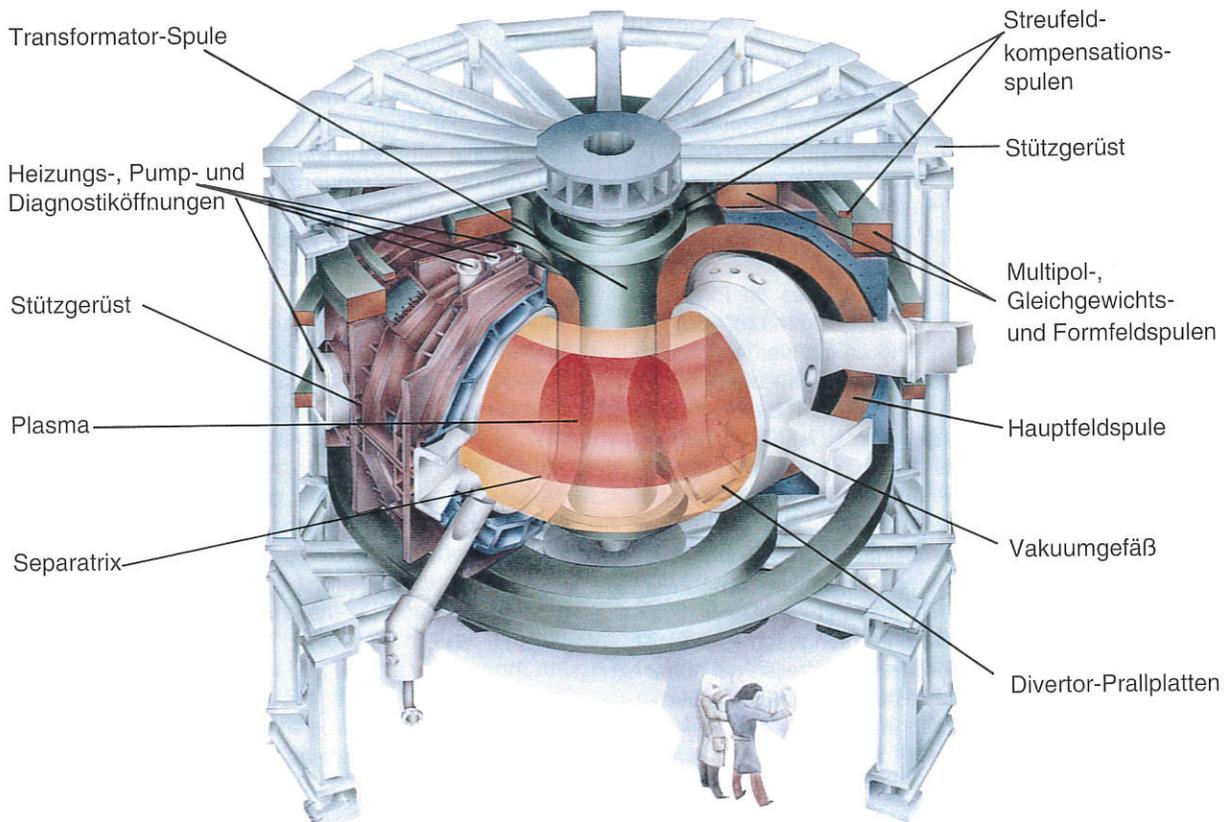
ASDEX Upgrade

Projektleiter: Dr. Walter Köppendörfer

Mit der Erzeugung des ersten Plasmas hat am 21. März 1991 an dem neuen Fusionsexperiment ASDEX Upgrade, der gegenwärtig größten Fusionsanlage in der Bundesrepublik Deutschland, der wissenschaftliche Experimentierbetrieb begonnen: Der große und zum Teil überraschende Erfolg des Divertor-Experiments ASDEX hat die Frage aufgeworfen, unter welchen Bedingungen auch ein Fusionsreaktor mit einem Divertor ausgestattet werden kann. Dabei sollte das rein physikalische Divertorkonzept von ASDEX nun in ASDEX Upgrade den technischen Erfordernissen eines Fusionsreaktors angepaßt werden. In einem brennenden Reaktorplasma 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.

Die Aufgabe von ASDEX Upgrade wird sein, einen solchen offenen Divertor zu testen. Im Gegensatz zum Vorgänger ASDEX werden dabei wesentliche Plasmaeigenschaften, vor allem die Plasmadichte und die Belastung der Wände, den Verhältnissen in einem späteren Fusionsreaktor angepaßt. Durch genügend hohe Heizleistung soll dafür gesorgt werden, daß die Energieflüsse durch die Randschicht des Plasmas denen im Fusionsreaktor entsprechen. Die Anlage dient also dem Studium der Plasma-Wand-Wechselwirkung unter reaktorähnlichen Plasma-Randschichtbedingungen. Ausserdem wurde das Experiment so dimensioniert, daß in der auf Reaktormaße vergrößerten Anlage Blanket und erste Wand innerhalb der Magnetspulen Platz fänden. Aufgrund dieser Maßnahmen ist zu erwarten, daß ASDEX Upgrade trotz seiner kleinen Abmessungen die Randschichteigenschaften ausreichend simuliert, die in NET bzw. ITER sowie in einem Reaktorplasma auftreten werden.

Abbildung 1: Ansicht des Tokamak-Systems von ASDEX Upgrade (aufgeschnitten) mit Plasmagefäß, Hauptfeldmagneten, Poloidalfeldspulen und äußerem Stützgerüst.



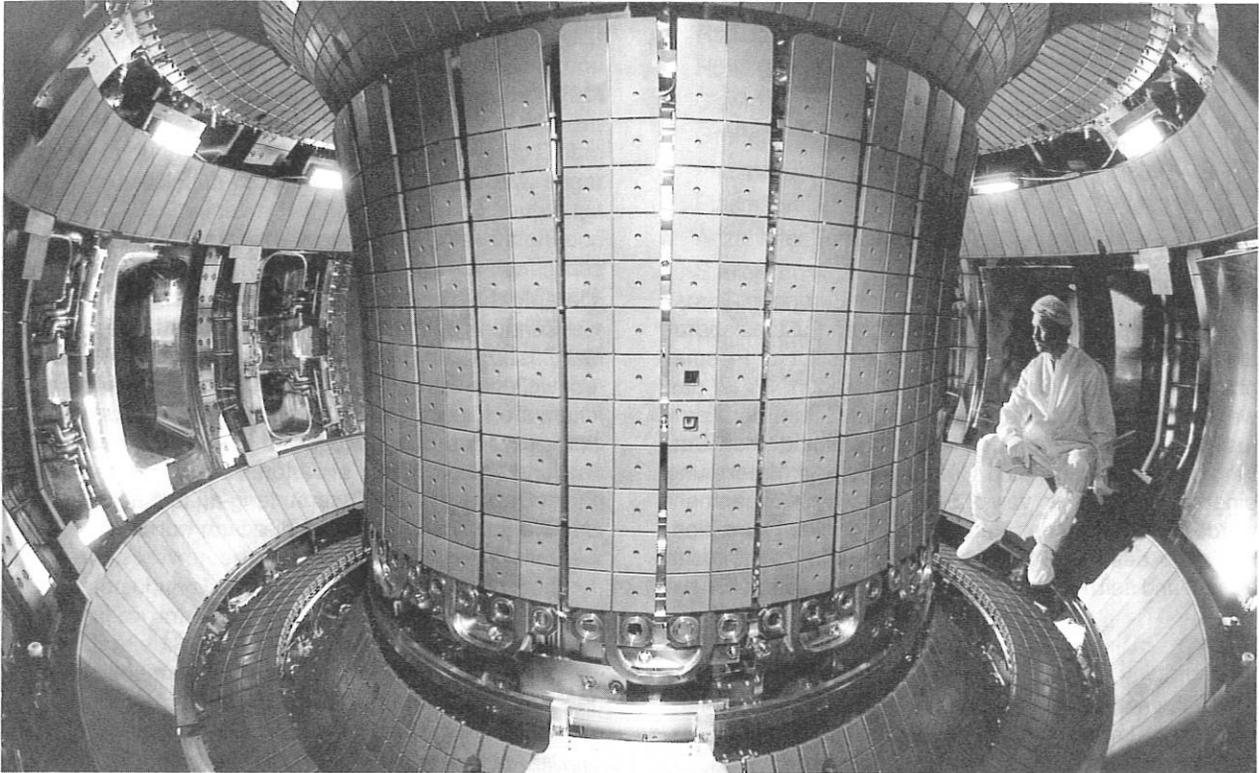


Abbildung 2: Blick in das Plasmagefäß von ASDEX Upgrade. An Boden und Decke sieht man die ringförmig umlaufenden Prallplatten des »offenen« Divertors.

Geplant und entworfen wurde ASDEX Upgrade ab 1981 von einem Team von ca. 23 Ingenieuren und Physikern. Wesentliche Beiträge lieferten auch die IPP-Bereiche Tokamakphysik und Informatik. 1983 wurden diese Pläne von der Europäischen Forschungsbehörde EURATOM genehmigt, die sich neben Bund und Freistaat Bayern an den Investitionskosten beteiligte. 1984 wurden die ersten Industrienaufträge zur Fertigung der Hauptkomponenten – Plasmagefäß, Magnetspulen und ihre Abstützungen – vergeben. Nach Fertigstellung der europaweit gefertigten Einzelkomponenten begann die Montage von ASDEX Upgrade im Mai 1988, ab Herbst 1990 konnte das fertiggestellte Tokamaksystem schrittweise technisch in Betrieb genommen werden. Es folgte der Aufbau der Peripherie, d.h. der Strom- und Kühlwasserversorgung, der Vakuumpumpen und ersten Diagnostiken. Nach Test des Vakuumgefäßes konnte der Einbau der hitzebeständigen Graphitkacheln für die dem Plasma ausgesetzten Wandteile beginnen. Zugleich wurden die Hauptfeldspulen getestet. Die Schalt- und Regelstrecken für die Stromversorgungen der Spulensysteme und die Kühlversorgungen wurden seit 1984 aufgebaut. Die für den Entladungsablauf und für die Plasmakontrolle nötige schnelle Feedbacksteuerung wurde im IPP entworfen. Schnelle Realtime-Rechner auf Transputerbasis wurden hierfür vom Bereich Informatik entwickelt (siehe Kapitel Informatik), der ebenso ein vernetztes Datenverarbeitungssystem mit eigener Datenstruktur aufgebaut hat mit einer schnellen Datenleitung zu den Großrechnern des Instituts.

Im Januar 1991 wurde mit den Tests der Poloidal-feldspulen begonnen. Im März 1991 folgten erste Entladun-

gen mit stromgeheizten Plasmen. In den jetzt begonnenen Plasmaexperimenten werden zunächst Plasmaaufbau, Kontrolle der Plasmaform, Plasmalage und Stabilität untersucht und optimiert. Im Laufe des Jahres 1992 folgen dann Experimente mit Plasmaheizung durch Hochfrequenzwellen, anschließend wird die Heizung durch Neutralteilcheneinschuß in Betrieb genommen.

Abbildung 3: Charakteristische Daten des Experimentes ASDEX Upgrade

Radius der Anlage (über alles):	5 Meter
Höhe (über alles):	9 Meter
Gewicht:	800 Tonnen
Großer Plasmaradius:	1,65 Meter
Plasmahöhe:	1,60 Meter
Plasmabreite:	1,00 Meter
Anzahl der Toroidal-feldspulen:	16
Spulenstrom:	84 Kiloampere
Magnetfeld:	3,90 Tesla
Plasmastrom (max.):	2 Megaampere
Entladungsdauer:	10 Sekunden
Heizleistung:	
– Neutral-Injektion:	9 Megawatt
– Ionen-Zyklotronheizung:	6 Megawatt

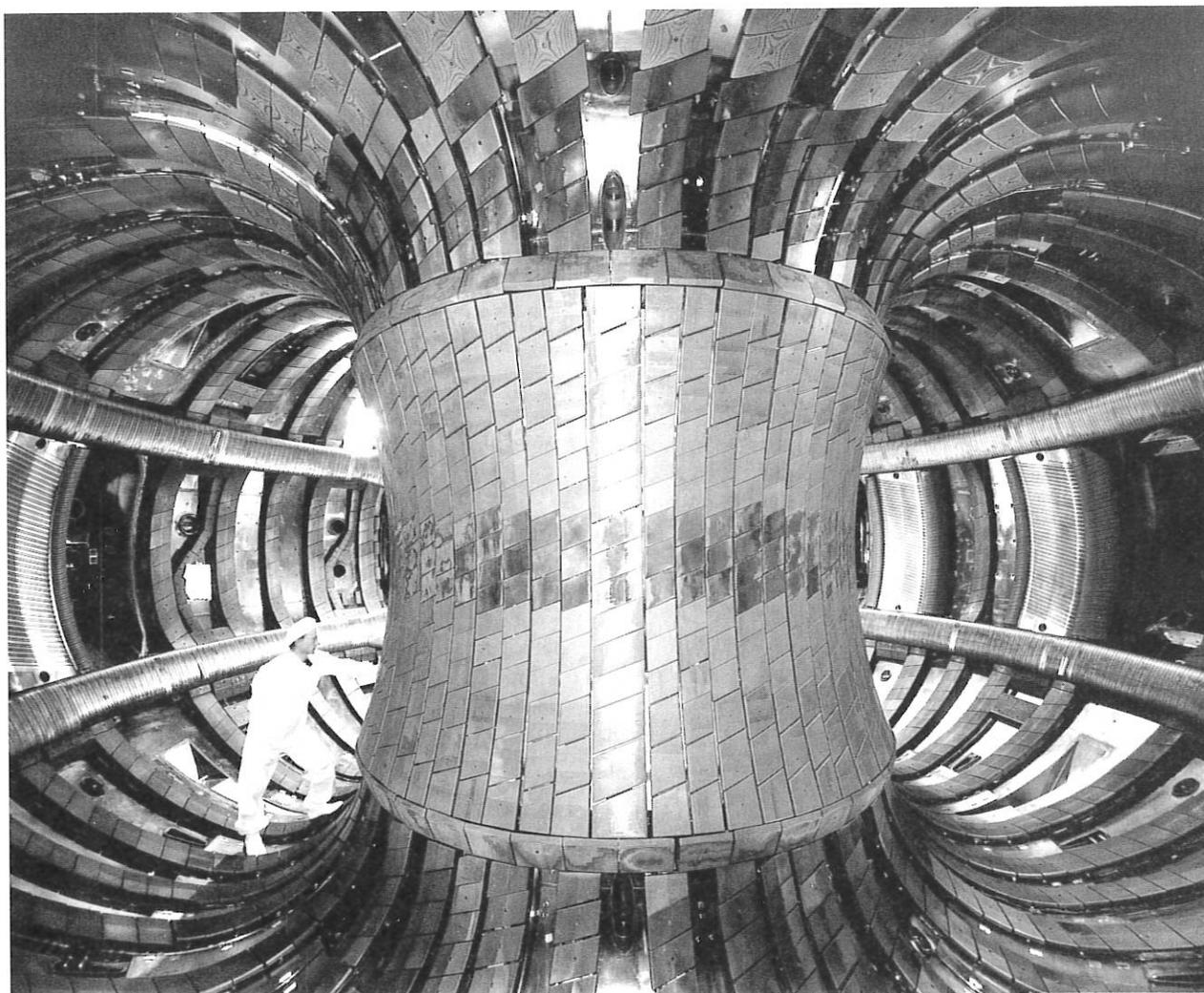
JET-Mitarbeit

Projektleiter: Prof. Dr. Michael Kaufmann

Das Tokamak-Experiment JET (Joint European Torus) wird gemeinsam von allen europäischen Fusionslaboratorien, darunter auch dem Max-Planck-Institut für Plasma-physik, in Culham/Großbritannien betrieben. Es 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 wurde ab 1972 von den Europäern gemeinsam konzipiert, innerhalb des vorgegebenen Kosten- und Zeitrahmens gebaut und seit 1983 auch gemeinsam betrieben. JET hat

die Aufgabe, das Verhalten eines Fusionsplasmas nahe der Zündung zu untersuchen: Nach stufenweisem Aufbau der Zusatzheizung mit Neutral-Injektion und Ionen-Zyklotronwellen sollte das Experiment Plasmazustände erreichen, die für ein Brenngemisch aus Deuterium und Tritium zumindest einige Megawatt an Heizleistung aus den Fusions-Alpha-Teilchen erwarten lassen. Wegen dieser Zielsetzung wurde JET von Anfang an technologisch auf den Betrieb mit Tritium und die dann notwendige Fernbedienung der Anlage ausgerichtet.

Abbildung 1: Blick in das Innere des Joint European Torus (JET). Die Plasmakammer besitzt ein Volumen von etwa 300 Kubikmetern, das Plasma erfüllt davon etwa 100 Kubikmeter.



Inzwischen hat JET – in jeweils verschiedenen Entladungen – Plasmatemperaturen von 300 Millionen Grad, Plasmadichten von $4 \cdot 10^{14}$ Teilchen pro Kubikzentimeter und Energieeinschlußzeiten von 1,8 Sekunden erreicht. Mit diesen Weltrekordwerten hat das Experiment die zur Plasmazündung nötigen Werte für Temperatur, Dichte und Wärmeisolation jeweils einzeln erreicht bzw. sogar übertroffen. Gemeinsam in einer Entladung konnten mit einem Modellplasma aus normalem Wasserstoff und Deuterium Plasmawerte erzielt werden, mit denen das Plasma – umgerechnet auf den Betrieb mit den eigentlichen Fusionsbrennstoffen, Deuterium und Tritium – bereits 90 Prozent der benötigten Heizleistung, d. h. etwa 20 Megawatt Fusionsleistung, über die ausgelösten Fusionsreaktionen wieder zurückerhalten würde. Mit Tritium soll jedoch erst in einer späteren Betriebsphase experimentiert werden. Die Wahrscheinlichkeit für das größere Nachfolge-Experiment, das gegenwärtig in Europa geplant wird, die Zündung zu erreichen, ist damit sehr groß geworden. Der gewaltige Fortschritt der Fusionsforschung, der sich hinter diesen Ziffern verbirgt, wird deutlich im Vergleich zu den Werten des Jahres 1970, als die Überlegungen zum Bau des JET-Experimentes begannen: Damals waren die Resultate der weltbesten Experimente um einen Faktor 25.000 von den Reaktorfordernissen getrennt, heute fehlt noch ein Faktor 6 zur Zündung.

Die guten Ergebnisse verdankt das JET-Experiment zweierlei Maßnahmen: Zum einen hat man die Maschine im »H-Regime« betrieben, einem am IPP-Experiment ASDEX entdeckten Plasmazustand mit besonders guten Einschlußeigenschaften (siehe Kapitel ASDEX). Zum anderen wurden die Innenwände des Plasmagefäßes mit einem speziellen Material – Beryllium – beschichtet. Seine leichten Atome können, wenn sie unter der Einwirkung des heißen Plasmas von der Wand abgeschlagen werden, das Plasma nur wenig stören. Trotzdem ist die allmähliche Ansammlung von Verunreinigungen in der Plasmamitte noch zu hoch, um den günstigen Plasmazustand lange genug aufrechtzuerhalten; das Plasma erstickt an seinen selbst produzierten Verunreinigungen. Die Lösung des Verunreinigungsproblems ist daher eine der wesentlichen noch zu lösenden Aufgaben.

Um diese Frage vertieft untersuchen zu können, hat JET eine Erweiterung seines laufenden Forschungsprogrammes bis zum Jahr 1996 vorgeschlagen: Nach dem Vorbild des IPP-Experimentes ASDEX soll ein »Divertor« in das Vakuumgefäß eingebaut werden, eine Zusatzeinrichtung, die es erlaubt, die Randschicht des Plasmas zusammen mit den darin enthaltenen Verunreinigungen abzusaugen. Nach der noch ausstehenden Genehmigung durch die europäische Forschungsbehörde EURATOM soll dieser Umbau Anfang 1992 beginnen.

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. Daneben bestand in den früheren Jahren die Hauptarbeit des IPP für JET im Entwurf und Bau von Plasmadiagnostiken. Diese Meßgeräte sind inzwischen in

Radius der Anlage (über alles):	7,5 Meter
Höhe (über alles):	11,5 Meter
Gewicht:	4000 Tonnen
Großer Plasmaradius:	2,96 Meter
Plasmahöhe:	4 Meter
Plasmbreite:	2,5 Meter
Anzahl der Toroidalfeldspulen:	32
Spulenstrom:	66 Kiloampere
Magnetfeld:	3,45 Tesla
Plasmastrom (max.):	7 Megaampere
Entladungsdauer (max.):	60 Sekunden
Heizleistung:	
– Neutral-Injektion:	21 Megawatt
– Ionen-Zyklotronheizung:	24 Megawatt

Abbildung 2: Charakteristische Daten des Experimentes JET

Betrieb und tragen wesentlich zur Untersuchung des JET-Plasmas bei. Das Institut bemüht sich, diese Diagnostiken auch zu betreiben, zu warten und ihre Ergebnisse zu interpretieren. Dies geschieht durch die Abordnung von Wissenschaftlern zu JET für den Zeitraum von ein bis zwei Jahren. Eine erhebliche Unterstützung folgt für JET auch direkt aus dem Forschungsprogramm des IPP, das mit dem Divertortokamak ASDEX Upgrade, wie zuvor mit ASDEX, Lösungen für die gegenwärtigen Schlüsselprobleme der Tokamakforschung erarbeiten will.

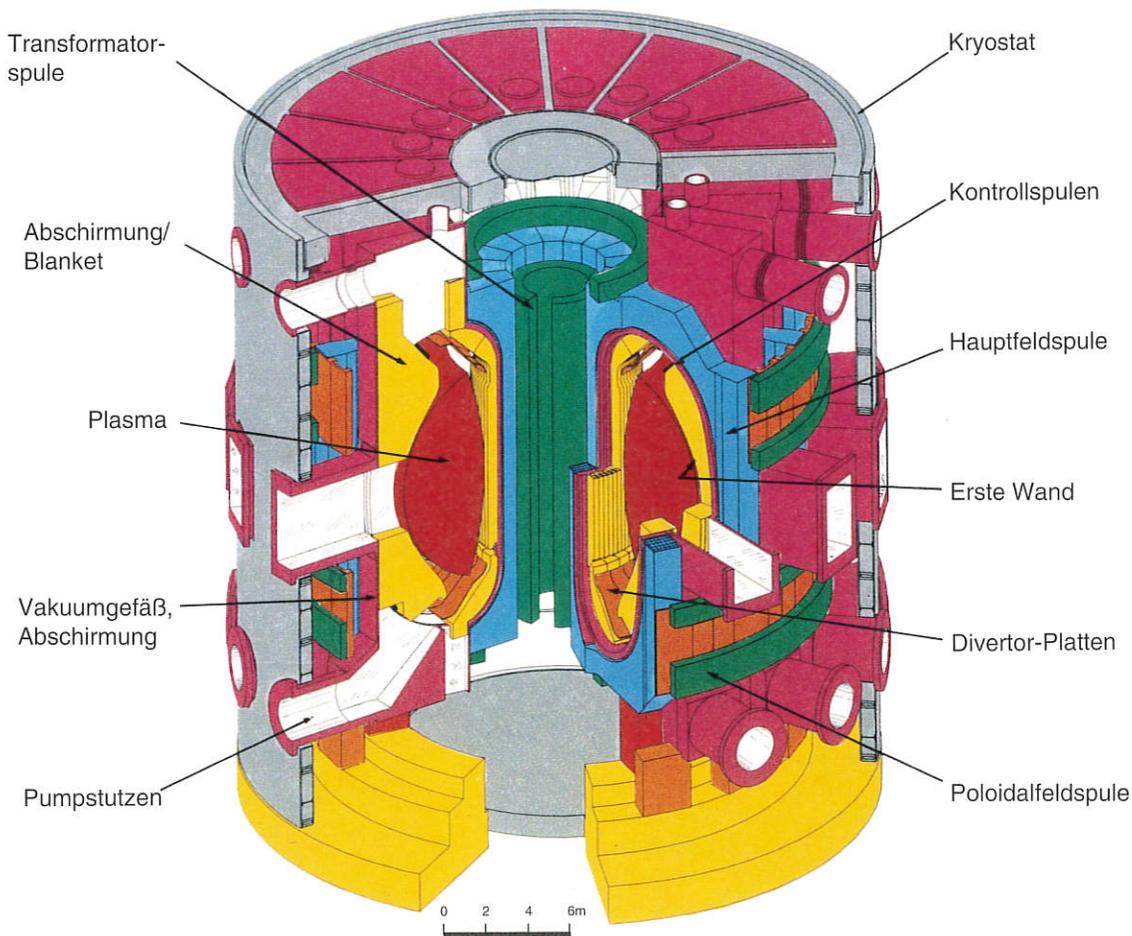
NET/ITER-Mitarbeit

Projektleiter: Dr. Günter Grieger

Das Experiment JET kann wichtige physikalische Erfordernisse für einen Fusionsreaktor prüfen. Vor dem Bau eines Demonstrationsreaktors muß jedoch der Nachweis erbracht werden, daß ein für längere Zeit kontrolliert brennendes Plasma physikalisch und technisch realisierbar ist. Außerdem müssen eine große Zahl technischer Reaktor-komponenten weiterentwickelt und erprobt werden. Hierzu gehören supraleitende Magnetspulen, die Tritium-Technologie, das Abführen der erzeugten Wärme-Energie sowie die Entwicklung fernbedient auswechselbarer Komponenten. Ebenso wichtig ist die Erforschung der Sicherheits- und Umweltfragen der Fusion.

Diese Aufgaben sind in Europa dem auf JET folgenden »Nächsten Europäischen Torus« (NET) zugewiesen. Parallel dazu beteiligt sich Europa an der weltweiten ITER-Zusammenarbeit (Internationaler Thermonuklearer Experimental-Reaktor). Die Dimensionen beider Anlagen werden die von JET noch einmal deutlich übersteigen, vor allem wegen der zusätzlich nötigen technischen Komponenten wie Blanket und radiologischer Abschirmung.

Abbildung 1: Der Internationale Thermonukleare Testreaktor ITER im Entwurf.



Die europäische NET-Zusammenarbeit begann 1983, als hierzu eine europäische Studiengruppe mit Sitz im IPP Garching gebildet wurde. Das Institut hat seine eigene Systemstudiengruppe dieser europäischen NET-Studiengruppe angegliedert. Zusätzlich werden auf der Basis gesonderter Verträge spezielle Detailfragen für NET bearbeitet, wobei das Institut insbesondere seine Kenntnisse auf dem Gebiet der Plasmarandphysik, der Divertorphysik sowie der Pellet- und Neutralinjektion zur Verfügung stellt.

Die Aufgaben des NET-Experimentes auf dem Weg zu einem Fusionsreaktor könnten aber auch – in weltweiter Zusammenarbeit – von ITER übernommen werden. Hiervon verspricht man sich eine engere Bündelung der technologischen Erfahrung in den beteiligten Ländern sowie eine Reduktion der von den einzelnen Partnern zu tragenden Kosten. Ebenso wie NET soll auch ITER demonstrieren, daß es physikalisch und technisch möglich ist, durch Kernverschmelzung Energie zu gewinnen und damit einen späteren Demonstrationsreaktor vorbereiten.

Das ITER-Projekt wurde 1985 in Gesprächen des sowjetischen Generalsekretärs Gorbatschow mit dem französischen Ministerpräsidenten Mitterand und dem damaligen amerikanischen Präsidenten Reagan eingeleitet. Im Frühjahr 1988 begannen dann am IPP als Gastlabor die Planungsarbeiten. Etwa fünfzig Wissenschaftler der vier weltweit wichtigsten Fusionsprogramme – aus Europa, den Vereinigten Staaten von Amerika, der Sowjetunion und Japan – arbeiteten seither in Garching gemeinsam an der Vorbereitung des Experiments. Das Projekt, das unter der Schirmherrschaft der Internationalen Atom-Energie-Agentur (IAEA) in Wien steht, wurde zunächst auf drei Jahre befristet. Termingerecht beendete die ITER-Gruppe im Dezember 1990 ihre Arbeiten mit der Vorlage eines Entwurfes für den Testreaktor. Standorte für die nun folgende etwa sechsjährige detaillierte Planungsphase werden neben dem IPP in Garching die Forschungslaboratorien Naka/Japan und San Diego/USA sein. Am Ende der Planungsphase soll entschieden werden, ob die vier Partner den Experimentalreaktor auch gemeinsam bauen und betreiben wollen oder ob sie die Planungen in den jeweils eigenen Fusionsprogrammen nutzen werden.

Der europäische Beitrag zu ITER wurde in der Entwurfsphase im wesentlichen durch die NET-Studiengruppe getragen. Die beiden Experimente stimmen in ihren Eckdaten nach gegenwärtigem Plan weitgehend überein, wobei NET geringere Werte für den nicht-induktiven Stromtrieb und die Brenndauer vorsieht. Um das europäische Fusionsprogramm nicht zu gefährden, soll bis zu einem verbindlichen Baubeschluß für ITER die Planung für den Nächsten Europäischen Torus weitergeführt werden. Durch die zu NET abgeordneten Wissenschaftler trägt das IPP auch zu der ITER-Aktivität bei. Mit dem Forschungsprogramm seines neuen Divertor-Tokamaks ASDEX Upgrade hat das IPP einen Großteil seiner Aktivitäten auf die Vorbereitung eines Testreaktors ausgerichtet. Außerdem stehen die IPP-Wissenschaftler in allen physikorientierten Fragen in engem Kontakt mit der ITER-Gruppe und haben darüberhinaus in zahlreichen Vertragsstudien spezielle Probleme für ITER bearbeitet. Hierzu zählen Beiträge des ASDEX-Experimentes, das Fragen der Wärmeabfuhr, des verbesserten Plasmaeinschlusses und Dichtelimits für ITER untersuchte. Außer-

ITER	
Gesamtradius:	14 Meter
Höhe (über alles):	28 Meter
Gewicht:	15 000 Tonnen
Großer Plasmaradius:	6.0 Meter
Plasmahöhe:	8,6 Meter
Plasmabreite:	4,3 Meter
Toroidalfeld:	4,85 Tesla
Anzahl der Toroidalfeldspulen:	16
Anzahl der Poloidalfeldspulen:	7
Maximaler Plasmastrom:	22 Megaampere
Heizleistung:	ca. 50 Megawatt
Stromtrieb:	ca. 100 Megawatt
Fusionsleistung:	ca. 1000 Megawatt
Brenndauer:	200 Sekunden bis Dauerbetrieb

Abbildung 2: Charakteristische Daten des ITER-Experimentes (nach dem Stand der Planungen im Dezember 1990)

dem wurden Modelle für den Energie- und Teilchen-transport getestet. Da die Transportvorgänge im Plasma physikalisch nicht vollständig geklärt sind, ist man auf Modellvorstellungen angewiesen. Dabei ist man an möglichst genauen Vorhersagen interessiert, weil sie den Entwurf großer Fusionsexperimente wie NET oder ITER stark beeinflussen. Hierzu wurden in umfangreichen Computercodes mehrere Modelle mit realen Entladungen von ASDEX verglichen und in ihrer Aussagekraft getestet. Ergänzt werden diese Einzelanalysen durch die statistische Auswertung einer Vielzahl von Entladungen, die über die Datenbanken von ASDEX, JET und einigen internationalen Experimenten zugänglich sind.

Stellarator-Experimente

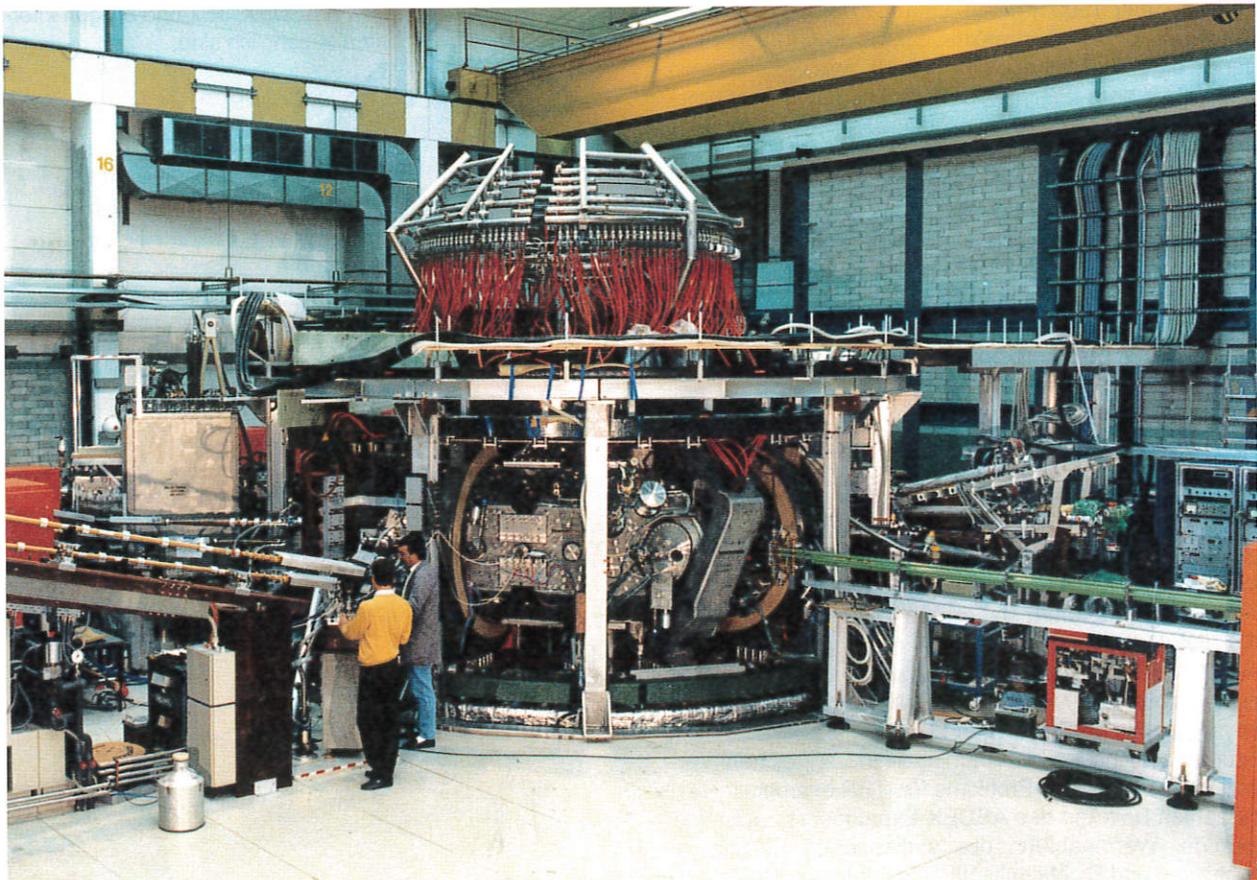
Im Rahmen des Europäischen Fusionsprogrammes betreibt das Institut für Plasmaphysik die Entwicklung der Stellaratoren als die wichtigste Alternative zum Tokamak. Wesentliche Vorteile eines Stellarators sind seine Fähigkeit zu stationärem Betrieb sowie die Aussicht, durch nicht axial-symmetrische Magnetfelder, wie sie in den am IPP entwickelten Optimierungs-Prinzipien der Advanced Stellarators verwirklicht sind, die Einschlußeigenschaften toroidaler Systeme noch einmal wesentlich zu verbessern.

Das IPP beschäftigt sich zur Zeit mit zwei Stellaratoren: WENDELSTEIN VII-AS und WENDELSTEIN VII-X. Das Experiment WENDELSTEIN VII-AS ging 1988 in Betrieb. Der Vorgänger hatte erstmals das Stellarator-Prinzip – Einschluß eines heißen Plasmas allein durch äußere Magnetfelder – auch bei höheren Plasma-Energiedichten

demonstriert. Zugunsten größtmöglicher experimenteller Flexibilität war die Spulenanordnung jedoch weder reaktortauglich noch auf hohe Beta-Werte ausgerichtet. Das Experiment WENDELSTEIN VII-AS geht daher unter Verwendung möglichst vieler Komponenten seines Vorgängers einen Schritt in Richtung optimierter Magnetfelder und soll das physikalische Prinzip des Advanced Stellarators (AS) einem ersten praktischen Test unterwerfen. Gleichzeitig wird ein modulares Spulenkonzept verwirklicht, das auch technologisch reaktorrelevant ist.

Das vollständig optimierte Experiment WENDELSTEIN VII-X, das derzeit in Planung ist, soll schließlich die Reaktortauglichkeit der Advanced Stellarators demonstrieren.

Abbildung 1: Das Stellarator-Experiment WENDELSTEIN VII-AS, das 1988 in Betrieb genommen wurde.



WENDELSTEIN VII-AS

Projektleiter: Dr. Hermann Renner (bis 30. Mai 1991)
Dr. Friedrich Wagner (ab 1. Juni 1991)

Der Stellarator WENDELSTEIN VII-AS ist seit 1988 in Betrieb. In Stellaratoren wird das Plasma durch Magnetfelder eingeschlossen, die allein durch Ströme in Spulen außerhalb des Plasmabereichs erzeugt werden. Ein Netto-Längsstrom im Plasma – wie bei Tokamaks – ist also bei Stellaratoren nicht nötig. WENDELSTEIN VII-AS ist der erste Stellarator der neuen »fortgeschrittenen« Generation der »Advanced Stellarators«. Weiterentwickelte theoretische Modelle zum Einschluß von Stellaratorplasmen bei hohem Druck und hoher Temperatur werden in WENDELSTEIN VII-AS einem ersten praktischen Test unterworfen. Die nach den Optimierungsverfahren des »Advanced Stellarators« entworfene, physikalisch verbesserte Magnetkonfiguration – ein nicht-axial-symmetrisches Einschlußsystem – läßt ein Plasmagleichgewicht mit höherem Druck und eine höhere Dichtigkeit des Magnetfeldkäfts erwarten.

Auch technisch geht WENDELSTEIN VII-AS durch seine neuartigen Spulen über bisherige Stellaratoren hinaus: Ein einziger Satz aus 45 nichtebenen Einzelspulen produziert das gesamte zum Plasmaeinschluß nötige Feld. WENDELSTEIN VII-AS hat bereits gezeigt, daß die berechnete Magnetfeldstruktur von modularen Spulen mit ausreichender Genauigkeit erzeugt werden kann. Außerdem bestätigt die experimentelle Beobachtung des Plasmaeinschlusses bereits einen Teil der benutzten Optimierungskriterien. Damit werden die Voraussetzungen geschaffen, in einer darauffolgenden größeren und vollständig optimierten Anlage WENDELSTEIN VII-X die Reaktortauglichkeit des Stellarators zu demonstrieren.

Ziel der Untersuchungen an WENDELSTEIN VII-AS ist es, die physikalischen und technischen Grundlagen der Advanced Stellarators zu testen. Untersucht werden sollen insbesondere die Einschlußeigenschaften des verbesserten Magnetfeldes, der Energie- und Teilchentransport sowie der Einfluß von magnetischen Spiegeln, elektrischen Feldern und Plasmaströmen. Außerdem sollen Verunreinigungs-transport und Verunreinigungskontrolle studiert, Gleichgewicht und Stabilität abhängig vom Plasmadruck untersucht sowie die verschiedenen Heizverfahren optimiert werden.

Die magnetische Konfiguration, die das WENDELSTEIN-Plasma einschließt, wird durch einen modularen Spulensatz aus 45 nichtebenen Spulen erzeugt. Durch überlagerte toroidale und vertikale Felder, die von zusätzlichen Toroidal- und Vertikalfeldspulen erzeugt werden, kann dieses System modifiziert werden. So kann der Einfluß unterschiedlicher Magnetfeldkonfigurationen, die sich hinsichtlich Rotationstransformation, Verscherung oder magnetischer Spiegel unterscheiden, auf das Plasmaverhalten untersucht werden. Besondere Bedeutung für die Transportvorgänge im Plasma haben elektrische Felder und

Ströme, die durch die verschiedenen Heizverfahren gesteuert werden können.

An WENDELSTEIN VII-AS werden drei unterschiedliche Heizverfahren zur Erzeugung und Heizung »stromloser« Plasmen benutzt. Dabei kommt der Hochfrequenzheizung bei der Elektronen-Zyklotronfrequenz besondere Bedeutung zu. Mit dieser Heizmethode kann das Plasma über die Heizung der Elektronen sowohl aus einem Neutralgas erzeugt als auch wirksam geheizt werden. Die Stromheizung ist so nicht mehr nötig. An WENDELSTEIN VII-AS stehen gegenwärtig vier Generatoren bei einer Frequenz von 70 Gigahertz zur Verfügung. Mit einer steuerbaren Leistung von je 200 Kilowatt und einer Pulsdauer von drei Sekunden können damit bei den Resonanzfeldstärken von 1.25 bzw. 2.5 Tesla Plasmen mit einer Dichte von $3 \cdot 10^{13}$ bzw. $6 \cdot 10^{13}$ Teilchen pro Kubikzentimeter aufgebaut werden. Wegen der kurzen Wellenlänge von vier Millimetern können die Mikrowellen direkt über Fenster und Spiegel quasioptisch in das Plasma eingestrahlt werden. Eine Antenne in Plasmanähe ist hierfür nicht nötig, was den Verunreinigungsfluß in das Plasma erheblich reduziert. Ein großer Vorteil der Elektronen-Zyklotronheizung ist es, daß sie das Plasma lokal aufheizen kann. So läßt sich die Temperaturverteilung der Elektronen gezielt verändern und außerdem mit lokalem Stromtrieb die Plasmadruckwirkung auf das Vakuumfeld kompensieren. Die Experimente zur Elektronen-Zyklotronheizung an WENDELSTEIN VII-AS werden zusammen mit dem **Institut für Plasmaforschung (IPF) der Universität Stuttgart** ausgeführt, wo die Leitungen zur Übertragung der Mikrowellen entwickelt wurden.

Abbildung 1: Charakteristische Daten des Experimentes WENDELSTEIN VII-AS

Radius der Anlage (über alles):	3,6 Meter
Höhe (über alles):	4 Meter
Gewicht:	250 Tonnen
Großer Plasmaradius:	2 Meter
Mittlerer kleiner Plasmaradius:	0,2 Meter
Anzahl der modularen Spulen:	45
Strom pro Spulenwindung:	37 Kiloampere
Magnetfeld:	3 Tesla
Rotationstransformation:	0,25 – 0,6
Pulsdauer:	3 Sekunden
Heizleistung:	
– Elektronen-Zyklotronheizung:	1 Megawatt
– Ionen-Zyklotronheizung:	1,5 Megawatt
– Neutral-Injektion:	1,5 Megawatt

Inzwischen steht zur Anhebung der Dichtegrenze ein Gyrotron mit höherer Sendefrequenz von 140 Gigahertz zur Verfügung. Der Prototyp wurde mit 100 Kilowatt Leistung für eine Pulsdauer von 0.1 Sekunde im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) entwickelt. Bei einem Magnetfeld von 2.5 Tesla läßt sich damit die Dichtegrenze, ab der die Mikrowellen vom Plasma nicht mehr aufgenommen werden, auf $1.2 \cdot 10^{14}$ Teilchen pro Kubikzentimeter anheben. Erste Plasmaexperimente waren bereits erfolgreich. Wegen der geringen Senderleistung wird das System weniger zur Heizung als für diagnostische Zwecke bei hohem Plasmadruck und hohen Dichten benutzt. Dagegen wurde die Übertragungsleitung als Pilotprojekt vom IPF Stuttgart für spätere Anwendungen bei WENDELSTEIN VII-AS, WENDELSTEIN VII-X oder ASDEX Upgrade bereits für eine Übertragungsleistung von einem Megawatt ausgelegt.

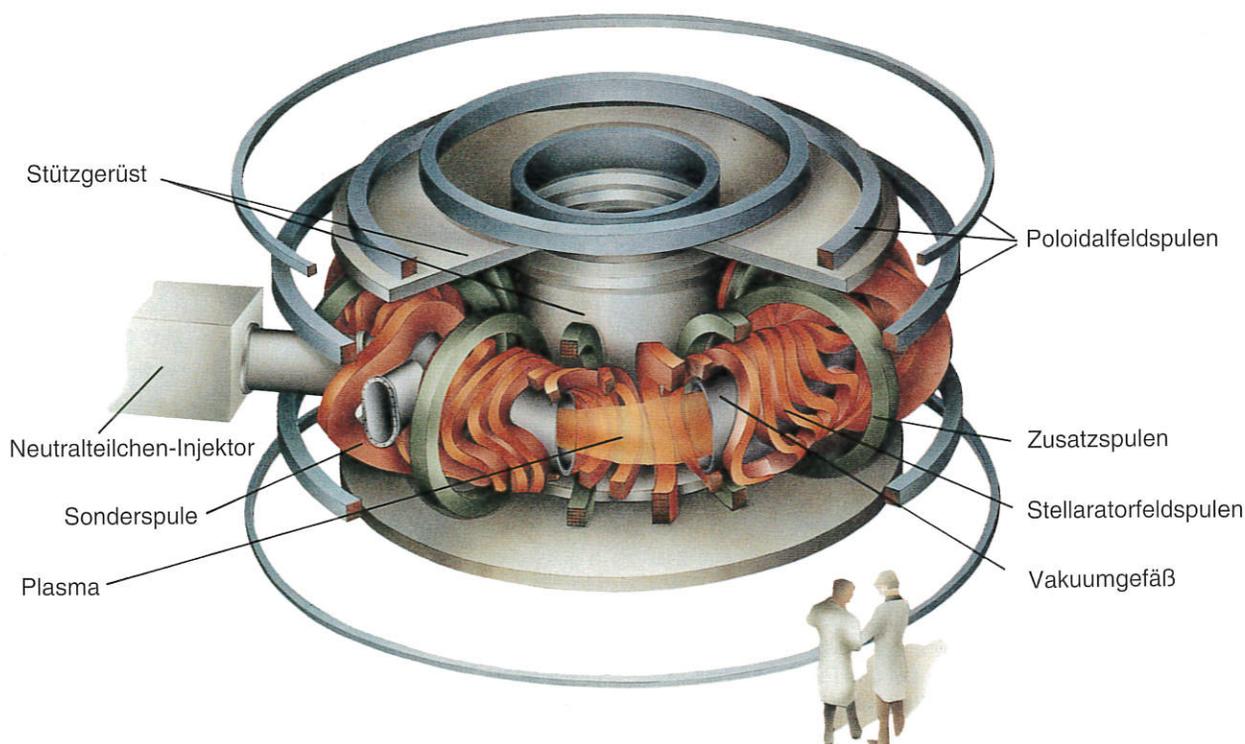
WENDELSTEIN VII-AS ist mit zwei Injektoren für die Neutralteilchenheizung ausgerüstet. Da die beiden Injektoren mit gegenläufiger Strahlrichtung angeordnet sind, kann mit ihrer Hilfe auch über Stromtrieb der Plasmastrom gesteuert werden. Ihre Leistung wird in das durch Elektronenzyklotron-Heizung erzeugte Plasma eingekoppelt. Da der damit verbundene Teilchenfluß die Plasmadichte

jedoch über die Dichtegrenze der Elektronen-Zyklotronheizung hinaus anhebt, ist bei guten Einschlußbedingungen eine kombinierte Heizung mit Elektronen-Zyklotronheizung bei 70 Gigahertz nicht möglich.

Die Hochfrequenzheizung bei der Ionen-Zyklotronfrequenz bei 38,76 Megahertz – die dritte Heizmethode an WENDELSTEIN VII-AS – könnte die Schwierigkeiten der Dichtekontrolle bei Neutralinjektion überwinden. Allerdings ist eine Ankopplung an das Plasma unter den Bedingungen des WENDELSTEIN VII-AS besonders schwierig. Bisherige Experimente mit einem konventionellen Antennensystem führten zu einem Anstieg der Verunreinigungen und Gasfreisetzung aus der Wand. Allerdings ist der Aufbau des Plasmas zur weiteren Heizung mit Neutralinjektion gelungen, so daß ein weiteres Verfahren zur Plasmaerzeugung zur Verfügung steht. Mit einem veränderten Antennensystem und verringerter Feldstärke soll die Optimierung der Ionen-Zyklotronheizung weiter verfolgt werden.

In der ersten Betriebsphase zeigten sich überraschend große Deformationen an einzelnen modularen Spulen, weswegen aus Sicherheitsgründen das Magnetfeld auf die halbe Feldstärke von 1.25 Tesla beschränkt wurde.

Abbildung 2: Spulenanordnung von WENDELSTEIN VII-AS: Das Experiment besitzt ein Hauptspulensystem aus 45 nicht-ebenen Einzelspulen (rot). Ihr Magnetfeld kann mit Hilfe ebener Zusatzspulen (grün) zur Veränderung der Rotationstransformation variiert werden. Ein Vertikalfeld (graue Poloidalfeldspulen) dient zur Verschiebung der Plasmasäule im Gefäß.



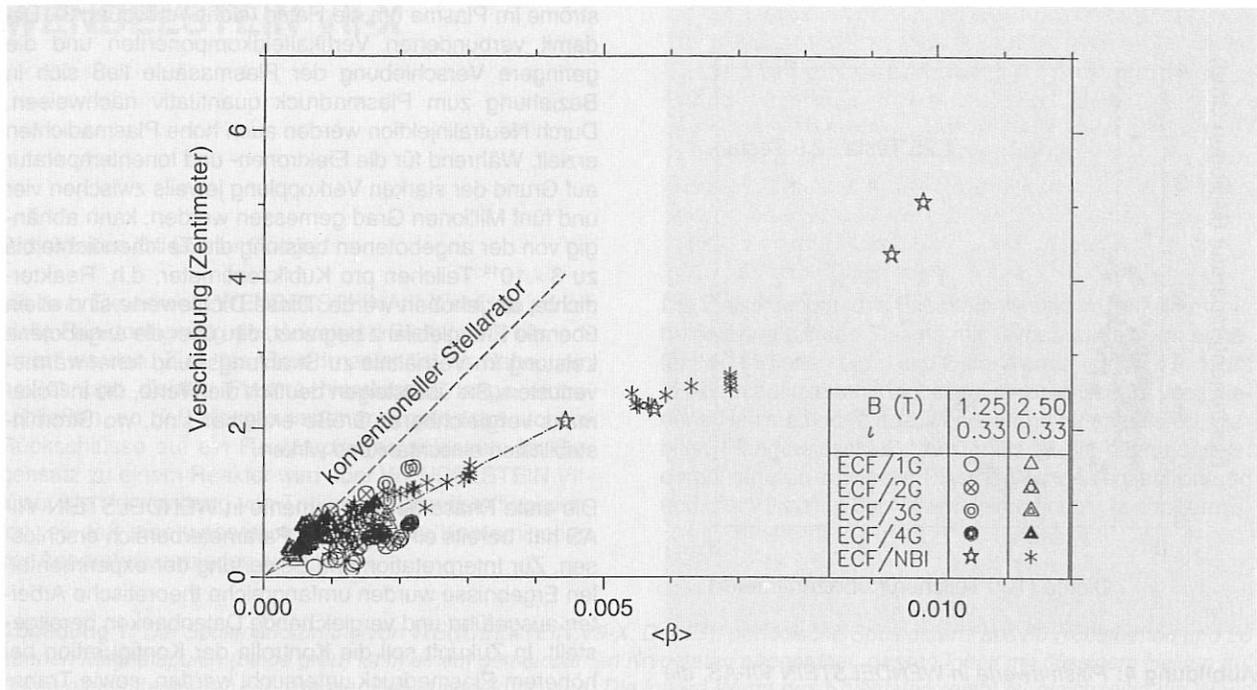


Abbildung 3: Verbesserung des Gleichgewichts auf Grund der »Optimierung« von WENDELSTEIN VII-AS: Die Horizontalverschiebung der Plasmasäule im Gefäß ist abhängig vom Plasmadruck (bzw. β) dargestellt. Zum Vergleich wurde die größere Verschiebung bei einem konventionellen Stellarator gegenübergestellt (gestrichelte Linie).

Seit Dezember 1989 läuft nach einer Versteifung der Spulenabstützung der Betrieb bei dem vollen Magnetfeld von 2.5 Tesla routinemäßig. Beeinträchtigungen der projektierten Lebensdauer des Systems von ca. zehn Jahren sind nicht mehr zu befürchten. Bisher liefen 14000 Entladungen, davon 7000 bei vollem Magnetfeld mit einer typischen Pulsdauer von 0.5 bis 1.5 Sekunden.

Alle vorgesehenen Meßgeräte zur Beobachtung des Plasmas sind in Betrieb. Mit Ende der Betriebszeit des Tokamaks ASDEX wurde ein Teil der ASDEX-Mannschaft in das WENDELSTEIN VII-AS-Team integriert und einige technische Einrichtungen von ASDEX übernommen, was insbesondere für die Diagnostik von Fluktuationen und Plasma-Wand-Wechselwirkung entscheidende Verbesserungen gebracht hat. Die Beschreibung von Verunreinigungsflüssen im Wandbereich und vorbereitende Maßnahmen zur Dichte- und Verunreinigungskontrolle werden auch durch die neue Zusammenarbeit mit dem Zentralinstitut für Elektronenphysik in Berlin (ZIE) verstärkt.

Die zahlreichen Meßsysteme stellen die Plasmaparameter mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung dar. Die komplizierte, nicht-axialsymmetrische Plasmagestalt macht es notwendig, an unterschiedlichen toroidalen Positionen bestimmte Plasmawerte nicht auf den Radius, sondern auf magnetische Flächen zu beziehen. Diese Transformationen haben außerdem die Verzerrung der magnetischen Vakuumflächen durch den Plasmadruck zu berücksichtigen. Das hierzu entwickelte Datenerfassungssystem UDAS hat seine Bewährungsprobe bereits bestanden. Im Verbund der 16 Subrechner werden pro Schuß bis zu fünf Megabyte an Daten gewonnen und zur Auswertung und Dokumentation in das Rechenzentrum übertragen.

Die Experimente waren bisher auf Einschlußuntersuchungen an Plasmen konzentriert, die durch Elektronenzyklotron-Wellen und Neutralteilcheninjektion geheizt wurden. Mit Hochfrequenzheizung bei 70 Gigahertz und Leistungen bis zu 0.8 Megawatt wurden bei vollem Magnetfeld Plasmadichten bis zu $5 \cdot 10^{13}$ Teilchen pro Kubikzentimeter, Elektronentemperaturen bis zu 25 Millionen Grad und Ionentemperaturen um 4,5 Millionen Grad erreicht. Die Ionen werden dabei über Stöße durch die heißeren Elektronen geheizt. Durch Bedecken der Wände mit dünnen Schichten aus Kohlenstoff oder Bor konnten aus der Wand stammende Verunreinigungen entscheidend reduziert werden. Die damit verbundene Senkung der Strahlungsverluste hat die globalen Einschlußzeiten und Temperaturen wesentlich erhöht. Beachtliche Energieeinschlußzeiten bis zu 40 Millisekunden wurden so möglich.

Der lokale Energie- und Teilchentransport wird über die Energie- und Teilchenbilanz analysiert. Dazu werden lokale Energieaufnahme und Teilchenerzeugung mit gemessenen Plasmawerten, wie Temperatur- und Dichteprofilen, Neutralteilchendichten und Strahlungsprofilen verknüpft. Die so gewonnenen lokalen Transportkoeffizienten lassen sich mit Vorhersagen der theoretischen Modelle vergleichen, die dem Advanced Stellarator zu Grunde liegen. Im allgemeinen wurde eine gute Übereinstimmung der experimentellen Ergebnisse mit der Theorie gefunden: Die lokalen Werte für die Elektronen- und Ionenwärmeleitung sowie den Teilchentransport werden durch die Optimierungsprinzipien im Zentralbereich gut genähert. Im Randbereich fanden sich jedoch signifikante Abweichungen und Erhöhungen der Verluste, deren physikalische Ursachen noch nicht ausreichend beschrieben werden konnten.

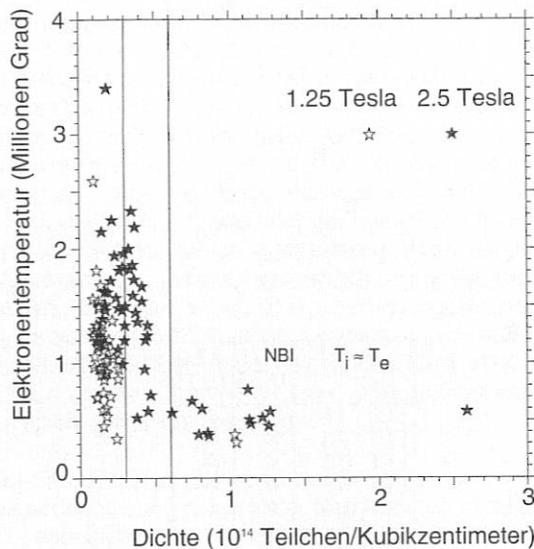


Abbildung 4: Plasmawerte in WENDELSTEIN VII-AS, die mit Elektronen-Zyklotronresonanzheizung bei 70 Gigahertz und Neutralinjektion erreicht wurden. Bei einem Magnetfeld von 1,25 Tesla werden die Elektronen-Zyklotronwellen bei Erreichen einer Plasmadichte von $3 \cdot 10^{13}$ Teilchen pro Kubikzentimeter nicht mehr aufgenommen, bei doppelter Feldstärke von 2,5 Tesla liegt die Aufnahmegrenze für die Mikrowellen doppelt so hoch. Anschließend wurde mit Neutralteilchen weitergeheizt. Dargestellt ist die Elektronentemperatur und die Dichte im Plasmazentrum.

Der sich selbständig einstellende Plasmastrom – der sogenannte bootstrap-Strom – der ohne toroidales elektrisches Feld durch radiale Dichte- und Temperaturunterschiede angetrieben wird, kann ebenfalls sehr gut als globale Größe in Abhängigkeit von Magnetkonfiguration und Temperaturverteilung beschrieben werden. Obwohl dieser Strom mit maximal fünf Kiloampere relativ klein bleibt, verändert er die magnetische Konfiguration. Deshalb ist eine Kontrolle des Stroms notwendig, um das Auftreten von rationalen Werten der Rotationstransformation im Plasmabereich zu vermeiden. Bei rationalen Werten der Rotationstransformation wird nämlich das System von geschlossenen magnetischen Flächen zerstört, und damit der Einschluß verschlechtert. Die Elektronenzyklotron-Heizung kann durch gegenläufigen lokalen Stromtrieb den bootstrap-Strom kontrollieren und so den Einschluß optimieren.

Höchste Plasmadrücke werden durch Neutralteilcheninjektion erreicht. Bei einer Injektionsleistung von 1,5 Megawatt und halbem Magnetfeld wurden mittlere Beta-Werte bis zu 1,2 Prozent erreicht. Maximale zentrale Beta-Werte von 1,6 Prozent bei vollem Feld und über zwei Prozent bei halbem Feld führen nahe an die vorhergesagten Grenzen der Stabilität. Damit ließ sich bereits eine wesentliche Gleichgewichts-Eigenschaft des Advanced Stellarators bestätigen. Gegenüber einem konventionellen Stellarator verringert die optimierte Konfiguration von WENDELSTEIN VII-AS die Gleichgewichts-

ströme im Plasma um die Hälfte (siehe Abbildung 3). Die damit verbundenen Vertikalfeldkomponenten und die geringere Verschiebung der Plasmasäule ließ sich in Beziehung zum Plasmadruck quantitativ nachweisen. Durch Neutralinjektion werden auch hohe Plasmadichten erzielt. Während für die Elektronen- und Ionen temperatur auf Grund der starken Verkopplung jeweils zwischen vier und fünf Millionen Grad gemessen werden, kann abhängig von der angebotenen Leistung die Teilchendichte bis zu $3 \cdot 10^{14}$ Teilchen pro Kubikzentimeter, d.h. Reaktordichte, angehoben werden. Diese Dichtewerte sind allein über die Energiebilanz begrenzt, d.h. über die angebotene Leistung im Verhältnis zu Strahlungs- und Ionenwärmeverlusten. Sie übersteigen deutlich die Werte, die in Tokamaks vergleichbarer Größe erzielbar sind, wo Stromstabilitäten einschränkend wirken.

Die erste Phase der Experimente in WENDELSTEIN VII-AS hat bereits einen großen Parameterbereich erschlossen. Zur Interpretation und Bewertung der experimentellen Ergebnisse wurden umfangreiche theoretische Arbeiten ausgeführt und vergleichende Datenbanken bereitgestellt. In Zukunft soll die Kontrolle der Konfiguration bei höherem Plasmadruck untersucht werden, sowie Transport und Anomalie im Randbereich und Fragen zur Verunreinigungskontrolle. Eine Erhöhung der Heizleistung ist geplant. Die Elektronenzyklotron-Heizung bei 70 Gigahertz soll durch Einheiten bei 140 Gigahertz auf eine Leistung von zwei Megawatt erhöht werden; die Neutralinjektionsleistung durch eine Verdopplung der Quellen auf drei Megawatt gesteigert werden.

Bei einer Erweiterung des Parameterbereichs werden Verunreinigungs- und Dichtekontrolle eine entscheidende Rolle spielen. WENDELSTEIN VII-AS bietet die Möglichkeit, die Plasmaquerschnitte sowohl durch Limiter als auch durch eine magnetische Separatrix zu begrenzen. Die im Separatrixbetrieb auftretenden lokalisierten Energie- und Teilchenflüsse im Plasmaußenraum könnten für divertorähnliche Teilchenfallen genutzt werden. Insgesamt wurde bisher eine gute Datenbasis für das Konzept des Advanced Stellarator erarbeitet; die Bestätigung von erwarteten Plasmaeinschlußeigenschaften drängen zu einer Weiterverfolgung der Entwicklungslinie.

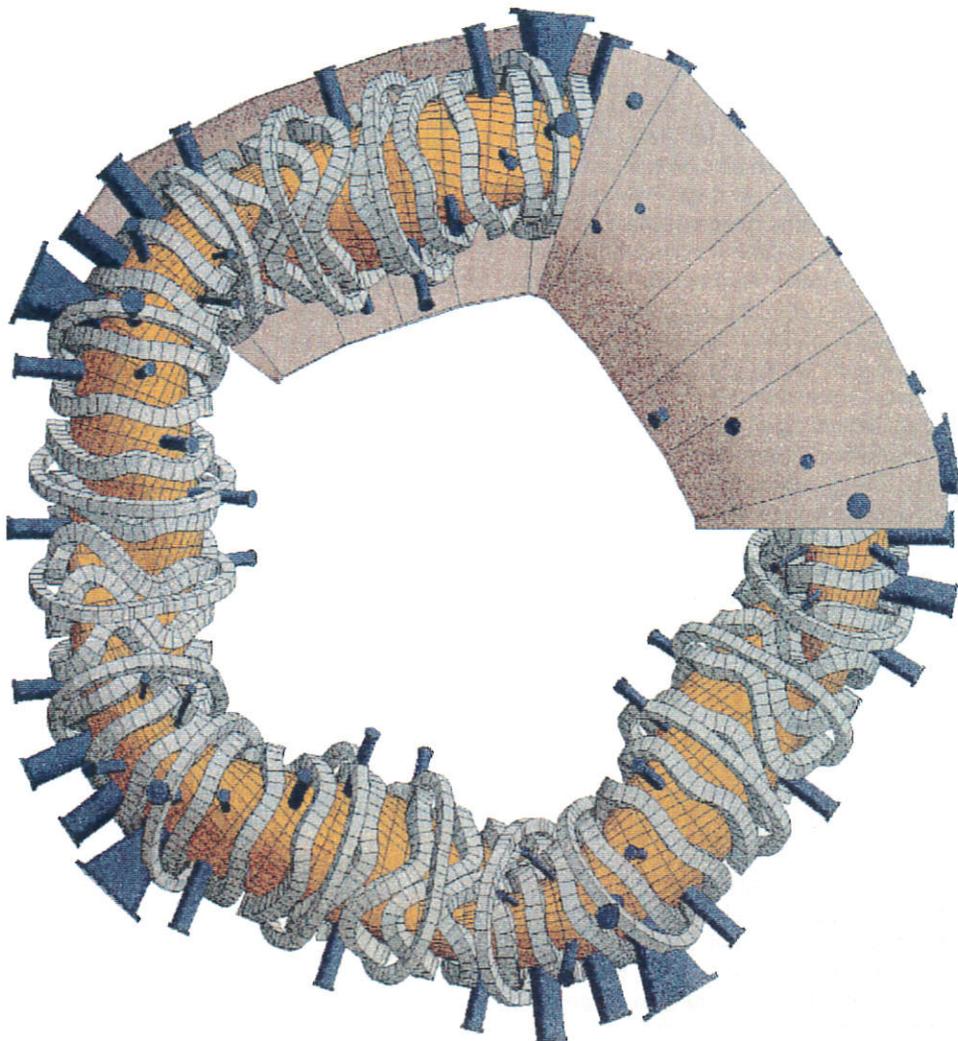
WENDELSTEIN VII-X

Projektleiter: Dr. Günter Grieger

Mit dem Experiment WENDELSTEIN VII-X soll die prinzipielle Reaktoreignung des Advanced Stellarators demonstriert werden. Ziel des Experimentes ist es daher, ein heißes und dichtes Plasma hinreichend lange einzuschließen, so daß die gewonnenen Ergebnisse sichere Rückschlüsse auf ein Reaktorplasma zulassen. Im Gegensatz zu einem Reaktor wird aber WENDELSTEIN VII-X auf die Verwendung von Tritium als Brennstoff verzichten, so daß eine wesentliche radioaktive Kontamination der Apparatur vermieden wird.

Die Zielsetzungen des Experiments sind im einzelnen, ein heißes und dichtes Plasma mit Temperaturen von ungefähr 50 Millionen Grad und Beta-Werten von fünf Prozent in einem optimierten Magnetfeld einzuschließen, verschiedene Heizmethoden anzuwenden und zu optimieren, stabilen Plasmaeinschluß über mehr als 20 Sekunden zu demonstrieren sowie die Plasma-Wand-Wechselwirkung und das Verhalten der Verunreinigungen zu kontrollieren.

Abbildung 1: Die Spulenanordnung von WENDELSTEIN VII-X: Der fünf-periodische Spulenkranz aus 50 nichtebenen und 20 ebenen Magnetspulen (beide grau) ist in einem gemeinsamen Kryostaten angeordnet, dessen Inhalt mit flüssigem Helium auf Supraleitungstemperaturen von vier Kelvin abgekühlt wird. Die innere Wand des Kryostaten (gelb) ist gleichzeitig die Wand des Plasmagefäßes. Stützen (blau) zum Anschluß von Meßgeräten, Heizungen und Vakuumpumpen führen – thermisch isoliert – durch den kalten Spulenbereich.



Der modulare Aufbau des Spulensystems setzt die bereits im Vorgänger WENDELSTEIN VII-AS mit Erfolg verwirklichte Linie fort. Es besteht aus 50 modularen Einzelspulen, die in fünf gleichen Perioden mit je zehn nicht-ebenen Spulen pro Periode angeordnet sind. Aus Symmetriegründen gibt es aber nur fünf geometrisch verschiedene Spulen pro Periode. Da dieser Spulensatz alleine ein festes Magnetfeld ohne Variationsmöglichkeiten liefert, wird ein zweiter Spulensatz von zwanzig Spulen überlagert. Er erlaubt es, die Geometrie des Magnetfeldes maximal um zehn Prozent zu ändern und gibt damit dem Experiment die notwendige Flexibilität. Die Abmessung der Anlage hat sich gegenüber dem früheren Plan geändert, der mittlere große Plasmaradius wurde von 6,5 auf 5,5 Meter reduziert (siehe Tabelle). Diese Verkleinerung der Apparatur erfolgte nach Abwägung aller Gesichtspunkte: Die Notwendigkeit, Plasma und erste Wand so weit wie möglich von einander zu trennen und den gewonnenen Zwischenraum zur Kontrolle der Verunreinigungen zu nutzen, spricht für eine möglichst große Apparatur, während auf der anderen Seite der technische Aufwand und die Kosten nahezu mit dem Volumen steigen. Wegen der angestrebten Pulszeit von mehr als 20 Sekunden wird das Magnetfeld des WENDELSTEIN VII-X – anders als beim Vorgänger – mit Hilfe von supraleitenden Spulen erzeugt. Für eine normalleitende Ausführung hätte man wegen der großen elektrischen Verluste die Stromversorgung des IPP erheblich erweitern müssen, was jedoch auch dann eine Pulszeit von nur etwa fünf Sekunden erreichbar gemacht hätte.

Die mit diesen Spulen erzeugte Magnetfeldstruktur des WENDELSTEIN VII-X ist eine fünf-periodische Helias-Konfiguration (Helias = Helical Advanced Stellarator). Sie zeichnet sich unter anderem durch eine helikal gewundene magnetische Achse aus, was günstige Plasmaeigenschaften erlaubt. Umfangreiche theoretische Untersuchungen in den vergangenen Jahren – insbesondere des Bereichs Theorie 2 (siehe dort) – haben die besondere Reaktoreignung dieser Magnetfeldkonfiguration gezeigt: Die Lage der Plasmasäule im Gefäß ändert sich mit steigendem Plasmadruck sehr wenig, die Stabilitätsgrenze wird bei mittleren Beta-Werten von 4,3 Prozent erwartet. Die schnellen Alphateilchen, die in einem brennenden Plasma entstehen, werden in einer Helias-Konfiguration gut eingeschlossen; bei geeigneter Wahl des Magnetfeldes lassen sich Verluste weitgehend vermeiden. In WENDELSTEIN VII-X, der ohne die Verwendung von Tritium mit einem Modellplasma aus normalem Wasserstoff arbeitet, soll das Verhalten der Alphateilchen durch eingeschossene schnelle Teilchen mit Energien von 60 Kiloelektronenvolt simuliert werden. Umfangreiche Untersuchungen befaßten sich mit den Verlusten des Plasmas aufgrund der Coulomb-Wechselwirkung der geladenen Plasmateilchen. Dieser klassische oder neoklassische Verlustmechanismus würde in einem Stellaratorreaktor die Zündung verhindern, wenn nicht eine geeignete Formgebung des Magnetfeldes eine Reduktion möglich machte. In einer Helias-Konfiguration gelingt es nun, die Teilchenbahnen so zu gestalten, daß der neoklassische Verlust auf ein für die Zündung tolerables Maß vermindert werden kann. Besonderen Wert bei diesen Untersuchungen wurde auch auf die Minimierung des Bootstrap-Stroms gelegt. Dieser Ringstrom, der durch eine Besonderheit der Teilchenbahnen im Magnetfeld zustande

Radius der Anlage (über alles):	7,5 Meter
Höhe (über alles):	ca. 4 Meter
Gewicht:	550 Tonnen
Großer Plasmaradius:	5,5 Meter
Mittlerer kleiner Plasmaradius:	0,53 Meter
Anzahl der modularen Spulen:	50
Anzahl der ebenen Zusatzspulen:	20
Magnetfeld:	3 Tesla
Rotationstransformation (Achse):	0,84
Verscherung:	0,1-0,14
Pulsdauer:	20-30 Sekunden, Dauerbetrieb mit Elektronenzyklotron-Heizung
Heizleistung:	20 Megawatt

Abbildung 2: Charakteristische Daten des Experimentes WENDELSTEIN VII-X (nach dem Stand der Planungen im Juni 1991).

kommt und sich aus der inneren Energie des Plasmas speist, stellt für Stellaratoren eine Gefahr dar, weil er das Magnetfeld auf ungünstige Weise verändert. Er kann jedoch auf unwesentliche Werte reduziert werden. In der in WENDELSTEIN VII-X gewählten Konfiguration ist dies verwirklicht.

Ein weiteres Thema der theoretischen Vorarbeiten für WENDELSTEIN VII-X ist die Plasma-Wand-Wechselwirkung. Mit Hilfe von Teilchenbahnrechnungen konnten die durch das ausströmende Plasma besonders belasteten Gebiete auf der Gefäßwand oder auf eingebauten Aufprallflächen gefunden werden. Außerdem wurde das Verhalten von Neutralteilchen in dieser Randschicht numerisch untersucht. Die Rechnungen haben zum Ziel, einen Divertor für WENDELSTEIN VII-X zu entwickeln.

Von grundsätzlicherer Bedeutung sind die Untersuchungen zum Plasmagleichgewicht in allgemeiner dreidimensionaler Stellarator-Geometrie. Eine befriedigende Beschreibung muß die Existenz von magnetischen Inseln und stochastischen Gebieten zulassen, die bei WENDELSTEIN VII-X insbesondere in den Randgebieten auftreten können. Es ist nun gelungen, hierzu ein Modell unter Hinzunahme von Stoß- und Reibungseffekten der Plasmateilchen untereinander aufzustellen und für diesen Fall – im Unterschied zu dem idealen magnetohydrodynamischen Gleichgewicht – die Existenz und Eindeutigkeit von Lösungen zu beweisen.

Das technische Kernstück des WENDELSTEIN VII-X sind die supraleitenden Spulen. Wegen des relativ geringen Magnetfeldes von sechs Tesla auf den Spulen kann Niob-Titan als Material für die Supraleiter verwendet werden. Von den Firmen Siemens-Interatom und ABB wurden Studien zur Machbarkeit eines modularen Spulensatzes angefertigt und 1989 vorgelegt. Sie erfassen die Herstellungsprobleme eines solchen Spulensatzes und zeigen Lösungen auf. Danach können die Spulen mit heutiger Technik gefertigt werden. Die Übertragung der

Studienergebnisse auf den fünf-periodischen Spulensatz mit 20 Zusatzspulen zur Feldvariation führt auf eine Gesamtanordnung, wie sie in der Abbildung gezeigt ist. Alle Spulen sind in einem gemeinsamen Kryostaten angeordnet, der mit flüssigem Helium auf Supraleitungstemperaturen von vier Kelvin abgekühlt wird. Die innere Wand des Kryostaten ist gleichzeitig die Wand des Vakuumpfäßes, das mit mehr als hundert Öffnungen für Beobachtungs- und Heizstützen ausgestattet ist, die thermisch isoliert durch den kalten Spulenbereich hindurchgeführt werden. Zwischen den Spulen befinden sich dem Kraftfluß entsprechend angeordnete Strukturteile, um ein toroidales Gewölbe aufzubauen.

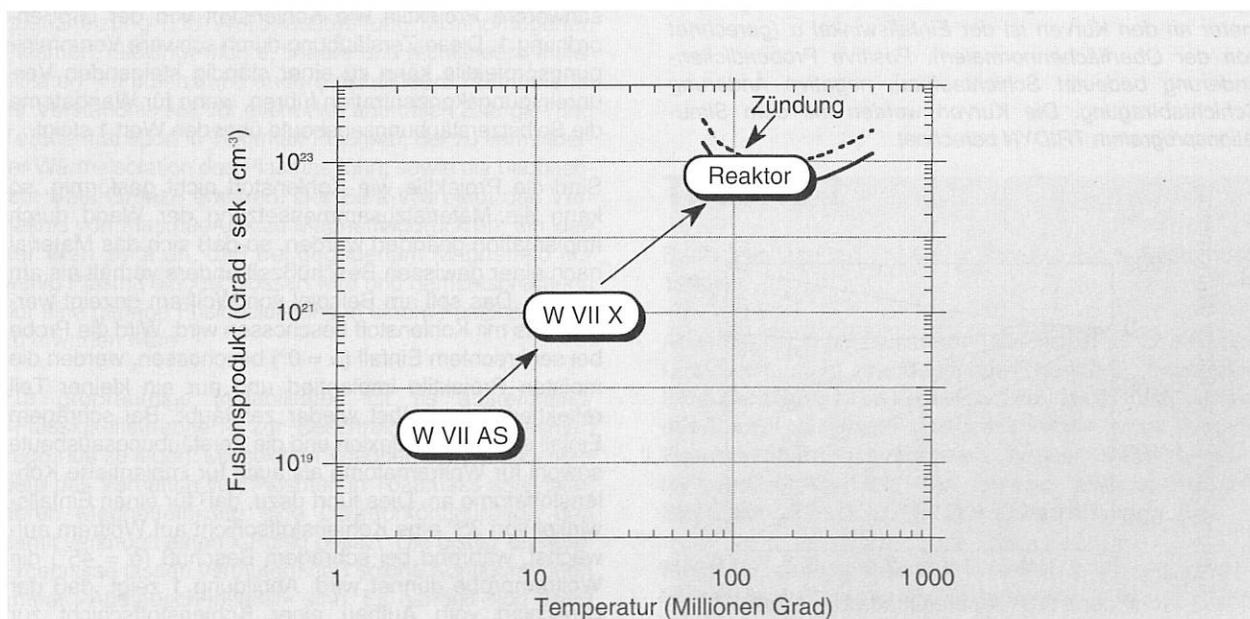
Bevor die Anlage in die Bauphase gehen kann, sind umfangreiche Entwicklungsarbeiten erforderlich; insbesondere ist die Herstellung einer supraleitenden Prototypspule vorgesehen. Mit der Herstellung eines Teststückes für ein innengekühltes supraleitendes Kabel wurde bereits begonnen. In einem weiteren Schritt wird dieses Kabel zu einer Zylinderspule gewickelt und dann im Teststand STAR des Kernforschungszentrums Karlsruhe elektromagnetisch und hydraulisch bei vollen Betriebswerten geprüft. Darauf folgt dann der Bau der Prototypspule und eines Kryostatstückes, um diese Komponenten ebenfalls bei Betriebsbedingungen zu testen. Der weitere Fortgang dieser Arbeiten hängt von dem derzeit laufenden Genehmigungsverfahren für das gesamte Projekt ab. 1990 wurde der Experimentvorschlag WENDELSTEIN VII-X formuliert und den zuständigen EURATOM-Gremien vorgelegt. Eine Entscheidung zur Phase I des Genehmigungsverfahrens wird bis Ende 1991 erwartet.

Erste Überlegungen zu einem Fusionsreaktor nach dem Helias-Prinzip zeigen, daß dieses Konzept eine echte Alternative zum Tokamakreaktor sein könnte. Ein Reaktor

mit der Magnetfeldkonfiguration des WENDELSTEIN VII-X wäre mit einem großen Plasmaradius von 20 Metern etwa dreimal so groß wie ein Tokamak, dafür mit einem kleinen Plasmaradius von 1.6 Metern aber wesentlich schlanker. Die gespeicherte magnetische Energie – näherungsweise ein Maß für die Baukosten – ist in etwa so groß wie in einem Tokamakreaktor. Da die Stellaratoren zum Aufbau des Magnetfeldes ohne Plasmastrom auskommen, fallen bei ihnen alle mit dem Plasmastrom der Tokamaks verbundenen Unannehmlichkeiten weg; Es werden keine Apparaturen benötigt zum Herstellen und Kontrollieren des Stroms, Stromabbrüche können nicht auftreten und das Plasma liegt ohne Lageregelung stabil. Außerdem sind Stellaratoren von vornherein für Dauerbetrieb geeignet, anders als Tokamaks, die – wegen des Plasmastromes – ohne spezielle Zusatzeinrichtungen nur pulsweise arbeiten können. Unter dem immer mehr an Bedeutung gewinnenden Gesichtspunkt der Reaktortechnologie betrachtet, könnten Stellaratoren also die technisch einfachere Lösung sein.

Auf plasmaphysikalischer Seite erfüllen die Stabilität und der neoklassische Transport die vom Reaktor gesetzten Ziele. Unbekannt bleibt vorerst, wie sich der in Stellaratoren bisher ähnlich wie in Tokamaks beobachtete anomale Transport unter reaktorähnlichen Bedingungen verhält. Nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand müßte er halbiert werden, um die Zündbedingung zu erfüllen – eine Situation, die in der weltweiten Tokamakforschung bis zur Entdeckung des H-Regimes am IPP-Tokamak ASDEX ebenso galt. Es gibt Anhaltspunkte dafür, daß die Optimierungsprinzipien einer Heliaskonfiguration selbst für eine wesentliche Reduktion des anomalen Transports sorgen werden; Gewißheit kann hier aber nur das Experiment liefern.

Abbildung 3: Das zur Zündung in einem Reaktor nötige Fusionsprodukt aus zentraler Plasmatemperatur, Plasmadichte und Energieeinschlußzeit im Vergleich mit den von WENDELSTEIN VII-AS und WENDELSTEIN VII-X angestrebten Werten (aufgetragen als Funktion der Temperatur). Die Extrapolation folgt der Lackner-Gottardi-Skalierung.



Allgemeine Arbeiten zur Fusion

Plasma-Wand-Wechselwirkung

Bereichsleiter: Prof. Dr. Volker Dose,
Prof. Dr. Jürgen Küppers

Die Wechselwirkung eines Fusionsplasmas mit den Gefäßwänden beruht, abgesehen von der Einwirkung elektromagnetischer Strahlung aus dem Plasma, auf dem unvollständigen magnetischen Einschluß des Plasmas. Plasmateilchen, neutrale Atome oder Ionen können durch Stöße die äußeren Magnetflächen durchdringen und dann auf die Wand auftreffen. Hier werden sie zum Teil aufgenommen und zum Teil reflektiert. Sie tragen also sowohl zum Wasserstoff-Inventar der Wand bei und als auch zum Recycling des Wasserstoffs in der Plasmaanlage. Die Plasmateilchen produzieren aber auch Verunreinigungen, indem sie Wandatome losschlagen, die in das Plasma eindringen. Da diese Wandatome im Plasma nicht vollständig ionisiert werden können, strahlen sie intensiv und entziehen damit dem Plasma Energie. Deshalb dürfen diese Verunreinigungen gewisse Konzentrationen im Plasma nicht überschreiten. Dieser Erosionsprozeß wird Zerstäubung genannt und findet vorwiegend an den das Plasma begrenzenden Limitern oder Divertoren statt. Ein Aspekt dieses Prozesses soll im folgenden näher beschrieben werden.

Abbildung 1: Änderung der Dicke einer Wolframprobe in Abhängigkeit von der Fluenz der einfallenden Kohlenstoffatome (mit einer Energie von 6 Kiloelektronenvolt). Parameter an den Kurven ist der Einfallswinkel α (gerechnet von der Oberflächennormalen). Positive Probendickenänderung bedeutet Schichtaufbau, negative Änderung Schichtabtragung. Die Kurven werden mit dem Simulationsprogramm TRIDYN berechnet.

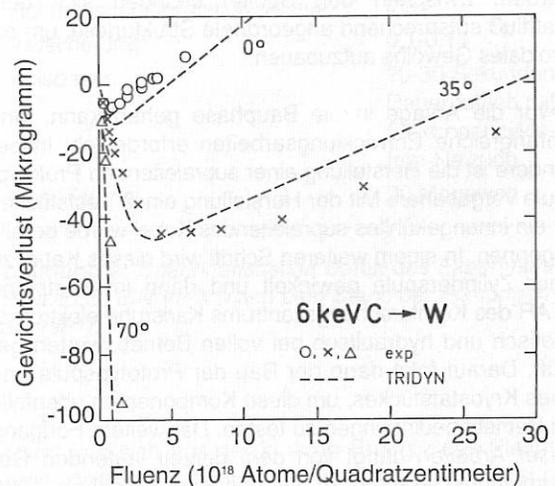
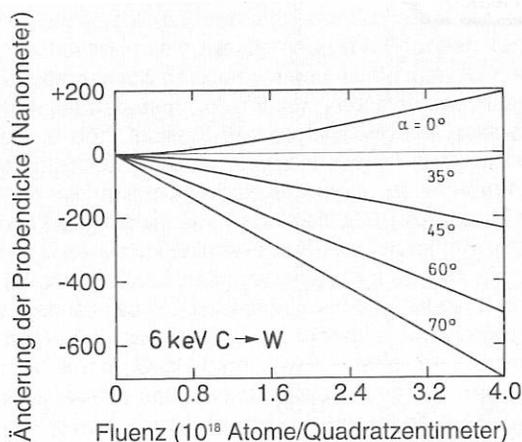


Abbildung 2: Vergleich von gemessenen und berechneten Gewichtsänderungen einer Wolframprobe, die mit Kohlenstoffatomen (mit einer Energie von 6 Kiloelektronenvolt und drei verschiedenen Einfallswinkeln $\alpha = 0, 35$ und 70 Grad) beschossen wird.

Die Zerstäubung wird charakterisiert durch die Zerstäubungsausbeute, die als mittlere Zahl der abgestäubten Atome pro einfallendes Projektil definiert ist. Die Zerstäubungsausbeute hängt von der Energie der Projektile und dem Auftreffwinkel ab und natürlich vom Material der Wand und der Projektilsorte. Für Wasserstoff ist die Ausbeute maximal von der Größenordnung 1/100, für schwerere Projektile wie Kohlenstoff von der Größenordnung 1. Diese Zerstäubung durch schwere Verunreinigungsprojektile kann zu einer ständig steigenden Verunreinigungskonzentration führen, wenn für Wandatome die Selbstzerstäubungsausbeute über den Wert 1 steigt.

Sind die Projektile wie Kohlenstoff nicht gasförmig, so kann die Materialzusammensetzung der Wand durch Implantation geändert werden, so daß sich das Material nach einer gewissen Beschußzeit anders verhält als am Anfang. Das soll am Beispiel von Wolfram gezeigt werden, das mit Kohlenstoff beschossen wird: Wird die Probe bei senkrechtem Einfall ($\alpha = 0^\circ$) beschossen, werden die meisten Projektile implantiert und nur ein kleiner Teil reflektiert bzw. selbst wieder zerstäubt. Bei schrägem Einfall steigt die Reflexion und die Zerstäubungsausbeute sowohl für Wolframatom als auch für implantierte Kohlenstoffatome an. Dies führt dazu, daß für einen Einfallswinkel von 35° eine Kohlenstoffschicht auf Wolfram aufwächst, während bei schrägem Beschuß ($\alpha = 45^\circ$) die Wolframprobe dünner wird. Abbildung 1 zeigt, daß der Umschlag vom Aufbau einer Kohlenstoffschicht zur

Erosion von Wolfram für Einfallswinkel zwischen 35° und 45° erfolgt und daß in diesem Winkelbereich eine hohe Fluenz benötigt wird, um zu Gleichgewichtsbedingungen zu kommen. Abbildung 2 zeigt die gute Übereinstimmung dynamischer Monte-Carlo-Rechnungen des Rechenprogramms TRIDYN mit experimentellen Ergebnissen für die Einfallswinkel 0° , 35° und 70° . Da Wolfram sehr viel schwerer ist als Kohlenstoff, findet zuerst ein Gewichtsverlust statt bei $\alpha = 0^\circ$ und 35° und dann ein Gewichts-gewinn durch den Aufbau der Kohlenstoffschicht auf Wolfram. Bei Einfallswinkeln, die größer sind als 45° (hier 70°), erfolgt eine ständige Erosion der Wolframoberfläche.

Ähnliche Rechnungen und Messungen wurden auch für Kohlenstoff auf Beryllium – was im europäischen JET-Experiment verwendet wird – durchgeführt. Allerdings zeigen hier die Messungen bei schrägem Beschuß ($\alpha = 70^\circ$) eine wesentlich geringere Erosion als die Ergebnisse von Simulationsrechnungen. Die gemessene Tiefenverteilung des Kohlenstoffs im Beryllium ist wesentlich größer als es der Reichweite der Kohlenstoff-Projektile im Beryllium entspricht, so daß in diesem Fall Diffusionseffekte selbst bei Zimmertemperatur eine Rolle spielen. Da die Simulationsrechnungen nur die Stoßeffekte berücksichtigen, kann in diesem Beispiel keine Übereinstimmung von berechneten und gemessenen Ergebnissen erwartet werden. Diffusions- und Abscheidungseffekte hängen stark vom Material und der Temperatur ab. Da Kohlenstoff in den meisten Fusionsanlagen verwendet wird, sind Veränderungen von Oberflächen kaum zu vermeiden.

Theorie 1

Bereichsleiter: Prof. Dr. Dieter Pfirsch

Im Bereich Theorie 1 werden allgemeine Probleme der Plasmatheorie bearbeitet. Schwerpunkte sind Hochfrequenzheizung und Wellenausbreitung in inhomogenen Plasmen, Gleichgewichte, lineare und nichtlineare Instabilitäten, Turbulenz und andere nichtlineare Phänomene. Ihr Verständnis soll vor allem den anomalen Energie- und Teilchentransport in Tokamak-Plasmen, der zu verminderter Wärmeisolation des Plasmas führt, sowie die beobachtete Beta-Grenze erklären. Der Beta-Wert gibt das Verhältnis von Plasmadruck zu Magnetfelddruck an; ein kleiner Wert zeigt an, daß bei gegebenem Magnetfeld nur wenig Plasma eingeschlossen wird und dementsprechend nur eine geringe Fusionsleistung in einem Fusionsreaktor zu erwarten wäre.

Für großräumige Instabilitäten ist es ausreichend, »Flüssigkeitstheorien« zur Beschreibung der Plasmen zugrunde zu legen. Mit solchen Theorien wurde insbesondere das Verhalten von Plasmen in Tokamaks analysiert, deren Magnetfeldkäfig eine Divertorkonfiguration und damit verknüpft einen x-Punkt besitzt. Die bisher erzielten Ergebnisse lassen vermuten, daß solche Konfigurationen immer »Austausch-instabil« sind. Es handelt sich dabei um zeitlich anwachsende Störungen, die in der Nähe des

x-Punkts eine wellenförmige Struktur entlang des Magnetfeldes aufweisen und zu erhöhten Teilchenverlusten führen können.

Im Rahmen von Flüssigkeitstheorien lassen sich auch Widerstandsinstabilitäten beschreiben, die vor allem den sägezahn-ähnlichen Verlauf der Temperatur im zentralen Plasmabereich und das plötzliche Abreißen des Plasmastroms erklären sollen, aber auch die Beta-Grenzen mitbestimmen. Generell bewirkt der elektrische Widerstand, daß sich Plasma und Magnetfeld in einem gewissen Maß gegeneinander bewegen und damit neue Instabilitäten auftreten können.

In Zusammenarbeit mit der Universität von Texas in Austin und dem Courant-Institut in New York wurde die Frage weiter behandelt, wann Störungen negativer Energie in einem Plasma auftreten, die die Ursache für nichtlineare Instabilitäten und daraus folgenden anomalen Transport sein können. Im vorangehenden Zweijahresbericht wurde berichtet, daß alle magnetisch eingeschlossenen Plasmen solche Störungen erlauben. Für ihre Wirksamkeit ist jedoch insbesondere ihre Struktur wesentlich. Es interessiert dann besonders, inwieweit Störungen mit Wellenlängen, die groß sind verglichen mit den Gyroradien der verschiedenen Teilchensorten, negative Energie besitzen können. Deshalb wurde eine neue Theorie entwickelt, die alle möglichen Phasenraumtheorien behandeln kann, insbesondere die sogenannte driftkinetische Theorie. Hier sind alle Gyroradien näherungsweise unendlich klein, so daß die Wellenlängen aller Störungen von vorneherein groß sind im Vergleich zu den Gyroradien. Erste Ergebnisse für homogene Plasmen zeigen eine im Vergleich zur Vlasov-Theorie erweiterte Klasse von Gleichgewichten, die keine Störungen negativer Energie aufweisen.

Die seit langem bestehende Zusammenarbeit mit der Königlich-Technischen Universität in Stockholm wurde fortgesetzt. Die oben erwähnten Stabilitätsuntersuchungen von x-Punkten sind auch für das dortige Extrap-Experiment von wesentlicher Bedeutung.

Theorie 2

Bereichsleiter: Prof. Dr. Arnulf Schlüter (bis 1. September 1990)

Ausschließlich der Stellarator-Theorie gewidmet sind die Untersuchungen des Bereiches Theorie 2. Nach der Emeritierung des Bereichsleiters im Herbst 1990 wurde der Bereich als Gruppe »Stellaratorphysik« in den Bereich Experimentelle Plasmaphysik 2 aufgenommen, der sich im wesentlichen mit der Planung des optimierten Stellarators WENDELSTEIN VII-X beschäftigt.

Motiv für die vom Bereich Theorie 2 ausgegangene Weiterentwicklung der Stellaratoren war, daß eine Reihe von Eigenschaften klassischer Stellaratoren ungünstig für

einen Fusionsreaktor sind. Kritische Punkte waren zum Beispiel die unbefriedigende Qualität der magnetischen Flächen des Magnetfeldkäfigs sowie ihre umständliche Realisierung durch Magnetspulen. Diese Schwierigkeiten konnten durch Optimierung hin zu den sogenannten »Advanced Stellarators« überwunden werden. Dabei ist man gänzlich neue Wege gegangen: Bei der Konzeption bisheriger Stellaratoren begann man nämlich »von außen« mit dem Entwurf des Spulensystems und untersuchte dann die daraus folgenden Eigenschaften des erzeugten Magnetfeldkäfigs. Zur Optimierung ging man jedoch den viel effektiveren umgekehrten Weg: Da die wesentlichen Eigenschaften eines Fusionsexperimentes allein von der Struktur des Magnetfeldes bestimmt werden, begann man die Konzeption nun an der entscheidenden Stelle »von innen« mit der Auswahl der Magnetfeldstruktur, von der ausgehend zunächst die magnetischen Flächen und dann in einem dritten Schritt eine geeignete Form der Magnetspulen gesucht wurde. Ein Ergebnis sind sogenannte quasi-helikale symmetrische toroidale Stellaratoren, die zeigen, daß sich magnetische Struktur und geometrische Gestalt der Stellaratoren nicht entsprechen müssen: Ihr Magnetfeld ist in magnetischen Koordinaten helikalsymmetrisch, obwohl die geometrische Form der magnetischen Flächen keine Symmetrie mehr zeigt. Durch diese Methode öffnete sich der volle, weite Raum möglicher Stellarator-Konfigurationen, unter denen dann – mit erheblichem Theorie- und Rechenaufwand – die besten, d.h. für das Plasma stabilsten und wärmeisolierendsten Anordnungen ausgewählt werden konnten: »Advanced Stellarators«. Die Optimierung von Stellaratoren bedeutet also nicht nur die Verbesserung eines gegebenen Konzeptes, sondern vielmehr die Auswahl ihrer grundlegenden physikalischen Eigenschaften. In der optimierten Form der »Advanced Stellarators« könnten Stellaratoren eine echte Alternative zu einem Tokamakreaktor sein.

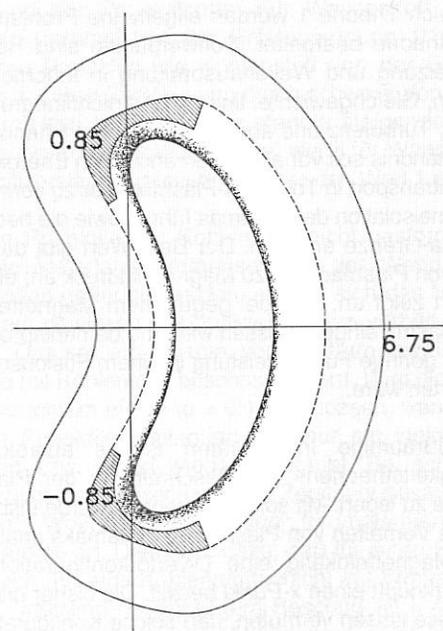
Wichtig für die Optimierung des Plasmaverhaltens im Magnetfeldkäfig ist, daß die Geometrie des Käfigrandes – die letzte geschlossene magnetische Fläche – die Eigenschaften des gesamten Magnetfeldkäfigs vollständig bestimmt. Deshalb können zur Optimierung Randwertprobleme gelöst werden, wobei die Randparameter die Optimierungsvariablen sind. Randwertprobleme stellen also die Grundschritte des verwendeten Optimierungsverfahrens dar, was große Schrittweiten im Konfigurationsraum der Stellaratoren zuläßt. Helias-Stellaratoren (Helical Advanced Stellarators), die sich unter anderem durch eine helixartige magnetische Achse auszeichnen, und ihre Darstellung des Randes liefern offenbar einen geeigneten Konfigurationsraum.

Bei der Optimierung des Magnetfeldes zog man sowohl plasmaphysikalische Gesichtspunkte in Betracht als auch die technischen Randbedingungen eines modularen Spulensystems. Sieben Bedingungen, die die Qualität eines Stellarators bestimmen, sollen dabei gleichzeitig erfüllt werden: Angestrebt werden erstens eine hohe Qualität der magnetischen Flächen des Vakuumfeldes, die sich zweitens bei ansteigendem Plasmadruck nur wenig verformen sollen. Drittens und viertens will man gute Stabilitätseigenschaften sowie gute Wärmeisolation erreichen, d.h. geringe Wärmeleitung quer zum Magnetfeld. Fünftens wird ein kleiner »bootstrap«-Strom verlangt, d.i. ein Ringstrom, der ohne toroidales elektrisches Feld

durch radiale Dichte- und Temperaturgradienten angetrieben wird und die Struktur des Magnetfeldkäfigs ungewünscht verändern könnte. Sechstens wird ein gutes Einschlußverhalten für die später bei der Fusion entstehenden Alphateilchen angestrebt, die nach Abschalten der äußeren Heizung das Plasma von innen heizen. Siebtens schließlich soll der Magnetfeldkäfig durch ein System modularer Spulen möglichst einfach herzustellen sein.

Praktisch läuft das Optimierungsverfahren in den folgenden Schritten ab: Die Kriterien 1 und 7 werden durch Lösung von Helias-Randwertproblemen berücksichtigt. Die Kriterien 2 und 3 können durch Aufrechterhaltung resistiver Austausch- bzw. Ballooning-Stabilität für Magnetfeld-Anordnungen mit fünf Perioden und einem Verhältnis von großem und kleinen Plasmaradius von ungefähr zehn erfüllt werden. Die Kriterien 4, 5 und 6 werden zunächst indirekt durch Optimierung der Magnetfeldstruktur in magnetischen Koordinaten abgedeckt. Dieses Vorgehen stellt die innere »Schleife« des Optimierungsprozesses dar. Zu einer Iteration dieser inneren Schleife führt die Auswertung der Frage, ob die Ballooning-Stabilität sowie die drei Eigenschaften 4, 5 und 6 von der errechneten Konfiguration befriedigend erfüllt werden. Diese Rechenschritte werden so lange mit veränderten Eingangsdaten durchlaufen, bis in allen sieben Punkten geeignete Eigenschaften erreicht wurden.

Abbildung 1: Simulation der Abschältschicht in einem Stellarator mit einem Feldlinien-»Diffusions«-Modell. Gezeigt ist der Plasmaquerschnitt, umgeben von der errechneten Abschältschicht (schwarz punktiert). Die schraffierte Fläche zeigt den Querschnitt durch den trogförmigen Divertor, der an der gestrichelt dargestellten Wand des Plasmagefäßes angebracht ist.



Ein Beispiel für die hierzu nötigen Rechnungen sind Stabilitätsbetrachtungen: Die magnetohydrodynamische Stabilität eines Plasmas ist in der Fusionsforschung von großer Bedeutung, weil durch die Stabilitätsgrenze der erzielbare Energieinhalt eines Plasmas beschränkt wird. Bei Stellaratoren sind Stabilitätsrechnungen besonders schwierig, weil ihre Gleichgewichte – im Gegensatz zu den symmetrischen, d.h. zweidimensionalen Tokamaks – notwendigerweise dreidimensional sind. Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich für solche Untersuchungen, weil im linearisierten magnetohydrodynamischen Energieprinzip sogenannte »Auslöschung« auftreten kann, so daß stabilisierende und destabilisierende Terme sich rechnerisch fast aufheben. Ferner muß die Information, die in numerisch, d.h. mit Näherungsverfahren per Computer berechneten Gleichgewichten enthalten ist, so verarbeitet werden, daß die Güte der Näherung nicht verringert wird. Die Stromverteilung im Plasma darf als abgeleitete Größe zum Beispiel nicht aus dem Magnetfeld numerisch berechnet werden. Nachdem es gelungen war, eine Formulierung des Energieprinzips zu finden, die diesen Erschwernissen Rechnung trägt, sind die entsprechenden Code-Entwicklungen im Centre de Recherches en Physique des Plasmas in Lausanne (Rechenprogramm TERPSICHORE) und im IPP (Rechenprogramm CAS3D) erfolgreich verlaufen. So wurde in realistischen Beispielen die näherungsweise Übereinstimmung der Stabilitätsgrenze mit derjenigen aus Stabilitätskriterien gefunden, die sich auf lokalisierte Testfunktionen, sogenannte Mercier-artige und ballooning-artige Moden beziehen.

Die optimierten Helias-Konfigurationen zeichnen sich außerdem durch eine für Divertor-Anwendungen wichtige geometrische Besonderheit aus. Sie besitzen fünf halbhelixartige Kanten am Plasmarand, die die Unterseite eines Querschnitts mit der Oberseite des entsprechenden, um eine Periode versetzten Querschnitts verbinden. Diese Kanten führen im Zusammenspiel mit am Rande liegenden Inselketten zur Ablenkung der Feldlinien nach außen in halbhelixartige Streifen. Dies legt die Konstruktion eines offenen u-förmigen Divertorbereiches nahe, ähnlich dem in JET vorgesehenen, aber in fünffacher halbhelixartiger statt axialsymmetrischer Geometrie. Die Divertoreigenschaften des Feldes werden dabei bereits durch das einschließende Spulensystem erzeugt; zusätzliche Divertorspulen – wie bei Tokamaks – sind nicht nötig. Dieses Konzept wird zur Zeit mit Feldlinienberechnungen sowie mit Spulenoptimierungen verfolgt, die den notwendigen Platz verfügbar machen sollen. Vorversuche hierzu sollen bei WENDELSTEIN VII-AS beginnen.

Ein vereinfachtes Bild der vom Divertor erfaßten Abschälsschicht ergibt sich mit den üblichen Annahmen, daß die Bewegung der Plasmateilchen quer zu den Feldlinien anomal und durch einen Diffusionskoeffizienten von etwa einem Quadratmeter pro Sekunde charakterisiert ist, die Geschwindigkeit entlang der Feldlinien dagegen in etwa der Schallgeschwindigkeit entspricht. In diesem Bilde erhält man eine Simulation der Abschälsschicht durch eine passend gewählte »Diffusion« von Feldlinien, die durch zufällige Versetzungen während der Feldlinienverfolgung nach charakteristischen freien Weglängen bewirkt wird. Die Abbildung zeigt ein Ergebnis, das charakterisiert ist durch eine zwei Zentimeter dicke Abschälsschicht in der

Symmetrielinie und die Erhaltung der Ablenkung entlang der helikalen Kante, durch die Verwischung detaillierter Inselstrukturen und, als Folge, durch eine angemessene Größe der Divertorfläche, auf der das Plasma seine Energie abladen kann.

Tokamakphysik

Bereichsleiter: Prof. Dr. Karl Lackner

Die Mitarbeiter des Bereichs Tokamakphysik betreiben anwendungsorientierte Plasmatheorie im Hinblick auf Entwurf und Interpretation der Tokamakexperimente im IPP. Im Vordergrund stehen die physikalische Analyse sowie die Entwicklung und der Einsatz leistungsfähiger numerischer Rechenverfahren zur Auswertung theoretischer Ansätze. Eines der wichtigsten Arbeitsgebiete sind Untersuchungen der Plasmarandschicht und des Divertorplasmas. Sie stützen sich sowohl auf analytische Rechnungen als auch auf umfangreiche numerische Simulationscodes.

Analytische Methoden liefern ein grundlegendes Verständnis der in der Randschicht ablaufenden Prozesse, die für das Verhalten des gesamten Plasmas ausschlaggebend sind. Zum Beispiel ergibt die Lösung der Wärmeleitungsgleichung die Temperaturverteilung sowie zusammen mit der Impulsbilanz die Dichte der Elektronen, beides in Abhängigkeit von der Energieflußdichte aus dem Plasma in die Randschicht. Dieses Modell sagt unter anderem ein »Randdichtelimit« vorher, d.h. eine Grenze für die am Plasmarand maximal erreichbare Dichte (siehe Kapitel: ASDEX). Darüberhinaus beschreibt das Modell bei verringerter Energieflußdichte in die Randschicht quantitativ die Erniedrigung des Elektronendruckes an der Separatrix, was die Grundlage schafft für ein tieferes Verständnis der Randschichtphysik.

Für eine weitergehende Interpretation experimenteller Daten aus der Randschicht sind neben analytischen Rechnungen Computersimulationen unerlässlich. Dabei ist zwischen dem stoßbehafteten Randschichtplasma und einer elektrostatischen Schicht direkt vor den Divertorplatten zu unterscheiden, die in einem magnetfeldfreien Plasma extrem dünn ist. Bei Anwesenheit eines schräg einfallenden Magnetfeldes verbreitert sie sich erheblich, bleibt aber immer noch dünner als ein Millimeter. Da diese Längen wesentlich kleiner sind als die mittlere freie Weglänge für Stöße, müssen zur Beschreibung dieser Zone die kinetischen Gleichungen gelöst werden. Tatsächlich wurde die Verbreiterung der elektrostatischen Randschicht im Magnetfeld auf diese Weise durch Teilchensimulationsrechnungen erkannt. Weitere Anwendungen finden derartige Modelle zum Beispiel bei der Beschreibung der Teilchenbewegung in Hochfrequenz-Feldern, wie sie bei der Hochfrequenz-Heizung von Tokamaks auftreten. Kinetische Gleichungen haben hier einen Gleichrichtereffekt gezeigt, der die Beschleunigung gela-

dener Teilchen auf die Wände und damit eine Quelle der Verunreinigungsproduktion erklärt.

Kinetische Modelle beschreiben auch die Verteilung der Neutralteilchen in den Plasmarandzonen. Dabei wird mit Monte-Carlo-Methoden die komplexe dreidimensionale Freisetzung und die Bewegung der neutralen Teilchen im Randschichtplasma untersucht. Allerdings erfordern Monte-Carlo-Simulationen eine hohe Rechenleistung, wie sie nur auf Großcomputern zur Verfügung steht. Im einzelnen setzen Monte-Carlo-Verfahren das physikalische Bild der Neutralteilchenbewegung in ein stochastisches Modell um. Dazu wurde ein Rechenverfahren entwickelt, das die gesuchten Neutralteilchendaten als Erwartungswert einer Wahrscheinlichkeitsverteilung auffaßt, so daß sich diese Daten mit statistischen Methoden schätzen lassen. Aus aufeinanderfolgenden Stichproben ergeben sich dann die dreidimensionalen Bahnen der Neutralteilchen im Tokamakplasma. Die Berechnung der Neutralteilchenbewegung ist unerläßlich für die Deutung experimenteller Messungen wie zum Beispiel der Spektroskopie an angeregtem, neutralen Wasserstoff zur Bestimmung der Wasserstoffkonzentration oder der Analyse umgeladener Neutralteilchen zur Bestimmung der Ionentemperatur im Randschichtplasma.

Ist wie im Falle der geladenen Plasmateilchen die Zahl der Stöße zwischen Teilchen derselben Sorte ausreichend hoch, so können sie zu einer einheitlichen Komponente des Plasmas zusammengefaßt werden. Dann läßt sich das Randschichtplasma makroskopisch durch gemittelte Größen wie Dichte, Geschwindigkeit und Temperatur jeder Teilchensorte beschreiben. Diese Mehrflüssigkeitsgleichungen lassen sich numerisch gut behandeln, wenn die Geometrie des Problems nicht zu kompliziert ist. Im Rahmen dieser Modellvorstellungen werden die Teilchen-, Impuls- und Energiebilanz der geladenen Plasmateilchen aus der kinetischen Boltzmann-Gleichung berechnet. Die numerische Lösung erfolgt dabei in mehreren Stufen. Zunächst wird das dreidimensionale Differentialgleichungssystem auf ein zweidimensionales Problem reduziert, da für den axialsymmetrischen Divertor in ASDEX und ASDEX Upgrade toroidale Symmetrie herrscht. Dann sind die Randbedingungen zu berücksichtigen und zusätzliche Angaben über die Neutralteilchen erforderlich. Die Wechselwirkungen der geladenen Teilchen mit den Neutralen wird durch die Kopplung des Plasmaflüssigkeitsmodells mit Neutralteilchenmodellen realisiert. Nach mehreren Iterationen ergibt sich dann ein vollständiges Bild der Teilchenbewegung sowohl der Neutrals als auch der Ladungsträger. Derartige Simulationsrechnungen wurden auf ein Wasserstoffplasma mit verschiedenen Verunreinigungsionen angewendet und liefern für jeden Ort in der Randschicht die Dichte, Geschwindigkeit und Temperatur der Elektronen, der Wasserstoff- und der Verunreinigungsionen. Beispielsweise wird so berechnet, wie sich die Freisetzung und Bewegung des Divertormaterials verringern läßt, wenn in der Divertorkammer Gas – zum Beispiel Neon – eingeblasen wird, um die Temperatur herabzusetzen. Da die Lebensdauer der Divertorplatten ein kritisches Element in Fusionsanlagen darstellt, haben diese Simulationsrechnungen große Bedeutung für künftige Fusionsreaktoren.

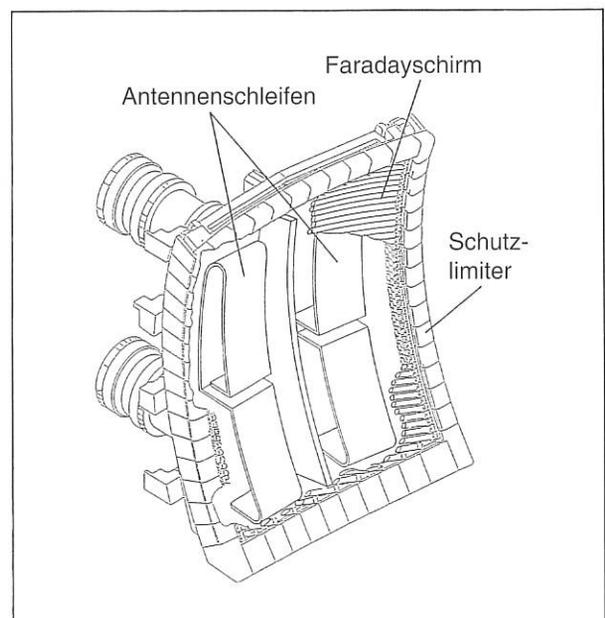
Technologie

Bereichsleiter: Prof. Dr. Rolf Wilhelm

Die Aufheizung eines Plasmas auf reaktorrelevante Temperaturen ist eine wichtige Aufgabe bei den derzeitigen Fusionsexperimenten, aber auch im künftigen Fusionsreaktor. Für die Plasmaheizung geeignete Verfahren wie Neutralteilcheninjektion oder Hochfrequenzmethoden werden vom Bereich Technologie entwickelt und an den Plasmaexperimenten des Instituts aufgebaut und betrieben. Einige Details über die Funktionsweise der Heizverfahren sowie damit erzielte physikalische Ergebnisse sind in den vorangehenden Abschnitten dieses Jahresberichts erläutert. Weitere, mehr technische Einzelheiten sind im nachfolgenden Beitrag dargestellt. Die Tabelle gibt eine Zusammenstellung der wichtigsten Daten der Heizverfahren, die an ASDEX – bis zur Beendigung des Experiments Mitte 1990 – sowie an WENDELSTEIN VII-AS und demnächst an ASDEX Upgrade eingesetzt werden.

Wie der Tabelle zu entnehmen ist, erreicht die mit den bisherigen Systemen verfügbare Nettoheizleistung bereits einen Gesamtumfang von etwa 12 Megawatt. Mit den jetzt in Angriff genommenen Ausbaustufen insbesondere für das neue Experiment ASDEX Upgrade erhöht sich die Summe an Teilchenstrahl-, Hochfrequenz- oder Mikrowellenheizleistung auf über 40 Megawatt. Dieser Wert bzw. auch die entsprechende Netzanschußleistung von über 100 Megawatt zeigt, welchen technischen Umfang und Aufwand die Plasmaheizverfahren inzwischen annehmen. Für die Zündung eines künftigen Fusionsreaktors wird etwa das Doppelte benötigt. Die jetzt am Institut begonnenen Schritte in Richtung künftiger Großanlagen für die Plasmaheizung wurden erst durch die langjährigen Erfahrungen an den bisherigen »kleinen« Systemen möglich.

Abbildung 1: Eine der neukonzipierten »Schleifen-Antennen«, die Radiowellen der Ionen-Zyklotronfrequenz in das Plasma von ASDEX Upgrade eingekoppelt.



			WENDELSTEIN VII-AS	ASDEX	ASDEX Upgrade (in Vorbereitung)
		Einheiten			
Untere Hybrid-frequenz	Frequenz	Gigahertz	–	2,45	–
	Abgestrahlte Leistung	Megawatt	–	2,4	–
	Pulslänge	Sekunden	–	1	–
Ionen-Zyklotron-Resonanz	Frequenz	Megahertz	76/38	67/38,5	30-120
	Abgestrahlte Leistung	Megawatt	bis 1	3,7	6-7
	Pulslänge	Sekunden	3	10	10
Neutralinjektion	Teilchenenergie	Kilo-Elektronenvolt	45	55	65
	Neutralstrahlleistung	Megawatt	1,5 (3)	3,0	9 (18)
	Pulslänge	Sekunden	2,7	10	10
Elektronen-Zyklotron-Resonanz	Frequenz	Gigahertz	70	–	(140)
	Abgestrahlte Leistung	Megawatt	0,8 (~ 1,5)	–	(1,5)
	Pulslänge	Sekunden	3	–	(5-10)

Abbildung 2: Grundparameter der an den IPP-Experimenten ASDEX (bis Ende 1990), ASDEX Upgrade und WENDELSTEIN VII-AS eingesetzten Heizverfahren. Die Werte in Klammern geben geplante Ausbaustufen an.

Im Fall der Neutralteilcheninjektion sind hier der zuverlässige Betrieb bei voller Nennleistung an WENDELSTEIN VII-AS sowie die Langpulsinjektion bis zu fünf Sekunden Dauer in der letzten Experimentierphase an ASDEX besonders hervorzuheben. Weiterer Entwicklungsschritt ist die jetzt in Aufbau und Test befindliche große Injektorbox, die bei 65 Kilovolt Beschleunigung einen Deuteriumstrahl von neun Megawatt für etwa zehn Sekunden liefern soll. Ein vorgesehener zweiter Injektor wird eine wichtige technische Verbesserung enthalten. Hier soll anstatt des allgemein verwendeten Niederdruckbogenplasmas erstmals eine großvolumige Hochfrequenz-Plasmaquelle zur Herstellung des benötigten Ionenstrahls von über 80 Ampere bei 65 Kilovolt verwendet werden. Diese am Institut weitgehend abgeschlossene Entwicklung geht zurück auf eine Zusammenarbeit mit der Universität Gießen, wo entsprechende Ionenquellen für kleinere Raumfahrtantriebe entwickelt werden. Neben technischen Vereinfachungen verspricht die neue Hochfrequenz-Ionenquelle eine erhebliche Verbesserung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer, wie sie für künftige Fusionsanwendungen erforderlich ist. Als physikalischer Vorteil kommt hinzu, daß die neue Quelle vor allem einfache Ionen (H^+ bzw. D^+), kaum aber die unerwünschten Molekülonen H^2+ und H^3+ bzw. D^2+ und D^3+ aussendet.

Ähnlich wie bei der Neutralinjektion wurden auch bei der Ionenzyklotronheizung Leistungssteigerungen und Konzeptverbesserungen notwendig. Dazu wurde die bestehende Hochfrequenzanlage von bisher vier Megawatt bei 30 bis 120 Megahertz um weitere vier Hochfrequenz-Generatoren erweitert. Mit vier neukonzipierten »Schleifen-Antennen« wird die erzeugte Hochfrequenz-Leistung in das Plasma von ASDEX Upgrade eingekoppelt. Abbildung 1 zeigt eine Darstellung der aus zwei nebeneinander liegenden Schleifen bestehenden Antenneneinheit. Mit dieser Anordnung ist es möglich, das von der Antenne abgestrahlte Wellenspektrum durch Wahl der Phasenlage beider Schleifenströme optimal an das zu heizende Plasma anzupassen. Neben einer Verbesserung des Heizwirkungsgrades ist mit dieser Maßnahme zugleich eine

deutliche Verringerung der Verunreinigungsproduktion zu erwarten.

Die in Zusammenarbeit mit dem Institut für Plasmaforschung (PPPL) in Princeton und dem Fusionsforschungsinstitut der ENEA in Frascati/Italien angestellte Untersuchung zu Heizung und Stromtrieb durch Mikrowellen bei 2,45 Gigahertz wurde mit Beendigung des ASDEX-Experimentes erfolgreich abgeschlossen (siehe Kapitel ASDEX). Um das Programm zu konzentrieren, muß allerdings auf die Fortführung eines entsprechenden Vorhabens an ASDEX Upgrade verzichtet werden. Entsprechend den neuesten Fortschritten auf dem Gebiet der Höchsthochfrequenzröhren (Gyrotrons) sollen dafür die Anstrengungen auf dem Gebiet der Plasmaheizung durch lokal fokussierte Millimeter-Wellen der Elektronen-Zyklotronheizung weiter verstärkt werden. Dazu ist eine Zusammenarbeit mit dem Institut für Plasmaforschung der Universität Stuttgart vorgesehen, um die vier vorhande-

Abbildung 3: Diese "Grill-Antenne" im Plasmagefäß des Experimentes ASDEX strahlt Heizwellen der Lower Hybrid-Frequenz in das Plasma ein.



nen Anlagen bei WENDELSTEIN VII-AS, die je 200 Kilowatt Leistung bei einer Frequenz von 70 Gigahertz in das Plasma einstrahlen, durch ein System von fünf 0,4 Megawatt-Röhren bei 140 Gigahertz zu ersetzen. Eine entsprechende Anlage ist auch für das neue Experiment ASDEX Upgrade vorgesehen.

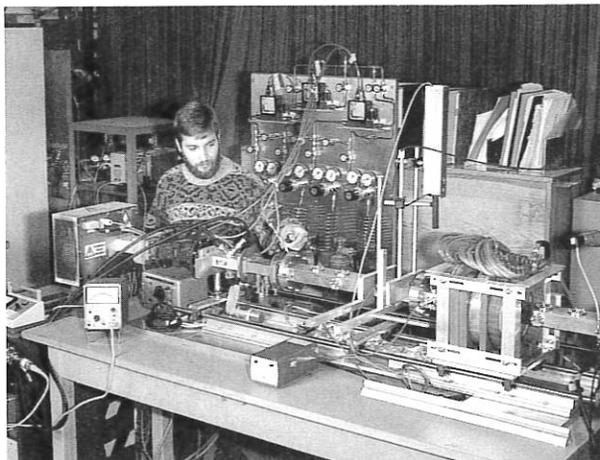
Plasmatechnologie

Gemeinschaftsvorhaben der Bereiche
Oberflächenphysik und Technologie
Leitung: Prof. Dr. Wolfhard Möller

Das im Jahr 1988 begonnene Vorhaben Plasmatechnologie verfolgt drei Aufgaben: Mit Hilfe von plasmachemischen Verfahren werden Oberflächen vergütet und Beschichtungen hergestellt, die in den Kernfusionsexperimenten des Instituts benötigt werden. Dazu werden, falls notwendig, spezielle Beschichtungsverfahren entwickelt oder verbessert. Dies erfordert ein tieferes Verständnis der chemischen und physikalischen Vorgänge der Plasmadeposition. Daher werden Plasma- und Schichteigenschaften systematisch untersucht, mit dem Ziel, die Prozeßbedingungen so einzustellen, daß eine gewünschte Eigenschaft der erzeugten Schicht optimiert wird.

Zum Beispiel wurden harte amorphe Kohlenwasserstoff-Schichten auf Bauteile der Ionenzyklotron-Heizung am Experiment ASDEX Upgrade aufgebracht. Die Antennenteile, die der Plasmarandschicht direkt ausgesetzt sind, werden durch die Beschichtung vor dem Kontakt mit dem Plasma geschützt. Außerdem dienen solche Schichten dazu, elektrische Durchbrüche (»Multipactoring«) in Hochleistungs-Koaxialleitungen zu verhindern. Je nach Geometrie wurde mit verschiedenen Niederdruck-Plasma-

Abbildung 1: Innenbeschichtung eines Hohlleiters in einem Mikrowellenplasma. Links der Mikrowellengenerator, rechts die verschiebbaren Magnetspulen, in deren Nähe das Rohrinne beschichtet wird.



verfahren gearbeitet, jeweils mit Methan als Prozeßgas. Einzelne Teile können im Gleichspannungs- oder Hochfrequenz-Plasma in einem großen Reaktorgefäß von 80 Zentimeter Durchmesser beschichtet werden. Im Falle der Koaxialleitung dient diese selbst als Reaktionsgefäß, wobei ein Wechselspannungsplasma dafür sorgt, daß Innen- und Außenleiter gleichzeitig beschichtet werden.

Multipaktor-Entladungen können auch in Mikrowellenleitern auftreten, was wiederum durch spezielle Beschichtungen verhindert werden kann. In einem Testhohlleiter wurden die hierbei wesentlichen Mechanismen untersucht: Ein Magnetspulensatz, der außen um das mit Methan gefüllte Rohr herumgreift, erzeugt im Zusammenwirken mit einer eingestrahlten Mikrowelle ein lokales Plasma am Ort des Magnetfeldes. Das reaktive Methan gas zerlegt sich und schlägt sich als polymerartige Kohlenwasserstoffschicht an der Innenwand des Hohlleiters nieder. Durch Verschieben der Spulen in Längsrichtung wird so das komplette Rohr von innen beschichtet (siehe Abbildung).

Informatik

Bereichsleiter: Prof. Dr. Friedrich Hertweck

Die Aktivitäten des Bereichs Informatik sind zur Zeit vollständig auf das Datenerfassungssystem für das Experiment ASDEX Upgrade ausgerichtet. Es besteht aus etwa 70 UNIX-Workstations und einem IBM 3090-150 Zentralrechner, die durch ein im Bereich Informatik entwickeltes Glasfaser-Netz verbunden sind. Nach einigen Jahren Erfahrung an ASDEX wurde das System jetzt für ASDEX Upgrade aufgebaut.

Die Struktur der Dateien für Meßdaten, d.h. die sogenannte Schußfilestruktur, die objekt-orientiert und erweiterbar ist, wurde ergänzt, so daß jetzt folgende Objekte zur Verfügung stehen: diagnostic, device, parameter set, list (eine Liste anderer Objekte), time base, signal, signal group (eine Zusammenfassung gleichartiger Signale), local timer (zur Beschreibung des Timer-Systems von ASDEX Upgrade), shot file list sowie update set für die Herstellung von level-n-Schußfiles. Letztere wurden eingeführt, um bereits mit Programmen interpretierte Daten auf die gleiche Weise abzuspeichern zu können wie die Rohdaten-Schußfiles. In Zusammenhang damit wurde für alle Dateien des Betriebssystems AMOS/2 die Möglichkeit geschaffen, File-Editionen zu bilden.

Das File-Archivierungssystem des Betriebssystems AMOS/2 wurde an den Bandroboter des Rechenzentrums angeschlossen und die Bandkondensierung hinzugefügt, um effizientere Speicherung zu erreichen und gleichzeitig die Sicherheit vor Datenverlusten zu erhöhen. Die Funktionen des AMOS/2 sind auch von UNIX-Workstations oder vom IBM VM/CMS aus aufrufbar. Das Glasfaser-Netz wurde durch schnellere MSCC-Module für zwei Megabit pro Sekunde erweitert. Ein Funktionstest mit acht Work-

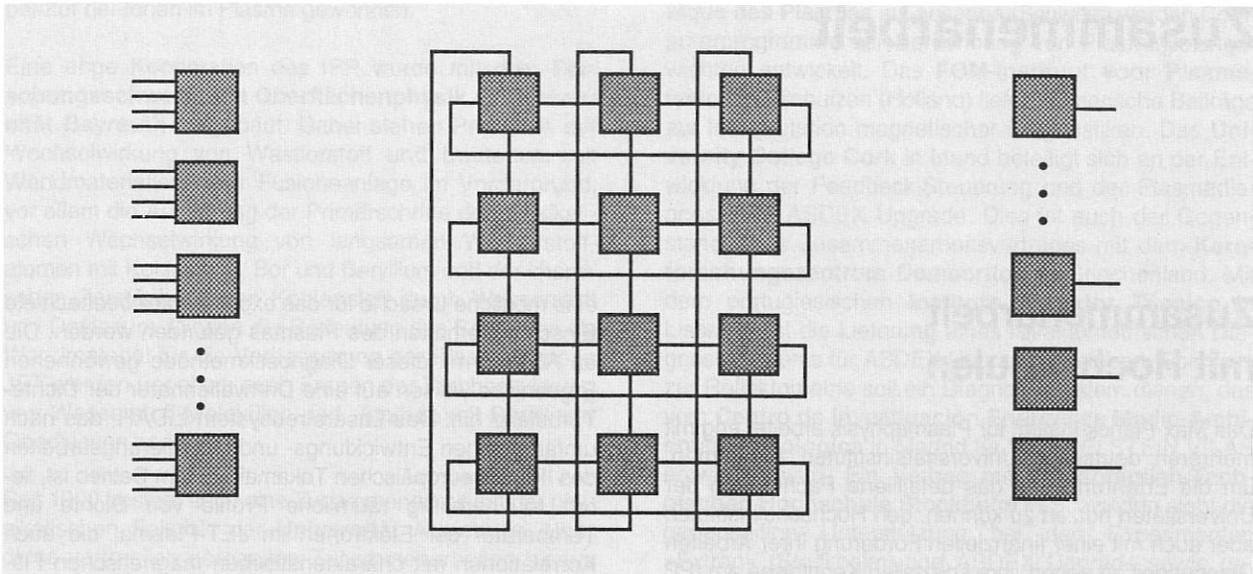


Abbildung 1: Im IPP entwickeltes Transputer-System zur Lageregelung des ASDEX Upgrade-Plasmas. Seine Topologie kann dreifach variieren (von links nach rechts): In der Eingabephase nehmen die 48 Links der Transputer Daten auf, während der Rechenphase sind die zwölf Rechner in der Art eines Hypercube verbunden und in der Ausgabephase senden die Rechner Steuersignale an die Magnetspulen.

stations konnte den geplanten Durchsatz von einem Megabyte pro Sekunde im Dauerbetrieb demonstrieren.

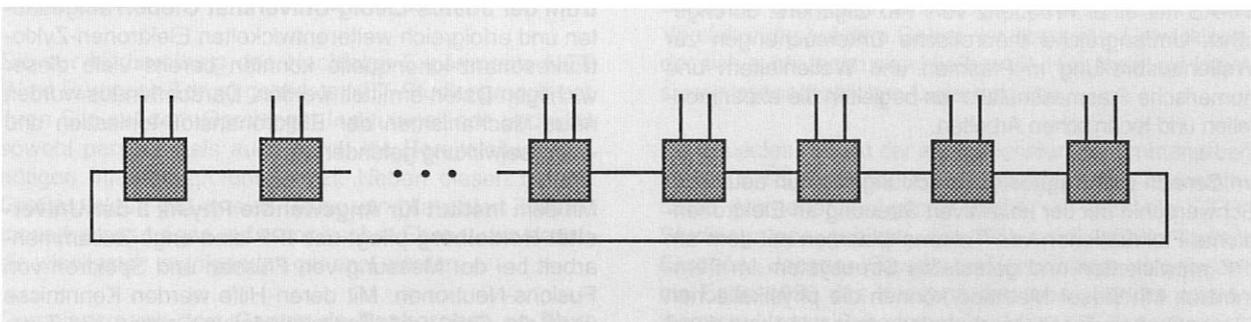
Für die Programmierung des Entladungsablaufs im Experiment, d.h. die Definition der Steuerdaten und -signale, wurde ein interaktiver Schußprogramm-Editor entwickelt. Die Daten werden mit Hilfe von Menü-Technik und graphischen Mitteln eingegeben. Zu diesem Zweck wurde das PLOT-Paket erweitert, das inzwischen auf den UNIX-Workstations, im AMOS/2 und CMS des IBM-Rechners und auf der CRAY-XMP zur Verfügung steht.

Die Verwendung von Parallelrechnern für numerisch-intensive Anwendungen wird immer interessanter. Die eigenen Entwicklungen von Transputer-Systemen haben sich als extrem nützlich erwiesen für die speziellen Probleme der Steuerung und der Erfassung großer Datenmengen bei ASDEX Upgrade. Der im Bereich konzipierte Rechner mit zwölf Transputer-Prozessoren für die Lageregelung des ASDEX Upgrade-Plasmas wurde vollständig aufgebaut und die geforderte Funktionalität demonstriert. Ein wesentliches Merkmal des Rechners ist die dreimalige

Umschaltung der Topologie in dem Regelzyklus von 1,4 Millisekunden: In der Eingabephase nehmen die 48 Links der Transputer Daten auf, während der Rechenphase sind die zwölf Rechner in der Art eines Hypercube verbunden, und in der Ausgabephase senden die Rechner Steuersignale an die Magnetspulen (vgl. Abbildung).

Eine andere Anwendung von Transputer-Systemen, bei denen die Topologieumschaltung wesentlich ist, ist die Erfassung einer großen Anzahl von Meßkanälen mit hohen Datenraten. Ein Prototypsystem mit 16 Rechnern für Mirnov-Sonden-Signale, welches in der Topologie der Abbildung 2 auf 32 Kanälen je ein Megabyte pro Sekunde Daten aufnehmen kann, wurde an ASDEX demonstriert. Es ist in der Lage, in Realzeit die interessanten Daten zu erkennen und nur diese zu speichern. In der anschließenden Auswertephase, die in der Pause von fünf bis zehn Minuten zwischen zwei Experiment-Entladungen liegt, wird wieder eine hypercube-artige Topologie eingestellt. Das für ASDEX Upgrade geplante System von 64 Transputern wird etwa die halbe Leistung einer Cray-CPU besitzen.

Abbildung 2: Eingabe-Topologie des Transputer-Systems für die Aufnahme großer Datenmengen aus einer Vielzahl von Meßkanälen.



Zusammenarbeit

Zusammenarbeit mit Hochschulen

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik arbeitet eng mit mehreren deutschen Universitätsinstituten zusammen, um die Erfahrung und das detaillierte Fachwissen der Universitäten nutzen zu können, den Hochschulinstituten aber auch mit einer finanziellen Förderung ihrer Arbeiten Gelegenheit zu geben, ihre speziellen Kenntnisse am IPP anzuwenden und zu erweitern. Die Schwerpunkte liegen dabei auf grundlegenden physikalischen Problemkreisen und umfassen Plasmaheizung, Plasma-Wand-Wechselwirkung, die Entwicklung und Anwendung spezieller Diagnostikmethoden und die Bestimmung von Daten für Spektroskopie und Wand-Wechselwirkung.

Das **Institut für Plasmaforschung (IPF) der Universität Stuttgart** trägt einen großen Teil der Zusammenarbeit und liefert wesentliche Beiträge zur Plasmaheizung im Bereich der Elektronen-Zyklotron-Resonanzheizung am Stellarator WENDELSTEIN VII-AS und zur Plasmadiagnostik mit der Fern-Infrarot-Lichtstreuung an den Tokamaks ASDEX und ASDEX Upgrade, der LIDAR-Streuung am europäischen Gemeinschaftsexperiment JET und der Plasmarand-Diagnostik für ASDEX Upgrade.

Die Elektronen-Zyklotron-Resonanzheizung (ECRH) mit einer Frequenz von 70 Gigahertz wurde vom IPF aufgebaut. Sie führt dem Plasma von WENDELSTEIN VII-AS über eine 60 Meter lange, hochentwickelte Übertragungsleitung eine vollkommen polarisierte, nahezu divergenzfreie Elektronenzyklotronwelle zu, mit der das Plasma sowohl aufgebaut und geheizt als auch ein elektrischer Strom im Stellarator getrieben werden kann. Die verwendeten Wellenleiter und speziellen Hochfrequenz-Bauteile wie Modenwandler und -filter, Krümmer und Taper wurden im IPF mit großer Sorgfalt entwickelt, getestet, optimiert und erprobt, so daß eine hohe Güte der eingestrahlten Wellen erreicht und damit günstige Plasmawerte erzielt werden konnten. In enger Zusammenarbeit des IPF mit dem **Kernforschungszentrum Karlsruhe** und dem IPP werden ECRH-Experimente bei der zweiten Harmonischen am Fusionsexperiment WENDELSTEIN VII-AS mit einer Frequenz von 140 Gigahertz durchgeführt. Umfangreiche theoretische Untersuchungen zur Wellenausbreitung in Plasmen und Wellenleitern und numerische Plasmasimulationen begleiten die experimentellen und technischen Arbeiten.

Im Bereich der Diagnostikentwicklung liegt ein deutlicher Schwerpunkt bei der kollektiven Streuung an Elektronendichte-Fluktuationen von Tokamakplasmen mit dem am IPF entwickelten und getesteten Streusystem im Fern-Infrarot. Mit dieser Methode können die physikalischen Eigenschaften der Plasmaturbulenz aufgeklärt und damit

eine mögliche Ursache für das experimentell beobachtete Einschlußverhalten des Plasmas gefunden werden. Die an ASDEX mit dieser Diagnostikmethode gewonnenen Ergebnisse weisen auf eine Driftwellennatur der Dichteturbulenz hin. Das Laserstreusystem LIDAR, das nach umfangreichen Entwicklungs- und Optimierungsarbeiten des IPF am europäischen Tokamak JET im Betrieb ist, liefert routinemäßig räumliche Profile von Dichte und Temperatur der Elektronen im JET-Plasma, die auch Korrelationen mit charakteristischen magnetischen Flächen erlauben. In einer neuen Arbeitsrichtung werden auch spektroskopische Untersuchungen des Randplasmas und das Studium der chemischen Verunreinigungs-erzeugung vorbereitet.

Untersuchungen von Zerstäubungsausbeuten fester Oberflächen beim Auftreffen schneller und schwerer Ionen, die für das Verständnis der Wechselwirkung der Plasmen mit der Wand und der Freisetzung von Verunreinigungen wichtig sind, werden im **Isotopentrenn-Laboratorium des Physik-Departments der Technischen Universität München** ausgeführt. Die Kenntnis der Ausbeuten von Zerstäubung und Selbstzerstäubung ist für die Auswahl geeigneter Wandmaterialien – wie zum Beispiel für die Divertorplatten im Tokamak – in Fusionsanlagen von großer Bedeutung.

Mit dem **Institut für Experimentalphysik AG VI der Ruhr-Universität Bochum** arbeitet das IPP eng zusammen bei der Untersuchung der thermophysikalischen Eigenschaften von technischem Graphit, wie er für Limiter- und Divertorplatten in heutigen Fusionsanlagen Anwendung findet. Dabei werden thermische Wellen sehr kleiner Amplitude mit akustischen und radiometrischen Methoden nachgewiesen. Bei Fluktuationsmessungen an Tokamaks arbeitet das IPP eng mit dem **Institut für Experimentalphysik II der Ruhr-Universität Bochum** zusammen.

Für die Interpretation der Strahlungsverluste aus den Plasmen und die Deutung spektroskopischer Messungen des IPP werden Daten von Ionisationsquerschnitten vielfach geladener Ionen benötigt. Mit den Ionenstrahlen einer am **Institut für Kernphysik und Strahlungszentrum der Justus-Liebig-Universität Gießen** aufgebauten und erfolgreich weiterentwickelten Elektronen-Zyklotronresonanz-Ionenquelle konnten bereits viele dieser wichtigen Daten ermittelt werden. Darüberhinaus wurden neue Mechanismen der Elektronenstoß-Ionisation und -Wechselwirkung gefunden.

Mit dem **Institut für Angewandte Physik II der Universität Heidelberg** pflegt das IPP eine enge Zusammenarbeit bei der Messung von Flüssen und Spektren von Fusions-Neutronen. Mit deren Hilfe werden Kenntnisse über die Orts- und Energieverteilung sowie die Tem-

peratur der Ionen im Plasma gewonnen.

Eine enge Kooperation des IPP wurde mit dem **Forschungsschwerpunkt Oberflächenphysik der Universität Bayreuth** aufgebaut. Dabei stehen Probleme der Wechselwirkung von Wasserstoff und Deuterium mit Wandmaterialien einer Fusionsanlage im Vordergrund, vor allem die Aufklärung der Primärschritte der physikalischen Wechselwirkung von langsamen Wasserstoffatomen mit Kohlenstoff, Bor und Beryllium und der chemischen Zerstäubung von Kohlenstoff durch Wasserstoff und Deuterium. Wegen der Bedeutung des Berylliums als Wandmaterial für die Verbesserung der Plasmawerte in JET werden vor allem auch Fragen der Wechselwirkung von Wasserstoff-Molekülen und -Atomen mit Beryllium-Oberflächen bearbeitet.

Seit 1990 besteht auch eine Zusammenarbeit mit der physikalischen Fakultät der **Universität Augsburg**. Über diese vertraglich geregelten Zusammenarbeiten hinaus pflegt das IPP zahlreiche wissenschaftliche Kontakte mit fast allen deutschen Universitäten.

Mit dem fusionsorientierten Teil des **Zentralinstituts für Elektronenphysik** der Akademie der Wissenschaften der ehemaligen DDR hat das IPP 1990 eine Zusammenarbeit über Fragen der Randschichtphysik und -diagnostik begonnen. Auf Empfehlung des Wissenschaftsrats beabsichtigt das IPP, im Zuge der Neugliederung der Forschung in der Bundesrepublik eine Außenstelle in Berlin zu gründen, die diese Arbeiten weiterführt.

Internationale Zusammenarbeit

Das IPP arbeitet nicht nur mit vielen deutschen Hochschulen, sondern auch mit zahlreichen europäischen und außereuropäischen Instituten zusammen. Die europäische Kooperation erfolgt im Rahmen von Assoziationsverträgen mit der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM). Gemeinsam betreiben die Euratom-Partner in Culham/Großbritannien das europäische Fusions-Experiment JET (Joint European Torus). Das IPP ist an JET nicht nur durch die Entsendung von wissenschaftlich-technischem Personal beteiligt, sondern auch durch Entwicklung, Bau und Betrieb verschiedener Plasma-diagnostiken.

Die zur Vorbereitung des Nachfolge-Experiments NET (Next European Torus) gebildete NET-Studiengruppe hat ihren Sitz auf dem Garching Institutsgelände und wird sowohl personell als auch durch die Bereitstellung der nötigen Infrastruktur unterstützt. Neben diesen beiden Großprojekten gibt es eine Reihe von bilateralen Zusammenarbeitsverträgen auf europäischer Ebene, von denen die wichtigsten im folgenden genannt werden:

Gemeinsam mit dem **Centre de Recherches en Phy-**

sique des Plasmas in Lausanne (Schweiz) werden Computerprogramme zur Berechnung von Plasmagleichgewichten entwickelt. Das **FOM-Instituut voor Plasmafysica** in Rijnhuizen (Holland) liefert numerische Beiträge zur Interpretation magnetischer Diagnostiken. Das **University College Cork** in Irland beteiligt sich an der Entwicklung der Feedback-Steuerung und der Plasmadiagnostik für ASDEX Upgrade. Dies ist auch der Gegenstand eines Zusammenarbeitsvertrages mit dem **Kernforschungszentrum Democritos** in Griechenland. Mit dem portugiesischen **Instituto Superior Técnico** in Lissabon ist die Lieferung eines reflektometrischen Diagnostiksystems für ASDEX Upgrade vereinbart. Ebenfalls zur Reflektometrie soll ein Diagnostiksystem dienen, das vom **Centro de Investigación Energetica Medio-Ambiental Tecnológica** in Madrid für WENDELSTEIN VII-AS entwickelt wird. Ein Vertrag mit der **Königlich-Technischen Hochschule Stockholm** in Schweden sieht die gegenseitige Unterstützung bei den Experimenten »Extrap« (Stockholm) und ASDEX Upgrade sowie gemeinsame Arbeiten zur Magneto-Hydrodynamik vor. Das **Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare e le Energie Alternative** in Frascati/Italien hat wesentliche Teile für die Lower-Hybrid-Heizung an ASDEX bei 2,45 Gigahertz gebaut. Mit der **Katholieke Universiteit Leuven** in Belgien sind Untersuchungen zur solaren und stellaren Magneto-Hydrodynamik vereinbart. Die Thematik der MHD-Instabilitäten und die Rückkopplungsstabilisierung in toroidaler Geometrie umfaßt ein Zusammenarbeitsvertrag mit dem **Culham Laboratory** in Abingdon, Großbritannien. Daneben wird gemeinsam ein Computer-Code auf dem Gebiet des Stromtriebs mit Lower-Hybrid-Wellen entwickelt. Zusammen mit dem **FOM-Instituut voor Plasmafysica** in Rijnhuizen (Holland) und der **Katholieke Universiteit Leuven** in Belgien hat das Max-Planck Institut für Plasmaphysik einen »Twinning«-Vertrag mit der Europäischen Gemeinschaft abgeschlossen mit dem Thema »Alfvénwellenheizung und dissipative Instabilitäten astrophysikalischer Plasmen«.

Das **Joffe-Institut** in Leningrad baut Neutralteilchen-Analysatoren für ASDEX Upgrade und WENDELSTEIN. Darüber hinaus bestehen nach Rußland Kontakte über Personalaustausch mit dem **General Institute for Physics** in Moskau und dem **Physikalisch-Technischen Institut** in Charkow auf dem Gebiet der Stellaratoren.

Im Rahmen der Internationalen Energie-Agentur (IEA) in Paris bestehen größere Vereinbarungen zur Zusammenarbeit mit den USA bei der Erforschung von Tokamaks mit poloidalem Divertor in den Experimenten ASDEX Upgrade / IPP und Doublet III-D / San Diego. In diese Zusammenarbeit sind auch die Fusionslaboratorien in Princeton und Austin einbezogen. Ebenso besteht eine Vereinbarung auf dem Gebiet der Stellarator-Entwicklung, der sich auch Japan anschließen will. Hier findet ein intensiver wissenschaftlicher Austausch statt.

Als neuestes Projekt der internationalen Zusammenarbeit wurde 1988 unter der Schirmherrschaft der Internationalen Atomenergie-Agentur (IAEA) in Wien die ITER-Studiengruppe gebildet. Am IPP als Gastlabor haben Europäer, Japaner, Sowjets und Amerikaner gemeinsam bis Ende 1990 das Konzept für einen »Internationalen thermonuklearen Experimentalreaktor« (ITER) erarbeitet.

Zusammenarbeit mit der Industrie

Der Bau eines Fusionsreaktors ist eine Aufgabe, die nur gemeinsam mit der Industrie realisiert werden kann. Deshalb ist es erforderlich, bereits bei den heutigen Experimenten von Anfang an Industriebetriebe einzubinden, um ihnen die Erarbeitung des besonderen, über den derzeitigen Stand der Technik hinausgehenden Know-hows zu ermöglichen. Ein effizienter Weg, die im IPP gewonnenen Kenntnisse in die industrielle Anwendung zu übertragen, ist nach bisherigen Erfahrungen die Vergabe von Studien- und Fertigungsaufträgen für den Bau reaktorrelevanter Komponenten.

Das Auftragsvolumen des IPP bewegt sich in der Größenordnung von 40 Millionen DM pro Jahr für Investitionen. Dies betrifft vor allem die Gebiete der Magnetfeldtechnik, der Steuerungstechnik und Datenverarbeitung, der Hoch- und Höchstfrequenztechnik sowie der Hochtemperatur- und Hochlastwerkstoffe. Der wechselseitige Informationsaustausch, der durch die Auftragsabwicklung eingeleitet wird, geht über den konkreten Vertragsgegenstand weit hinaus und gibt befruchtende Impulse für die weitere Zusammenarbeit.

Soweit im Laufe der Arbeiten lizenzfähige Erfindungen und Patente entstehen, vergibt das IPP Lizenzen über die 1972 zum Zweck des Technologietransfers gegründete Gesellschaft »Garching Instrumente«.

Das IPP findet seine Vertragspartner in Firmen jeder Größe. Aufträge, die eine aufwendige Infrastruktur vor-

aussetzen – wie hochbelastete und große Stahlstrukturen, Elektromaschinen, Hochfrequenzgeneratoren und Sender – gehen meist an größere Firmen. Bei Aufträgen auf dem Gebiet der Elektronik, Datenerfassung und kleineren Spezialgeräten sind dagegen häufig flexible kleine und mittlere Unternehmen im Vorteil.

Nachwuchsförderung

Das IPP veranstaltet seit 1986 jährlich im Oktober einen einwöchigen »Ferienkurs Plasmaphysik«, der einen Überblick über die Grundlagen und den derzeitigen Stand der fusionsorientierten Plasmaphysik vermittelt. Dieser Kurs wendet sich vor allem an Physikstudenten nach dem Vordiplom.

Diplom- und Doktorarbeiten vergibt das IPP im Rahmen der Zusammenarbeit mit den Münchener Hochschulen. Doktoranden (1990: 27) erhalten Forschungsstipendien für maximal drei Jahre. Nach der Promotion können bis zu 30 qualifizierte Wissenschaftler im Rahmen des Nachwuchsförderungsprogramms als Postdocs beschäftigt werden. Ihnen wird die Gelegenheit geboten, für drei Jahre am Forschungsprogramm des IPP mitzuarbeiten. Postdocs können sich auf freie Dauerstellen als wissenschaftliche Mitarbeiter des IPP bewerben und haben aufgrund ihrer speziellen Erfahrungen gute Chancen.

Wissenschaftliche Infrastruktur

Rechenzentrum Garching

Leiter: Dr. Johann Gaßmann

Das »Rechenzentrum Garching« (RZG) wird als gemeinsame Einrichtung des Max-Planck-Instituts für Plasma-physik und der Max-Planck-Institute für Physik, Astrophysik und Extraterrestrische Physik betrieben. Mittels Datenfernübertragung sind weitere Max-Planck-Institute angeschlossen.

Für die Fusionsexperimente des IPP betreut das Rechenzentrum die Datenauswertung von WENDELSTEIN VII-AS und stellt das Auswertesystem für ASDEX Upgrade bereit. Für die Theoriegruppen des IPP wird der lokale CRAY-Rechner betrieben und Zugangsmöglichkeiten zu externen Rechnersystemen geschaffen, da die Rechenleistung und Systemeigenschaften des lokalen Systems den Benutzeranforderungen bei weitem nicht mehr entsprechen.

Das zentrale System des Rechenzentrums besteht aus einem Verbund des Vektorrechners CRAY-XMP24 mit Skalarrechnern vom Typ IBM/370. Durch die Installation eines Systems AMDAHL5890-200 mit zwei Prozessoren und großem Hauptspeicher konnte 1990 dem Experiment WENDELSTEIN VII-AS genügend Auswertekapazität angeboten werden, ebenso wie dem Experiment ASDEX Upgrade, dem exklusiv das System IBM3090-15E zur Verfügung stand.

Ein neu installiertes automatisches Magnetbandarchiv machte die Datenarchivierung wesentlich schneller, einfacher und sicherer. Der Rechner IBM4381-2 mit geringer Leistung wurde ausschließlich für Datenübertragung vom Experiment zum Rechenzentrum eingesetzt. In Erwartung größerer Datenmengen der neuen Experimente wurde das Betriebssystem VM/XA eingeführt, so daß die Beschränkungen in der Größe der Auswerteprogramme wegfielen.

Das lokale Netzwerk, das neben den Zentralrechnern auch die reinen Experimentrechner, die CAD-Systeme für Konstruktionsberechnungen und die Terminalanschlüsse verbindet, wurde auf alle Gebäude des Instituts erweitert, so daß der Anschluß eines neuen Systems oder Terminals problemlos ist. Die einzelnen Segmente des Netzwerks sind dabei entkoppelt, um Störungen und Ausfälle zu minimieren. Ein umfangreiches Netzwerksegment wurde für die Projektgruppe ITER eingerichtet. Außerdem ist für ITER eine Satellitenleitung nach USA in Betrieb, um ausländischen Benutzern transparenten Zugriff auf Rechnersysteme in ihren Heimatinstitutionen in den USA oder Japan zu geben. Neben den ursprünglichen ITER-Benutzern wird diese Leitung auch von ver-

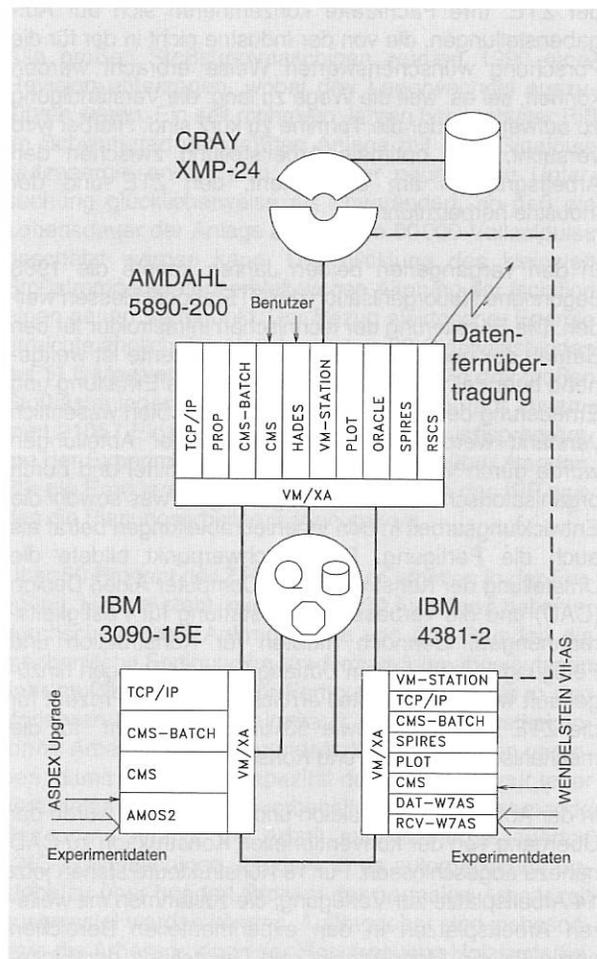


Abbildung 1: Der Rechnerverbund des Rechenzentrums Garching verfügt über einen Vektorrechner CRAY-XMP24 und drei Skalarrechner AMDAHL5890-200, IBM3090-15E und IBM4381-2. Die Skalarrechner werden für Datenerfassung und -auswertung der Plasmaexperimente eingesetzt sowie als Vorrechner für den Vektorrechner. Die Rechenlast wird auf die AMDAHL- und IBM4381-Rechner für WENDELSTEIN VII-AS sowie den IBM3090-Rechner für ASDEX Upgrade aufgeteilt, was eine sofortige detaillierte Auswertung der Meßdaten noch während des Experimentbetriebs ermöglicht.

schiedenen wissenschaftlichen Einrichtungen in Deutschland genutzt, die an das Deutsche Wissenschaftsnetz WIN angeschlossen sind.

Zentrale Technische Einrichtungen

Leiter: Dr. Harald Rapp

Zur Unterstützung der wissenschaftlichen Bereiche bei Entwurf, Aufbau und Betrieb der Experimente und ihrer zahlreichen Diagnostik-Apparaturen sind in den Zentralen Technischen Einrichtungen (ZTE) etwa 190 Mitarbeiter zusammengefaßt. Sie erbringen technische Dienste, die von Ingenieurleistungen bis zur handwerklichen Ausführung reichen. Die Ausbildung von etwa 50 Auszubildenden in fünf Fachrichtungen liegt ebenfalls in Händen der ZTE. Ihre Fachkräfte konzentrieren sich auf Aufgabenstellungen, die von der Industrie nicht in der für die Forschung wünschenswerten Weise erbracht werden können, sei es, weil die Wege zu lang, die Verständigung zu aufwendig oder die Termine zu kurz sind. Hierbei wird versucht, eine optimale Arbeitsteilung zwischen den Arbeitsgruppen am Experiment, den ZTE und der Industrie herbeizuführen.

In den vergangenen beiden Jahren konnte die 1988 begonnene Neuorganisation der ZTE abgeschlossen werden. Die Erweiterung der technischen Infrastruktur für den Betrieb der gegenwärtigen Großexperimente ist weitgehend beendet. Die Anstrengungen für die Erhaltung und Erneuerung der Betriebseinrichtungen mußten wesentlich verstärkt werden. Die Produktivität aller Abteilungen wurde durch Verbesserung der Arbeitsmittel und durch organisatorische Maßnahmen gesteigert, was sowohl die Entwicklungsarbeit in den Ingenieurabteilungen betraf als auch die Fertigung. Einen Schwerpunkt bildete die Umstellung der Konstruktion auf Computer Aided Design (CAD) und die verbesserte Ausstattung für Festigkeitsrechnungen. Dennoch mußten für Konstruktion und Fertigung in erheblichem Umfang Fremdleistungen hinzugekauft werden. Ihr Anteil erreichte 1990 33 Prozent für die ZTE insgesamt sowie 53 und 38 Prozent für die mechanische Fertigung und Konstruktion.

In der Abteilung Konstruktion und Berechnung wurde der Übergang von der konventionellen Konstruktion zu CAD nahezu abgeschlossen. Für 18 Konstrukteure stehen jetzt 14 Arbeitsplätze zur Verfügung, die zusammen mit weiteren Arbeitsplätzen in den experimentellen Bereichen sowie für die Modellierung und Darstellung der Finite-Element-Berechnungen zu einem Netz zusammengeschlossen sind. Einzelne Arbeitsplätze werden gegenwärtig auf interaktive 3D-Fähigkeit erweitert, was für den Entwurf insbesondere der Stellaratorexperimente von großer Bedeutung ist. Für die Archivierung und Verwaltung der Zeichnungen wurde eine Datenbank installiert, zu der sämtliche Nutzer des CAD-Netzes Zugang haben. Die Konstruktionsaufgaben verteilen sich auf Tokamak und Stellarator im Verhältnis zwei zu eins; der Diagnostikanteil beträgt fünfzig Prozent. Der gestiegene Bedarf an Rechnungen zu Festigkeit und Thermomechanik machte einen Ausbau der hierfür notwendigen Hard- und Software unausweichlich. Derzeit stehen vier Arbeitsplätze verschiedener Leistungsfähigkeit und die Finite-Element-Programme PATRAN, ADINA, ANSYS, MARC auf dem eigenen VAX-Cluster bzw. der CRAY des Rechenzentrums zur Verfügung. Anwendungsbeispiel



Abbildung 1: Herstellung eines gewölbten Spiegels für die Elektronen-Zyklotronheizung auf einer rechnergesteuerten Fräsmaschine. Das Bauteil, dessen Oberflächenqualität hohen Anforderungen genügen sollte, wurde in 240-stündigem Dauerbetrieb hergestellt, um die bei Arbeitsunterbrechung auftretenden thermischen Störeffekte auszuschließen.

hierfür sind Rechnungen zu einer Spule des Stellaratorexperimentes WENDELSTEIN VII-AS, deren experimentell gemessene Überbeanspruchung rechnerisch simuliert und nachgewiesen werden konnte. Dies ist insofern bemerkenswert, als frühere Rechnungen keinen kritischen Befund erkennen ließen und sich die korrekte rechnerische Behandlung des Problems als schwierig und lehrreich erwies. Im Rahmen der Entwurfsarbeiten zum Stellaratorexperiment WENDELSTEIN VII-X wurden die Modellierungen und Festigkeitsrechnungen fortgeführt. Dank der leistungsfähigen Programmpalette konnten außerdem Schwingungsanalysen zu einer Pelletzentrifuge, die rechnerische Simulation der thermomechanischen Eigenschaften eines Blanket-Entwurfs für das ITER-Projekt sowie eine Studie über die Wandbelastung bei Neutralteilchenheizung für ASDEX Upgrade ausgeführt werden.

Die Abteilung Elektronikentwicklung in den ZTE besteht aus drei Gruppen, von denen sich der Elektronik-Service immer mehr als eine unentbehrliche Einrichtung erweist, die von allen Bereichen eifrig in Anspruch genommen wird. Neben der Reparatur von Meßgeräten kamen neue Aufgaben bei EDV-Geräten hinzu. Kurze Wege, Sachkenntnis und Geschick haben bei über 500 Reparaturaufträgen pro Jahr viel Geld und Ausfallzeit erspart. Die Gruppe Hochspannungselektronik entwickelte und baute bisher 13 schnelle Leistungsschalter und hochkonstante Regler für die Hochspannungsversorgung der Neutralinjektoren und Gyrotrons der Elektronenresonanzheizung. Im gleichen Umfang stieg der Betreuungsaufwand, um die Verfügbarkeit sicherzustellen. Die Gruppe Elektronik entwickelt im wesentlichen spezielle Steuerungen, die verschiedene kommerzielle Systeme für Steuerung und Datenverarbeitung koppeln. Neben den Spezialentwicklungen nach Kundenwunsch bleibt die Weiterentwicklung rechnersteuerbarer Analogverstärker für Meßzwecke, die sich seit Jahren in hohen Stückzahlen an den Experimenten bewährt haben, unverändert wichtig.

Die Abteilung Materialtechnologie bietet ihre Dienstleistungen unter anderem auf dem Gebiet der Werkstoffe samt Wärmebehandlung, Beschichten und Fügen an. Sie unterstützt mit Entwicklung, Prüfung, Beratung sowie Fertigungsbetreuung insbesondere die Arbeitsgruppen der Neutralinjektion und Ionenzyklotronheizung. Auch hier machen sich die erheblich gestiegenen Anforderungen an die thermomechanische Beanspruchung bemerkbar. Unverändert wichtig ist die galvanische Behandlung der Oberflächen von Vakuum- und Hochfrequenzbauteilen. So mußten 200 Meter Rohre mit einer inneren Oberfläche von 31 Quadratmetern vergoldet werden. Auch die Erzeugung dielektrischer und metallischer Schichten für optische Komponenten mittels Hochvakuumverdampfung ist für die Diagnostikgruppen ein stets gefragtes Angebot. Dank eines neuen breitbandigen Spektralphotometers können die optischen Eigenschaften von Oberflächen aller Art präzise gemessen und den Kundenwünschen optimal angepaßt werden. Bei der Fertigung von Bolometern wurde die Qualität in Zusammenarbeit mit dem Projekt Plasmatechnologie deutlich verbessert. Ein Schwerpunkt ist ferner die Herstellung unmagnetischer Strom- und Meßdurchführungen und das Plasmafein-

Abbildung 2: Konstruktive Studie für die Untersuchung der Prototypspule für WENDELSTEIN VII-X in der TOSKA-Testanlage des Kernforschungszentrums Karlsruhe. Die supraleitende WENDELSTEIN-Spule (rot) soll im Prüffeld der ebenfalls supraleitenden LCT-Spule (grün) getestet werden.



schweißen von Membrankörpern nach Kundenwunsch. Mit der zunehmenden Verwendung von Graphit in den Plasmaanlagen stieg die Nachfrage nach UHV-Abgasmessungen der entsprechenden Bauteile.

Die Abteilung Elektrotechnik ist für die elektrische Energieversorgung des IPP und der Experimente zuständig und hilft bei Projektierung und Aufbau von Steuerungen für Maschinen und Experimentbaugruppen. In der Vergangenheit stand der Aufbau der Stoßstromanlagen, insbesondere für das neue Tokamakexperiment ASDEX Upgrade, im Vordergrund. Dies wurde abgelöst durch die Inbetriebnahme des Experiments und die sich hieraus ergebenden Anpaßarbeiten bei Regelung, Steuerung, Überwachung und Protokollierung.

Alle großen Stoßstrommaschinen wurden 1990 einer Revision unterzogen, wobei drei Lagerwechsel auszuführen waren. Ein seit mehreren Jahren beobachteter Riß im Schwungrad der größten Anlage mit 1,45 Gigajoule Nutzenergie erwies sich bei einer neuerlichen Untersuchung glücklicherweise als unverändert, so daß die Lebensdauer der Anlage auf weitere 60 000 Vollastpulse geschätzt werden kann. Die Wicklung des kleinsten Stoßstromgenerators erhielt wegen Alterung der Isolation einen neuen Sternpunkt. Der Bezug elektrischer Energie erreichte ähnlich den Vorjahren etwa 23 Gigawattstunden bei 11,6 Megawatt Verrechnungsleistung. Die drei großen Stoßstromanlagen lieferten im vergangenen Jahr zusammen 21057 Einzelpulse, denen 8758 Versuchsprogramme der Experimente an 140 Tagen gegenüber standen. Für die Erneuerung der Netzeinspeisung in das IPP wurden die Planungsarbeiten aufgenommen.

Über 50 Prozent der ZTE-Mitarbeiter arbeiten in der Fertigung. Hierbei steht mit jährlich 700 Aufträgen bei einer durchschnittlichen Auftragsgröße von 200 Stunden die mechanische Fertigung im Vordergrund. Im abgelaufenen Jahr mußte deutlich mehr Fertigungsleistung als in den Vorjahren von außen zugekauft werden. Industriekonforme Arbeiten werden grundsätzlich nach außen vergeben, damit die eigene Kapazität den nicht oder nur teuer vermittelbaren Aufgaben vorbehalten bleibt. Zunehmende Bedeutung erlangt die Arbeit mit rechnergesteuerten CNC-Fräsmaschinen, die dank ihres automatischen Betriebs zu über hundert Prozent der normalen Arbeitszeit ausgelastet werden können. Auftraggeber sind insbesondere die Arbeitsgruppen der Hochfrequenz-Heizsysteme, deren Antennen und Spiegel an die Kontur des Plasmas angepaßt werden oder speziellen wellenoptischen Formvorschriften genügen müssen. Ein gewölbter Spiegel für die Elektronenzyklotronheizung mit hohem Anspruch an die Oberflächen wurde in 240-stündigem Dauerbetrieb hergestellt, um störende thermische Effekte auszuschließen. Die Elektronikwerkstatt mußte vermehrt anfallende Aufträge über Kleinserien an externe Hersteller vergeben, um die Prototypentwicklung nicht zu behindern. Die Elektrowerkstatt war unvermindert stark in die Montagearbeiten an ASDEX Upgrade eingebunden. Dies galt auch für die Schreinerei, die darüberhinaus mit einer Vielzahl von Modellen den Konstrukteuren und Monteuren bei der Planung zuhelfe kam. Die Ausbildung in den Fachrichtungen Industriemechaniker, Industrieelektroniker und Tischler wurde im bisherigen Umfang und mit unverändert gutem Erfolg weitergeführt.

Verwaltung und Allgemeine Dienste

Leitung: Dr.-Ing. Karl Tichmann

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

Personalabteilung

Leitung: Dr. jur. Eric Hirsch (bis 31.12.1989)
Dr. jur. Christoph Halfmann (ab 1.1.1990)

- Vom 1.1.1989 bis 31.12.1990 ist die Gesamtzahl der Beschäftigten von 1078 auf 1087 angestiegen. Ursache für diese Steigerung bei gleichzeitigem Stellenabbau ist der Aufwuchs der Beschäftigten außerhalb des Stellenplans. So ist zum Beispiel die Zahl der Postdocs von 25 auf 34 angestiegen.

Der Personalstand zum Jahresende 1989 und 1990 stellt sich wie folgt dar:

	Stand: 31.12.89	Stand: 31.12.90
Wissenschaftler (einschließlich Gastforscher)	277	294
Technisches Personal	466	464
Direktorium und Betriebsrat	19	20
Allgemeine Dienste	116	112
Verwaltung	68	68
	<u>946</u>	<u>958</u>
Auszubildende und Praktikanten	49	49
Doktoranden und Diplomanden	38	32
Zeithilfen	30	32
Zusatzpersonal ITER/NET	13	16
	<u>1076</u>	<u>1087</u>

Das Institut hat aufgrund der Forderung des BMFT und gesetzlicher Sparmaßnahmen von 1982 bis zum 31.12.1990 von 981 Stellen 106 Stellen abgebaut. Hingegen wurden sechs Fiebigere-Stellen befristet genehmigt, davon drei bis 31.12.1996 und 3 bis 31.12.1998. Zum Ausgleich der Arbeitszeitverkürzung wurden vier Stellen bewilligt, so daß derzeit das Planstellen-Soll 885 Stellen beträgt. Außerdem wurden zur Unterstützung der internationalen Verpflichtungen 16 Annex-Stellen genehmigt. Der Stellenabbau erfolgte aus der Fluktuation.

- Zu JET waren zum Jahresende 1990 zehn Mitarbeiter für einen mehrjährigen Aufenthalt nach England beur-

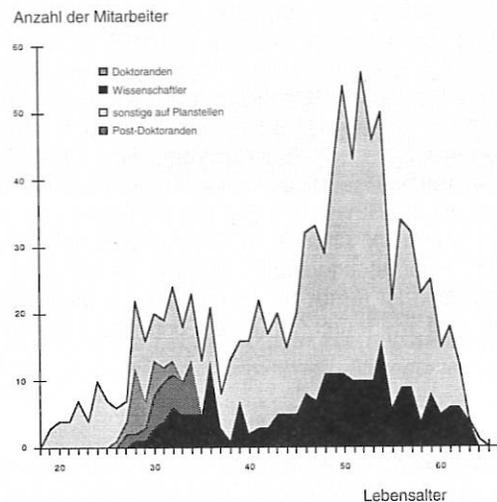


Abbildung 1: Altersstruktur der Mitarbeiter des Instituts (Stand 31. Dezember 1990)

laubt. Sieben Mitarbeiter waren 1990 zeitweise zu JET abgeordnet.

- Zum NET-Team waren zum Jahresende 1990 fünf Wissenschaftler abgeordnet. Fünfzehn weitere Mitarbeiter wurden zur zusätzlichen Unterstützung des Teams beschäftigt, davon elf außerhalb des Stellenplans. Für die Unterstützung des ITER-Teams wurden zum Jahresende 1990 fünf Mitarbeiter außerhalb des Stellenplans beschäftigt. Unabhängig davon beteiligten sich die Wissenschaftler des IPP mit einem erheblichen Teil ihrer Arbeitszeit an NET/ITER-Aufgaben.
- Zum Jahresende 1990 waren im IPP insgesamt 47 Mitarbeiter mit Ausbildungsverträgen beschäftigt (Vorjahr 48), davon 17 Industriemechaniker, 18 Industrie-Elektroniker, sechs Energiegeräte-Elektroniker, zwei Schreiner, eine Technische Zeichnerin und drei Bürokaufleute.
- Das Durchschnittsalter der wissenschaftlichen Mitarbeiter auf Planstellen betrug 1990 47,9 Jahre (Vorjahr 47,8 Jahre). Bezieht man die außerhalb des Stellenplans mit Drei-Jahres-Verträgen angestellten Nachwuchs-Wissenschaftler mit ein, so ergibt sich ein Durchschnittsalter von 45,7 Jahren (1989 46,3 Jahre).
- Durch Tarifverträge wurden die Löhne und Gehälter zum 1.1.1989 um 1,4 Prozent und ab 1.1.1990 um weitere 1,7 Prozent angehoben. Durch Erhöhung der Allgemeinen Zulage ab 1.1.1990 sind die Bezüge um weitere 1,86 Prozent angestiegen.

Rechts- und Patentabteilung

Leitung: Dr. jur. Thomas Köstlin (bis 30. April 1991)
Dr. jur. Alexander Krause (ab 1. Mai 1991)

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. Des Weiteren wurden die gewerblichen Schutzrechte des IPP verwaltet und auf ihre Verwertbarkeit untersucht. In den Jahren 1989 und 1990 wurden insgesamt 183 (1989) bzw. 196 (1990) Schutzrechte und Schutzrechtsanmeldungen betreut, darunter 12 (1989) bzw. 13 (1990) europäische Patente und Patentanmeldungen, die in insgesamt 15 Ländern hinterlegt worden sind. Die Verwertung der Schutzrechte und des Know-how geschah in Zusammenarbeit mit der zur Max-Planck-Gesellschaft gehörenden Firma Garching Instrumente, Gesellschaft zur industriellen Nutzung von Forschungsergebnissen mbH. Zum Jahresende 1990 bestanden 12 Lizenzverträge über Schutzrechte und technisches Know-how des IPP.

Beschaffungsabteilung

Leitung: Dr. jur. Christoph Halfmann (bis 31.12.1989)
Dr. jur. Michael Landwehrjohann (ab 1.1.1990)

Die Beschaffungsabteilung hat im Berichtszeitraum 15.416 Aufträge erteilt, davon 8235 Aufträge im Jahre 1989 und 7181 Aufträge im Jahr 1990. Der einzelne Auftragswert lag bei 152 Aufträgen über 50.000,-DM (1989: 96; 1990: 56) und bei 1.481 Aufträgen zwischen 5.000,- und 50.000,-DM (1989: 840; 1990: 641).

Da während dieser Zeit der Aufbau des Experimentes ASDEX-Upgrade in seiner Endphase lag, betrafen die Bestellungen hauptsächlich Komponenten für diesen Bereich.

Sozialabteilung

Leitung: Berthold Appel (bis 30. Oktober 1990)
Dr. Georg Frischmann (ab 1. September 1990)

Am 26. Juli 1989 konnte das »Internationale Begegnungszentrum Werner Heisenberg« seiner Bestimmung übergeben werden, das mit Unterstützung der Alexander von Humboldt-Stiftung und Mitteln der Stiftung Volkswagenwerk errichtet wurde. Das Begegnungszentrum, dem ein Gästehaus angeschlossen ist, wurde als Kommunikationszentrum für die auf dem Garchinger Forschungsgelände arbeitenden Wissenschaftler errichtet.

Finanzabteilung

Leitung: Dr. jur. Heinz-Georg Sundermann
(bis 30. April 1991)
Dr. jur. Thomas Köstlin (ab 1. Mai 1991)

Im Jahre 1990 stand ein Haushaltsvolumen von 153,5 MDM zur Verfügung. Die Ausgaben setzten sich verglichen mit den Vorjahren wie folgt zusammen:

	Ist 1988 MDM	Ist 1989 MDM	Ist 1990 MDM
Personalausgaben	66,0	67,0	70,6
Sachausgaben	33,9	35,5	34,7
Beteiligung am JET-Projekt	5,6	4,7	4,4
Durchlaufende Mittel für fremde Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	1,3	1,3	1,3
Betriebsausgaben	106,8	108,5	111,0
Laufende Investitionen	12,9	13,3	5,1
Investitionen nach Ausbauprogramm	42,2	33,1	38,1
Investitionsausgaben	55,1	46,4	43,2
Gesamtausgaben	161,9	154,9	154,2

Die Finanzierung wurde wie folgt vorgenommen:

Eigene Erträge	20,9	21,7	22,5
EURATOM-Zuschüsse für IPP	40,0	39,0	35,0
Fremde Forschungs- und Entwicklungsarbeiten	1,3	1,3	1,3
Zuschuß Bund	89,7	83,6	85,9
Zuschuß Bayern	10,0	9,3	9,5
	161,9	154,9	154,2

Bauabteilung

Leitung: Bauingenieur Martin Mahl (bis 28. Februar 1990)
Dipl.-Ing. Gerd Mannhardt (seit 1. März 1990)

Die Bauabteilung hat im Zeitraum 1989/1990 insgesamt 770 Bauaufträge ausgeführt, von denen die folgenden Arbeiten hervorzuheben sind: Am 26. Juli 1989 wurde das »Internationale Begegnungszentrum« in Garching offiziell eingeweiht. Im gleichen Zeitraum wurde das ITER-Gästehaus mit zwanzig Wohneinheiten fertiggestellt und dem Benutzer übergeben.

Die Testhalle wurde um einen viergeschossigen Büro- und Labortrakt erweitert. Im Gebäude T1 wurde die alte Telefonanlage durch eine neue Anlage ersetzt und in Betrieb genommen. Der Verbindungsgang von Gebäude L5 nach L6 sowie der Seminarraum im Gebäude L6A wurden fertiggestellt. Für die NET-Gruppe wurde ein Bürogebäude mit vierzig Arbeitsplätzen fertiggestellt.

Stabsstellen der Geschäftsführung

Organisation

Leitung: Dipl.-oec. Wolfgang Weidinger

Mit der Istaufnahme von Verwaltungsabläufen hat die Abteilung Organisation im Berichtsjahr 1989 eine öffentliche Ausschreibung für ein neues Softwarepaket für die Verwaltung vorbereitet. Die Ausschreibung erfolgte im Herbst, außerdem wurde die Verwaltung mit Personal Computern ausgestattet.

1990 wurde nach öffentlicher Ausschreibung die Entscheidung für das Softwarepaket von SAP getroffen. Das IPP setzt hierfür ein externes Dienstleistungsrechenzentrum ein. Seit Juli 1990 wurde der Einsatz der Module RF (Finanzbuchhaltung) und RK (Kostenrechnung) vorbereitet. Umstellungstermin war der Jahreswechsel 1990/91.

Revision

Leitung: Dr. jur. Georg Frischmann (bis 30.8.1990),
Dr. jur. Manfred Bödicker (seit 1.9.1990)

Neben routinemäßigen Prüfungen stellte die Innenrevision verschiedene Ordnungsmäßigkeits- und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an, die sämtlich ohne schwerwiegende Beanstandungen blieben.

Wissenschaftlich-Technisches Büro

Leitung: Dr. rer.nat. 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« finden.

Sicherheit

Leitung: Dr.-Ing. Manfred Hüls

1990 erhöhte sich die Gesamtunfallzahl von 87 im Jahr 1989 auf 112. Darin enthalten sind 28 meldepflichtige Unfälle (Vorjahr: 16), davon 25 meldepflichtige Arbeitsunfälle. Für das Jahr 1990 ergibt sich daraus eine Gesamtunfallquote von 10,3 Prozent und eine Quote meldepflichtiger Wege- und Betriebsunfälle von zusammen 2,6 Prozent. Der durch die meldepflichtigen Unfälle bedingte

Arbeitszeitverlust erhöhte sich gegenüber dem Vorjahr (382 Ausfalltage) im Jahr 1990 auf insgesamt 391 Fehltage. Damit ergibt sich über alle meldepflichtigen Unfälle gemittelt ein spezifischer Arbeitszeitverlust von 14 Arbeitsausfalltagen je Unfall.

Aufgrund gesetzlicher Vorschriften und behördlicher Auflagen sind verschiedene Experimente, Plasmaanlagen und Beschleuniger im IPP auf die Produktion ionisierender Strahlung und Röntgenbremsstrahlung sowie die Mitarbeiter auf die empfangene Dosis zu überwachen. Im

Berichtszeitraum wurden bei der Ortsdosimetrie wie bei der routinemäßigen Überwachung der Mitarbeiter durch Filmplaketten, TL-Dosimeter oder Ausscheidungsanalysen keine Dosisüberschreitungen festgestellt.

Im Berichtsjahr wurde mit der Konzept-Entwicklung für den Abbau des stillgelegten Tritiumlabors begonnen. Die Erstellung eines entsprechenden Leistungsverzeichnisses wurde einer erfahrenen Industriefirma übertragen. Emittiert wurden aus dem Tritiumlabor im Jahr 1990 mit der Abluft insgesamt $1,18 \times 10^9$ Bequerel pro Kubikmeter Luft, was 39 Prozent des im Mittel Zulässigen entspricht.

Für die Gruppen-Unfallversicherung gegen Strahlenschäden waren im Berichtsjahr 91 Personen zu melden. 645 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind in unserer arbeitsmedizinischen Vorsorgekartei erfaßt und wurden entsprechenden Untersuchungen zugeführt. Zur Umsetzung der Bestimmungen der Gefahrstoffverordnung wurde 1990 mit der vorgeschriebenen Stoffhebung begonnen. Zum Jahresende waren etwa 600 Gefahrstoffe erfaßt. An Sondermüll mußten im Berichtszeitraum mehr als 48 Tonnen entsorgt werden (1987 waren es noch 11 Tonnen, 1988 23 Tonnen und 1989 26 Tonnen).

Angelegenheiten des Arbeitsschutzes, der Strahlensicherheit, des Laserschutzes und der Objektsicherung werden im Arbeitsschutzausschuß des Instituts behandelt, der zur Zeit 53 Mitglieder hat. Darunter sind 18 der für die verschiedenen Bereiche eingesetzten Sicherheitsbeauftragten, 24 Strahlenschutzbeauftragte und 4 Laserschutzbeauftragte.

Abbildung 1: Blick in die Experimentierhalle von ASDEX Upgrade am "Tag der offenen Tür" 1989 im Institut für Plasmaphysik



Öffentlichkeitsarbeit

Leitung: Isabella Milch

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 zu einem großen Teil durch Betreuung von Journalisten von Presse, Rundfunk und Fernsehen, für die aktuelle Presseinformationen herausgegeben sowie Interviews und Hintergrundgespräche organisiert wurden. Herausragendes Interesse fand neben der Institutsarbeit im Frühjahr 1989 das Thema »Kalte Kernfusion«. Ein besonderes Ereignis waren auch die Veranstaltungen zur Einweihung des neuen Tokamak-Experimentes ASDEX Upgrade im IPP am 2. August 1990, über dessen Forschungsziele sich zahlreiche Gäste aus Politik, Industrie und Wissenschaft informierten. Aus diesem Anlaß wurde auch zu einer Pressekonferenz eingeladen.

Über 3500 Personen haben im Berichtszeitraum der Jahre 1989 und 1990 die Gelegenheit genutzt, durch einen Besuch im IPP Einblick in die Fusionsforschung zu gewinnen. Unter den Gästen, die sich über die Institutsarbeit unterrichteten – sowohl Gruppen von Studenten, Schülern, interessierten Laien oder Wissenschaftlern als auch Einzelbesucher aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft – waren Königin Beatrix der Niederlande, Prof. Klaus-Peter Budig, Minister für Wissenschaft und Technik

der ehemaligen DDR, Prof. Weizmann, Minister für Wissenschaft und Entwicklung in Israel, begleitet von dem Bayerischen Ministerpräsidenten, Dr. Max Streibl, Dr. Gebhard Ziller, Staatssekretär im Bundesministerium für Forschung und Technologie, eine Delegation von Land- und Bundestagsabgeordneten der Grünen, Teilnehmer des Arbeitskreises für Technologiefolgenabschätzung (STOA) des Europäischen Parlamentes unter Leitung seines Vorsitzenden, Dr. Rolf Linkohr (MdEP), das Kulturforum der Münchner SPD, Mitglieder der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft, Garching Bürger im Rahmen der Garching »Umweltwoche« sowie Delegationen aus Bulgarien, Großbritannien, Japan, den Niederlanden, Österreich, Polen, der Sowjetunion, Taiwan, den USA, Vietnam und der Volksrepublik China.

Am 23. September 1989 veranstaltete das IPP zusammen mit den Nachbar-Instituten auf dem Garching Forschungsgelände einen »Tag der offenen Tür«. In das IPP kamen etwa 2000 Besucher, die sich in den Experimentier- und Werkhallen durch Filmvorführungen und Informationsstände mit den Arbeiten des Instituts bekannt machten. Eine Posterausstellung informierte über die europäischen Experimente JET und NET sowie über das internationale Projekt ITER, an denen das Institut beteiligt ist. Ein eigener Informations- und Diskussionsstand war den zu erwartenden Umwelt- und Sicherheitseigenschaften eines Fusionsreaktors gewidmet.

Wie in den vergangenen Jahren war das IPP 1989 auf der Hannover Industrie-Messe vertreten. Am Stand der

Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen stellte das IPP das 1988 in Betrieb gegangene Stellarator-Experiment WENDELSTEIN VII-AS vor.

Im März 1989 beteiligte sich das IPP an der Sonderschau »Handwerk und Forschung« auf der Internationalen Handwerksmesse in München. Das IPP demonstrierte mit Bauteilen, die in den eigenen Werkstätten hergestellt waren, das Zusammenwirken von modernster Wissenschaft mit traditionellem handwerklichen Können.

In der Wanderausstellung der Arbeitsgemeinschaft der Großforschungseinrichtungen »Großforschung – Partner der Hochschulen«, die im Berichtszeitraum in der Stadtparkasse Aachen und in den Universitäten von Konstanz, Wuppertal und Hamburg gezeigt wurde, stellte das IPP die Zusammenarbeit mit dem Institut für Plasmaforschung der Universität Stuttgart auf dem Gebiet der Mikrowellenheizung vor.

Zur weiteren Information der Öffentlichkeit wurden mehrere Broschüren und der Zweijahresbericht 1987/88 produziert, die in allgemeinverständlicher Weise Stand und Perspektiven der Fusionsforschung darstellen. Außerdem wurden die wissenschaftlichen Jahresberichte (in englischer Sprache) und zum Informationsaustausch der Institutsmitglieder untereinander die »Monatlichen Mitteilungen« sowie die Hauszeitschrift »Impulse« herausgegeben. Ein interner Presse-Spiegel wurde regelmäßig zur Verfügung gestellt.

Der organisatorische Aufbau des IPP

Der organisatorische Aufbau des IPP

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 des Direktoriums, überprüft die satzungsgemäß zu erstattenden Berichte und wirkt im Kuratorium mit.

Finanzierungsträger des Instituts sind:

- die Bundesrepublik Deutschland, die 1990 rund 61 Prozent der Ausgaben finanzierte,
- der Freistaat Bayern, der sich mit etwa 7 Prozent beteiligte,
- die Europäischen Gemeinschaften (EURATOM) mit 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 sich daraus 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 1990:

Professor Dr. Dr. Heinz Staab, Präsident der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. (Vorsitzender bis 30.6.1990),
Prof. Dr. Hans Zacher, Präsident der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. (Vorsitzender seit 1.7.1990),
Generaldirektor a.D. Dr. Alexander Hocker (Ehrenkurator),
Ministerialdirektor Herbert Kießling, Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst, vom Freistaat Bayern entsandter Vertreter,
Dr.-Ing. E.h. Eberhard von Kuenheim, Vorsitzender des Vorstandes der Bayerischen Motoren-Werke AG, N.N., vom Bundesminister der Finanzen entsandter Vertreter,
Dipl.-Volksw. Wolfgang Oehme, Vorstandsvorsitzender der Esso AG,
Prof. Dr. Wolfgang Wild, Generaldirektor der Deutschen Agentur für Raumfahrtangelegenheiten (DARA) GmbH.

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 1990:

Prof. Dr. Harold P. Furth (Vorsitzender), Plasma Physics Laboratory, Princeton University, Princeton, USA,
Prof. Dr. Hans Schlüter, (Stellvertretender Vorsitzender), Ruhr-Universität Bochum, Institut für Experimentalphysik, Bochum,
Prof. Dr. Bo Lehnert, The Royal Institute of Technology, Division of Plasma Physics and Fusion Research, Stockholm, Schweden,
Dr. Derek C. Robinson, Culham Laboratory, Abingdon, Großbritannien,
Prof. Dr. Klaus Dransfeld, Universität Konstanz,
Prof. Dr. Roy W. Gould, California Institute of Technology, Pasadena, USA,
Dr. Rolf Gremmelmaier, Siemens AG, Zentrale Forschung und Entwicklung, Forschungslaboratorien, Erlangen,
Prof. Dr. Gerhard Ertl, Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin,
Prof. Dr. Dieter Kind, Präsident der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig, Institut für Hochspannungstechnik der Technischen Universität Braunschweig,
Prof. Dr. Raimar Lüst, Präsident der Alexander von Humboldt-Stiftung,
Prof. Dr. Gerd Wolf, Forschungszentrum 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 1990 an:

Prof. Dr. Klaus Pinkau, Vorsitzender und Wissenschaftlicher Direktor,
Prof. Dr. Volker Dose,
Dr. Günter Grieger,
Prof. Dr. Friedrich Hertweck,
Prof. Dr. Jürgen Küppers,
Prof. Dr. Michael Kaufmann,
Prof. Dr. Karl Lackner,
Dr. Friedrich Wagner,
Prof. Dr. Rolf Wilhelm.

Ferner:

Prof. Dr. Ewald Fünfer, emeritiertes Wissenschaftliches Mitglied,
Dr. Gerhart von Gierke, emeritiertes Wissenschaftliches Mitglied,
Prof. Dr. Arnulf Schlüter, emeritiertes Wissenschaftliches Mitglied seit 1.9.1990,
Dipl.-Ing. Karl-Heinz Schmitter, emeritiertes Wissenschaftliches Mitglied,

Prof. Dr. Allen H. Boozer, auswärtiges Wissenschaftliches Mitglied
Prof. Dr. James McCune, auswärtiges Wissenschaftliches Mitglied,
Prof. Dr. Rudolf Wienecke, auswärtiges Wissenschaftliches Mitglied,
Prof. Dr. Folker Engelmann, auswärtiges Wissenschaftliches Mitglied.

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 1990 folgende Mitglieder an:

für den wissenschaftlich-technischen Geschäftsbereich:

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

für den kaufmännisch-administrativen Geschäftsbereich:

Dr. jur. Ernst-Joachim Meusel.

Der nach dem Assoziationsvertrag mit EURATOM gebildete **Lenkungsausschuß**, dem Vertreter der Europäischen 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 1000.000,- ECU.

Der Lenkungsausschuß setzte sich 1990 wie folgt zusammen:

seitens der Kommission der Europäischen Gemeinschaften in Brüssel:

Dr. Charles Maisonnier (Vorsitzender),
Prof. Dr. Hardo Bruhns,
Karl Melchinger;

seitens des Instituts:

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

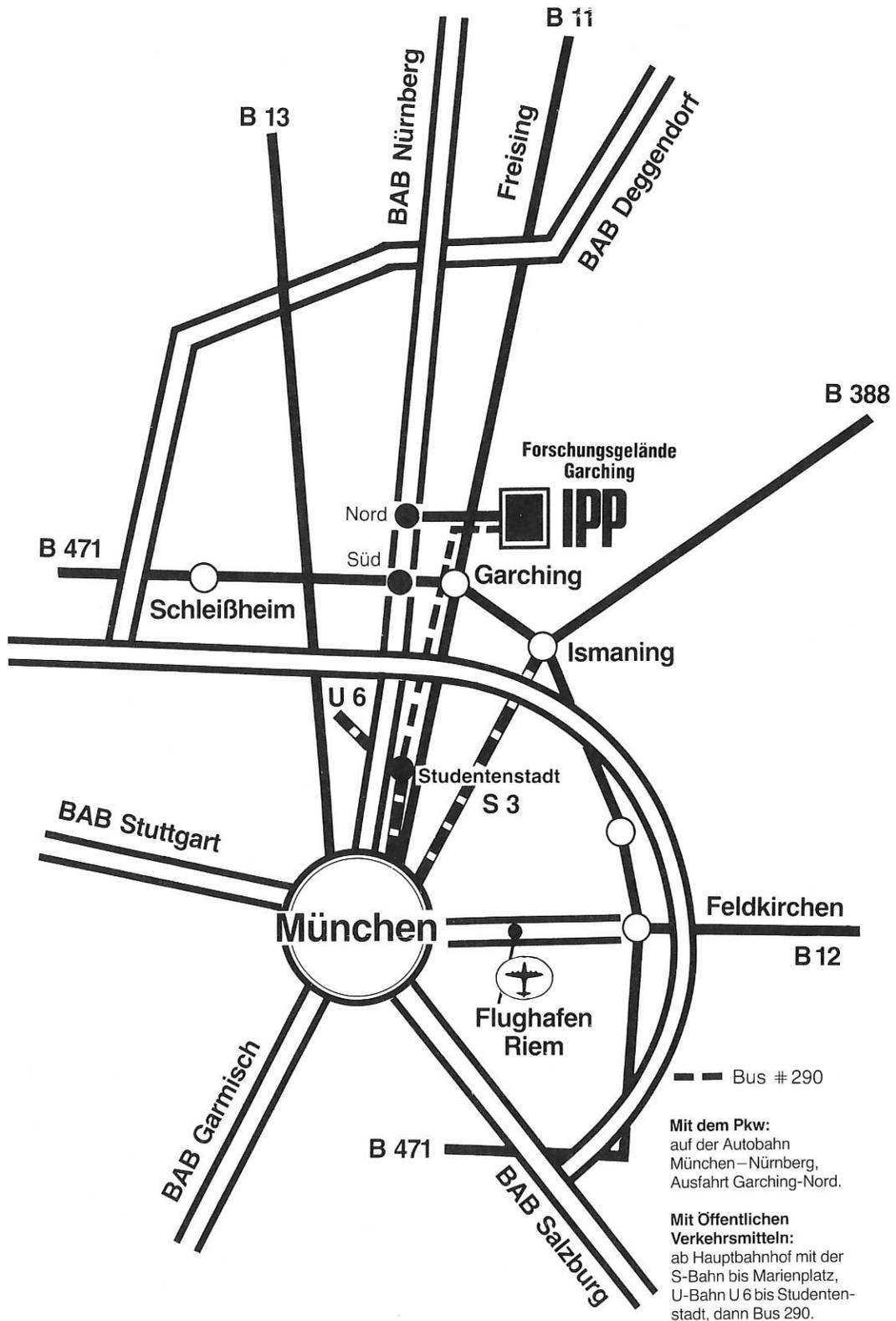
Der aus gewählten Vertretern der wissenschaftlichen Mitarbeiter bestehende **Wissenschaftlerrat** berät die wissenschaftliche Leitung in allen Angelegenheiten ihres Entscheidungsbereiches, insbesondere in Fragen des wissenschaftlichen Programms, bei Struktur- und Personalfragen. Der Wissenschaftlerrat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

Dr. Hans-Stephan Bosch (Vorsitzender),
Dr. Rainer Behrisch (Stellvertretender Vorsitzender),
Dr. Monika Bessenrodt-Weberpals,
Dr. Werner Dyckhoff,
Dr. Wolfgang Eckstein,
Bernd Heinemann,
Dr. Josef Junker,
Dr. Arne Kallenbach,
Dr. Otto Kardaun,
Josef Maier,
Dr. Rita Meyer-Spasche,
Dr. Jean-Marie Noterdaeme (Stellvertretender Vorsitzender),
Dr. Fritz Rau,
Dr. Ursula Schneider,
Peter Schütz,
Dr. Jochem Simon-Weidner,
Dr. Arthur Weller.

Dem **Betriebsrat** gehören seit dem 3.4.1990 folgende Mitglieder an:

Heinz Fendl (Vorsitzender; freigestellt),
Fritz Lehnert (Stellvertretender Vorsitzender; freigestellt),
Anton Albrecht (freigestellt),
John Cox,
Dieter Eichner,
Roswitha Hiebl,
Richard Hirt,
Richard Hüttinger,
Manfred Hunger,
Michael Karpfinger,
Dr. Walter Poschenrieder,
Robert Semler,
Uwe Weber,
Reinhilde Weinfurtnner,
Barbara Wörle.

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



JAHRESBERICHT 1989/90

Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) · 8046 Garching bei München
Telefon (0 89) 32 99 - 01 · Telefax (0 89) 32 99 - 22 00

Redaktion und Gestaltung:
Isabella Milch

Umschlag: SV-Kommunalschriften-Druckerei, München

Druck: Wartelsteiner GmbH, Garching bei München

1991 Copyright by IPP Garching

Printed in Germany

ISSN 0172-8482